université de bretagne occidentale

THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE
sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE
Mention : Géographie
École Doctorale des Sciences de la Mer

présentée par

Camille ANDRÉ

préparée à l'Institut Universitaire Européen de la Mer, laboratoire LETG-Brest Géomer et au BRGM

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 soutenue le 18 décembre 2013
devant le jury composé de :

Patrick PIGEON
Professeur de géographie, Université de Savoie / *Rapporteur*

Freddy VINET
Professeur de géographie, Université de Montpellier 3 / *Rapporteur*

Denis BAILLY
Maitre de conférences en économie, Université de Bretagne Occidentale / *Examinateur*

Roland NUSSBAUM
Directeur de la Mission Risques Naturels / *Examinateur*

Anne ROZAN
Professeur d'économie, ENGEES, Université de Strasbourg / *Examinatrice*

Jean-Philippe TORTEROTOT
Adjoint au Directeur de la Recherche et de l'Innovation, MEDDE/CGDD / *Examinateur*

Catherine MEUR-FÉREC
Professeur de géographie, Université de Bretagne Occidentale / *Directrice de thèse*

Charlotte VINCHON
Chercheur et chef de projets au BRGM / *Directrice de thèse*

Résumé

Cette thèse de doctorat porte sur l'analyse des dommages et sur l'évaluation des coûts induits sur les habitations par les submersions marines. L'étude se base sur les données d'assurance de deux évènements récents ayant touché la France et causé des submersions sur les côtes bretonnes et atlantiques : les tempêtes Johanna (mars 2008) et Xynthia (février 2010).

Dans un premier temps, l'analyse des données d'expertise et d'indemnisation d'assurance, en lien avec celle des paramètres de l'aléa et des enjeux exposés, a eu pour but la meilleure compréhension des différents types de dommages, et l'explication des coûts observés. En parallèle, un travail de modélisation de l'aléa a été réalisé à une échelle régionale, afin de déterminer des indicateurs des forçages météo-marins, et à une échelle locale, afin de préciser les processus d'endommagement sur les sites étudiés pour les deux tempêtes. La caractérisation de la vulnérabilité et de la valeur des enjeux (coûts de construction) a été menée à l'aide de différents paramètres issus de bases de données nationales (INSEE et IGN) et de campagnes de terrain.

Dans un second temps, les informations recueillies ont permis la construction de modèles empiriques de prédiction du coût des dommages aux habitations spécifiques à l'aléa submersion marine, outils aujourd'hui inexistants en France. Les différents types de modèles testés sont basés sur des approches statistiques univariées (fonctions d'endommagement) et multivariées. L'apport des données d'assurance à la réalisation de tels modèles est discuté, et des recommandations ainsi que des perspectives de recherche sont évoquées, afin de rendre ces modèles opérationnels et d'augmenter leur capacité de prédiction des coûts d'évènements catastrophiques futurs.

Mots-clés : risques côtiers, submersion marine, tempêtes, dommages, données d'assurance, évaluation économique, fonctions d'endommagement, modélisation multivariée, Johanna, Xynthia.

*** Pour les non-francophones, les premiers résultats de cette thèse ont été publiés dans un article qui est présenté en annexe : 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.**

Abstract

Analysis of coastal flooding damage and assessment of induced costs on residential buildings, based on insurance data - insights gained from Johanna (2008) and Xynthia (2010) storm events

This PhD work aims at analysing damage and evaluating costs related to coastal flooding on residential buildings. The study is based on insurance data from two recent storm events, which caused coastal flooding in the Brittany and Atlantic regions in France: the storms Johanna (March 2008) and Xynthia (February 2010).

At first, the analysis of insurance indemnities and loss adjustment data, in connection with hazard parameters, and exposed assets characteristics, allowed a better understanding of the different types of damage and costs observed. At the same time, hazard models were carried out at a regional level, in order to identify meteorological forcing indicators, and at a local level, in order to link damages to the associated physical flooding processes on the studied sites. The characterization of the asset's vulnerability and values (construction costs) was conducted using different parameters from national databases (INSEE and IGN) and field survey.

In a second step, empirical cost-assessment models were built on the basis of the data analysed, using univariate (damage functions) and multivariate statistical approaches. This study is the first attempt in France to elaborate models for the prediction of damage costs linked to coastal flooding on housing. The contribution of insurance data to the implementation of such models is discussed, and recommendations and research perspectives are expressed, in order to make the models operational and to increase their capacity to predict future catastrophic events costs.

Keywords: coastal risks, coastal flooding, winter storms, damages, insurance data, cost assessment, damage functions, multivariate modelling, Johanna, Xynthia.

*** For English-speakers, the first results of this research were published in a paper, which is annexed to this thesis: André, C., Monfort, D., Bouzit, M. and 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.**

Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent tout d'abord à mes deux directrices de thèse, Catherine Meur-Férec et Charlotte Vinchon, pour la confiance qu'elles m'ont accordée tout au long de ces trois ans, ainsi que pour leur investissement, leurs précieux conseils et encouragements, notamment durant la phase de rédaction de cette thèse, ce pour quoi je les remercie profondément. Cette thèse ne serait pas non plus ce qu'elle est sans la participation essentielle de Daniel Monfort, à qui j'adresse ma profonde gratitude pour ses nombreux apports à ce travail de recherche.

C'est un honneur pour moi que de compter messieurs Patrick Pigeon et Freddy Vinet comme rapporteurs, ainsi que Denis Bailly, Roland Nussbaum, Anne Rozan et Jean-Philippe Torterotot dans mon jury de thèse. Je les remercie sincèrement d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

J'exprime ma vive reconnaissance à la Fondation MAIF, pour le financement de cette thèse, ainsi qu'au comité de pilotage du projet JOHANNA et de la thèse, pour les échanges réalisés à plusieurs étapes de ces travaux. Cette étude n'aurait pas été possible sans la collaboration des assureurs AXA, MAAF et MAIF, j'adresse donc ma profonde gratitude à Éric Petitpas, Bénédicte Chalon et bien sûr Dominique Laidet, pour leur participation qui a permis à ce projet de disposer des précieuses données pour lesquelles il a été construit. Je remercie également les cabinets d'expertise ELEX et Polyexpert de La Rochelle pour leur accueil et pour les entretiens au cours desquels ils ont répondu à nos nombreuses questions.

Mes remerciements se tournent ensuite vers les membres du groupe de travail « ACB inondations » du Ministère de l'Environnement, grâce à qui j'ai beaucoup appris au cours des multiples réunions de travail, sur les dimensions appliquées de l'évaluation économique des dommages. Je tiens à remercier en particulier Cédric Peinturier et Natacha Crespin pour m'avoir convié à participer à ce groupe, et le CEPRI pour le travail mené en collaboration sur les fonctions d'endommagement.

Je voudrais ensuite remercier toutes les personnes du BRGM et du laboratoire Géomer qui ont participé de près ou de loin à cette thèse et/ou à qui je dois un inoubliable séjour aussi bien à Orléans qu'à Brest : l'équipe « Risques Côtiers » du BRGM, Madjid Bouzit, Bénédicte Rulleau et Louinord Voltaire pour leurs conseils en économie et en statistiques, Steven et Houcine pour leurs travaux de stage, Jocelyne et Isabelle pour leur aide administrative, Sylvestre, Olivier, Marie, Julien, François, Alexandre, Thomas, Sophie et Anthony pour les sorties rue de Bourgogne et sur les bords de Loire, l'équipe de basket du COS, tous les doctorants et les autres collègues de Géomer pour les fameux repas au RU, les commentaires des articles du Télégramme, et pour m'avoir supporté durant la rédaction de cette thèse…

À ce stade, j'ai également une pensée pour les amis ayant partagé les années de ma vie d'étudiant à Cherbourg, Brest et Grenoble, ainsi que pour mes amis d'enfance de Normandie qui sont toujours là, malgré l'éloignement et les années.

Enfin, je remercie ma famille et mes parents, à qui je dois d'avoir pu faire ces études, et qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans tous mes choix. Mes remerciements ultimes vont à Ana, pour sa présence, malgré la distance, sa confiance, sa foi en moi, son soutien, et surtout sa patience… Je ne te remercierai jamais assez.

Table des matières

Introduction générale 1

Partie I. État de l'art 7

Introduction 7

1. L'étude des risques naturels 8
1.1. Définition préalable des concepts 8
1.2. La vulnérabilité 9
1.3. Les dommages 16

2. L'évaluation des dommages 18
2.1. L'évaluation physique des dommages 20
2.1.1. Les échelles de dommages 20
2.1.2. Les courbes de fragilité 23
2.2. L'évaluation économique des dommages 25
2.2.1. L'évaluation des dommages chez les assureurs 27
2.2.2. L'évaluation de l'impact des politiques publiques de gestion des risques 28
2.2.3. L'outil de l'évaluation économique - les fonctions d'endommagement 30
2.2.4. Les paramètres de l'aléa utilisés par les fonctions d'endommagement 34
2.2.5. Les modèles multivariés d'évaluation économique des dommages 37

3. L'assurance des risques naturels en France 40
3.1. L'assurabilité des risques naturels 40
3.2. Le régime CatNat 42
3.3. La réassurance 43
3.4. Le Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs 44
3.5. Le déclenchement du système lors d'une catastrophe naturelle 46

4. Spécificités des risques côtiers 47
4.1. Définition des aléas côtiers 48
4.2. Les forçages météo-marins de la submersion marine 50
4.3. Les différents modes de submersion 52
4.4. L'évaluation de l'aléa submersion 53

5. Présentation des évènements Johanna et Xynthia et des sites d'étude 55
5.1. Description des forçages des deux tempêtes et de leurs impacts à l'échelle régionale 55
5.1.1. La tempête Johanna 55
5.1.2. La tempête Xynthia 56
5.2. Présentation des sites d'étude à l'échelle locale 58
5.2.1. La commune de Gâvres 58
5.2.2. Le site des Bouchôleurs 65

Conclusion de la première partie 70

Partie II. Les données de l'évaluation des dommages 73

Introduction 73

1. Inventaire des données de retours d'expérience 74
1.1. Arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle 74
1.2. Dossiers communaux de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle 79
1.3. Rapports et comptes-rendus institutionnels 81
1.4. Bilans et modélisations du secteur de la réassurance 84
1.5. Informations issues d'articles de la presse généraliste 85
1.6. Données de terrain 86
1.6.1. Présentation des données de terrain collectées après les tempêtes Johanna et Xynthia 87
1.6.2. Reconstitution des hauteurs d'eau par interpolation des levés de terrain 88
1.7. Données d'enquêtes 89

2. Les données brutes issues de l'assurance 91
2.1. Présentation des données 91
2.2. Fonctionnement de l'expertise des dommages 92
2.3. Méthodologie de collecte des données 94
2.4. Présentation des données recueillies 100
2.5. Géolocalisation des données 101
2.6. Utilisation des données d'assurance pour l'analyse des dommages 103

3. Les données produites par modélisation de l'aléa 105
3.1. Indicateurs de forçages à l'échelle régionale 106
3.1.1. Sources des données utilisées 106
3.1.1. Production des indicateurs 107
3.2. Modélisation hydraulique de la submersion à l'échelle locale 110
3.2.1. Présentation du procédé de modélisation 110
3.2.2. Préparation des Modèles Numériques d'Élévation 111
3.2.3. Résultats des modélisations 115
3.2.4. Affectation des paramètres de l'aléa aux dossiers de sinistres 122

Conclusion de la deuxième partie 124

Partie III. Analyse des données d'assurance à l'échelle régionale : une synthèse des dommages des évènements 125

Introduction 125

1. Description et analyse des indemnisations des deux tempêtes 126
1.1. Indemnisations par type d'enjeux 126
1.2. Répartition géographique des sinistres et des coûts associés 128
1.3. Distribution statistique des indemnisations 130
1.4. Indemnisations en fonction de la source des données 133
1.5. Représentativité du jeu de données 133

2. Analyse des dommages de la tempête Johanna 135
2.1. Dommages et caractéristiques de l'aléa 135
2.2. Dommages et caractéristiques des enjeux 140

3. Analyse des dommages de la tempête Xynthia 141
3.1. Dommages et caractéristiques de l'aléa 141
3.2. Dommages et caractéristiques des enjeux 144
3.3. Synthèse des dommages de Xynthia a une résolution communale 152

4. Les facteurs de dommages non liés à la vulnérabilité intrinsèque des habitations 155

Conclusion de la troisième partie 157

Partie IV. Analyse des données d'assurance à l'échelle locale : une recherche des paramètres explicatifs du coût des dommages 159

Introduction 159

1. Description et analyse des coûts détaillés des dommages.....160
1.1. Analyse des coûts par types de sinistres..... 160
1.2. Distribution des coûts immobiliers et mobiliers 162
1.3. Analyse des coûts immobiliers par postes de dommages 162

2. Coûts des dommages en fonction des paramètres de l'aléa 164
2.1. Paramètres de l'aléa issus des données d'expertise d'assurance..... 165
2.1.1. La hauteur d'eau 165
2.1.2. Les types de processus de l'aléa..... 167
2.2. Paramètres de l'aléa issus des données de retours d'expérience 168
2.2.1. La durée de submersion..... 168
2.2.2. La hauteur d'eau 170
2.3. Paramètres de l'aléa issus des modélisations hydrauliques 172
2.3.1. La hauteur d'eau 172
2.3.2. La vitesse du courant et de montée de l'eau 176

3. Coûts des dommages en fonction des paramètres des enjeux.....181
3.1. Paramètres des enjeux issus des données d'expertise d'assurance..... 181
3.1.1. Les matériaux de construction..... 181
3.1.2. Le capital mobilier assuré..... 182
3.1.3. La surface habitable et le nombre de pièces du bâtiment..... 184
3.1.4. La présence d'étage et de sous-sol 185
3.2. Paramètres des enjeux issus de bases de données institutionnelles..... 187
3.2.1. Les statistiques communales des recensements de l'INSEE..... 187
3.2.2. L'emprise au sol des habitations..... 187
3.3. Caractéristiques « constructives » et chiffrage de la valeur du bâti 191
3.3.1. Typologie de la morphologie urbaine et de l'âge du bâti à partir de photos aériennes anciennes 191
3.3.2. Typologie du bâti à partir d'inspections de terrain 193
3.3.3. Chiffrage du coût de construction des habitations 198
3.4. Indicateurs du standing des habitations 202
3.4.1. Le type d'occupation des habitations (résidences principales ou secondaires)..... 202
3.4.2. Le revenu moyen communal des habitants 203

4. Analyse par niveaux d'endommagement.....205
4.1. Réalisation d'une échelle de dommages spécifique à la submersion marine..... 205
4.2. Liens entre les niveaux de dommages, la hauteur d'eau et le coût des sinistres 206

Conclusion de la quatrième partie.....209

Partie V. Modélisation des dommages : apports des données d'assurance à la prédiction du coût des dommages liés à la submersion marine 213

Introduction 213

1. Intérêt de la mise en place de modèles prédictifs des dommages spécifiques à la submersion marine 215

1.1. Des coûts des dommages de Xynthia plus forts que ceux obtenus par les modèles d'endommagement fluviaux existants 215

1.2. Explication des écarts de coûts constatés 219

1.2.1. Spécificités liées à l'aléa submersion marine 219

1.2.2. Spécificités liées aux enjeux littoraux 221

1.2.3. Spécificités liées au contexte médiatique de Xynthia 222

2. Modèles univariés : vers des fonctions d'endommagement spécifiques à la submersion marine 224

2.1. Méthode de régression simple 225

2.1.1. Formulation du modèle 225

2.1.2. Transformations de variables 227

2.2. Modèle d'estimation des coûts par classes de hauteur d'eau 232

3. Modèles multivariés : prise en compte de la plurifactorialité des coûts des dommages liés à la submersion marine 234

3.1. Méthode de régression multiple 235

3.1.1. Formulation du modèle 235

3.1.2. Méthodologie de modélisation 237

3.1.3. Présentation des variables explicatives candidates 238

3.1.4. Hétéroscédasticité et transformations de la variable dépendante 244

3.2. Les arbres de régression 247

3.2.1. Présentation de la méthode CART 248

3.2.2. Étapes de construction d'un arbre de régression 249

3.2.3. Construction d'un arbre de régression à partir des données de Xynthia 250

3.2.4. Limites du modèle d'arbre de régression mis en place 253

4. Bilan et discussion des résultats obtenus 255

4.1. Comparaison des différents modèles explorés 255

4.2. Comparaison des résultats obtenus avec ceux de modèles multivariés de la littérature 257

4.3. Incertitudes liées à la modélisation des dommages 259

4.4. Limites liées à l'utilisation des modèles d'endommagement 260

Conclusion de la cinquième partie 264

Conclusion générale 267

1. Synthèse des résultats des différentes étapes de la démarche suivie 267

2. Intérêts et limites des données d'assurance pour l'évaluation des dommages 268

3. Recommandations pour l'utilisation et la disponibilité des données d'assurance 269

4. Perspectives de recherche sur l'évaluation économique des dommages 274

Bibliographie 277

Liste des figures 293

Liste des tableaux 299

Annexe 301

Sigles et abréviations

AAL : Average Annual Loss

ACB : Analyse Coûts-Bénéfices

AFP : Agence France-Presse

APFM : Associated Programme on Flood Management

AQC : Agence Qualité Construction

AUP : Architecture Urbanisme Patrimoine

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CAH : Classification Ascendante Hiérarchique

CART : Classification And Regression Trees

CatNat : Catastrophe Naturelle

CAUE : Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement

CCR : Caisse Centrale de Réassurance

CEPRI : Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation

CETE : Centre d'Études Techniques de l'Équipement

CETMEF : Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales

CFSR : Climate Forecast System Reanalysis

CGDD : Commissariat Général au Développement Durable (MEDDE)

CMA : Coût Moyen Annuel

COCORISCO : COnnaissance, COmpréhension et gestion des RISques CÔtiers

CONHAZ : Costs Of Natural HAZards

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

D4E : Direction des Études Économiques et de l'Évaluation Environnementale (MEDD puis MEDAD)

DARVA : Développement d'Applications sur Réseaux à Valeur Ajoutée

DDTM : Direction Départementales des Territoires et de la Mer

DEMA : Dommage Évité Moyen Annuel

DGFiP : Direction Générale des Finances Publiques (MEF)

DGPR : Direction Générale de la Prévention des Risques (MEDDE)

DHI : Danish Hydraulic Institute

DMA : Dommage Moyen Annuel

DOM : Département d'Outre-Mer

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EDI : Échange de Données Informatisées

EMS-98 : Échelle Macrosismique Européenne

ENSURE : Enhancing resilience of communities and territories facing natural and na-tech hazards

EPRI : Évaluation Préliminaire des Risques d'Inondation

EPTB : Enquête sur le Prix des Terrains à Bâtir

FEMA : Federal Emergency Management Agency

FFB : Fédération Française du Bâtiment

FFSA : Fédération Française des Sociétés d'Assurances

FHRC : Flood Hazard Research Centre

FILOCOM : FIchier des LOgements par COMmunes

FLEMO : Flood Loss Estimation MOdel

FPRNM : Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs

FSUE : Fonds de Solidarité de l'Union Européenne

Gaspar : Gestion ASsistée des Procédures Administratives relatives aux Risques naturels

GEMA : Groupement des Entreprises Mutuelles d'Assurance

GPS : Global Positioning System

HT : Hors Taxes

Ifremer : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

IGN : Institut Géographique National

INSEE : L'Institut National de la Statistique et des Études Économiques

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

IRIS : Îlots Regroupés pour l'Information Statistique (INSEE)

LETG : Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique

LIDAR : LIght Detection And Ranging

LPO : Ligue pour la Protection des Oiseaux

MAAF : Mutuelle d'Assurance des Artisans de France

MAAP : Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche

MAIF : Mutuelle d'Assurance des Instituteurs de France

MARS : hydrodynamical Model for Applications at Regional Scale

MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (1997-2002)

MBCPFPRE : Ministère du Budget, des Comptes Publics, de la Fonction Publique et de la Réforme de l'État (2007-2012)

MEDAD : Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables (2007-2008)

MEDD : Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (2002-2007)

MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (depuis 2012)

MEDDTL : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (2010-2012)

MEEDDAT : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (2008-2009)

MEEDDM : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (2009-2010)

MEF : Ministère de l'Économie et des Finances (depuis 2012)

MEFI : Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie (1997-2012)

METL : Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (1997-2002)

MIOMCT : Ministère de l'Intérieur, de l'Outre-Mer et des Collectivités Territoriales (2007-2012)

MISEEVA : Marine Inundation hazard exposure and Social, Economic and Environmental Vulnerability Assessment

MNE : Modèle Numérique d'Élévation

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MOVE : Methods for the improvement of vulnerability assessment in Europe

MRH : Multi-Risque Habitation

MRN : Mission Risques Naturels

NGF : Nivellement Général de la France (IGN)

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

ONRN : Observatoire National des Risques Naturels

PAPI : Programme d'Action de Prévention des Inondations

PML : Probable Maximum Loss

PPR : Plan de Prévention des Risques

PPRL : Plan de Prévention des Risques Littoraux

PSR : Plan Submersions Rapides

RDC : Rez-De-Chaussée

REX : Retour d'EXpérience

RMS : Risk Management Solutions

SDRS : Scénario Départemental de Risque Sismique

SEEIDD : Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (MEDDE/CGDD)

SHAB : Surface HABitable

SHOB : Surface Hors Œuvre Brute

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

SHON : Surface Hors Œuvre Nette

SIDPC : Service Interministériel de Défense et de Protection Civile

SIG : Système d'Information Géographique

SILYC : Syndicat Intercommunal du Littoral d'Yves et de Châtelaillon-Plage

SOeS : Service de l'Observation et des Statistiques (MEDDE/CGDD)

SPRL : Schéma de Prévention des Risques Littoraux

SWAN : Simulating WAves Nearshore

TGN : Tempête-Grêle-Neige

TTC : Toutes Taxes Comprises

TVA : Taxe sur la Valeur Ajoutée

USACE : United States Army Corps of Engineers

VAN : Valeur Actualisée Nette

VIF : Variance Inflation Factors

Introduction générale

Ce travail de thèse porte sur l'analyse des dommages et sur l'évaluation des coûts induits par les submersions marines. L'étude se base sur les données d'assurance de deux évènements récents ayant touché la France et causé des submersions sur les côtes bretonnes et atlantiques : les tempêtes Johanna, du 10 mars 2008 et Xynthia, du 27 février 2010.

La tempête Xynthia, particulièrement dramatique, est responsable de 64 victimes en Europe, dont 41 par le phénomène de submersion marine en Vendée et en Charente-Maritime. L'évènement a surpris tout le pays et rappelé à quel point le risque de submersion était présent en France, tout en soulignant le retard pris par les pouvoirs publics dans la gestion de ce risque, relativement peu fréquent sur le territoire métropolitain.

Les submersions marines sont dues à l'élévation du niveau de la mer à la côte lors de tempêtes hivernales en Europe, ou de cyclones tropicaux, qui frappent l'Amérique du Nord, l'est de l'Asie et l'Océan Indien. Des évènements de submersion marine ont marqué l'histoire dans le monde entier, notamment dans l'Océan Indien, où les cyclones de Bhola, qui frappe le Bangladesh en 1970 et Nargis, qui s'abat sur la Birmanie en 2008, comptent parmi les catastrophes naturelles les plus meurtrières de l'histoire (respectivement de l'ordre de 300 000 et 140 000 victimes). Aux États-Unis, la saison des ouragans cause chaque année d'importants dommages, les évènements de la dernière décennie étant les plus coûteux jamais enregistrés : en 2005, l'ouragan Katrina dévaste Golfe du Mexique, et en particulier la ville de la Nouvelle-Orléans en Louisiane. Le bilan est de plus de 1 300 morts, et d'environ 125 milliards de dollars de dommages, dont 60 milliards couverts par les assureurs

et les réassureurs[1]. Plus récemment, l'ouragan Sandy, le 28 octobre 2012, s'abat sur la côte Est des États-Unis (après avoir touché les Caraïbes), et en particulier sur la ville de New York. 150 décès sont à déplorer, malgré l'évacuation de 375 000 personnes. La catastrophe coûte au final près de 70 milliards de dollars, dont 35 milliards de dommages assurés[2].

En Europe, où les tempêtes n'atteignent généralement pas la force des cyclones tropicaux, la submersion marine la plus catastrophique est celle de 1953, qui cause plus de 1 800 morts aux Pays-Bas et un coût actualisé en 2003 de l'ordre de 6 milliards d'euros (RMS, 2003). En France, la tempête Martin, qui frappe la Charente-Maritime la nuit du 28 décembre 1999 (survenant quelques jours après la tempête Lothar, ce qui fait que ces deux évènements sont baptisés les « tempêtes de 1999 »), fait 30 victimes (liées principalement au vent) et cause des submersions marines en Charente-Maritime et dans l'estuaire de la Gironde. Les dommages de ces deux tempêtes, les plus coûteuses à ce jour en France, sont évalués à 12 milliards d'euros en 2011 (Gérin et Nussbaum, 2012).

Les tempêtes et ouragans côtiers comptent donc parmi les catastrophes les plus coûteuses aux États-Unis et en Europe (avec les inondations fluviales). L'augmentation récente des dommages et des coûts induits, ainsi que la médiatisation des évènements catastrophiques, ont développé une prise de conscience accrue de ce risque naturel, ainsi que des potentiels futurs dommages, dans le contexte actuel de montée du niveau marin (Hallegatte et al., 2013).

Lors de tempêtes côtières, les dommages sont à la fois dus au vent et aux submersions marines, ce qui explique pourquoi ces évènements atteignent des coûts si élevés, et pourquoi leurs dommages sont plus difficiles à prédire que ceux d'une tempête classique ou d'une inondation fluviale. Les évènements de tempêtes côtières ayant entrainé des submersions étant en moyenne plus coûteux que les tempêtes pour lesquelles les dommages ne sont dus qu'au vent, une distinction de ces deux causes de dommages est donc nécessaire pour l'analyse du coût de ces évènements. En France, cette distinction est possible grâce au système d'indemnisation des catastrophes naturelles, dit « CatNat », qui définit une prise en charge différente des dommages liés aux submersions marines et au vent.

Bien que les besoins en termes d'évaluations du coût des dommages des évènements naturels soient importants, à la fois pour les scientifiques, afin d'avoir un référentiel pour

[1] Munich Re, NatCatSERVICE : http://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/georisks/natcatservice/default.aspx
[2] Swiss Re, sigma : http://www.swissre.com/sigma

hiérarchiser et comparer les risques, pour les assureurs, afin de calculer leur exposition et les provisionnements nécessaires, et pour les gestionnaires des risques, afin de mesurer l'efficacité des politiques de prévention et de protection, la sinistralité des évènements de submersion marine est encore mal connue en France. D'après les résultats de l'Évaluation Préliminaire des Risques d'Inondation (EPRI) nationale, première phase du dispositif fixé par la Directive européenne Inondation de 2007[3], les submersions marines n'ont représenté que 4 % du nombre d'événements enregistrés en France depuis l'origine du système « CatNat » (1982). Ces évènements ont cependant montré des coûts moyens supérieurs à ceux des inondations fluviales. D'après cette même étude, 1,4 million d'habitants (résidents permanents) seraient exposés aux risques de submersions marines en France métropolitaine (MEDDE/DGPR, 2012).

Quel que soit le risque naturel considéré, le frein le plus important à l'analyse et à l'évaluation des dommages est en général le manque de données économiques fiables et détaillées, ces dernières ne faisant que rarement l'objet de synthèses publiques ou retours d'expérience (REX) (Hubert et Ledoux, 1999 ; Vinet, 2007 et 2010 ; Merz et al., 2010). Pour pallier ce problème, on pense évidemment aux données d'assurance comme source d'information sur les impacts économiques des catastrophes naturelles. Cependant, en pratique, ces données ne sont en général pas accessibles, pour des raisons de confidentialité et de secret commercial, ou ne sont pas disponibles à un niveau de détail suffisant pour une analyse poussée des mécanismes des dommages et de leurs coûts.

L'utilisation des données d'assurance, pour un travail de recherche sur les dommages liés aux submersions marines, est donc inédite en France. Elle a été rendue possible par le montage d'un projet de recherche intitulé « JOHANNA », partenariat entre l'Université de Bretagne Occidentale (laboratoire LETG-Brest Géomer), le BRGM et la MAIF, et financé par la Fondation MAIF pour la recherche, au sein duquel est incluse cette thèse de doctorat de géographie. Proposé à la Fondation MAIF en 2009, le projet devait initialement porter sur la tempête Johanna de 2008 uniquement. Accepté en mars 2010, juste après la survenance de Xynthia, il portera finalement sur les deux évènements, qui ont eu des caractéristiques très différentes.

La tâche principale du projet, portée par cette thèse, a pour objectif l'analyse des dommages des submersions marines de ces deux tempêtes, sur un aspect physique (typologie des mécanismes d'endommagement) et sur un aspect économique (coût des dommages) afin

[3] Directive 2007/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation,
http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/l28174_fr.htm

d'améliorer la connaissance de ce risque et des dommages induits, et de pouvoir mettre en place une méthode d'évaluation des coûts potentiels d'évènements de submersion futurs, basée sur des modèles de prédiction tels que les « fonctions d'endommagement ».

L'étude est réalisée à partir de deux formes de données d'assurance : des données d'indemnisation (sommes versées aux assurés en compensation des dommages subis) et des données d'expertise (rapports des experts d'assurance ayant servi à l'évaluation des dommages sur le terrain). L'analyse se concentre plus particulièrement sur les enjeux les plus exposés à l'aléa submersion, qui ont également été les plus fortement impactés par les deux tempêtes étudiées, c'est-à-dire les habitations.

Dans la présente étude, il est proposé de déterminer les paramètres (concernant l'aléa et les enjeux) qui rendent spécifiques les dommages liés au risque de submersion marine, en comparaison, par exemple, au risque d'inondation fluviale, pour lequel la littérature scientifique est plus abondante, afin d'identifier les éléments nécessaires à l'évaluation de leurs coûts pour des évènements futurs. De plus, ce travail exploratoire, basé sur des données rarement accessibles à la communauté scientifique travaillant sur les risques naturels, se propose de déterminer ce que les données d'assurance peuvent apporter à la réalisation de modèles pour la prédiction du coût des dommages : quels sont leurs atouts, ainsi que leurs limites. Des pistes seront formulées pour améliorer le contenu de ces données et pour les rendre exploitables de manière plus systématique pour la recherche et la gestion des risques.

Ce travail s'inscrit particulièrement dans les politiques actuelles relatives à la gestion des risques naturels, en particulier d'inondation, telles que :

- La Directive européenne Inondation de 2007, qui préconise la réalisation d'Analyses Coûts-Bénéfices (ACB) pour évaluer la pertinence des projets de protection ou de prévention des risques. Une des principales étapes de l'ACB consiste en effet en la modélisation des dommages potentiels des inondations sur le site étudié.

- La nouvelle stratégie nationale de gestion des risques inondation, projet du Ministère de l'Environnement mis en consultation fin 2013[4], qui recommande l'amélioration des méthodes actuelles d'évaluation des dommages liés aux inondations, ainsi qu'une ouverture des connaissances et des données sur les dommages à tous les acteurs concernés par la gestion des risques.

[4] http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/strategie-nationale-de-gestion-des-a62.html

- L'Observatoire National des Risques Naturels (ONRN[5]), né d'un partenariat entre l'État (Ministère de l'Environnement), la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) et la Mission des sociétés d'assurances pour la connaissance et la prévention des Risques Naturels (MRN) en 2012, qui a pour mission une capitalisation et une diffusion des données sur les aléas naturels et sur leurs dommages, dans le but de mieux guider les politiques de prévention et de réduction de la vulnérabilité des biens et des personnes face aux risques naturels.

La démarche suivie comporte plusieurs étapes qui sont présentées dans les 5 parties de cette thèse :

La première partie consiste en un état de l'art des méthodes d'évaluation des dommages des risques naturels, en particulier liées au risque inondation (au sens large). Y sont également présentés le système français d'assurance des catastrophes naturelles, ainsi que les spécificités du risque de submersion marine. Enfin, les évènements et les sites étudiés sont évoqués et décrits.

La seconde partie de la thèse concerne la présentation des différents types de données existantes sur les dommages et sur l'aléa après un évènement naturel. Sont en particulier détaillées les données d'assurance auxquelles nous avons eu accès, et leur méthode d'acquisition, ainsi que les méthodes de modélisation mises en place pour reconstituer les paramètres des forçages météorologiques et de l'aléa submersion lors des deux évènements tempétueux étudiés.

La troisième et la quatrième partie consistent en une analyse des données d'assurance recueillies, à deux échelles spatiales. Dans un premier temps, à une échelle dite « régionale », un bilan des dommages et des coûts, ainsi que des caractéristiques respectives de chacun des deux évènements étudiés est réalisé. Dans un deuxième temps, à une échelle « locale », les liens entre les coûts des dommages, les paramètres de l'aléa et la vulnérabilité des habitations sont étudiés, à l'aide de données détaillées sur chaque enjeu individuel affecté.

La cinquième et dernière partie de la thèse exploite les résultats de l'analyse des données d'assurance et évalue leur apport à la réalisation de modèles de prédiction des coûts des dommages, fondés sur des approches statistiques univariées et multivariées. Une analyse

[5] http://www.onrn.fr

critique des données et des méthodes utilisées pour la mise en place de ces modèles est réalisée : elle permet de définir les précautions à prendre pour l'utilisation de données d'assurance en vue de l'évaluation des coûts de dommages. Enfin, des recommandations sont émises pour une meilleure capitalisation des données d'assurance, dans un objectif de mise en place de modèles d'endommagement précis et opérationnels pour la prédiction des coûts des submersions marines.

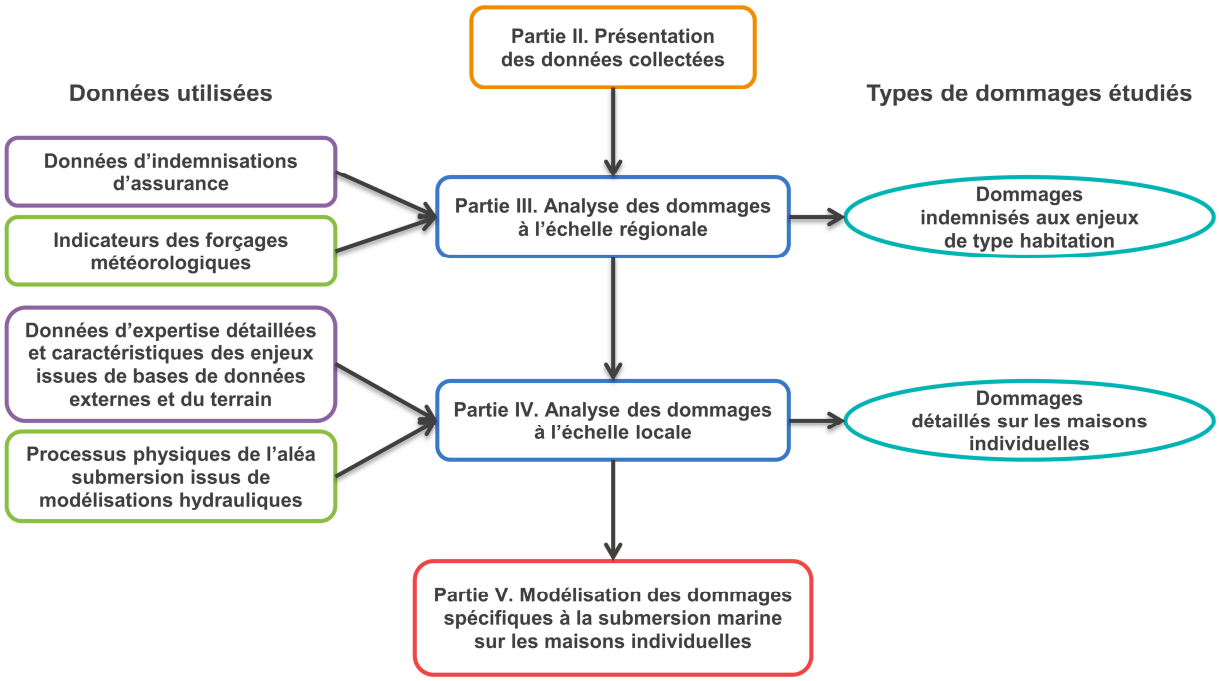


Figure 1 : Schéma des principales étapes de la thèse.

Partie I. État de l'art

Introduction

La première partie de cette thèse consiste en un « état de l'art » de l'étude des risques naturels, et en particulier de l'analyse des dommages, sur laquelle se fonde ce travail. L'objectif est ici de présenter les méthodes existantes et les travaux déjà réalisés, à propos des risques d'inondation en général, et du risque de submersion marine en particulier.

La première section introduit les grands concepts de l'étude des risques naturels, en se focalisant sur les notions de la vulnérabilité et des dommages. La seconde section traite des principales méthodes d'évaluation des dommages utilisées pour différents risques et pour différentes applications. La troisième section présente le contexte de l'assurance des risques naturels en France et les spécificités du régime « CatNat », dont un minimum d'éléments est nécessaire à l'analyse des dommages à partir de données d'assurance. La quatrième section précise le vocabulaire et les spécificités des risques côtiers, en particulier sur le plan de l'évaluation des aléas, préalable à toute analyse et évaluation des dommages. Enfin, la cinquième section présente les deux tempêtes Johanna et Xynthia sur lesquelles se basent les développements de cette thèse.

1. L'étude des risques naturels

1.1. Définition préalable des concepts

Les risques naturels sont, de par leur nature, un sujet d'étude fondamentalement pluridisciplinaire, à l'interface entre les sciences naturelles ou physiques (géologie, géomorphologie, climatologie, météorologie, hydrologie, ingénierie, etc.), caractérisant les phénomènes naturels, et les sciences humaines et sociales (géographie humaine, sociologie, psychologie, architecture, urbanisme, économie, sciences politiques, etc.), caractérisant l'impact de ces phénomènes sur les hommes et la société.

Au sein de toutes ces disciplines, la terminologie classique associée aux risques naturels est basée sur les notions d'aléa, d'enjeux et de vulnérabilité, même si les définitions précises de ces termes peuvent sensiblement différer d'une approche à l'autre. Telles qu'elles apparaissent dans les documents règlementaires en France (MATE et METL, 1997a ; MEDDE/DGPR, 2004 ; 2006 ; 2008 et 2011) les définitions de ces notions sont les suivantes :

- L'**aléa** est la manifestation d'un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données.
- Les **enjeux** sont l'ensemble des personnes et des biens susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel (l'aléa). Ils se caractérisent par leur importance (nombre, nature, valeur monétaire ou non monétaire, etc.) et leur vulnérabilité.
- La **vulnérabilité** est désignée comme la capacité ou propension à favoriser l'endommagement (pour les biens et les activités) ou les préjudices (pour les personnes) des éléments exposés à l'aléa. De manière générale, elle mesure et exprime le niveau de conséquences prévisibles de l'aléa sur les enjeux.

Le terme de **risque** est donc utilisé pour définir la combinaison d'un ou de plusieurs aléa(s) avec des enjeux plus ou moins vulnérables à ce(s) phénomène(s) (Figure 2). Tandis que le terme **exposition** est utilisé pour décrire la situation où des enjeux sont situés dans une zone soumise à l'aléa, le risque exprime la possibilité de survenance de **dommages** variant selon la vulnérabilité des enjeux exposés. Il se caractérise donc par la combinaison de la probabilité d'occurrence d'événements dommageables et de la gravité de leurs impacts sur la société.

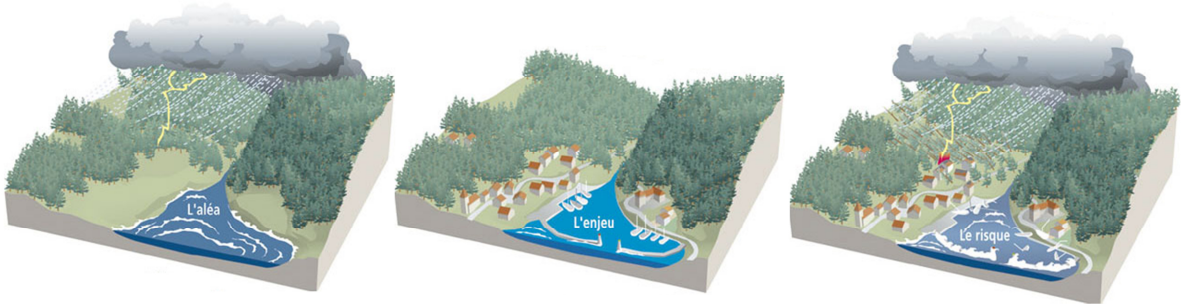


Figure 2 : Schéma de l'aléa, des enjeux et du risque (source : http://www.prim.net).

Notons la dualité « nature / société » qui ressort de toutes ces définitions, opposant les aléas dits naturels, aux enjeux et à leur vulnérabilité liés aux sociétés humaines. Cette opposition est davantage due à la segmentation des disciplines étudiant traditionnellement le risque qu'à la réalité des phénomènes (Pigeon, 2002 et 2005 ; Meur-Férec, 2006 ; Metzger et d'Ercole, 2011). En effet, s'il n'existe pas de risque « naturel » sans enjeux exposés, certains aléas d'origine naturelle comme les inondations sont eux-mêmes fortement influencés par les aménagements humains tels que l'endiguement des fleuves et l'imperméabilisation des sols. L'étude des risques ne peut donc se passer d'une intégration des approches physiques et humaines et sociales, et d'une analyse conjointe de tous ces éléments dans un cadre pluridisciplinaire.

1.2. La vulnérabilité

Si la notion d'aléa fait assez consensus, celle de la vulnérabilité, plus complexe à définir, reste controversée et marque ainsi les différentes approches disciplinaires existant dans la communauté des risques. Dans le domaine des sciences physiques, et notamment en ingénierie, la notion de vulnérabilité est couramment utilisée pour caractériser la plus ou moins grande sensibilité d'un enjeu à un aléa donné, par exemple en termes de résistance ou de fragilité aux processus physiques de l'aléa, pour les bâtiments (Douglas, 2007) : on parle alors de **vulnérabilité intrinsèque**. Au contraire, en sciences humaines, et en particulier en géographie, la définition de la vulnérabilité est moins restrictive : elle se rapporte à tous les éléments permettant d'expliquer les impacts de l'aléa sur les enjeux à l'échelle d'un territoire ou d'un système défini, incluant les concepts de perception, de gestion du risque, de résilience, ainsi que les interactions existant entre tous les éléments de ce système. On parle alors de **vulnérabilité systémique** (Blaikie et al., 1994 ; Cutter, 1996 ; Dauphiné, 2001 ; Veyret, 2003 ; Pigeon, 2005 ; Adger, 2006 ; Janssen et al., 2006 ; Gilbert, 2009 ; Metzger et D'Ercole, 2009).

La première approche envisage la vulnérabilité selon un angle analytique (la vulnérabilité de « quelque chose ou de quelqu'un à quelque chose » (Romieu et Vinchon, 2009), alors que la

seconde considère que la vulnérabilité est une notion synthétique (Dauphiné, 2001 ; Vinet, 2007 et 2010). C'est également une différence entre une vulnérabilité « passive » et une vulnérabilité « active », qui réside dans ces définitions : dans le premier cas la vulnérabilité est « subie », alors que dans le second elle inclut les actions réalisées par l'homme réduisant ou aggravant le risque. Dans ce sens, la vulnérabilité peut se définir comme « l'expression synthétique d'un certain contexte, d'un certain nombre de conditions propices, ces dernières étant susceptibles d'engendrer des dommages et/ou dysfonctionnements majeurs en cas de concrétisation d'un aléa » (Pigeon, 2002).

L'objet de cette étude n'est en aucun cas de faire une synthèse exhaustive de ces travaux, ce qui serait une tâche énorme et trop éloignée de l'objectif de cette thèse. Nous pouvons toutefois illustrer par quelques exemples les différentes façons d'appréhender la vulnérabilité.

Quelques auteurs tentent dans un premier temps de formaliser le cadre conceptuel de la vulnérabilité : J. Birkmann (2006) indique les différentes déclinaisons intermédiaires des approches existant entre la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité systémique (Figure 3).

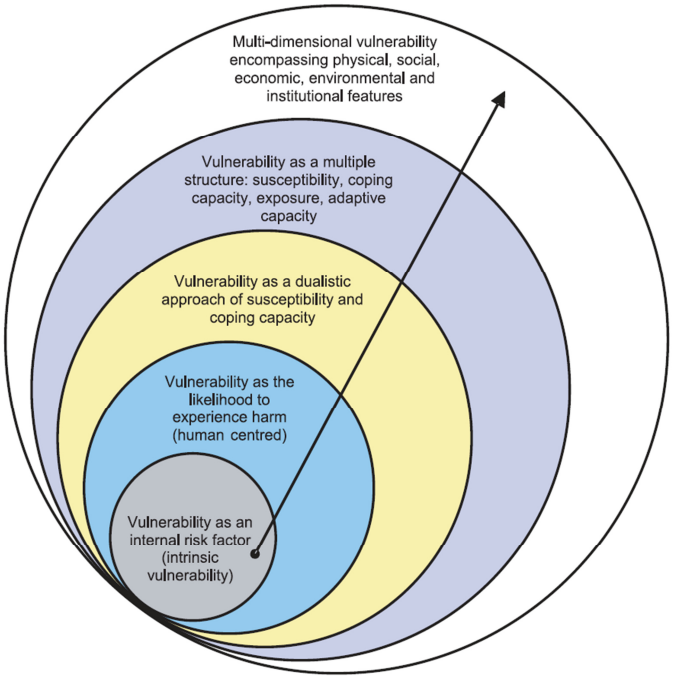


Figure 3 : Schéma des différents niveaux d'étendue du concept de vulnérabilité, d'après Birkmann, 2006.

M. Reghezza (2006) détermine, quant à elle, le lien entre les différentes approches de la vulnérabilité et les disciplines de l'étude des risques, et intègre également à la vulnérabilité le terme de résilience, que l'on peut assimiler à la capacité de la société à faire face au risque, ainsi qu'à s'adapter et à se reconstruire après une catastrophe (Figure 4).

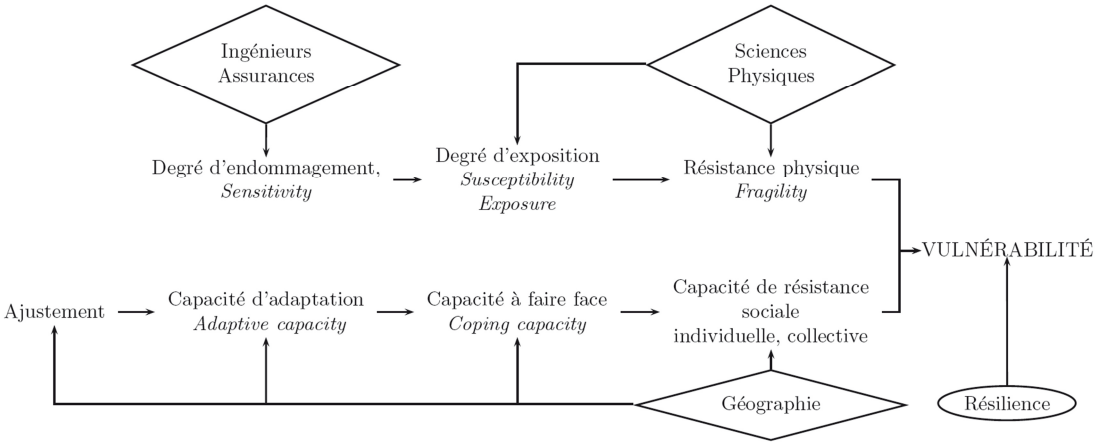


Figure 4 : Schéma des différentes approches de la vulnérabilité, d'après Reghezza, 2006.

Plus spécifiquement sur les aléas d'inondation ou côtiers, on peut mentionner les études suivantes, par niveau croissant d'intégration d'éléments dans la notion de vulnérabilité :

V. Jousseaume et D. Mercier (2009) traitent par exemple de la vulnérabilité architecturale des bâtiments d'habitation aux inondations dans le Val Nantais. Cette méthode est proche de la vulnérabilité intrinsèque. Elle est basée sur une typologie des enjeux bâtis, qui inclut plusieurs paramètres architecturaux (présence d'étage, de sous-sol) ainsi que sur l'exposition à l'aléa des bâtiments en fonction de leur altitude, ce qui permet la production d'indicateurs qualitatifs de risque pour ces derniers (Figure 5).

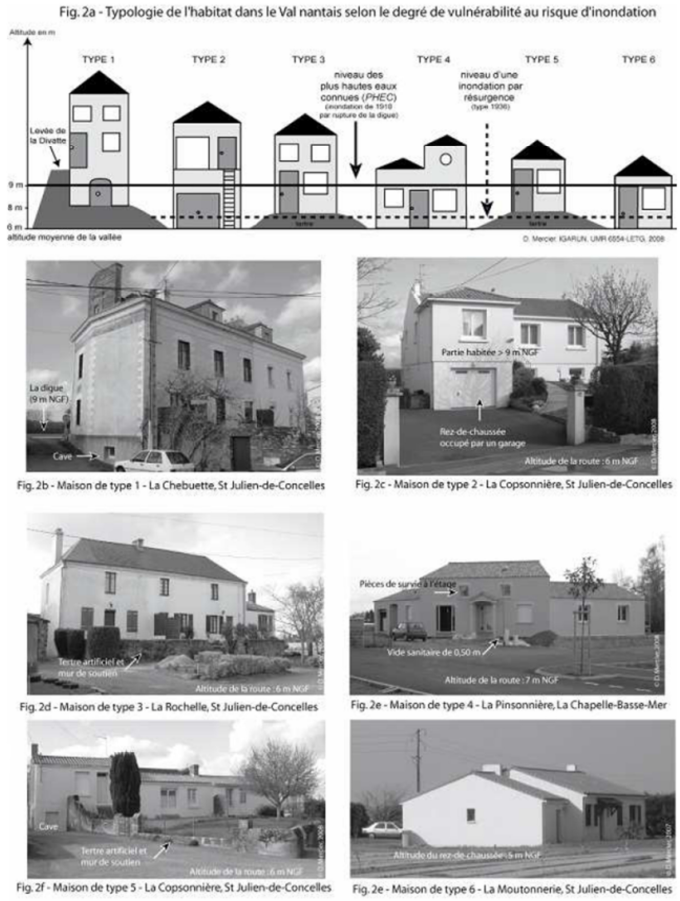


Figure 5 : Typologie de l'habitat et vulnérabilité au risque d'inondation, d'après Jousseaume et Mercier, 2009.

Pour le risque inondation également, S. N. Jonkman (2007) décrit la vulnérabilité des personnes et réalise un outil de modélisation des pertes, basé sur des aspects physiques (capacité à se maintenir debout en fonction de la hauteur d'eau et du courant), mais aussi sur les systèmes d'alerte existants, la gestion de l'évacuation, la présence de refuges hors d'eau dans la zone inondable et l'organisation des secours.

De leur côté, F. Vinet et al. (2011 et 2012a) déterminent, en analysant le profil des victimes et les circonstances des décès lors de deux évènements récents d'inondation (crues rapides du Var et submersion marine de la tempête Xynthia en 2010), qu'en plus de facteurs physiques tels que la hauteur d'eau et l'âge des victimes, un facteur qui influence la mortalité est l'ensemble des comportements de « prise de risque », dus au manque de conscience du danger et à la méconnaissance de celui-ci. Ils s'interrogent donc sur la portée réelle des consignes de sécurité et sur l'appropriation des mesures de prévention par la population comme facteur de vulnérabilité.

Deux approches plus synthétiques de la vulnérabilité sont celles de B. Barroca (2006 ; ou Barroca et al., 2006) pour le risque inondation et de D. Dominey-Howes et M. Papathoma

(2007) pour le risque tsunami. Le premier développe un « *Vulnerability Assessment Tool* » basé sur des indicateurs de la vulnérabilité systémique aux inondations. Les seconds mettent en place le modèle PTVA (*Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment*), basé sur une grande quantité d'indicateurs qualitatifs et quantitatifs portant sur les types de bâtiments, la population, les ouvrages de protection artificiels et naturels, ainsi que le contexte politique et assurantiel dans la zone d'étude. Une partie de ces indicateurs sont cartographiables, ce qui permet l'analyse spatiale de la vulnérabilité.

Enfin, C. Meur-Férec (2006) présente un cadre conceptuel de l'analyse de la vulnérabilité systémique pour les risques côtiers, qui a pour spécificité d'inclure l'aléa au sein de la notion de vulnérabilité (Figure 6).

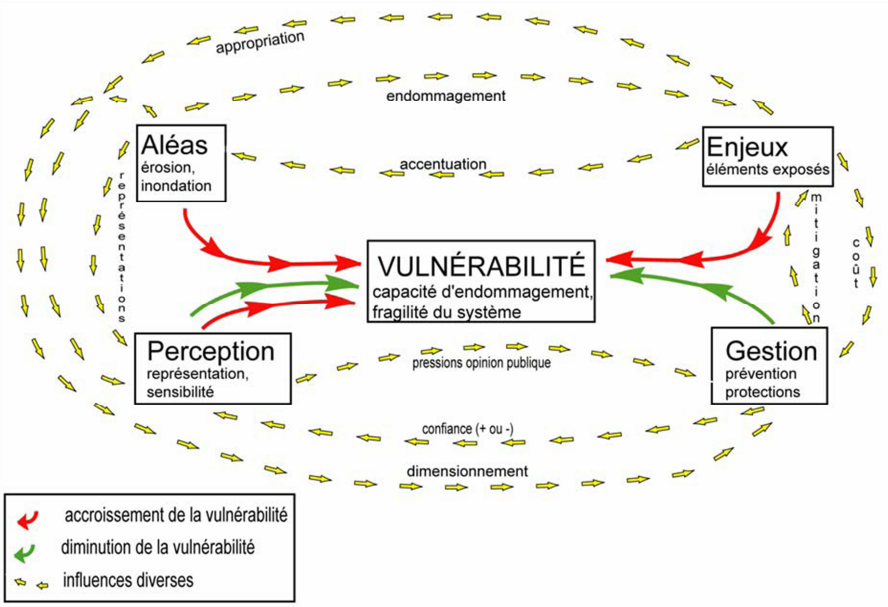


Figure 6 : Schéma de la vulnérabilité systémique pour les risques côtiers, d'après Meur Férec, 2006.

À partir de cette définition, l'équipe pluridisciplinaire du projet « vulnérabilité des territoires côtiers »[6] met en place des grilles d'évaluation de la vulnérabilité pour le risque d'érosion côtière, reposant sur quatre catégories de « descripteurs » ou indicateurs qualitatifs sur l'aléa, les enjeux, la gestion et la perception du risque (Meur-Férec et al., 2008). Les notes de chacun des descripteurs (représentées sous la forme d'un diagramme radar) permettent de définir le profil de vulnérabilité de plusieurs sites selon les quatre catégories, ainsi que les stratégies de gestion les plus adaptées (Figure 7).

[6] Dans le cadre du Programme National Environnement Côtier.

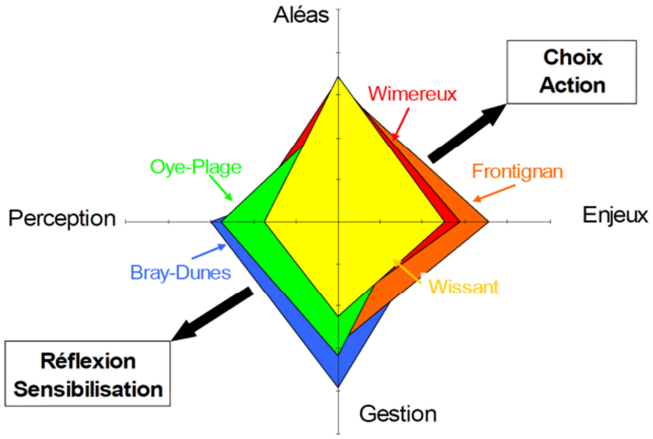


Figure 7 : Diagrammes radar des indicateurs de vulnérabilité de plusieurs sites exposés aux risques côtiers, d'après Meur-Férec, 2006.

D'une manière similaire, le projet en cours COCORISCO (COnnaissance, COmpréhension et gestion des RISques CÔtiers[7]), dont les travaux interdisciplinaires portent à la fois sur l'amélioration de la connaissance des aléas côtiers et sur la définition de moyens de gestion à la hauteur des enjeux actuels, définit la vulnérabilité d'un territoire selon les composantes aléas, enjeux, représentations (perception), et gestion du risque.

À propos de la submersion marine, le projet MISEEVA (*Marine Inundation hazard exposure and Social, Economic and Environmental Vulnerability Assessment*) s'est donné pour objectif d'évaluer la vulnérabilité systémique du littoral à cet aléa dans le contexte de changement climatique, selon différents scénarios prospectifs d'élévation du niveau marin et de l'évolution des conditions socio-économiques. L'analyse de la vulnérabilité repose sur une évaluation économique des dommages, sur la capacité d'adaptation de la population, évaluée par des enquêtes ciblant sa perception des risques, et sur les perspectives d'évolution des politiques publiques de prévention des risques, dans un contexte de changement climatique (Vinchon et al., 2010 et soumis ; Meur-Férec et al., 2010 ; Hellequin et al., 2013 ; Serrand et al., 2013).

Une dernière étude, traitant de la vulnérabilité des réseaux de transport (Gleyze, 2005 ; Gleyze et al., 2005), en prenant l'exemple du métro parisien face aux inondations, vise à analyser les chaines de risque, c'est-à-dire les rétroactions que peut entrainer l'endommagement matériel des enjeux sur leur structure et leurs usages. Cette étude a pour vocation de rendre possible l'analyse, pour un territoire, de la vulnérabilité de son organisation spatiale, appelée vulnérabilité « structurelle », qui peut exister en dehors de la zone exposée à l'aléa elle-même, si l'endommagement matériel de certains enjeux en affecte d'autres de par leur fonction. La notion d' « effet domino » décrivant notamment les

[7] http://www.cocorisco.fr

risques technologiques liés à la survenance d'aléas naturels, est entrée dans l'actualité depuis l'accident de la centrale de Fukushima, conséquence du séisme et du tsunami de Tōhoku au Japon en 2011.

On peut également indiquer que la notion de vulnérabilité, déjà complexe au sein de l'ensemble des disciplines traitant des risques naturels, se pose différemment dans les études liées au changement climatique, ce qui contribue à renforcer la diversité sémantique de la notion, notamment dans le cadre de l'étude des risques côtiers, où risque et changement climatique sont imbriqués (Romieu et Vinchon, 2009 ; Romieu et al., 2010).

On voit donc à quel point la notion de vulnérabilité peut revêtir de nombreuses définitions et concepts sous-jacents. Pour conclure sur ces approches de la vulnérabilité par les disciplines des sciences humaines, F. Leone (2007) récapitule les approches intrinsèques et systémiques de la vulnérabilité existantes en France pour l'ensemble des risques naturels. Au niveau européen, deux projets récents ENSURE (Menoni et al., 2012) et MOVE (Birkmann et al., 2013) ont proposé un cadre conceptuel qui rassemble les différentes dimensions de la vulnérabilité.

F. Leone (2007) soulève également le problème de la « disponibilité » de l'ensemble de ces approches pour une utilisation opérationnelle, du fait de la complexité des approches systémiques et du manque de données accessibles pour mettre en œuvre ces méthodes. On voit que, la plupart du temps, les données socio-économiques sur les enjeux disponibles dans les bases de données institutionnelles, ne permettent pas de répondre aux besoins des modèles développés, et que des collectes de données, par le biais d'enquêtes de terrain, sont toujours nécessaires.

Le champ de la vulnérabilité face aux risques naturels est un sujet de recherche en pleine évolution, dont les méthodes ne cessent de se perfectionner et deviennent de plus en plus appliquées et opérationnelles, afin de pouvoir être mises en œuvre pour une meilleure gestion des risques. Dans le cadre de cette thèse, qui porte sur les **dommages des submersions marines aux habitations**, c'est davantage la notion de **vulnérabilité intrinsèque** qui sera employée, non seulement lorsque l'on tentera de relier les dommages aux processus d'endommagement, mais également quand on cherchera à évaluer les coûts des dommages sur ce type d'enjeux, notamment en fonction des caractéristiques de sensibilité et de résistance des enjeux à l'aléa.

1.3. Les dommages

Quelles que soient les approches d'évaluation de la vulnérabilité, on constate qu'elles reviennent souvent à lier la vulnérabilité à la notion de **dommages** potentiels. En effet, les dommages, par leur nature, sont le résultat des interactions entre des processus physiques d'endommagement et des enjeux exposés plus ou moins vulnérables. Ainsi, « à aléa de caractère comparable, les sociétés humaines peuvent subir des dommages différents selon leur manière d'occuper le territoire, et réagir de manière très différente en fonction de leur perception de l'aléa » (Pigeon 2002). La notion d'occurrence de dommages est formulée comme la « réalisation du risque » par les assureurs (Vinet, 2007 et 2010). Les dommages sont donc une matérialisation du risque et de la vulnérabilité lors de la survenance d'une catastrophe (Pigeon, 2002).

Un dommage est défini (Larousse) comme une atteinte ou un préjudice porté à une personne ou à des biens. Dans le cas d'un dommage à une personne, on parlera de dommages corporels ou moraux ; dans celui de dommages matériels, on parlera de dégâts, de dégradations ou de détériorations, etc. La séparation entre ces deux types de dommages, provenant de la définition juridique du terme, existe également dans le milieu de l'assurance. De manière plus étendue, on peut définir un dommage par une altération préjudiciable d'un état, causant une réduction de la valeur de cet état. Le terme de dommage étant plutôt employé pour indiquer la manifestation physique de l'endommagement, c'est le terme de « **pertes** » (en anglais *loss*) qui est le plus couramment utilisé pour désigner la valeur économique de l'endommagement résultant d'une catastrophe naturelle, même si ces deux termes sont parfois employés l'un à la place de l'autre, notamment par les communautés de l'économie et de l'assurance.

Les dommages sont traditionnellement classés en économie dans 4 grandes catégories, selon leur caractère « direct » ou « indirect » et « tangible » ou « intangible » (Penning-Rowsell et al., 1977 et 2005 ; Smith et Ward 1998 ; Messner et al., 2007 ; Jonkman et al., 2008 ; Merz et al., 2010 ; Meyer et al., 2012). Les **dommages directs** sont ceux induits directement par le contact de l'aléa avec les enjeux, tandis que les **dommages indirects** sont induits par les dommages directs, et peuvent ainsi se situer en dehors de la zone touchée par l'aléa, ou survenir au-delà de la durée de la catastrophe elle-même. D'un autre côté, les **dommages tangibles**, ou monétarisables, sont les dommages aux capitaux humains, ou les perturbations des flux de ces capitaux (biens marchands), alors que les **dommages intangibles** sont ceux pour lesquels il n'existe pas de marché grâce auquel on peut évaluer directement leur valeur d'échange ; ils sont donc plus difficilement monétarisables. On pourra cependant les rapporter à une valeur marchande à l'aide, par exemple, des méthodes

des prix hédoniques ou d'évaluation contingente (Rosen, 1974 ; Desaigues et Lesgards, 1992 ; Desaigues et Point, 1993).

Des exemples de dommages classés selon les combinaisons de ces deux propriétés sont indiqués dans le Tableau 1.

	Dommages directs	**Dommages indirects**
Dommages tangibles Biens « marchands »	- destruction ou dégradation de bâtiments, de mobilier, ou de véhicules, - interruption ou perturbation d'activités économiques à l'intérieur de la zone affectée, - dommages aux parcelles agricoles, récoltes et bétail, - dommages aux infrastructures de distribution d'eau et d'électricité, de transport et de communication, - mise en place de mesures d'évacuation, de sauvetage et de nettoyage.	- relogement temporaire des sinistrés, - interruption ou perturbation d'activités économiques à l'extérieur de la zone affectée (dont pertes de production induites à des fournisseurs ou des clients des entreprises directement affectées), - interruption ou perturbation du trafic et des transports passant par la zone affectée, - pertes de revenu des personnes travaillant dans la zone affectée.
Dommages intangibles Biens « non marchands »	- pertes humaines, accidents corporels, - destruction ou dégradation de biens privés irremplaçables ou à valeur sentimentale (souvenirs, animaux de compagnie), - destruction ou dégradation du patrimoine culturel, historique et naturel, - interruption de services publics à l'intérieur de la zone affectée.	- deuil, traumatismes psychologiques, - dégradation de la qualité de vie des sinistrés, - déracinement et perte de communauté, - pertes de services écosystémiques, - inquiétude des habitants, perte de confiance dans les autorités.

Tableau 1 : Classification des dommages directs et indirects et tangibles et intangibles.

Les risques dits **majeurs**, tels que définis à nouveau dans les documents règlementaires (MEDDE/DGPR, 2004 ; 2008), ne sont pas limités aux aléas d'origine naturelle. Cette notion exprime la possibilité qu'a un événement d'origine naturelle ou anthropique (risques technologiques), se caractérisant souvent par une faible fréquence, d'occasionner des dommages importants (mettant en jeu un grand nombre de personnes, ou économiquement parlant), dépassant les capacités de réaction de la société. Le risque majeur est donc défini à la fois par l'intensité de l'aléa et par la vulnérabilité des enjeux exposés. La courbe de R. Farmer (1977) reprise par P. Pigeon (2010) illustre cette relation entre l'intensité ou la gravité des dommages et la fréquence à laquelle la survenance de ces dommages a des chances de se produire (Figure 8).

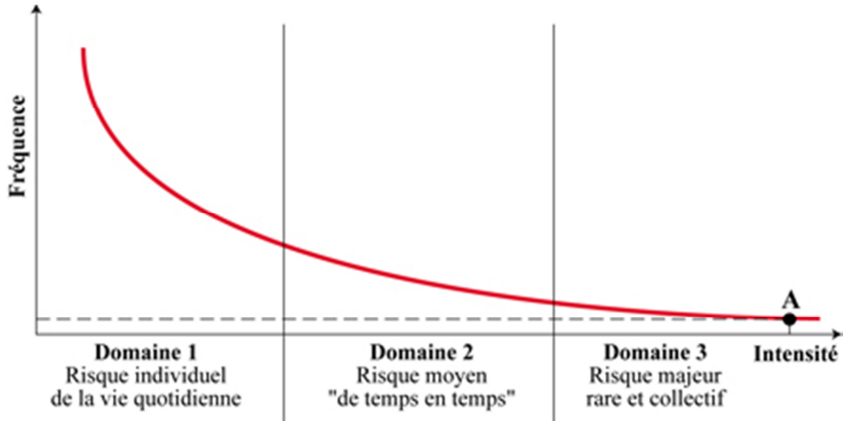


Figure 8 : Courbe de R. Farmer (1977) représentant la relation entre l'intensité et la fréquence des dommages, d'après Pigeon, 2010. Le point A représente la catastrophe naturelle ou la réalisation d'un risque majeur.

2. L'évaluation des dommages

La gestion des risques naturels nécessite en premier lieu de connaitre les risques et de pouvoir les évaluer. Un certain nombre d'études de risque présentées jusqu'ici passe par une évaluation de l'aléa, puis de la vulnérabilité des territoires exposés, à l'aide des différents cadres conceptuels présentés. Une alternative à cette approche consiste à évaluer les dommages potentiels que peut produire l'aléa, pour exprimer le risque encouru.

Les évaluations des dommages sont réalisées dans deux contextes (Figure 9). D'une part, elles peuvent être menées après la survenance d'une catastrophe : on parle alors d'évaluation « ***ex post*** » ou « ***a posteriori*** », des dommages avérés. Elles sont effectuées soit immédiatement après une catastrophe, dans le but d'organiser en temps réel les secours et de coordonner les actions urgentes à mettre en place pour le retour à la normale, soit plus tard, la phase de crise étant passée, dans le but de tirer un retour d'expérience (REX) sur les processus ayant entrainé les dommages et leurs coûts. D'autre part, on peut réaliser une évaluation des dommages potentiels d'une catastrophe, sans qu'elle ne se soit produite, il s'agit alors d'évaluation des dommages « ***ex ante*** » ou « ***a priori*** », qui revient à une évaluation du risque (Hubert et Ledoux, 1999 ; APFM, 2007).

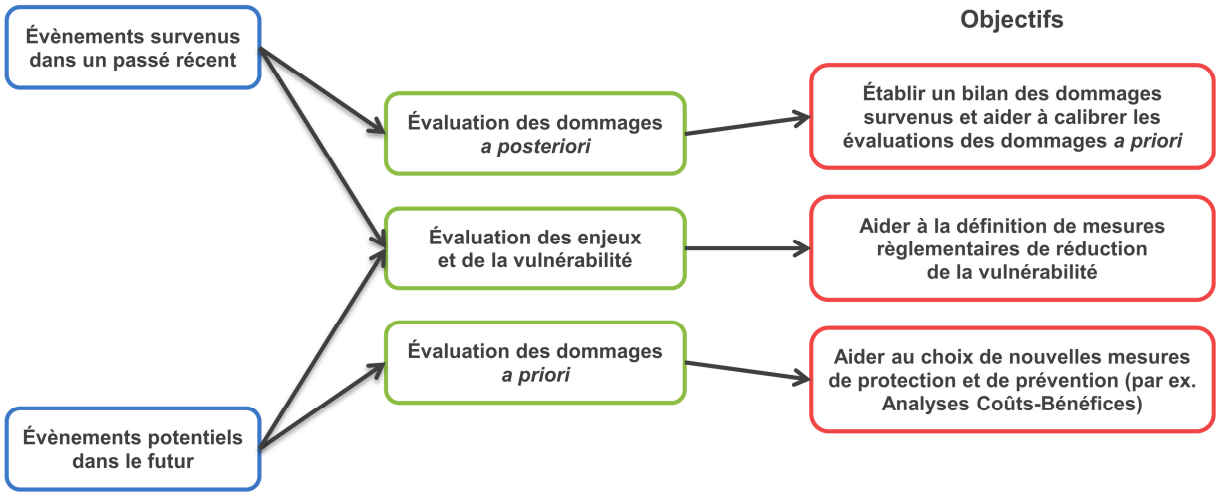


Figure 9 : Schéma de l'évaluation des dommages *ex post* et *ex ante*, modifié d'après Hubert et Ledoux, 1999.

Une difficulté majeure de l'évaluation des dommages vient du fait que le dommage n'existe que lorsqu'il est identifié et reconnu en tant que tel par une société donnée (Pigeon, 2002). Cela signifie que toute société a ses règles pour définir la limite entre ce qui est de l'ordre du dommage dû à une catastrophe, ou de l'ordre d'un nécessaire renouvellement des biens dû à leur usure normale. En effet, on constate que les régions affectées par des évènements d'inondation fréquents provoquant de faibles dommages, ont parfois tendance à accepter ces pertes récurrentes comme faisant partie des contraintes liées à leur environnement, alors que dans les régions affectées plus rarement par l'aléa, le moindre dommage est plus souvent perçu comme résultant d'un évènement catastrophique. De manière générale, les sociétés occidentales, mieux assurées contre les catastrophes, ont tendance à considérer plus systématiquement comme dommage toutes les pertes liées à un évènement naturel et à réclamer pour cela une compensation, ce qui n'est pas le cas des sociétés pour lesquelles le secteur de l'assurance est moins implanté ; on peut ainsi parler de différents seuils de « tolérance aux risques » (Peretti-Watel, 2000). On peut donc conclure à une difficulté de l'évaluation des dommages du fait que toute démarche de ce type est forcément biaisée à la base, car ce qui est considéré comme dommage ne suivra pas toujours la même définition, selon l'importance de l'évènement catastrophique, les caractéristiques de la société affectée, etc.

Quoi qu'il en soit, l'évaluation des dommages sous-entend la définition d'une unité de mesure de ces derniers. La plupart du temps, ce sont les coûts économiques d'une catastrophe qui sont évalués (principalement les pertes directes), mais on peut évaluer les dommages grâce au nombre de victimes et de blessés, de personnes évacuées ou sans abris, de bâtiments endommagés, etc. De ce choix de l'unité de mesure des dommages, en fonction des objectifs de l'évaluation, vont dépendre les approches et les outils utilisés pour

l'évaluation, qui sont de deux principaux types : l'approche physique et l'approche économique.

2.1. L'évaluation physique des dommages

L'approche physique de l'évaluation des dommages est celle qui provient de la branche de l'ingénierie des risques naturels. Elle s'applique principalement aux enjeux bâtis et repose sur l'analyse de la sensibilité de ces derniers aux processus physiques de l'aléa engendrant les dommages.

Cette méthode est basée sur la description physique des dommages par des échelles qualitatives de dommage qui permettent, en lien avec l'analyse des caractéristiques des bâtiments, la réalisation d'un modèle d'endommagement prédisant les dommages attendus en fonction de l'intensité de paramètres de l'aléa. Développée historiquement pour le risque sismique, pour lequel la manifestation physique des dommages sur les bâtiments est particulièrement visible, elle a par la suite été adaptée à d'autres risques naturels, tels que les tempêtes (vent), les inondations ou encore les tsunamis.

2.1.1. Les échelles de dommages

La première étape de l'étude physique des dommages consiste à définir une échelle descriptive de niveaux ou de degrés d'intensité de dommages par typologie d'enjeux affectés. En général, ces échelles vont d'un état « sans dommage » appelé D0 jusqu'à un état de destruction complète de l'enjeu (niveau D5 pour beaucoup d'échelles). Ces échelles sont la plupart du temps empiriques, c'est-à-dire construites à partir d'observations de dommages *ex post*. À la survenance d'un nouvel évènement, elles facilitent le recensement des dommages, la plupart du temps sur le terrain, parfois à l'aide de données de télédétection.

Des études de synthèse ont comparé les différentes échelles de dommages entre elles (Zihri, 2004 ; Leone, 2007 ; Friedland, 2009). Voici quelques exemples d'échelles couramment utilisées et représentatives (Figure 10 à Figure 16).

Classification des dégâts aux bâtiments en maçonnerie	
	Degré 1: Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux) Fissures capillaires dans très peu de murs. Chute de petits débris de plâtre uniquement. Dans de rares cas, chute de pierres descellées provenant des parties supérieures des bâtiments.
	Degré 2: Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés) Fissures dans de nombreux murs. Chutes de grands morceaux de plâtre. Effondrement partiel des cheminées.
	Degré 3: Dégâts sensibles à importants (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants) Fissures importantes dans la plupart des murs. Les tuiles des toits se détachent. Fractures des cheminées à la jonction avec le toit; défaillance d'éléments non structuraux séparés (cloisons, murs pignons).
	Degré 4: Dégâts très importants (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants) Défaillance sérieuse des murs; défaillance structurale partielle des toits et des planchers.
	Degré 5: Destruction (dégâts structuraux très importants) Effondrement total ou presque total.

Figure 10 : Échelle de dommages aux bâtiments pour les séismes, d'après Grünthal, 1998.

F-Scale	Windspeed (mph)	Damage description
F0	40-72	Some damage to chimneys and TV antennae; breaks twigs off trees, pushes over shallow-rooted trees
F1	73-112	Peels surfaces off roofs; windows broken; light trailer houses pushed over or overturned; some trees uprooted or snapped; moving automobiles pushed off road
F2	113-157	Roofs torn off frame houses leaving strong upright walls; weak buildings in rural areas demolished; trailer houses destroyed; large trees snapped or uprooted; railroad boxcars pushed over; light object missiles generated; cars blown off highway
F3	158-206	Roofs and some walls torn off frame houses; some rural building completely demolished; trains overturned; steel-framed hangar-warehouse type structures torn; cars lifted off the ground; most trees in a forest uprooted, snapped, or leveled
F4	207-260	Whole frame houses leveled, leaving piles of debris; steel structures badly damaged; trees debarked by small flying debris; cars and trains thrown some distance or rolled considerable distances; large missiles generated
F5	261-318	Whole frame houses tossed off foundations; steel-reinforced concrete structures badly damaged; automobile -sized missiles generated; incredible phenomena can occur

Figure 11 : Échelle de dommages aux bâtiments pour le vent, d'après Fujita, 1971 et NOAA, 2003.

Damage Scale (DS) Level	Water Interaction with Structure
DS0	No water contact with structure.
DS1	Water contacts outside of structure but does not enter.
DS2	Water infiltrates (i.e. seeps or leaks in through small apertures). OR External features are damaged or removed by water or debris.
DS3	Water or debris penetrates through a closed or covered opening (probably by breaking the opening); for example, a window or a door.
DS4	Water or debris penetrates through a route not including an opening (structural integrity is attacked); for example, a wall or roof.
DS5	Structure is damaged beyond repair; for example, walls collapse, the structure moves, or the foundation is undermined.

Figure 12 : Échelle de dommages aux bâtiments pour les inondations, d'après Kelman, 2002.

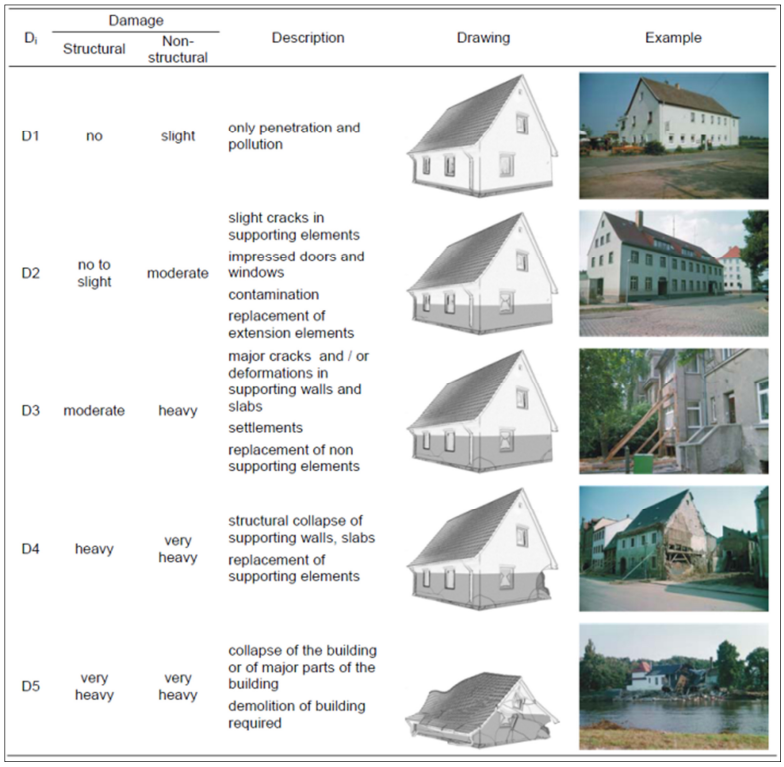


Figure 13 : Échelle de dommages aux bâtiments pour les inondations, d'après Schwarz et Maiwald, 2008.

Damage Scale	**Description**
No Damage (D0)	No visible structural damage
Light Damage (D1)	Damage limited to chipping of plaster, minor visible cracking, damage to windows, doors. Damage minor and repairable. Immediate Occupancy
Moderate Damage (D2)	Out-of-plane failure or collapse of parts of or whole sections of wall panels without compromising structural integrity. Scouring at corners leaving foundations partly exposed, repairable by backfilling. Masonry walls repairable. Unsuitable for immediate occupancy but suitable after repair.
Heavy Damage (D3)	Out-of-plane failure or collapse of masonry wall panels beyond repair, structural integrity compromised. Most parts of structure collapsed. Excessive scouring and collapse of sections of structure due to settlement. Requires demolition since unsuitable for occupancy
Collapse (D4)	Complete structural damage or collapse, foundations and floor slabs visible and exposed. Collapse of large sections of foundations and structures into scour holes

Figure 14 : Échelle de dommages aux bâtiments pour les tsunamis, d'après Garcin et al., 2007 ; 2008.

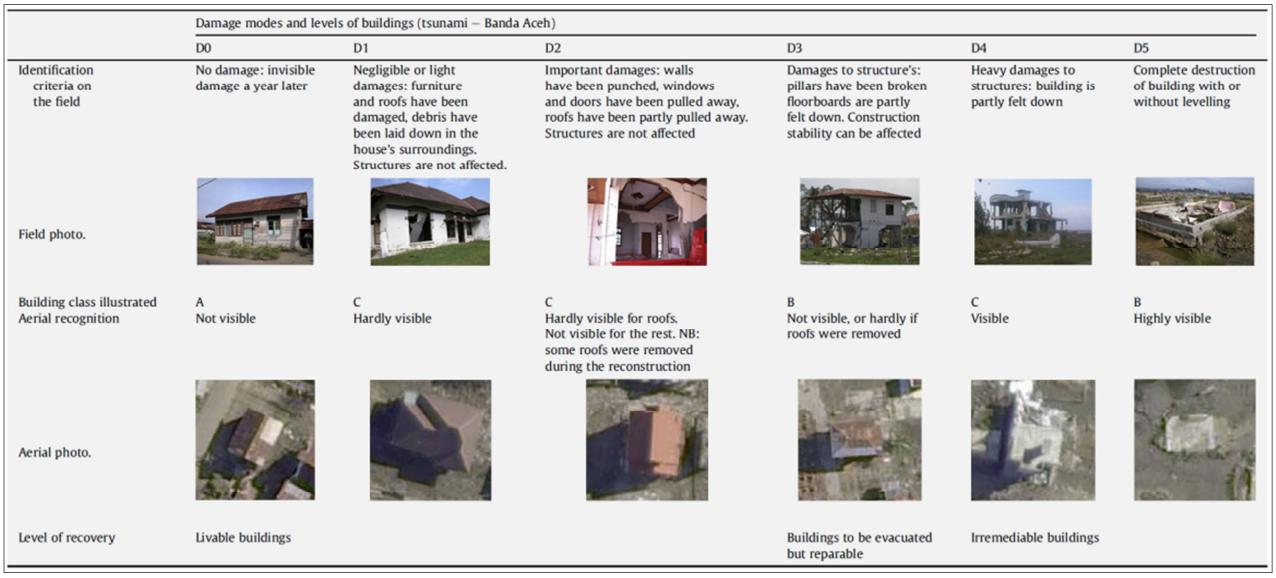


Figure 15 : Échelle de dommages aux bâtiments pour les tsunamis, d'après Leone et al., 2011.

Wind and Flood (WF) Damage Scale	
WF-0	No Damage or Very Minor Damage - No floodwater impacts the building.
WF-1	Minor Damage - Breakaway walls or appurtenant structures (staircases carports, etc.) damaged or removed without physical damage to remaining structure. No floodwater impacts the building.
WF-2	Moderate Damage - Some wall cladding damage from floodborne debris or high velocity floodwater. Breakaway walls or appurtenant structures (staircases carports, etc.) damaged or removed with physical damage to remaining structure.
WF-3	Severe Damage - Removal of cladding from "wash through" of surge without wall structural damage.
WF-4	Very Severe Damage - Failure of wall frame, repairable structural damage to any portion of the building or cases of unrepairable structural damage, not to exceed 25 % of the building plan area.
WF-5	Partial Collapse - House shifted off foundation, overall structure racking, unrepairable structural damage to > 25 % of the building plan area. Structure is still partly intact.
WF-6	Collapse - Total structural failure (no intact structure).

Figure 16 : Échelle de dommages aux bâtiments pour le vent et la submersion marine (ouragans), d'après Friedland, 2009.

Il est à noter qu'il existe également des échelles décrivant qualitativement l'intensité des évènements dans leur ensemble, en fonction du ressenti des populations et des dommages subis, telle que l'Échelle Macrosismique Européenne (EMS-98) pour les séismes (Grünthal et al., 1998), qui ne doivent pas être confondues avec les échelles de dommages concernant un type d'enjeu particulier.

2.1.2. Les courbes de fragilité

À partir de ces échelles, la probabilité, pour un enjeu de type donné, d'atteindre un certain niveau de dommages en fonction d'un ou de plusieurs paramètres de l'aléa, est déterminée par des matrices (probabilités discrètes) ou des courbes (probabilités continues) de fragilité

ou de vulnérabilité (*fragility curves* et *vulnerability curves*) pour chaque classe de bâtiments (Figure 17). Elles sont élaborées, soit de manière empirique, à partir des retours d'expérience d'évènements passés, soit à partir de modèles d'analyse mécanique de la résistance des classes de bâtiments.

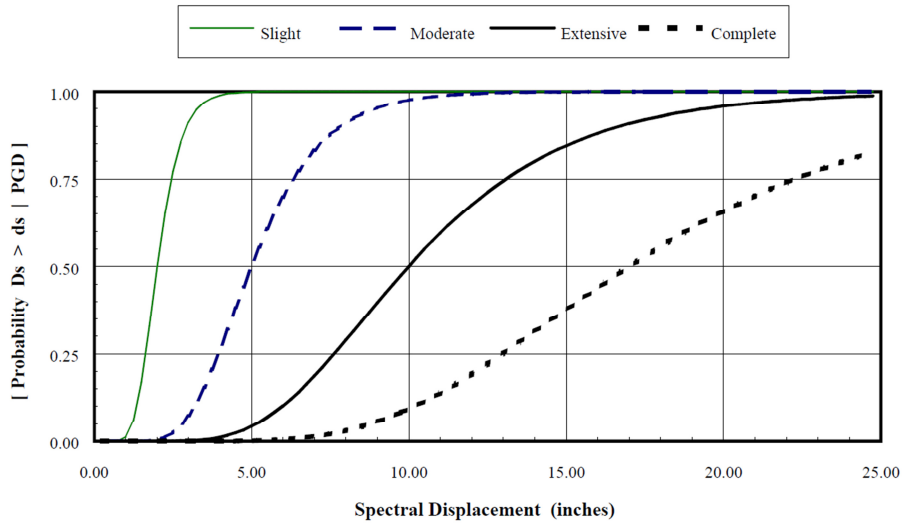


Figure 17 : Exemple de courbes de fragilité d'une classe de bâtiments donnée face au risque sismique indiquant la probabilité d'atteindre les niveaux d'une échelle de dommages de quatre degrés : léger, modéré, important et total en fonction du paramètre accélération spectrale, d'après FEMA, 2003.

Cette approche a d'abord été développée pour le risque sismique (Rossetto et Elnashai, 2003 ; Lagomarsino et Giovinazzi, 2006 ; Sedan et al., 2008), du fait de la relative facilité de modélisation des phénomènes mécaniques d'endommagement, et du risque important d'effondrement des bâtiments lors des séismes, mettant en danger les personnes y habitant. En effet, pour le risque sismique, le nombre de bâtiments détruits est un indicateur du nombre potentiel de victimes d'un évènement, c'est donc le principal objectif des évaluations de dommages. De plus, la faible fréquence d'occurrence des séismes importants fait que les évaluations *ex post* des dommages sont souvent réalisées pour des évènements historiques, pour lesquels on dispose de peu de données économiques.

L'approche a toutefois été adaptée à d'autres aléas et des études ont développé des courbes de fragilité pour les inondations (Schwarz et Maiwald, 2008 ; Mebarki et al., 2012) ou pour les tsunamis (Peiris, 2006 ; Reese et al., 2007 ; Garcin et al., 2008 ; Valencia et al., 2011). À ce jour, aucune étude n'a développé cette méthodologie pour le risque de submersion marine.

Pour une automatisation de la prédiction des dommages à l'aide des courbes de fragilité, de nombreux programmes informatiques ont été développés, le plus complet étant sans doute le logiciel américain HAZUS® de la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), qui évalue les dommages des séismes, des inondations et du vent causé par les ouragans (FEMA,

2003). On peut également citer la plateforme CAPRA© (Marulanda et al., 2013) qui a été développée pour faciliter l'évaluation des risques sismique, d'inondation, de mouvement de terrain, de vent cyclonique et de submersion marine. En France, le logiciel ARMAGEDOM©, développé par le BRGM, est utilisé pour l'estimation des dommages aux bâtiments et aux personnes pour le risque sismique (Sedan et Mirgon, 2003 ; Sedan et al., 2013).

La plupart de ces programmes proposent, à partir de l'évaluation physique des dommages réalisée, une étape supplémentaire d'estimation des pertes économiques directes liées à ces dommages. Le lien entre les niveaux d'endommagement physique évalués et le coût des dommages est réalisé, une fois de plus, sur la base des retours d'expérience ou d'avis d'experts. En risque sismique, les travaux de J. Bommer et al. (2002) et de S. Tyagunov et al. (2006) donnent des exemples d'évaluation d'un « taux d'endommagement » des bâtiments, qu'il faut rapporter à la valeur économique des biens pour déterminer le coût des dommages d'un évènement (Figure 18).

Damage grade	Damage ratio, %	Central damage factor, %
Grade 0: No damage	0	0
Grade 1: Negligible to slight damage	0–1	0.5
Grade 2: Moderate damage	1–20	10
Grade 3: Substantial to heavy damage	20–60	40
Grade 4: Very heavy damage	60–100	80
Grade 5: Destruction	100	100

Figure 18 : Table de conversion entre les niveaux de dommages de l'échelle EMS-98 et le taux d'endommagement des bâtiments, à affecter aux valeurs économiques des bâtiments pour l'évaluation des pertes économiques d'un séisme, d'après Tyagunov et al., 2006.

2.2. L'évaluation économique des dommages

L'autre grand type d'approche d'évaluation des dommages est l'évaluation économique, reliant directement les paramètres de l'aléa au coût des dommages, sans passer par la phase de description physique de l'endommagement. Développée en particulier pour le risque inondation, pour lequel la manifestation physique des dommages est beaucoup moins visible qu'en sismique, elle a également été privilégiée pour ce risque du fait des très importantes pertes économiques liées aux évènements d'inondations, beaucoup plus fréquents que les séismes, mais qui entrainent en général des pertes humaines moins importantes. Les inondations étant le risque le plus coûteux pour de nombreux pays européens, il parait logique que ce soient les assureurs et les économistes qui aient développé les méthodes d'évaluation de leurs dommages.

À la différence des approches physiques, qui ne peuvent quantifier que les dommages matériels, les approches économiques peuvent également évaluer les retombées des dommages sur le système économique d'un territoire affecté. Elles se focalisent en général sur l'évaluation des dommages monétarisables. En effet, des méthodes déjà mentionnées de valorisation des enjeux humains ou environnementaux se développent afin de définir des référentiels de valeur pour les biens non marchands ; elles posent cependant des questions méthodologiques et éthiques qui font qu'elles sont jusqu'à présent relativement peu utilisées dans l'évaluation économique des dommages dus aux risques naturels. Au final, l'évaluation des dommages indirects et intangibles étant complexe, l'évaluation économique se limite le plus souvent aux **dommages directs tangibles**.

L'évaluation économique des dommages se différencie fondamentalement de l'approche physique par le fait qu'elle n'est pas basée uniquement sur le dénombrement des enjeux pouvant être affectés et sur leur sensibilité à l'aléa : elle dépend également de leur valeur économique et donc du niveau de vie de la société en question, dont dépend le potentiel économique des pertes. En effet, à aléa égal, l'inventaire des dommages physiques sera en général très élevé dans un pays en voie de développement (nombre de morts, de bâtiments détruits) alors que les pertes économiques seront relativement faibles ; à l'opposé, dans une société produisant de fortes richesses, le bilan matériel et humain peut être faible alors que l'impact sur l'économie sera conséquent (Munich Re, 2010).

Les évaluations économiques des dommages, ou « modélisations économiques », sont réalisées aussi bien par les assureurs et réassureurs, que par les gestionnaires des risques : les premiers, dans le but de calculer l'exposition d'un portefeuille d'assurance (ensemble des biens assurés par une compagnie) à un ou plusieurs risques, afin de prendre des mesures pour anticiper et gérer cette exposition ; les seconds, pour évaluer l'impact de politiques de gestion et d'aménagement, par le biais d'Analyses Coûts-Bénéfices (ACB), à titre d'outils d'aide à la décision pour la mise en place d'actions de prévention les plus pertinentes. Elles comportent en général deux principaux modules :

- Un **module « aléa »** qui estime l'intensité d'un ou de plusieurs paramètres physiques de l'aléa ; pour le risque inondation, la hauteur d'eau est le paramètre le plus souvent utilisé.
- Un **module « dommages »** qui calcule la valeur monétaire des dommages à partir des paramètres de l'aléa déterminés par le module précédent et des caractéristiques de vulnérabilité des enjeux exposés.

2.2.1. L'évaluation des dommages chez les assureurs

L'évaluation économique des dommages réalisée dans le secteur de l'assurance a pour objectif de déterminer le coût probable des catastrophes à venir, afin de permettre aux assureurs :

- de définir la tarification des primes d'assurance,
- d'estimer les montants à provisionner afin de pouvoir respecter leurs engagements de couverture des sinistres auprès de leurs assurés,
- de contrôler les accumulations de risques et de les éviter en diversifiant les risques couverts,
- de définir leurs besoins en termes de transfert de risque vers les réassureurs,
- de répondre à des règles comptables afin de satisfaire les exigences des actionnaires, des investisseurs et des agences de notation (RMS, 2008 ; Voronkoff, 2010 et 2011).

Dans ce cadre, les deux modules « aléa » et « dommages » ne suffisent pas et sont suivis par un module actuariel et financier (Chávez-López et Zolfaghari, 2010 ; Zolfaghari, 2010) dont l'objectif est d'intégrer à l'analyse les spécificités des polices d'assurance et des traités de réassurance, telles que les notions de franchise, de taux de réassurance et de rétention. L'assureur cherche donc à évaluer, au-delà des dommages, les pertes assurées et le risque financier pour son activité (Figure 19).

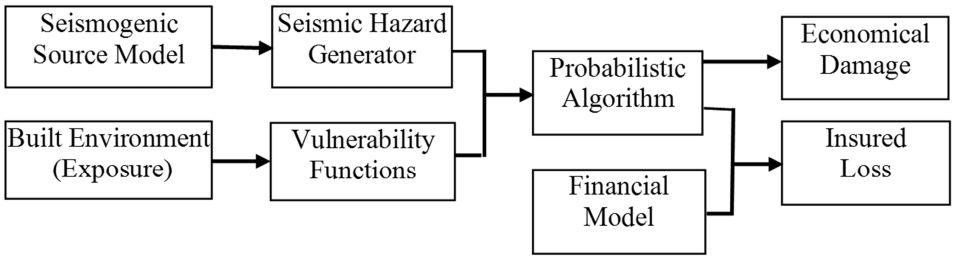


Figure 19 : Schéma d'un modèle d'évaluation des dommages dus aux séismes dans le secteur de l'assurance, d'après Zolfaghari, 2010.

La modélisation des dommages, et en particulier le module « aléa », peut être basée soit sur une méthode dite déterministe, soit sur une méthode probabiliste :

- L'approche **déterministe** consiste à analyser un scénario d'évènement naturel, le plus souvent un évènement réel historique, ou un évènement parmi les plus extrêmes possibles d'après les connaissances disponibles sur la zone d'étude. C'est à partir de l'aléa estimé pour ce scénario que seront évalués les dommages. Le résultat de cette analyse est le coût maximum probable d'une catastrophe ou *Probable Maximum Loss* (PML) qui donne une information sur le risque dans la zone d'étude.

- L'approche **probabiliste** consiste à créer, sur la base de l'analyse des évènements passés, une base de données simulant un très grand nombre d'évènements fictifs, dits « stochastiques » ou aléatoires, qui pourraient affecter la zone d'étude. Chaque évènement est défini par sa fréquence de survenance probable. L'évaluation des dommages étant réalisée pour chacun des évènements de ce catalogue, le coût de chaque évènement peut être associé à une probabilité d'occurrence. Cette analyse permet de construire une courbe de probabilités de pertes ou *loss Exceedance Probability curve* (*EP curve*), basée sur l'approche de R. Farmer (1977), qui permet de déduire le Coût Moyen Annuel (CMA) ou *Average Annual Loss* (AAL) et la probabilité annuelle de dépassement d'un coût donné (Grossi et Kunreuther, 2005 ; RMS, 2008 ; Figure 20).

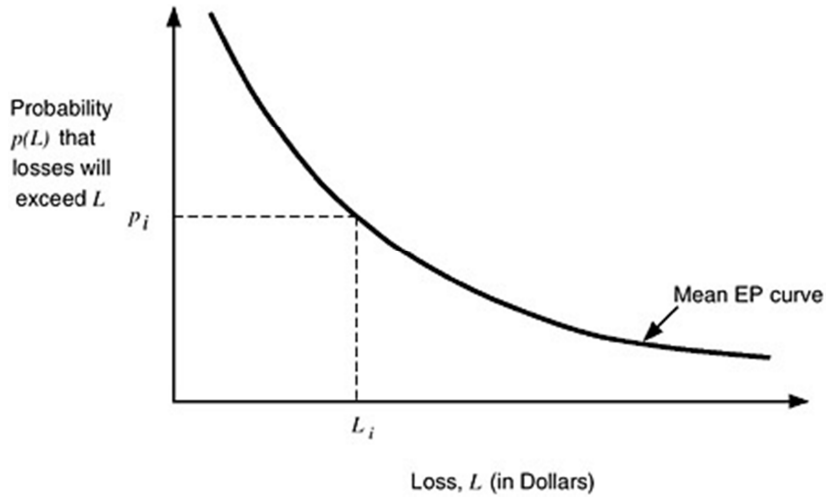


Figure 20 : Courbe de probabilités de pertes (*EP curve*), d'après Grossi et Kunreuther, 2005.

C'est cette seconde approche qui est privilégiée dans le secteur de l'assurance par les agences spécialisées dans la modélisation des pertes. En effet, bien que faisant appel à des modèles sophistiqués et demandant une importante puissance de calcul, cette méthode est la seule qui permet d'évaluer les probabilités de pertes financières sur lesquelles sont basées les stratégies de gestion des assureurs.

2.2.2. L'évaluation de l'impact des politiques publiques de gestion des risques

D'un autre côté, les évaluations économiques réalisées par les gestionnaires des risques ont pour objectif principal l'évaluation de l'impact et de l'efficacité de politiques de gestion des risques et d'aménagement, telles que la construction d'ouvrages de protection contre les inondations, par exemple, par le biais de l'outil d'**Analyse Coûts-Bénéfices (ACB)** (Hubert et Ledoux, 1999).

L'ACB repose sur le principe simple de la comparaison des coûts de mise en œuvre d'une mesure et des bénéfices que l'on peut en retirer. Dans le cas d'une mesure de gestion des risques naturels, les « bénéfices » correspondent aux dommages évités grâce à la mesure prise. Les dommages doivent donc être évalués dans deux situations : la situation avec et la situation sans aménagement. La différence de coût des dommages potentiels entre ces deux situations représente les « bénéfices », qui peuvent être comparés à l'investissement nécessaire à l'aménagement. Plusieurs actions de gestion peuvent également être comparées entre elles par leurs coûts de mise en œuvre ainsi que leurs dommages évités respectifs, afin de pouvoir les hiérarchiser et choisir l'option la plus efficace plus « rationnellement » et en toute transparence (Munier et al., 1997 ; Treich, 2005 ; MEDAD/D4E, 2007 ; CEPRI, 2010 et 2011).

Pour pouvoir évaluer rigoureusement la pertinence économique d'une mesure de gestion des risques, il ne faut pas seulement comparer à ses coûts les dommages évités lors d'un scénario d'évènement, mais ceux de tous les évènements susceptibles de se produire pendant la durée de vie de l'aménagement ou de la mesure en question. Une ACB passe donc également nécessairement par une évaluation probabiliste de l'aléa et des dommages, dont l'objectif est de calculer le coût moyen annuel probable aussi bien à partir d'évènements fréquents n'entraînant que des dommages limités, que d'évènements dont la période de retour est supérieure à la durée de vie de l'ouvrage, mais dont le potentiel de dommages évités est très élevé.

Le résultat de cette évaluation des pertes de plusieurs évènements de probabilité d'occurrence connue se visualise par une courbe fréquence-dommages du type, une fois de plus, de la courbe de R. Farmer (1977). Le calcul de l'aire située sous la courbe fréquence-dommages est appelé le Dommage Moyen Annuel (DMA), qui est potentiellement réduit par la mesure de protection envisagée. Après l'évaluation des dommages selon les situations initiales, et après aménagement, on peut quantifier le Dommage Évité Moyen Annuel (DEMA), qui correspond à l'aire située entre les deux courbes fréquence-dommages (Figure 21). Ce DEMA est ensuite rapporté à la durée de vie estimée de la mesure en question, afin d'évaluer les bénéfices probables de cet aménagement. La Valeur Actualisée Nette (VAN) du projet est la différence entre les bénéfices et les coûts de la mesure de protection envisagée. Si celle-ci est positive, la mesure peut être considérée comme économiquement pertinente ou « rentable ». L'exercice d'ACB impliquant la comparaison de coûts et de bénéfices s'échelonnant dans le temps, un recours aux méthodes d'actualisation est nécessaire (Treich, 2005 ; Commissariat Général du Plan, 2005 ; MEDDTL/CGDD/SEEIDD, 2011).

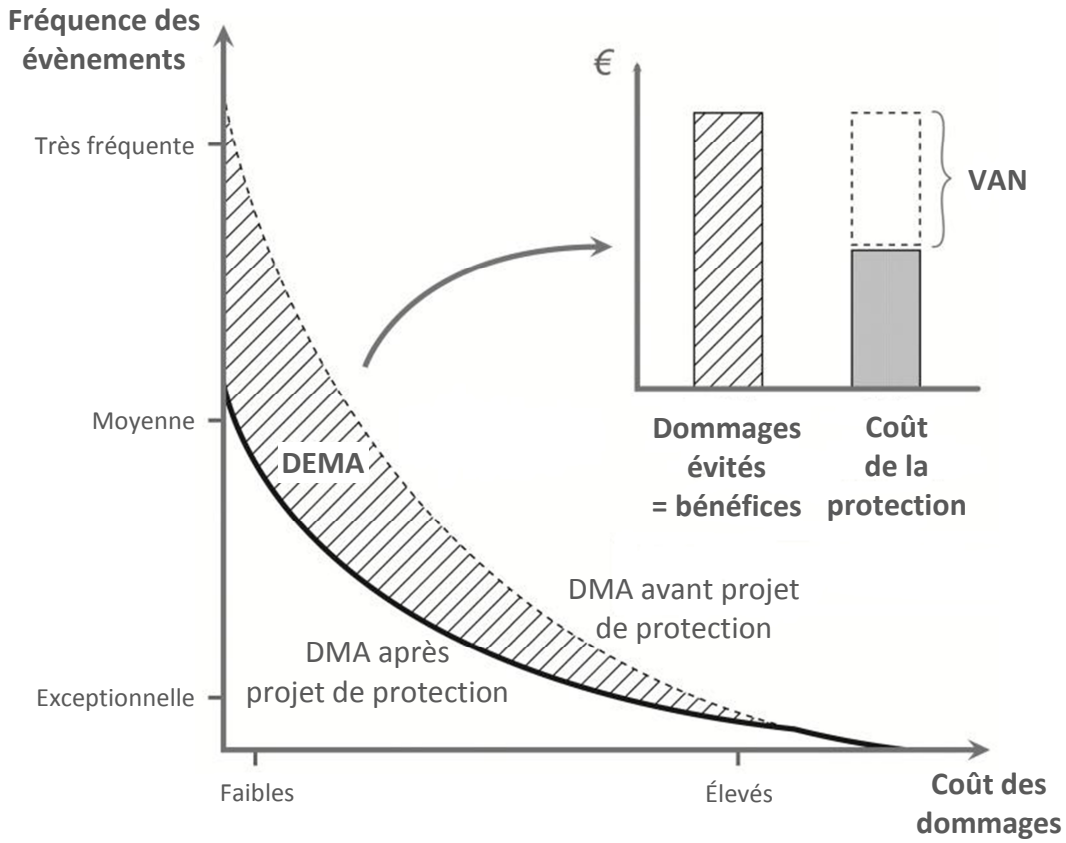


Figure 21 : Schéma de du principe de l'Analyse Coûts-Bénéfices représenté sur la courbe fréquence-dommages, modifié d'après MRN, 2012.

La méthode d'ACB, de par sa relative difficulté technique de mise en œuvre, et du fait de critiques sur la limite marchande de son application (non prise en compte des impacts humains et environnementaux), a été très peu utilisée comme outil d'aide à la décision pour l'évaluation des politiques publiques en France, en comparaison avec les pays anglo-saxons (Hubert et Ledoux, 1999 ; Treich, 2005 ; Vinet, 2007 et 2010). Avec la transposition de la Directive européenne Inondation de 2007, son utilisation sera obligatoire à partir de 2015, pour les projets ou programmes envisageant la mise en place d'infrastructures lourdes. Cette orientation se traduit aujourd'hui concrètement, en France, dans le cadre de la seconde génération de l'appel à projet PAPI (Programmes d'Action de Prévention des Inondations[8]) et du PSR (Plan Submersions Rapides) (CEPRI, 2011 ; MEDDTL/DGPR, 2011 ; MEDDTL, 2011).

2.2.3. L'outil de l'évaluation économique - les fonctions d'endommagement

Que ce soit pour une évaluation déterministe ou probabiliste des dommages, et pour une application dans le secteur de l'assurance ou des politiques publiques (ACB), le module

[8] Les projets de gestion du risque inondation répondant à l'appel d'offre et au cahier des charges PAPI sont évalués par un comité de labellisation, qui permet aux projets de bénéficier du soutien financier de l'État.

« dommages » des modèles d'évaluation des dommages est un point critique de l'évaluation économique des dommages, puisque c'est celui qui définit la valeur des dommages en fonction des paramètres de l'aléa et des caractéristiques des enjeux. L'outil le plus couramment utilisé pour ce module est la **fonction d'endommagement**.

Une fonction d'endommagement est une courbe ou fonction mathématique qui permet de relier l'endommagement des enjeux d'une classe considérée à l'intensité d'un ou de plusieurs paramètres de l'aléa. Connues également sous le nom de fonctions ou courbes de dommages (*damage functions* ou *damage curves*), elles ont principalement été développées en application au risque d'inondation fluviale : on parle alors de *stage-damage curves* ou de *depth-damage curves* (White, 1945 et 1964 ; Smith, 1994). Elles ont toutefois ensuite été appliquées à d'autres aléas comme les tempêtes (dommages dus au vent) (Stewart, 2003 ; Heneka et Ruck, 2008).

Les fonctions d'endommagement peuvent être construites, soit de manière analytique (ou synthétique) sur la base de « jugement d'expert », par exemple à partir de l'expérience et de la réflexion de praticiens du domaine de la construction pour les enjeux bâtis, soit de manière empirique, sur la base des données d'observations empiriques collectées lors des retours d'expérience (REX) des évènements passés. Les deux approches ont leurs avantages et leurs inconvénients : alors que la première méthode est très théorique et qu'elle ne peut que difficilement quantifier l'incertitude de l'évaluation des dommages produits, la seconde méthode est confrontée au problème de la rareté et de la difficulté d'accessibilité des données de retour d'expérience nécessaires à la démarche (Merz et al., 2010).

Les fonctions d'endommagement diffèrent des courbes de fragilité dans le sens où elles ne représentent pas la probabilité d'atteindre un certain niveau de dommages, mais directement l'endommagement du type d'enjeu considéré, selon l'intensité du paramètre de l'aléa en question. Cet endommagement peut être exprimé en valeur absolue (monétaire) ou relative (pourcentage du bien endommagé, en termes de valeur totale). D'un côté, les fonctions d'endommagement monétaires ont l'avantage d'être plus simples à utiliser, mais elles ne sont applicables qu'à des types d'enjeux dont la valeur est semblable à ceux pour lesquels le modèle a été construit, et nécessitent des recalibrations régulières du fait des évolutions des prix dans le temps. D'un autre côté, les fonctions relatives prédisant un « taux d'endommagement » des biens ont l'avantage d'être moins dépendantes des spécificités locales des enjeux et des évolutions temporelles de leurs prix, mais demandent une collecte supplémentaire de données sur les valeurs des biens afin de pouvoir déterminer un montant économique des dommages (Messner et al., 2007 ; Merz et al., 2010). La Figure 22 illustre le

fait que les fonctions d'endommagement existantes, bien qu'elles cherchent à modéliser les mêmes phénomènes, peuvent prendre une importante variété de formes.

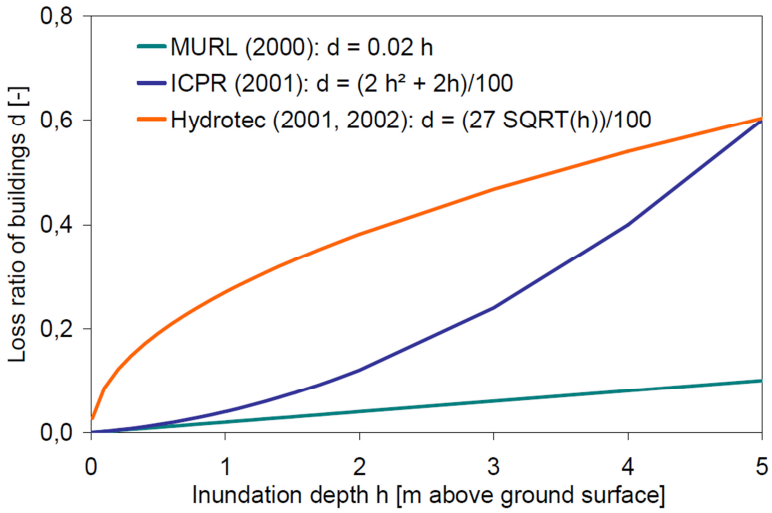


Figure 22 : Exemples de fonctions d'endommagement tirées de la littérature allemande pour le risque inondation, exprimant les dommages en valeurs relatives en fonction de la hauteur d'eau (Merz et al., 2010).

Le principe de l'évaluation des dommages par l'utilisation de fonctions d'endommagement peut s'appliquer à différentes échelles et niveaux de résolution et de précision (Gewalt et al., 1996 ; Messner et al., 2007) :

- À une échelle globale ou « échelle macro » (pour macroscopique, en référence à l'espace touché par l'évènement catastrophique), la zone couverte est de la taille d'un ou de plusieurs pays, l'évaluation est agrégée, et les objets considérés sont généralement des unités administratives (communes, régions, pays).
- À une échelle régionale ou « échelle méso », la zone couverte est une portion de la zone affectée par l'évènement et les objets considérés sont souvent des unités d'occupation du sol identiques (tirées de cartographies telles que l'outil *Corine Land Cover*[9]). Une fonction d'endommagement est donc utilisée pour chaque type d'occupation du sol considéré, renvoyant une valeur de dommages par unité de surface (€/m²) en fonction de l'intensité de l'aléa (hauteur d'eau).
- À une échelle locale ou « échelle micro », la zone couverte se limite à une ou à quelques communes, et les unités étudiées sont les objets individuels soumis à l'aléa (personnes, bâtiments, infrastructures, parcelles agricoles, etc.), classés dans des typologies pour lesquelles les fonctions d'endommagement sont disponibles.

[9] http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/li/1825/1097/occupation-sols-corine-land-cover.html

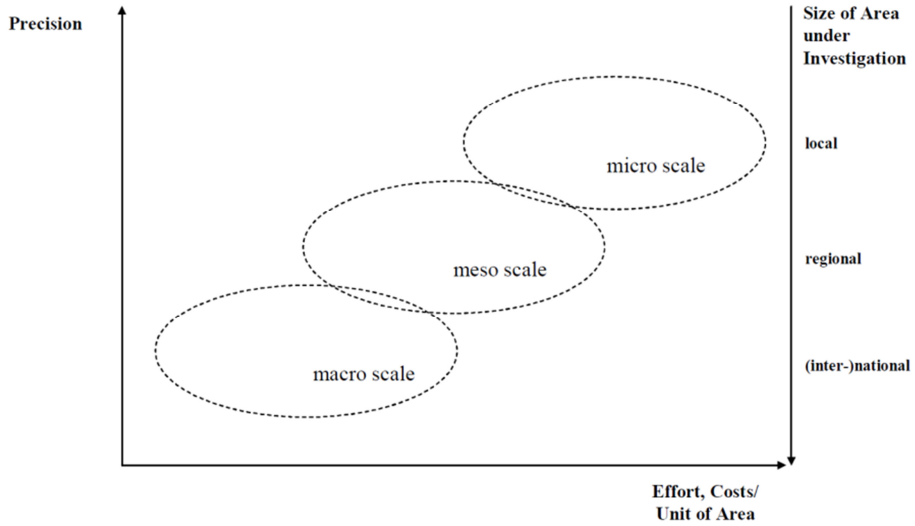


Figure 23 : Schéma des différentes échelles d'évaluation des dommages, en lien avec la taille de la zone d'étude, les unités évaluées et la précision attendue, d'après Messner et al., 2007.

L'échelle d'une évaluation des dommages dépendra donc d'un compromis entre la zone à couvrir, la précision désirée et le type de fonctions d'endommagement disponible. Elle dépendra également du niveau de détail des données accessibles sur la caractérisation de l'aléa et des enjeux. La comparaison de résultats d'évaluations à différentes échelles n'est donc pas évidente, les données d'entrée et l'incertitude des résultats n'étant pas identiques d'un cas à l'autre (Merz et al., 2010).

Il faut préciser qu'un modèle d'évaluation économique des dommages n'est en général pas constitué d'une seule fonction d'endommagement, mais plutôt d'un « jeu de fonctions » liées à différentes catégories d'enjeux (par ex. logements, entreprises, exploitations agricoles, etc.) de différentes caractéristiques de vulnérabilité et éventuellement de différentes valeurs. Parmi les études les plus reconnues ayant développé des fonctions d'endommagement pour le risque inondation, l'approche la plus aboutie est certainement celle du *Flood Hazard Research Centre* (FHRC), de l'Université du Middlesex à Londres (Royaume-Uni). Cette équipe édite en 2005 le *Multi-Coloured Manual* (Penning-Rowsell et al., 2005), une compilation de leurs travaux de recherche sur l'évaluation des dommages et la gestion des risques menées depuis les années 70 (Penning-Rowsell et al., 1977 ; Parker et al., 1987). Il contient des recommandations pratiques pour les gestionnaires des risques et un jeu de fonctions d'endommagement pour l'habitat résidentiel anglais (mis à jour en 2010).

On peut également citer les travaux de l'*United States Army Corps of Engineers* (USACE), qui développe les fonctions d'endommagement présentes dans le logiciel commercial HAZUS® évoqué précédemment (USACE, 1988 ; FEMA, 2003), le modèle allemand FLEMO (Flood Loss Estimation MOdel - Thieken et al., 2008 ; Kreibich et al., 2010), ainsi que de nombreux autres

travaux, dont les projets européens FLOODsite et CONHAZ font une très bonne synthèse (Messner et al., 2007 ; Meyer et al., 2012).

En France, les travaux de thèse de J.-P. Torterotot (1993), qui a produit des fonctions d'endommagement pour les inondations sur le bâti résidentiel, font référence et ont été utilisées pour la plupart des évaluations. Il y a peu d'études récentes sur la construction de fonctions d'endommagement en France (Grelot, 2004 ; MEDAD/D4E, 2007 ; Erdlenbruch et al., 2008 ; Grelot et al., 2008 ; Eleutério et al., 2008 ; Eleutério, 2012). Ce n'est que ces dernières années que de nouveaux travaux de ce type ont pris forme au sein d'un groupe de travail piloté par le Ministère de l'Environnement, qui a produit un guide méthodologique de recommandations pour la réalisation d'ACB dans le cadre des projets PAPI (CEPRI, 2010)[10].

Les fonctions d'endommagement étant liées à l'évaluation économique de dommages, dont les valeurs sont très fluctuantes entre différents pays, et même d'une région à une autre, ainsi que dans le temps, il est impossible d'utiliser en France les modèles réalisés à l'étranger (contrairement aux modèles d'évaluation physique des dommages, qui sont plus facilement transposables). Les travaux nationaux ayant été peu nombreux jusqu'à présent, et aucun n'ayant concerné spécifiquement le risque de submersion marine, il y a aujourd'hui un manque de méthodologies opérationnelles pour l'évaluation des coûts de ce risque en France.

2.2.4. Les paramètres de l'aléa utilisés par les fonctions d'endommagement

Quel que soit le type de modèle d'évaluation des dommages utilisé, y compris les fonctions d'endommagement, la détermination du taux d'endommagement ou de la valeur des dommages se fait à partir de l'intensité d'un ou de plusieurs paramètres de l'aléa qui expliquent les dommages sur les enjeux considérés.

Pour pouvoir définir les paramètres de l'aléa à utiliser pour prédire l'endommagement, il faut au préalable étudier les processus de l'aléa générant les dommages. Une synthèse de ces processus pour les inondations, au sens large, proposée par I. Kelman (2002, ou Kelman et Spence, 2004), est résumée dans le Tableau 2.

[10] Une nouvelle version de ce guide, qui intègre l'ACB dans la démarche plus globale d'Analyse Multicritères, est en cours d'élaboration ; une version provisoire a été mise en consultation publique et testée en 2012 (MEDDE/CGDD, 2012), la version finale sera publiée en 2014.

- Actions hydrostatiques
  - pression latérale exercée par la différence du niveau d'eau de part et d'autre d'un élément,
  - imprégnation de l'eau dans un élément et ascension par capillarité,
  - effet de flottaison dû à la poussée d'Archimède sur les structures inondées.
- Actions hydrodynamiques
  - pression de l'eau exercée par la vitesse moyenne du courant,
  - effet supplémentaire dû aux accélérations et aux changements de direction localisés du courant (pentes, étranglements),
  - effet supplémentaire dû aux turbulences dans la circulation de l'eau (remous, tourbillons, clapot de surface, etc.),
  - effet du flux et du reflux des vagues sur la variation de la pression hydrostatique,
  - effet du déferlement des vagues sur la pression hydrodynamique.
- Action de l'érosion : déstabilisation du bâti par affouillement des fondations
- Actions du charriage de débris
  - effet d'accumulation de sédiments ou de débris contre le bâti sur la pression hydrostatique,
  - effet d'augmentation de la densité du fluide chargé en sédiments sur la pression hydrostatique et hydrodynamique,
  - percussion de débris avec le bâti (de l'extérieur ou de l'intérieur des bâtiments).
- Actions non-physiques (les éléments peuvent être affectés par ces actions sans être entrés en contact avec l'eau)
  - actions chimiques (corrosion),
  - actions biologiques (moisissure).

Tableau 2 : Inventaire des processus d'endommagement liés aux inondations, d'après Kelman, 2002 et Kelman et Spence, 2004.

De par cette classification des processus d'endommagement, un certain nombre de paramètres de l'aléa peuvent être pris en compte pour évaluer les dommages potentiels des inondations (Gissing et Blong, 2004 ; Merz et al., 2010) :

- la hauteur d'eau,
- la vitesse ou le débit du courant,
- la vitesse de montée de l'eau,
- la durée de l'immersion,
- la hauteur et la période des vagues,
- la charge en sédiments et en débris de l'eau,
- la salinité ou la présence de polluants dans l'eau.

En pratique, la plupart des fonctions d'endommagement pour le risque d'inondation fluviale est basée uniquement sur la hauteur d'eau. En effet, c'est à la fois le paramètre le plus facile à mesurer après une catastrophe, grâce aux traces laissées par l'eau stagnante, et également le plus facile à modéliser, l'ensemble des modèles numériques hydrauliques d'inondation restituant ce paramètre (Kelman et Spence, 2004 ; Messner et al., 2007 ; Merz et al., 2010).

La durée de l'immersion est le second paramètre le plus souvent pris en compte. Certains modèles d'évaluation des dommages établissent une variante de chaque fonction

d'endommagement pour les durées d'inondations différentes, au-dessus ou en dessous d'un seuil de 12, 24 ou 48 h. Les autres paramètres sont en général seulement cités comme pouvant avoir un impact sur l'endommagement mais ne sont pas utilisés dans les évaluations, de par la difficulté de les estimer quantitativement ou de les modéliser à partir des outils actuels (Merz et al., 2010).

Une exception est la vitesse du courant, à laquelle plusieurs auteurs s'intéressent (par ex. Clausen, 1989 ; Schwarz et Maiwald, 2008 ; Kreibich et al., 2009 ; Pistrika et Jonkman, 2010). Ces derniers démontrent qu'une relation existe entre ce paramètre et les dommages, mais que pour évaluer ces derniers, il est plus efficace de les corréler, non pas directement à la vitesse, mais à des paramètres de l'aléa composés par la hauteur d'eau et la vitesse du courant, comme :

- L' « intensité de l'inondation » (*flood intensity*) h*v (en m^2/s)
- La « force du courant » (*flow force*) $h*v^2$ (en m^3/s^2)
- L' « énergie hydraulique » (*energy head*) $h+v^2/2g$ (en m)

Avec :
h : la hauteur d'eau (m)
v : la vitesse du courant (m/s)
g : accélération de la pesanteur = 9,81 m/s^2.

Le premier paramètre, l' « intensité de l'inondation », est étudié par L. K. Clausen (1989). Il met en place trois niveaux de dommages pour les bâtiments, appelés « dommages d'inondation », « dommages structuraux partiels », et « destruction totale » (« inundation damage », « partial damage » et « total destruction »), qui sont atteints à partir de seuils de vitesse du courant de 2 m/s et de seuils d'intensité de l'inondation de 3 et de 7 m^2/s (Figure 24). À partir de modélisations numériques de la submersion marine de l'ouragan Katrina, A. K. Pistrika et S. N. Jonkman (2010) montrent que ces seuils, même partiellement modifiés, n'expliquent pas complètement les dommages observés en 2005 à la Nouvelle-Orléans.

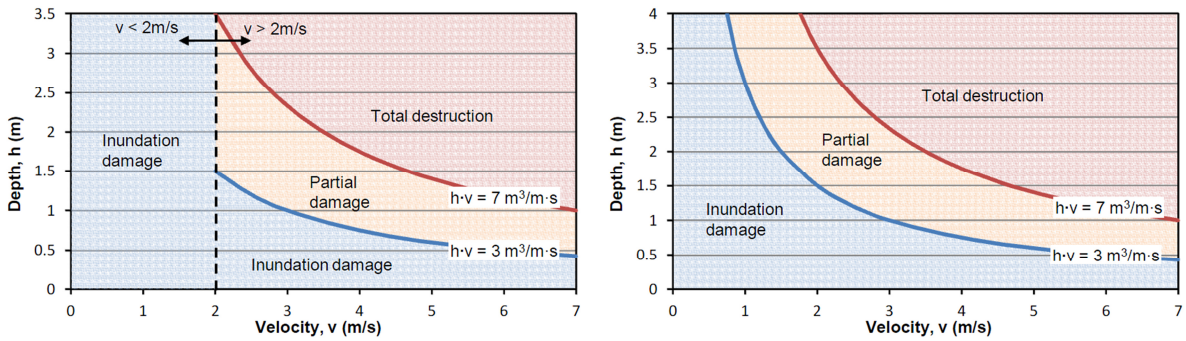


Figure 24 : Graphiques des seuils séparant les trois niveaux de dommages en fonction du paramètre intensité de l'inondation, proposés par Clausen, 1989 et Pistrika et Jonkman, 2010, d'après Dassanayake et al., 2012.

Concernant les paramètres « force du courant » et « énergie hydraulique », H. Kreibich et al., (2009) déterminent qu'ils peuvent avoir une influence pour l'évaluation physique des dommages aux bâtiments et aux routes, mais que leur impact dans l'évaluation économique des dommages reste généralement faible (Figure 25).

impact parameters	damage types				
	structural damage of residential buildings	structural damage of road infrastructure	monetary loss to residential buildings	monetary loss to road infrastructure and companies	business interuption and disruption duration
flow velocity	NO	STRONG	WEAK	NO	NO
water depth	STRONG*	MEDIUM	MEDIUM	NO	MEDIUM
energy head	STRONG*	MEDIUM	MEDIUM	NO	WEAK
indicator for flow force	WEAK*	STRONG	WEAK	NO	NO
intensity	WEAK*	STRONG	WEAK	NO	WEAK

Figure 25 : Évaluation qualitative de l'influence des paramètres hauteur d'eau, vitesse du courant, intensité de l'inondation, force du courant et énergie hydraulique sur les dommages sur différents types d'enjeux, d'après Kreibich et al., 2009.

En effet, d'après M. H. Middelmann-Fernandes (2010), la vitesse du courant n'est pas pertinente pour l'évaluation du coût des dommages aux bâtiments si elle n'atteint pas une intensité suffisante pour provoquer des dommages structuraux sur ces derniers. Cependant, dans les cas de fortes vitesses entrainant des destructions de bâtiments, elle permet d'expliquer les coûts liés aux dommages structuraux. La difficulté est donc de mettre en place une approche prenant comme paramètres de l'aléa à la fois la hauteur d'eau et la vitesse du courant : ce but peut être atteint par la construction de modèles multivariés pour l'évaluation des dommages.

2.2.5. Les modèles multivariés d'évaluation économique des dommages

Les fonctions d'endommagement, de par leur aspect intuitif, la possibilité de les adapter à toutes les échelles d'évaluation, et leur simplicité d'utilisation, se sont à l'heure actuelle imposées comme l'approche classique pour l'évaluation économique des dommages, en particulier pour le risque inondation.

Cependant, leur **méthode univariée** de définition des relations entre l'aléa et les dommages possède de nombreux défauts : on a notamment vu que les coûts sont exprimés en fonction

d'un seul paramètre de l'aléa (le plus souvent la hauteur d'eau) qui n'explique pas tous les processus d'endommagement. Pour une évaluation précise des dommages, les enjeux doivent alors être divisés en de nombreuses classes, selon leurs différentes caractéristiques de vulnérabilité, auxquelles s'applique la fonction la plus adaptée. Le nombre de fonctions d'un modèle d'endommagement étant limité, cette méthode restreint le nombre de caractéristiques de vulnérabilité des enjeux dont on peut tenir compte, ainsi que celui des facteurs de contexte qui peuvent aggraver ou atténuer les dommages (comme la perception et la connaissance du risque qu'ont les personnes exposées, l'existence d'une alerte, l'efficacité des procédures d'évacuation, etc.).

D'un autre côté, des **méthodes statistiques multivariées**, capables d'exprimer les variations du coût des dommages en fonction de nombreux paramètres, commencent à être utilisées pour l'évaluation des pertes de catastrophes naturelles. On peut notamment citer la méthode de régression multiple et les arbres de décision.

La régression multiple est la méthode statistique la plus souvent utilisée pour l'étude de relations multivariées. En économétrie, la régression multiple est souvent employée pour l'évaluation immobilière, c'est-à-dire la modélisation de la valeur marchande d'un bien à partir de ses différentes caractéristiques, aussi bien intrinsèques (type, taille, état du bâtiment, éléments de confort, etc.), que se rapportant à son environnement (localisation, paysage, accessibilité, etc.) (par ex. Des Rosiers, 2001 ; Fritsch, 2007 ; Thériault et al., 2007). Aussi désignée sous le nom de méthode des prix hédoniques en économie de l'environnement, cette approche considère que la valeur d'un bien résulte de la somme des prix que l'on peut attribuer à ses différentes caractéristiques. Elle est donc utilisée pour évaluer la valeur économique d'aménités environnementales : par exemple, d'après le principe des préférences révélées, pour un bien immobilier, la valeur de la vue sur mer peut être évaluée par la différence de prix entre des biens bénéficiant de cette caractéristique et d'autres qui n'en bénéficient pas, toutes choses égales par ailleurs, c'est-à-dire quand toutes les autres caractéristiques de ces biens sont identiques (Rosen, 1974 ; MEDD/D4E, 2005).

La régression multiple a également été récemment employée pour la conception de modèles multivariés d'évaluation des dommages, intégrant à la fois différentes caractéristiques de l'aléa et des enjeux exposés. Ces travaux portent sur le risque inondation (Zhai et al., 2005 ; Prettenthaler et al., 2010) ou sur les dommages liés aux ouragans (Kim et al. 2013).

Une dernière approche consiste à utiliser des arbres de décision pour la prédiction d'une variable qualitative ou quantitative en fonction de plusieurs autres informations. Elle se base notamment sur l'algorithme de construction d'arbres de classification et de régression CART

(*Classification And Regression Trees*), grâce auquel les arbres de décision sont construits partir de jeux de données empiriques (Breiman et al., 1984). Les arbres de décision sont utilisés dans le domaine de la médecine (Lemon et al., 2003) ou, comme la méthode de régression multiple, en évaluation immobilière (Yu et Wu, 2006). B. Merz et al. (2013) ont récemment utilisé cette méthode pour l'évaluation de dommages pour le risque inondation.

Il existe deux principales méthodes d'évaluation des dommages des risques naturels : une approche physique et une approche économique. Ces différences d'approche sont dues aux différentes manifestations de l'aléa et des dommages produits : les risques impliquant des dommages à la structure des bâtiments et entrainant un danger pour la vie humaine, sont davantage traités par la première approche, tandis que les risques entrainant les pertes financières les plus importantes sont davantage traités par l'approche économique. La différence vient également de la fréquence des évènements et donc du potentiel de dommages, qui est aussi relié à la quantité de données empiriques à partir desquelles on peut étudier le risque.

Dans le cadre de cette thèse sur les dommages liés aux submersions marines, par analogie avec les inondations et grâce aux données d'assurance disponibles, c'est **l'approche économique** qui est privilégiée, bien que les processus de dommages soient également analysés. À la suite de l'analyse des coûts des dommages à partir des données d'assurance, nous évaluerons l'apport de ces données pour la construction de **modèles empiriques** de prédiction du coût des dommages, basés sur des méthodes statistiques **univariées** et **multivariées**.

L'exploitation de données d'assurance pour l'élaboration de modèles d'endommagements a été entreprise par plusieurs équipes de recherche internationales pour le risque inondation : au Royaume-Uni, à l'aide d'une base de données recueillie à l'Université de Dundee (Black et Evans, 1999), en Allemagne, grâce à la base de données HOWAS 21[11] (Merz et al., 2004 ; Walliman et al., 2012) ou encore au Pays-Bas (Spekkers et al., 2011). Plus récemment, une étude a également été réalisée sur les dommages des ouragans aux États-Unis (Kim et al., 2013) grâce à des données d'assurance. Faute d'accès à des bases de données de ce type, très peu de travaux ont pu être réalisés sur le sujet en France. Nous présentons dans la partie suivante de cette thèse les données disponibles dans le cadre de la présente étude, et les précautions nécessaires requises pour leur utilisation pour l'évaluation des dommages. Un minimum de connaissances sur l'assurance des risques naturels étant tout d'abord

[11] http://dx.doi.org/10.1594/GFZ.SDDB.HOWAS21

requis, en particulier à propos des spécificités du système français, sa présentation est l'objet de la section suivante.

3. L'assurance des risques naturels en France

Les différents types d'assurance sont classés dans deux grandes catégories : l'assurance de personnes, dont les assurances « vie », qui couvrent les personnes physiques contre les accidents corporels, la maladie, l'invalidité ou le décès, et l'assurance de biens et de responsabilités ou **assurances « dommages »** qui couvrent les biens de l'assuré et les préjudices causés à des tiers par l'assuré (responsabilité civile).

L'assurance contre les risques naturels fait partie de la seconde catégorie et est relative aux dommages aux biens uniquement. Ce type d'assurance est défini par un contrat d'indemnité qui donne droit à l'assuré, moyennant le paiement d'une prime, au remboursement d'un préjudice subi. Cette compensation des dommages est appelée l'indemnisation d'assurance. Selon le principe qui prévaut en assurance dommages, l'évaluation de la valeur de **l'indemnisation se base sur la réparation ou le remplacement à l'identique** des biens endommagés ; par définition, l'indemnisation ne peut donc pas dépasser la valeur du préjudice subi.

3.1. L'assurabilité des risques naturels

Selon les principes assurantiels, un risque est **assurable** si les pertes potentielles qu'il peut provoquer sont quantifiables (modélisables en intensité et en fréquence) et si ces pertes peuvent être mutualisées, c'est-à-dire couvertes par les primes payées par l'ensemble des assurés pour ce risque (Chemitte, 2008 ; Zolfaghari, 2010). Il faut donc que le risque soit suffisamment connu et prévisible, et qu'il n'entraine pas de pertes probables trop importantes pour que les primes demandées par l'assureur soient acceptables pour l'assuré, ce qui bien souvent, n'est pas le cas des risques naturels, pour le moins ceux étant considérés comme des risques majeurs.

Une catastrophe naturelle est définie par le Code des Assurances[12] français comme responsable de « dommages matériels directs non assurables ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises ». Un risque non assurable n'étant pas pris en charge par les régimes classiques d'assurance, il n'est soit pas assuré, soit assuré par un dispositif spécifique.

[12] Article L. 125-1.

En France, l'assurance des risques naturels est régie par deux systèmes complémentaires : d'un côté un dispositif assurantiel contractuel classique pour les risques considérés comme assurables, et d'un autre côté le régime Catastrophe Naturelle ou régime « CatNat » dédié à l'indemnisation des risques non assurables (MEEDDAT/CGDD/SEEIDD, 2009 ; MEEDDM/CGDD/SEEIDD, 2010).

Les garanties contractuelles, concernant les risques considérés comme assurables, sont notamment :

- L'assurance **« Tempête-Grêle-Neige » (TGN)** qui comprend les actions directes du vent et les chocs de corps projetés par le vent lors de tempêtes et de tornades, les dommages de la grêle et du gel, du poids de la neige sur les toitures,
- L'assurance des incendies d'origine naturelle tels que les feux de forêt et les feux issus de la foudre,
- L'assurance des dommages électriques créés par les impacts de foudre n'entrainant pas d'incendie,
- L'assurance des dégâts des eaux qui couvre les infiltrations d'eau sous les éléments de toitures par l'effet du vent.

Tandis que les garanties du **régime CatNat** couvrent notamment les risques considérés comme non assurables, dont les dommages :

- Des séismes,
- Des phénomènes liés aux éruptions volcaniques,
- Des mouvements de terrain (gravitaires), incluant les effondrements de cavités souterraines,
- De la sécheresse (mouvements différentiels consécutifs à la déshydratation et la réhydratation des sols),
- Des inondations, incluant les phénomènes de débordement de cours d'eau, de ruissellement, de remontée de nappes phréatiques, de crues et de laves torrentielles et les submersions marines,
- Des évènements cycloniques dans les départements d'outre-mer (au-dessus d'un seuil de vitesse du vent),
- Des avalanches.

Cette classification n'est donc pas liée aux aléas mais à l'impact potentiel des évènements naturels : les dommages dus au vent lors des tempêtes sont donc couverts par la garantie TGN en France métropolitaine, alors que ceux des cyclones sont couverts par le régime CatNat dans les Départements d'Outre-Mer (DOM). Il faut noter que la liste des aléas

couverts par le régime CatNat n'est pas fermée, et que d'autres types d'évènements, si leurs conséquences le justifient, pourraient être ajoutés à cette liste, qui a déjà évolué depuis sa création.

3.2. Le régime CatNat

Le régime CatNat est fondé sur l'**inclusion obligatoire** dans tous les contrats d'assurance « dommages aux biens » d'une garantie contre les événements naturels catastrophiques, toutes les personnes possédant ce type de contrat sont donc obligatoirement assurées contre les risques naturels[13]. Instauré par la loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles, le système est financé par une prime additionnelle (surprime) définie par un pourcentage uniforme de la prime d'assurance « dommages » de base, quelle que soit l'exposition au risque. Il s'appuie donc sur le principe de **solidarité nationale** : tous les assurés, même ceux non exposés aux risques, participent au financement du régime, au même taux que les assurés les plus exposés.

Les dommages subis par les corps de véhicules aériens, maritimes, lacustres et fluviaux, ainsi que par les marchandises transportées et les dommages aux bâtiments en travaux sont exclus du champ d'application du régime CatNat. Les dommages causés aux cultures et aux sols, aux récoltes non engrangées et au cheptel vif hors bâtiments relèvent du régime des calamités agricoles[14].

Ce **système unique de partenariat public-privé** entre les assureurs et l'État français, connait toutefois des modèles proches comme au Danemark ou en Espagne, à l'opposé des systèmes d'assurance et de réassurance de marché existant en Allemagne, en Autriche et au Royaume-Uni (Nussbaum et Chemitte, 2006 ; Gérin et Nussbaum, 2012).

Les recettes issues de la surprime sont réparties entre les assureurs, les réassureurs et le Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs (FPRNM), d'après la Figure 26.

[13] Article L. 125-1 du Code des Assurances.
[14] Articles L. 361-1 à L. 361-21 du Code Rural.

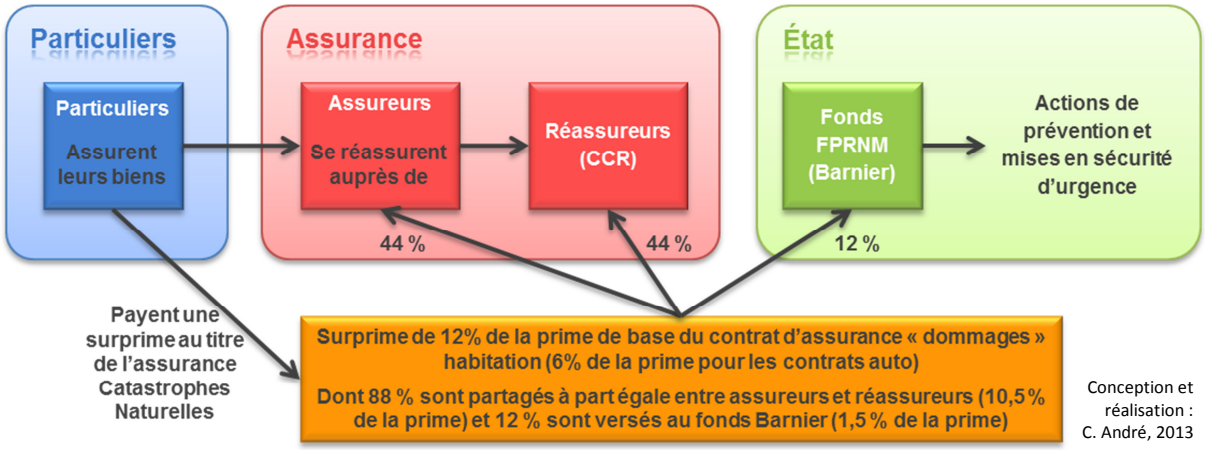


Figure 26 : Schéma des modalités de financement du régime CatNat.

3.3. La réassurance

De manière générale, la réassurance est l'opération par laquelle un assureur transfère une partie de ses risques à un réassureur qui en accepte la charge, dans des conditions fixées par un contrat. La réassurance est donc « l'assurance des assureurs », permettant à ces derniers de mutualiser à leur tour leurs risques. Aucune obligation dans la règlementation n'incite les sociétés d'assurance à choisir un réassureur en particulier dans le cadre du régime CatNat. Cependant, la **Caisse Centrale de Réassurance (CCR)**, société détenue par l'État français, bénéficie de la garantie financière de celui-ci, en cas de catastrophe naturelle dépassant ses capacités de trésorerie[15]. En pratique, l'ensemble des compagnies d'assurance françaises se réassure auprès d'elle pour les catastrophes naturelles en raison de la couverture illimitée proposée (MEEDDAT/CGDD/SEEIDD, 2009 ; MEEDDM/CGDD/SEEIDD, 2010).

Les contrats de réassurance de la CCR pour les catastrophes naturelles se définissent comme suit : les assureurs cèdent exactement 50 % de la surprime touchée dans le cadre du régime CatNat en échange du remboursement de 50 % de leurs indemnisations en cas de sinistre. Pour les risques liés au vent lors des tempêtes (hors système CatNat), les assureurs peuvent choisir de se réassurer auprès du réassureur de leur choix selon des conditions qu'ils fixent ensemble.

Les cotisations annuelles du système CatNat représentent pour les assureurs et les réassureurs 1,4 Md €, tandis que celles liées aux couvertures TGN s'élèvent à 1,3 Md €, sur un total de 15 Md € pour le marché de l'assurance « dommages aux biens » (chiffres 2011 - Gérin et Nussbaum, 2012). Pour ces deux systèmes, les cotisations sont globalement supérieures aux charges du régime (le coût moyen des dommages liés aux inondations, qui

[15] Loi n° 82-600 du 13 juillet 1982.

constituent le risque le plus dommageable couvert par le régime CatNat, est de l'ordre de 400 à 500 M € par an pour les assureurs) ; le système est donc équilibré. Cependant, on observe une très forte « volatilité » des dommages, ce qui signifie que les variations d'amplitude des dommages d'une année sur l'autre sont très importantes (Figure 27). En effet, certaines années, du fait de la survenance d'évènements majeurs, les dommages dépassent largement les recettes : par exemple, les tempêtes de 1999 sont estimées avoir coûté aux assureurs 12 Md € (coûts actualisés en 2011, Gérin et Nussbaum, 2012).

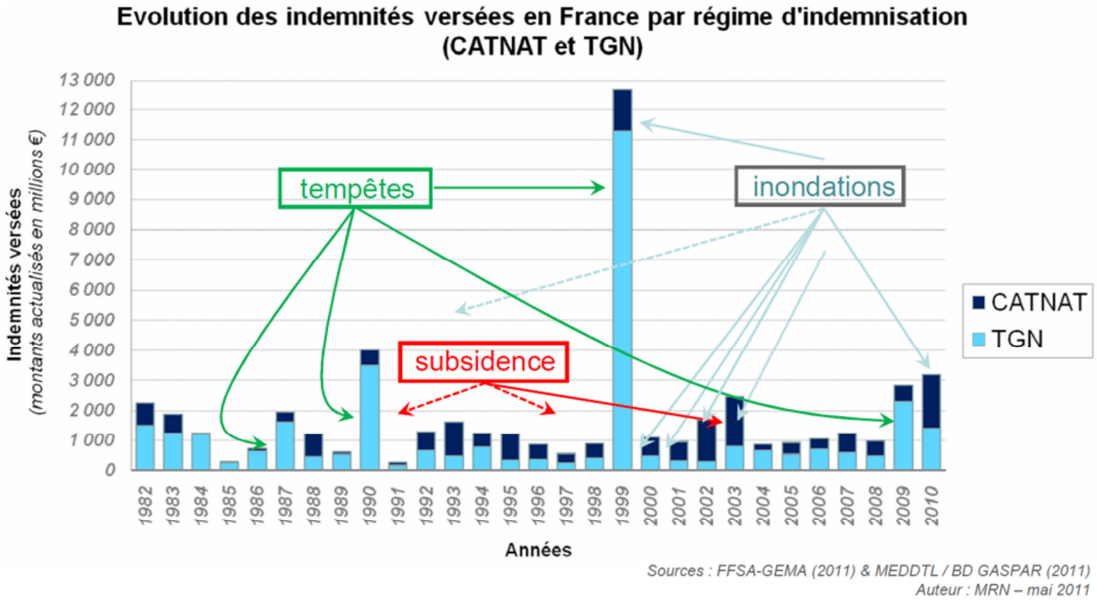


Figure 27 : Graphique du coût des évènements naturels en France, indemnisés par les régimes CatNat et TGN entre 1982 et 2010 (Gérin et Nussbaum, 2012), le terme « subsidence » est utilisé ici pour désigner les dommages dus au phénomène de mouvement des sols dus à la sécheresse.

Au sein de la classification des dommages, selon leur caractère direct/indirect et tangible/intangible (Tableau 1, page 17), les dommages assurés couvrent essentiellement les dommages directs tangibles, et certains dommages indirects, notamment ceux des entreprises. Dans les pays où le taux de souscription à des polices d'assurances couvrant les risques naturels est important (États-Unis, Europe), les dommages assurés sont généralement estimés comme représentant 50 % des pertes économiques totales dues à une catastrophe.

3.4. Le Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs

Créé par la loi n° 95-101 du 2 février 1995, dite « Barnier », relative au renforcement de la protection de l'environnement, le **Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs** (FPRNM) ou **« fonds Barnier »** est également bénéficiaire d'une partie de la surprime CatNat, sur laquelle il prélève 12 % (soit environ 1,5 % du total de la prime d'assurance initiale - Figure 26). Sa gestion comptable et financière est assurée par la CCR, tandis que le

Préfet engage et ordonnance les crédits et rend compte de leur utilisation. Il sert au financement des dix catégories d'opérations suivantes (MEDAD, 2006a et 2006b) :

1. Dépenses d'acquisition de biens exposés et dépenses connexes :
   - expropriation de biens menacés
   - acquisition amiable de biens menacés
   - acquisition amiable de biens sinistrés
   - évacuation et relogement des personnes exposées
2. Dépenses de réduction du risque et de la vulnérabilité face aux risques :
   - opérations de reconnaissance et traitement des cavités souterraines
   - dépenses afférentes à l'élaboration des Plans de Prévention des Risques (PPR[16])
   - études et travaux rendus obligatoires par un PPR
   - études et travaux de prévention ou de protection des collectivités territoriales
   - dépenses afférentes à l'information préventive
   - campagnes d'information sur la garantie catastrophes naturelles

Il est à noter que le fonds Barnier n'est en aucun cas un fonds d'indemnisation des dommages, rôle qui reste alloué aux assureurs et réassureurs. Les actions du fonds sont uniquement de l'ordre de la prévention ; les acquisitions amiables et expropriations, même après un sinistre, n'étant pas considérées comme une compensation du préjudice subi, mais comme une mise en sécurité des personnes.

Constitué initialement pour le financement des procédures d'expropriation uniquement, le champ des dépenses finançables par le fonds s'est grandement élargi depuis sa création. Malgré l'augmentation régulière du taux de la surprime finançant le régime CatNat (fixé initialement à 2 % de la prime d'assurance de base, puis à 4 % en 2006, 8 % en 2008 et 12 % en 2009) et l'augmentation de la part de cette surprime dédiée à l'alimentation du fonds Barnier (aujourd'hui à 12 %), la réserve qu'il était censé constituer est aujourd'hui faible. En effet, les dépenses du fonds ont dépassé les recettes annuelles (actuellement de l'ordre de 165 M €) pour la première fois en 2005, et le solde global du fonds est devenu négatif pour la première fois en 2010 et en 2011, du fait du grand nombre d'acquisitions amiables réalisées suite à la tempête Xynthia, nécessitant une avance de l'État (Hélias et al., 2007 ; Deboudt, 2010a et 2010b ; MBCPFPRE, 2011 ; MEF, 2012).

[16] Instaurés par la loi n° 87-565 du 22 juillet 1987, modifiée par la loi n° 95-101 du 2 février 1995, les Plans de Prévention des Risques Naturels sont des servitudes d'utilité publique qui règlementent l'utilisation des sols dans les zones exposées aux risques naturels, par des interdictions de construire ou des prescriptions pour la construction (articles L. 562-1 à L. 562-9 du Code de l'Environnement).

3.5. Le déclenchement du système lors d'une catastrophe naturelle

Lors de la survenance d'un événement naturel majeur, l'**état de catastrophe naturelle** permettant l'indemnisation des dommages sous le régime CatNat est déterminé par l'avis d'une commission interministérielle (des Ministères de l'Intérieur, et de l'Économie et des Finances, et de l'Environnement), saisie par le Préfet sur demande des communes qui transfèrent un dossier décrivant les dommages subis. Au vu de ce constat, l'état de catastrophe naturelle est reconnu par un arrêté interministériel qui détermine les périodes et la ou les communes où s'est produite la catastrophe, ainsi que la nature des dommages couverts par la garantie (Figure 28).

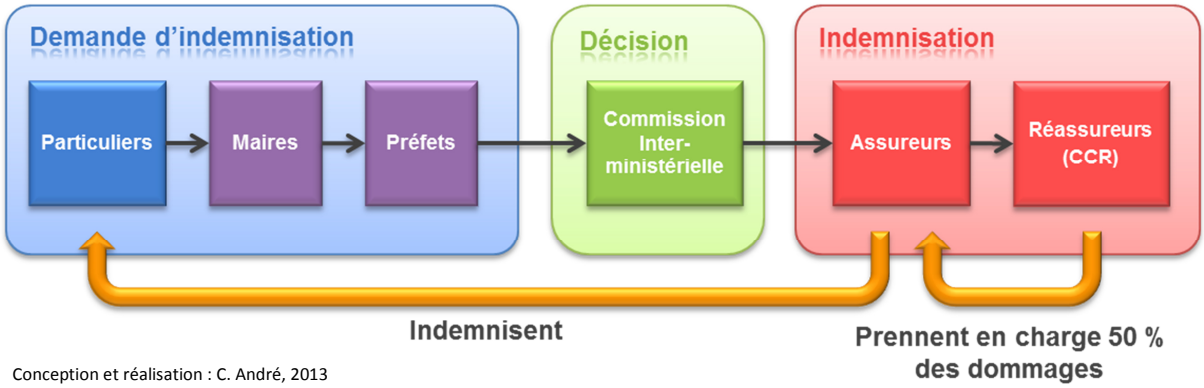


Figure 28 : Schéma du fonctionnement du régime en cas de catastrophe naturelle.

C'est en théorie sur la base de constats d'experts scientifiques que la commission reconnait le caractère exceptionnel du phénomène naturel ayant généré les dommages et déclare l'état de catastrophe naturelle (MEDAD, 2006a et 2006b). Les critères sont basés sur les observations des paramètres physiques de l'aléa, qui sont, pour les submersions marines liées aux tempêtes côtières : la vitesse du vent, la pression atmosphérique et la pluviométrie pour Météo France, le niveau marin lié à la marée et la surcote pour le SHOM (à l'aide du réseau marégraphique) et la hauteur des vagues pour le CETMEF (à l'aide des mesures de bouées houlographiques). Quand cela est possible, ces rapports succincts doivent estimer la période de retour (probabilité d'occurrence) du phénomène mesuré, pour permettre à la commission d'apprécier « l'intensité anormale[17] » de l'évènement. L'objectif de cette définition de l'état de catastrophe naturelle à partir de la fréquence de l'aléa est de limiter le nombre d'arrêtés publiés. Cependant, la période de retour exacte des phénomènes est difficile à évaluer et le critère d'exceptionnalité souvent difficile à apprécier. En pratique, la pression des assurés ayant subi des dommages et de leurs élus est importante, et la décision est en partie politique (Douvinet, 2006, 2008 et 2010).

[17] Article L. 125-1 du Code des Assurances.

Une fois l'état de catastrophe naturelle reconnu, les sinistrés contactent leurs assureurs auxquels ils déclarent leurs dommages. Selon l'importance de ces derniers, les assureurs décident de missionner ou non un expert en estimation et en liquidation de sinistres d'un cabinet indépendant, qui constatera les dommages et chiffrera l'indemnité à verser au sinistré selon les termes du code des assurances spécifiques au régime CatNat et les dispositions de son contrat d'assurance. Une franchise unique et uniforme (de 380 € pour les particuliers), reste notamment à la charge de l'assuré pour tous les sinistres de catastrophes naturelles (excepté pour les dommages dus à la sécheresse pour lesquels la franchise est de 1 520 €).

Cette présentation du régime français d'indemnisation des catastrophes naturelles nous donne un aperçu des implications de son fonctionnement sur les évaluations économiques des dommages basées sur des données d'assurance. En premier lieu, les dommages dus au vent lors des tempêtes et ceux des inondations ne sont pas indemnisés sous le même régime, ce qui permet de distinguer les deux types d'aléas lors de l'analyse des dommages des tempêtes côtières. D'un côté, les dommages dus au vent ne sont pas couverts par la CCR et laissent libres les assureurs de fixer leurs primes ainsi que les éléments garantis par leurs contrats. D'un autre côté, les dommages liés à la submersion marine doivent faire l'objet d'un arrêté de reconnaissance pour être indemnisés, et les circonstances de leur indemnisation sont régies par un contexte règlementaire défini par l'État. Ces éléments sont à prendre en compte pour l'analyse des données et pour la réalisation d'un modèle d'endommagement à l'aide de ce type de données. Ils seront détaillés dans la deuxième partie de cette thèse qui a pour objet la présentation des données en question.

4. Spécificités des risques côtiers

Dans le contexte actuel de changement climatique et d'élévation du niveau marin, les risques côtiers sont le sujet de plus en plus d'attentions. Qualifiés d' « émergents » par C. Meur-Férec et V. Morel (2004), les risques côtiers sont spécifiques de par l'évolution très rapide des enjeux exposés lors du siècle dernier. Jusqu'alors orientée vers les activités de pêche et de navigation, et vers l'agriculture des polders à l'arrière de la côte, la densification de l'occupation du littoral, dont découle le risque, est principalement due à l'essor du tourisme balnéaire du début du XXe siècle (Meur-Férec et Morel, 2004).

Ce phénomène est mis en relief par les chiffres de l'occupation actuelle du littoral. Ainsi, les communes côtières, qui ne couvrent que 4 % du territoire métropolitain, hébergent plus de 7,6 millions d'habitants permanents, soit près de 12 % de la population nationale. La densité de population atteint 315 habitants au km² dans ces communes, soit près de trois fois la

moyenne nationale de 115 habitants au km² ; la pression humaine y est donc très forte (MEDDE/DGPR, 2012).

Ce phénomène se traduit par une très forte urbanisation du littoral : entre 1990 et 2007, les communes littorales ont totalisé 12,5 % des surfaces de logements construits en métropole. La part des résidences secondaires construites sur cette même période est de 16 %, et dépasse parfois 30 %, notamment sur les littoraux de Vendée et de Charente-Maritime, contre une moyenne nationale de 4,5 %. Le nombre de résidences secondaires sur le littoral a ainsi été multiplié par 4 depuis 1968, pour atteindre 1,13 million de logements en 2006. Les littoraux concentrent donc les activités liées au tourisme, avec 40 % de l'ensemble des nuitées touristiques du pays en 2007, ce qui crée des caractéristiques de vulnérabilité tout à fait particulières pour cet espace, qui doivent être prises en compte dans la gestion des risques (MEDDE/CGDD/SOeS, 2011).

De plus, cette pression foncière, ainsi que les autres opportunités de développement socio-économique des communes littorales, entrent parfois en contradiction avec les impératifs de prévention des risques, qui sont de la responsabilité des maires, ce qui rend souvent leur rôle particulièrement difficile (Meur-Férec et Rabuteau, 2013).

D'autre part, les risques côtiers sont également liés à des aléas spécifiques, sur lesquels nous ne disposons que peu de recul, en raison de la relativement faible fréquence des évènements dommageables en France (MEDDE/DGPR, 2012).

4.1. Définition des aléas côtiers

Les risques côtiers, tels que définis par la communauté scientifique travaillant sur les risques naturels, regroupent les aléas d'érosion et de submersion marine. Les tsunamis peuvent être pris en compte dans cette typologie, en tant que phénomène de submersion très particulier, dont l'origine n'est pas météorologique mais géologique (sismique ou gravitaire).

Dans toute étude des risques côtiers ou plus généralement du littoral, il faut garder à l'esprit le caractère naturellement dynamique des côtes. Ce que nous définissons à l'échelle de la vie humaine comme les aléas d'érosion et de submersion, sont en fait les processus qui façonnent le littoral à l'échelle géologique (Guilcher, 1954). En effet, la mobilité du trait de côte existe à plusieurs échelles de temps et d'espace : d'un côté, les cycles glaciaires du Quaternaire ont fait varier le niveau marin de plusieurs centaines de mètres par rapport à sa position actuelle, et de l'autre, pour la période historique, des déplacements de moindre ampleur du trait de côte sont perceptibles et mesurables par l'homme. À cette échelle, ils

sont souvent liés à des évènements météo-marins extrêmes, tels que les tempêtes et les cyclones, dont l'occurrence est elle-même corrélée à des cycles climatiques (Pirazzoli, 1993 ; Paskoff, 1998 ; Hénaff et al., 2013). La dénomination de ces processus géomorphologiques sous le terme d'aléa est donc liée à l'implantation des sociétés humaines dans ce milieu naturel dynamique, souvent sans prise en considération suffisante de sa mobilité intrinsèque.

L'aléa érosion, ou recul du trait de côte, se produit à la fois sur des côtes dont la morphologie résulte de phénomènes quaternaires d'érosion (formations rocheuses, falaises et plateaux) et d'accumulation (formations sédimentaires meubles, plages et dunes de sable ou de galets, marais maritimes) exposées aux houles et aux courants littoraux. Il se traduit par l'amaigrissement des plages et par des mouvements de terrain tels que des glissements ou des éboulements rocheux, qui peuvent menacer les enjeux présents. Il est lié à l'action du vent, des vagues et des courants côtiers, et également pour les falaises à leur fonctionnement hydrogéologique et leur état d'altération.

L'aléa submersion marine, ou inondation côtière, se rapporte aux intrusions temporaires par la mer de la zone supratidale, c'est-à-dire située au-dessus de la zone intertidale recouverte quotidiennement par les marées. Ce phénomène est dû à l'élévation extrême du niveau d'eau se produisant lors des tempêtes sur des côtes suffisamment basses pour être inondées, essentiellement les plages, les polders, les marais maritimes ou les estuaires. Il est lié à une combinaison de plusieurs mécanismes : la surcote marine, les vagues, le niveau de la marée et les évolutions eustatiques.

Les aléas d'érosion et de submersion marine sont donc tous deux induits par des paramètres météo-marins soumis à des modifications liées aux variations climatiques. En effet, la montée eustatique du niveau marin, à laquelle il faut s'attendre dans le contexte actuel de réchauffement climatique (IPCC, 2007 ; Rahmstorf, 2007 ; Grinsted et al., 2010), ne peut résulter qu'à une tendance à l'augmentation des phénomènes d'érosion et de submersion marine. D'autre part, une éventuelle augmentation de la fréquence et de l'intensité des évènements météo-marins extrêmes, aurait potentiellement tendance à également accroitre ces deux aléas, mais elle n'est pas encore aujourd'hui démontrée par les études scientifiques. La part du réchauffement climatique liée aux activités humaines existe manifestement, mais ses effets sur les phénomènes tempétueux actuels ne sont probablement pas encore visibles (Bessemoulin, 2002 ; Dreveton, 2002 ; Planton, 2002 ; Planton et al., 2008 ; Braun et Déqué, 2011). Cependant, la variabilité climatique n'explique pas à elle seule les variations d'intensité de ces aléas. La disponibilité de stocks

sédimentaires est un autre paramètre clé pour la compréhension du phénomène d'intensification de l'érosion des côtes d'accumulation (Paskoff, 1998 ; Hénaff, 2012).

Il est également important de souligner les relations étroites et l'interdépendance existant entre les aléas érosion et submersion marine, en particulier pour les formations sédimentaires meubles. On constate en effet que l'état de « santé » d'un cordon naturel ou d'une plage au moment de la tempête pourra faire la différence entre une situation où le système plage-dune joue son rôle d'atténuation de l'aléa, et une situation où l'amaigrissement de la plage, permettant aux vagues de déferler plus près de la côte, peut entrainer le franchissement ou la rupture d'un ouvrage de protection ou d'un cordon naturel fragilisé. L'état morphologique des côtes est notamment fonction de leur réponse aux variations météorologiques saisonnières ; une tempête n'aura donc potentiellement pas les mêmes conséquences tant en terme d'érosion que de submersion, si elle se produit au printemps ou à l'automne, c'est-à-dire après une période d'engraissement ou d'amaigrissement des plages.

En étant donc conscient que les phénomènes de dynamique des littoraux existent à différentes échelles de temps et d'espace, sous l'influence d'éléments géologiques, géomorphologiques, climatiques, météo-marins et anthropiques, il s'agit maintenant de décrire plus en détail le phénomène de submersion marine, pour l'aléa qu'il représente dans le cadre du risque d'inondation côtière.

4.2. Les forçages météo-marins de la submersion marine

Les submersions marines sont produites par des évènements de tempêtes côtières qui se caractérisent par l'intensité de différents **forçages, ou agents météorologiques et maritimes**, tels que la pression atmosphérique, le vent, les vagues et la marée.

La **surcote marine**, onde de tempête ou *storm surge* est une élévation temporaire du niveau de la mer par rapport au niveau théorique attendu dû à la marée astronomique. Le niveau d'eau total atteint lors d'une tempête est d'autant plus élevé que la surcote et le coefficient de marée sont importants, et que ces deux phénomènes sont concomitants dans le temps. La surcote se décompose en deux parties appelées la surcote atmosphérique et la surcote liée aux vagues (Krien et al., 2010 ; Cariolet, 2011) :

La **surcote atmosphérique** est elle-même divisée en deux processus : le premier est dû à la chute de pression provoquée par le système dépressionnaire d'une tempête ou d'un cyclone, qui entraine une élévation du plan d'eau par effet de baromètre inverse. Le second,

le *wind setup*, est dû au vent qui exerce une contrainte à la surface de l'eau, ce qui modifie les courants de surface et peut également augmenter l'élévation du niveau du plan d'eau à la côte (Cariolet et Suanez, 2009 ; Krien et al., 2010).

La **surcote liée aux vagues** ou *wave setup* est quant à elle due au déferlement de la houle lié à la diminution de la profondeur des fonds marins à l'approche des côtes, qui crée un transfert d'énergie des vagues vers la colonne d'eau et une augmentation supplémentaire du niveau du plan d'eau.

Ces trois mécanismes définissent la surélévation du niveau du plan d'eau pendant une tempête par rapport au niveau de marée prédit (Figure 29). Un dernier phénomène dont il faut tenir compte est **le phénomène de jet de rive** ou *swash* qui se produit lors du déferlement des vagues sur une plage ou un ouvrage de protection. Ce phénomène n'affecte pas le niveau moyen du plan d'eau en soi mais définit l'altitude maximale ou *runup* que peut atteindre l'eau lors d'une submersion (Cariolet et Suanez, 2009 ; Krien et al., 2010).

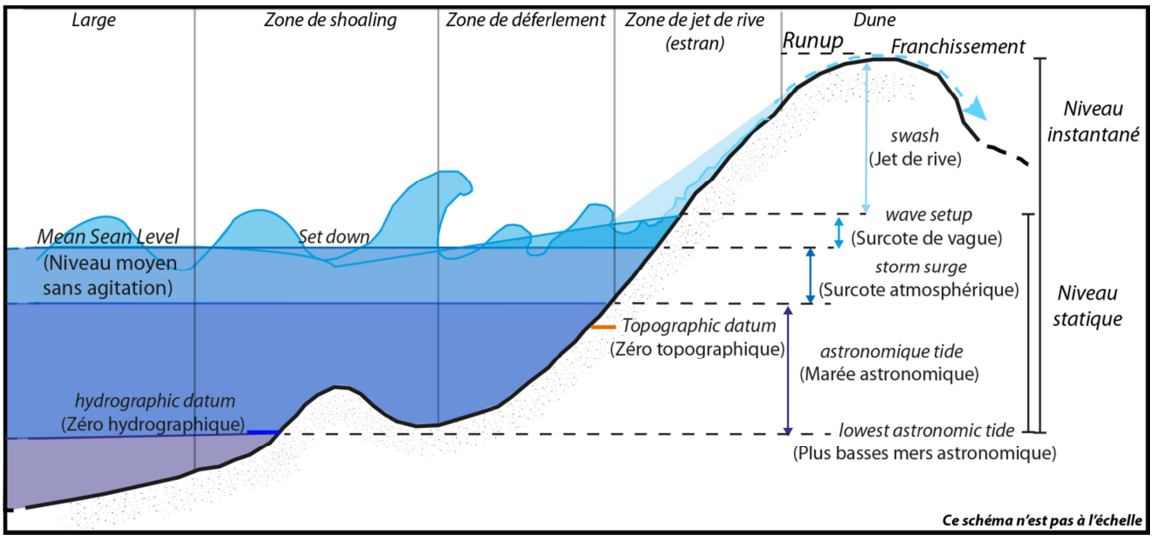


Figure 29 : Schéma des différents forçages de la submersion marine, d'après Nicolae Lerma, 2012. Les termes « niveau moyen » et « niveau statique » s'entendent ici au moment du pic de la tempête, et désignent le niveau maximal atteint sans prendre en compte l'agitation des vagues, en opposition au « niveau instantané ».

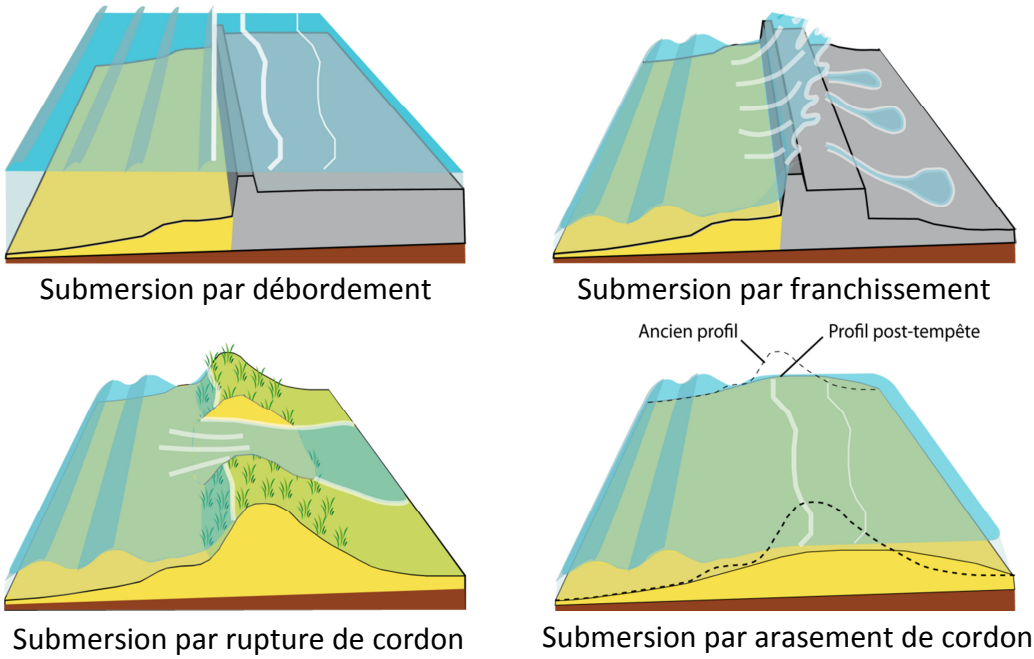
L'ensemble de ces éléments montre que la submersion dépend de la combinaison de multiples forçages météo marins, dont l'influence varie localement en fonction de la configuration de la côte et des fonds marins : orientation du vent et des vagues par rapport à la côte, pentes sous-marines, frottements dus à la nature des fonds marins, etc. La combinaison de tous ces paramètres n'entrainera une submersion des côtes basses qu'en fonction de leur concomitance dans le temps et dans l'espace, ce qui rend le niveau maximal du plan d'eau à la côte lors d'une tempête, et donc, l'aléa submersion, très difficile à prédire dans le temps et en intensité. Selon le niveau de détail nécessaire, des prédictions de

niveaux d'eau probables à la côte pourront être tirées d'études statistiques d'observations historiques basées sur les instruments marégraphiques (SHOM et CETMEF, 2012), ou sur une reconstitution à partir des forçages par modélisation hydraulique numérique (Krien et al., 2010).

4.3. Les différents modes de submersion

L'élévation du niveau d'eau à la côte lors des tempêtes peut entrainer différents modes de submersion (Figure 30 à Figure 32) selon la nature de la côte exposée :

- La submersion par **débordement** ou surverse intervient quand le niveau du plan d'eau (marée et surcote) dépasse la cote d'arase d'un cordon dunaire naturel ou d'un ouvrage de protection tel qu'une levée, une digue ou un perré.
- La submersion par **franchissement** intervient lorsque le niveau moyen du plan d'eau n'atteint pas celui du cordon naturel ou de l'ouvrage de protection, mais que le jet de rive permet à des « paquets de vagues » de franchir l'édifice et d'inonder les zones plus basses en arrière.
- La submersion par **rupture** ou brèche se produit quand un cordon naturel ou un ouvrage artificiel subit des dégâts importants lorsqu'il est franchi par des paquets de vagues ou par surverse. Ce type de submersion, qui peut aussi engendrer l'arasement généralisé d'un cordon dunaire, a la spécificité d'être particulièrement rapide et puissant au moment de la destruction de l'édifice protecteur.



Submersion par débordement | Submersion par franchissement

Submersion par rupture de cordon | Submersion par arasement de cordon

Figure 30 : Schéma des différents modes de submersion marine, d'après Cariolet, 2011.

Figure 31 : Illustration des phénomènes de franchissement d'ouvrage (gauche - à Gâvres dans le Morbihan lors de la tempête Johanna, photo © DDTM 56) et de rupture de digue (droite - sur l'île de Ré en Charente-Maritime après le passage de Xynthia, photo © AFP - Xavier Leoty).

Figure 32 : Illustration des phénomènes de rupture de cordon dunaire (gauche - lagune de la Belle-Henriette à la Faute-sur-Mer en Vendée, photo © BRGM) et d'arasement de cordon dunaire provoqué par débordement (droite - Réserve Naturelle du marais d'Yves en Charente-Maritime, photo © LPO) après le passage de Xynthia.

4.4. L'évaluation de l'aléa submersion

Les méthodes d'évaluation de l'aléa submersion, dont l'intensité se définit primairement par l'étendue potentielle des terres inondées, doivent donc tenir compte des multiples paramètres évoqués précédemment définissant le niveau d'eau maximal à la côte, des modes de submersion possibles en fonction des systèmes de protection existants, et évidemment de la topographie des zones côtières. Il s'agit en fait de méthodes de modélisation présentant divers niveaux de sophistication (MATE et METL, 1997b ; Cariolet et Suanez, 2009 ; Krien et al., 2010 ; CETMEF, 2012) :

- L'**approche statique** consiste à croiser le niveau d'eau maximal à la côte avec un modèle topographique pour estimer les hauteurs d'inondation, à l'aide par exemple d'un Système d'Information Géographique (SIG). Cette méthode est valable dans les zones où les emprises inondables sont faibles, mais pas dans les zones basses très étendues pour lesquelles la durée de la submersion (conjonction tempête et marée) est trop faible pour un remplissage complet des zones situées sous le niveau de l'eau lors de la tempête. C'est notamment le cas des larges polders.

- Dans ce cas, le calcul dynamique du **volume d'eau entrant** (dépendant de la variation dans le temps du niveau d'eau par rapport à la côte des ouvrages de protection) est nécessaire. Il peut être réalisé à partir de formules analytiques ; le volume total calculé est ensuite réparti sur les terres inondables.
- Dans le dernier cas, où les modes de submersion sont les plus complexes (franchissement, rupture d'ouvrage) et où la topographie, pour une raison ou pour une autre, ne permet pas la répartition uniforme de l'eau à terre, des **modèles hydrauliques** de simulation numérique doivent être utilisés. Il existe des modèles permettant d'intégrer différents niveaux de complexité, qui ne seront pas détaillés ici (modèles à casiers, modèles bidimensionnels, modèles vagues à vagues, etc.).

Le choix de mise en œuvre de l'une ou l'autre de ces différentes méthodes de modélisation de l'aléa dépend de la précision nécessaire en vue de l'objectif pour lequel est réalisée l'évaluation de l'aléa, de l'étendue de la zone d'étude et des données disponibles, sur les forçages météo-marins et sur la bathymétrie et la topographie de la zone d'étude. Le BRGM a mis en place une méthode permettant de choisir la meilleure approche possible pour évaluer la submersion marine à une échelle régionale en fonction des spécificités de différents types de côtes exposés à l'aléa (Garcin et al., 2012). Par ailleurs, la récente révision du guide méthodologique de réalisation des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) a permis de mieux définir toutes les méthodes de modélisation existantes et de préconiser les plus adaptées en fonction de l'objectif de l'étude, afin d'homogénéiser les évaluations de l'aléa réalisées en France, aujourd'hui de précision et de qualité très hétérogène (MEDDE/DGPR, 2014).

L'évaluation de l'aléa dans le cadre des PPRL se limite à la délimitation de l'exposition des enjeux, selon des classes qualitatives d'intensité de l'aléa, dans le but de mettre en place un zonage règlementant l'urbanisation dans les zones à risque. Le plus souvent, ce sont des méthodes simples qui sont utilisées. Au contraire, une évaluation de l'aléa ayant pour objectif une évaluation physique ou économique des dommages, nécessite que les paramètres de l'aléa liés aux processus d'endommagement soient évalués. Lorsque d'autres paramètres que la hauteur d'eau, comme par exemple la vitesse du courant, sont jugés nécessaires à la caractérisation des dommages, une méthode de modélisation hydraulique doit être utilisée.

5. Présentation des évènements Johanna et Xynthia et des sites d'étude

5.1. Description des forçages des deux tempêtes et de leurs impacts à l'échelle régionale

Les deux tempêtes étudiées dans cette thèse présentent un certain nombre de points communs : toutes deux ont provoqué des submersions marines, principalement du fait de surcotes atmosphériques importantes, survenant en conjonction de coefficients de marée élevés. Les deux évènements possèdent toutefois chacun des caractéristiques spécifiques et ont impacté des côtes de morphologie différente.

5.1.1. La tempête Johanna

La tempête Johanna a frappé la Bretagne et le sud du Royaume-Uni les 10 et 11 mars 2008, avec des vents atteignant 130 à 150 km/h à la côte et une pression atmosphérique de 975 hPa au-dessus de la Bretagne. La surcote atmosphérique produite (mesurée à 78 cm à Concarneau à marée haute), conjuguée à un coefficient de marée de 106 (sur un maximum de 120 pour la marée la plus forte possible), a entrainé des niveaux d'eau à la côte très élevés. La particularité de cette tempête est la conjonction avec une très forte houle, mesurée jusqu'à une hauteur significative de 11,5 m au large de l'île d'Ouessant, qui a entrainé un phénomène de *setup* et une attaque par les vagues des côtes exposées (Cariolet et al., 2010). De plus, la vitesse de déplacement de la dépression, particulièrement lente, a fait que la tempête est restée au-dessus de la Bretagne pendant une douzaine d'heures, affectant certains sites lors de la marée haute du matin du 10 mars, d'autres pendant la marée haute de l'après-midi, et certains sites lors des deux marées hautes (Cariolet et al., 2010 ; Cariolet, 2010). La tempête a ensuite causé des submersions en Haute-Normandie dans la nuit du 10 au 11 mars et au Royaume-Uni jusqu'au lendemain.

Les secteurs inondés par la tempête Johanna sont nombreux, mais du fait de la morphologie rocheuse des côtes de Bretagne, ces derniers sont limités en étendue. Par ailleurs, les très hautes vagues qui ont touché les côtes de l'ouest et du nord-ouest de la Bretagne, ont provoqué d'importants phénomènes d'érosion (Suanez et Cariolet, 2010). Le site choisi pour l'étude locale de l'évènement est la commune de Gâvres, qui est l'un des sites où le plus grand nombre de dommages à des habitations a été observé (Figure 33).

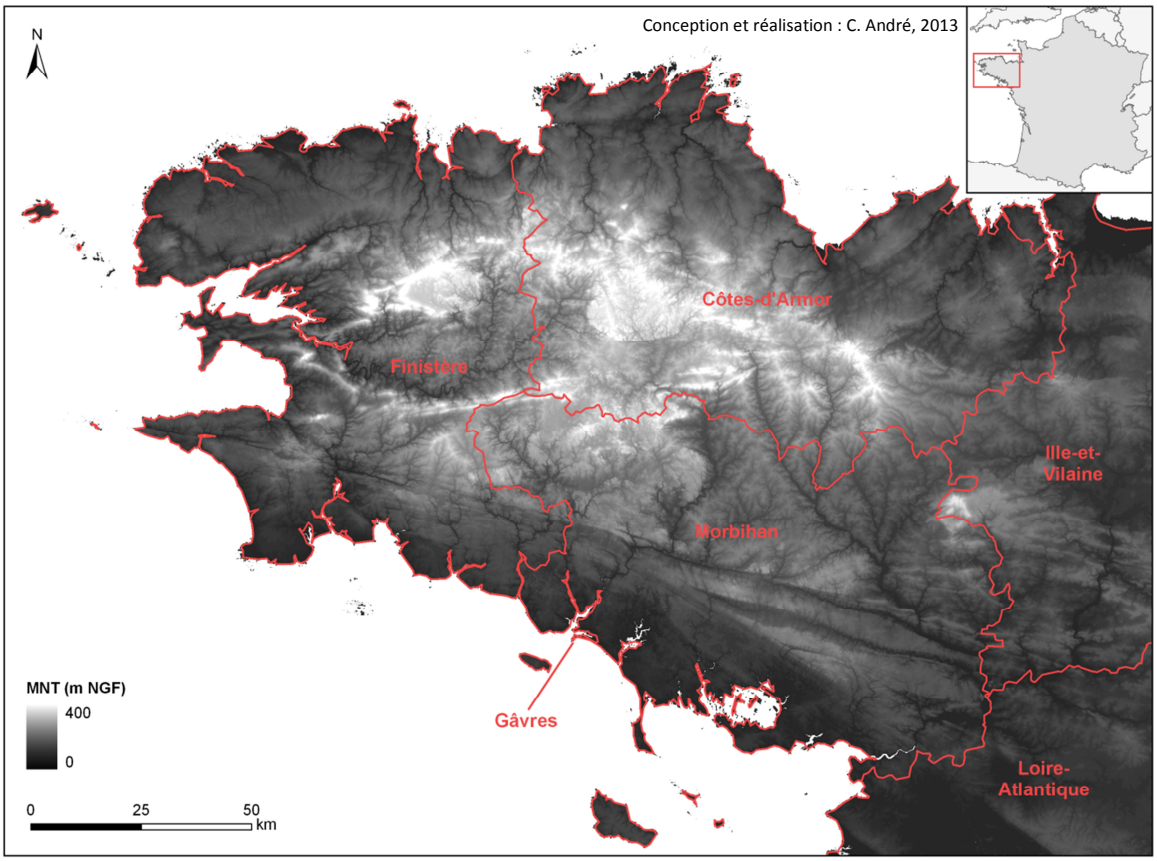


Figure 33 : Carte topographique de la Bretagne, avec la localisation des différents départements et de la commune de Gâvres (MNT BD ALTI® IGN).

5.1.2. La tempête Xynthia

La tempête Xynthia a affecté les côtes de plusieurs pays européens (dont le Portugal, l'Espagne et la France) entre le 27 février et le 1er mars 2010. La pression atmosphérique minimale de 969 hPa a été atteinte dans la nuit du 27 au 28 février, au moment où la dépression passait au-dessus des côtes françaises du golfe de Gascogne, avec des rafales de vent mesurées à 160 km/h à Saint-Clément-des-Baleines sur l'île de Ré[18]. En parfaite conjonction avec une marée haute de coefficient 102, la surcote atmosphérique est mesurée à 1,53 m au marégraphe de La Rochelle, ce qui est la plus haute valeur observée depuis la mise en place du marégraphe en 1997 (Pineau-Guillou et al., 2010). Le marégraphe étant situé dans le port de La Pallice, relativement abrité des vagues, on peut penser que la surcote réelle dans les Pertuis Charentais a été supérieure à cette valeur du fait du *wave setup*, même si la houle, de l'ordre de 7 m au large de l'île d'Oléron, a été nettement moins forte pour la tempête Xynthia que lors de Johanna. La principale particularité de la tempête Xynthia est sa trajectoire atypique, provenant du sud-ouest, qui a particulièrement exposé

[18] http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2010/la-tempete-xynthia-des-2728-fevrier-2010

au vent et aux vagues des secteurs qui en sont d'habitude protégés lors des tempêtes d'ouest (Pedreros et al., 2010 ; Bertin et al., 2012).

Les niveaux d'eau records atteints à la côte lors de Xynthia ont entrainé la submersion des très grands polders qui caractérisent les côtes de Vendée et de Charente-Maritime, en contraste avec les littoraux de Bretagne. Par ailleurs, l'impact des vagues sur l'érosion lors de Xynthia a été constaté sur les îles de Ré et d'Oléron (Pedreros et al., 2010), mais les vagues ont été beaucoup plus atténuées sur les côtes à forts enjeux humains du fond des Pertuis Charentais, où c'est la surcote qui est responsable de la majorité des dommages et de la mort de 41 personnes dans les zones inondées (Chauveau et al., 2011 ; Pigeon, 2012 ; Vinet et al., 2012b ; Genovese et Przyluski, 2013).

Pour l'analyse des dommages de la tempête à l'échelle locale, il a été choisi de se focaliser sur un nombre limité de sites, tous fortement impactés lors de l'évènement. Ce sont les communes de la Faute-sur-Mer, de l'Aiguillon-sur-Mer et de la Tranche-sur-Mer en Vendée, et les communes de Charron, Aytré, Angoulins, Châtelaillon-Plage, Yves, Fouras, la Flotte et la Couarde-sur-Mer (île de Ré) en Charente-Maritime. En particulier, un de ces sites a été choisi pour la reconstitution de l'aléa par modélisation numérique : le site des Bouchôleurs, situé sur les communes de Châtelaillon-Plage et d'Yves (Figure 34).

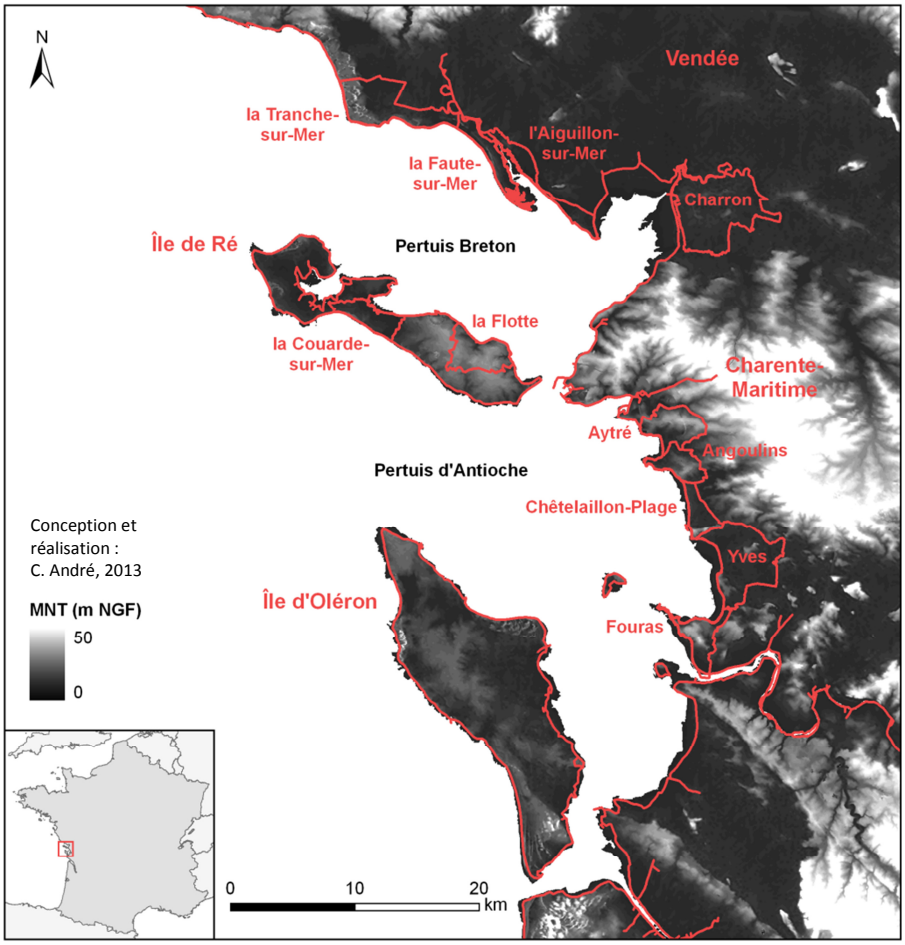


Figure 34 : Carte topographique des côtes de Vendée et de Charente-Maritime (Pertuis Charentais), avec la localisation des sites étudiés à l'échelle locale (MNT BD ALTI® IGN).

5.2. Présentation des sites d'étude à l'échelle locale

Pour chacun des deux évènements, un site a été choisi pour une étude plus détaillée des dommages, grâce à la reconstitution de l'aléa par modélisation numérique. Les deux sites ont été choisis en fonction du nombre important de dommages et de la variété des processus de l'aléa observés lors des deux tempêtes. Il s'agit de la commune de Gâvres pour la tempête Johanna et du site des Bouchôleurs pour la tempête Xynthia.

5.2.1. La commune de Gâvres

La commune de Gâvres se trouve sur une presqu'île, située à l'embouchure du Blavet, dans l'agglomération du Pays de Lorient, dans le département du Morbihan. La presqu'île est formée de deux plateaux rocheux granitiques à l'ouest de la commune : Porh-Guerh au sud et Ban-Gâvres au nord, autrefois séparés par une lagune, qui a été remblayée et qui est aujourd'hui une zone basse urbanisée, exposée à la submersion marine (Figure 35). Les deux plateaux sont reliés entre eux à l'ouest par le cordon dunaire de Goërem, et reliés au

continent à l'est par un tombolo de 6 km, montrant une tendance récente à l'érosion (Géos-AEL, 2008).

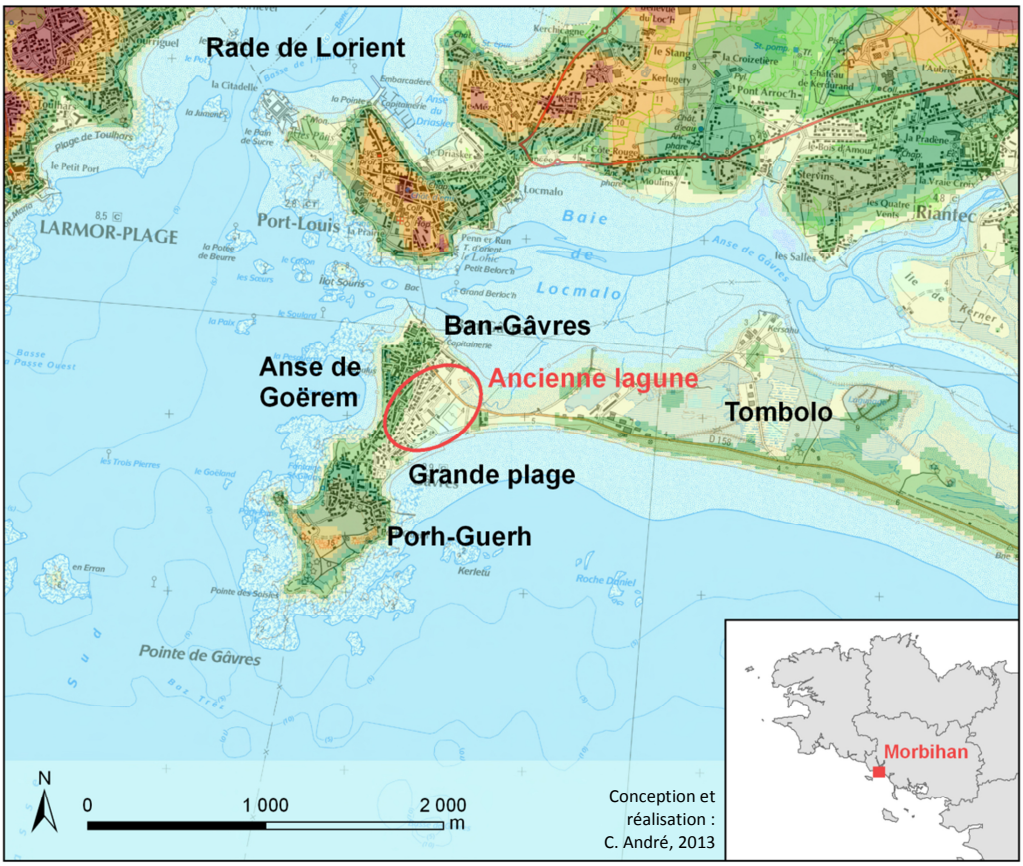


Figure 35 : Carte de localisation de la commune de Gâvres (fond SCAN 25® et MNT BD ALTI® IGN).

Les enjeux

Sur une superficie réduite (moins de 2 km^2), la commune compte 752 habitants en 2009, soit une densité de 400 hab./km², légèrement plus élevée que la densité moyenne des communes littorales bretonnes de 238 hab./km^2 (données INSEE[19]). Gâvres a connu une diminution de sa population de 15 % ces dix dernières années (893 habitants en 1999), liée à un fort vieillissement de la population, caractéristique des communes littorales balnéaires françaises : la tranche des 60-74 ans représente en effet plus de 25 % de la population ; le taux de retraités dans la commune est donc important (Le Berre et al., 2012).

La principale activité de Gâvres étant le tourisme, la population de résidents dans la commune est multipliée par cinq en été. Malgré la diminution globale du nombre d'habitants à l'année, le nombre de logements de la commune reste néanmoins croissant : il est passé de 535 à 905 sur la période de 1968 à 2009. Cette augmentation est

[19] http://www.insee.fr/fr/bases-de-donnees/default.asp?page=recensements.htm

principalement due à l'augmentation du nombre de résidences secondaires, qui représente plus de la moitié des habitations en 2009. En raison du manque d'espace, il n'y a pas d'activités agricoles ou industrielles sur la commune.

L'urbanisation de la commune s'est faite en plusieurs phases depuis le XVIIIe siècle. À cette époque, les zones bâties sont regroupées sur deux pôles correspondants aux plateaux surélevés :

- Le hameau de Porh-Guerh, situé au sud de la zone actuellement urbanisée, dans lequel se trouve l'église.
- Le hameau de Ban-Gâvres, situé au nord de la zone actuellement urbanisée, abritant le port. Il s'est développé essentiellement à partir du milieu du XIXe siècle avec l'essor de la pêche à la sardine (Géos-AEL, 2008).

En dehors de l'occupation militaire du tombolo, l'urbanisation est restée limitée à ces deux pôles jusqu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale. À partir des années 1950, une urbanisation pavillonnaire se développe, d'abord le long de l'axe reliant les deux hameaux. À cette époque, la lagune est encore inhabitée (Figure 36).

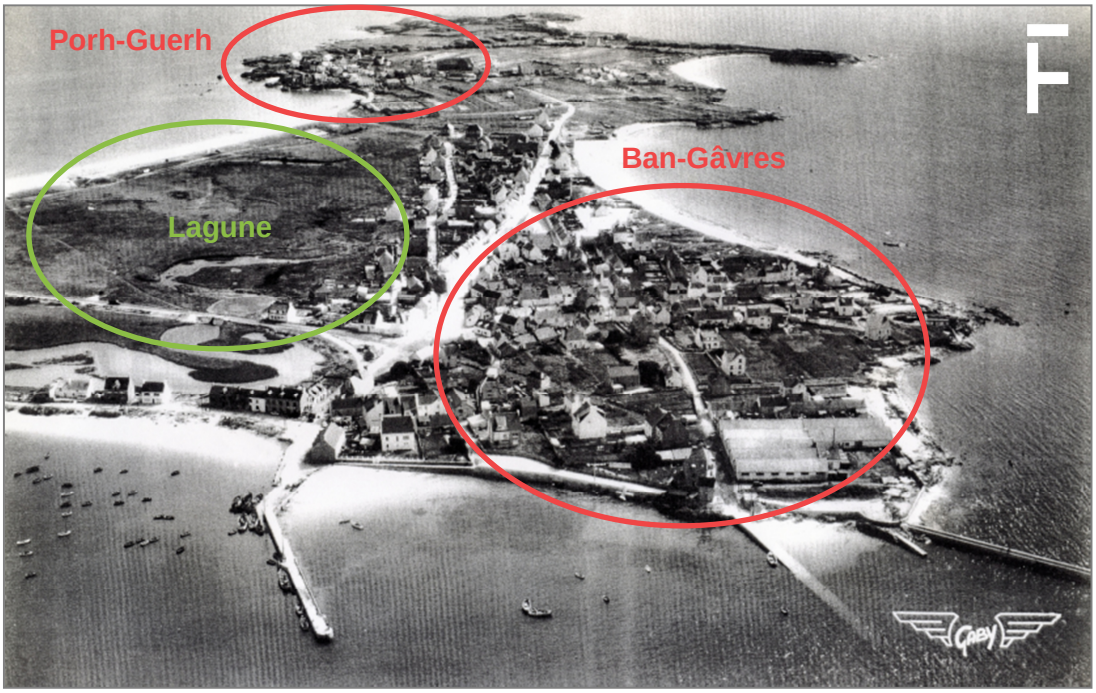


Figure 36 : Photo aérienne de Gâvres au début des années 1950 (source : Géos-AEL, 2008).

Au cours des années 1960, les constructions s'étendent le long de l'anse de Goërem, et un lotissement se crée en arrière de la grande plage, au niveau de l'ancienne lagune remblayée artificiellement. La coupure d'urbanisation entre les deux hameaux disparait dans les années 1970 et 1980. Les constructions s'étendent alors le long de la grande plage, et le bâti se

densifie entre les deux villages anciens jusqu'à former un ensemble continu (Figure 37). L'urbanisation est ensuite ralentie par le manque d'espace disponible (Géos-AEL, 2008).

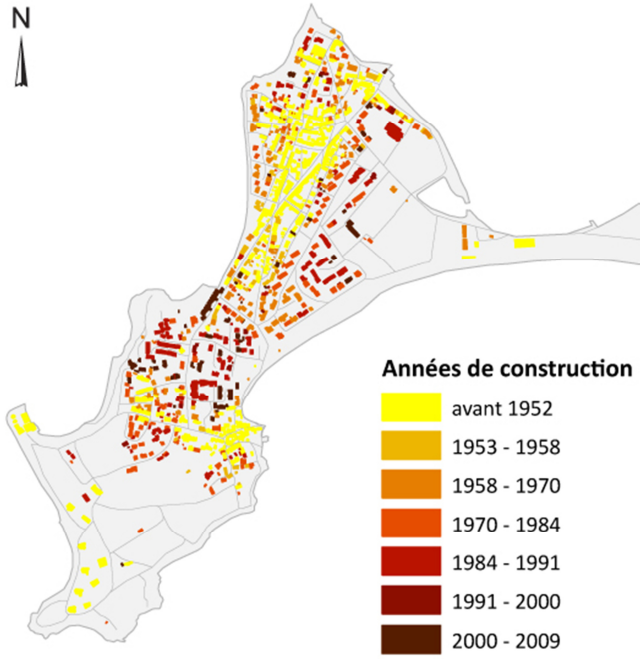


Figure 37 : Carte de l'évolution du bâti à Gâvres, d'après Le Berre et al., 2012.

L'exposition aux aléas côtiers d'érosion-submersion

L'anse de Goërem est particulièrement exposée aux houles dominantes d'ouest, tandis que la grande plage de Gâvres est davantage exposée aux houles de sud et sud-ouest. Le transit sédimentaire s'effectue principalement d'ouest en est sur la grande plage et vers le nord dans l'anse de Goërem. Avant l'installation de l'homme sur la presqu'île, les cordons littoraux étaient dans un état d'équilibre fluctuant, se traduisant par des échanges de sable entre la dune et la plage. À partir du XVIIIe, et tout au long des XIXe et XXe siècles, la fixation du trait de côte par de nombreux ouvrages visant à défendre les installations militaires et les habitations contre la mer (Figure 38) ont provoqué une érosion chronique des deux plages, mise en évidence par l'étude diachronique de photos aériennes anciennes (Géos-AEL, 2008).

Figure 38 : Photos des digues de la grande plage (gauche) et de l'anse de Goërem (droite) (photos © C. André et BRGM).

L'amaigrissement généralisé des plages, qui a pour conséquence l'augmentation des profondeurs d'eau sur l'estran lors des grandes marées, permet aux houles d'atteindre la côte en conservant une grande partie de leur énergie, et augmente le risque de submersion par franchissement des ouvrages de protection. D'après les archives étudiées par E. Le Cornec (Géos-AEL, 2008), plus de 40 tempêtes ont causé des dommages sur la commune de Gâvres entre 1850 et 2008. Parmi les évènements les plus importants, la tempête du 10 janvier 2001 a provoqué, par franchissement de la digue de la grande plage, la submersion de 80 maisons dans les limites de l'ancienne lagune, dont les terrains, malgré le remblai, se situent en dessous des niveaux de hautes mers par fort coefficient.

La tempête Johanna

Le 10 mars 2008, c'est un scénario plus grave qui se produit : à une marée de coefficient 106 (cote prédite de 2,8 m NGF), le vent et les houles importantes ajoutent une surcote de 70 cm (Géos-AEL et DHI, 2008 ; Cariolet et al., 2010), provoquant le franchissement par la mer de la digue de la grande plage en plusieurs points (Figure 31, page 53). Une centaine d'habitations sont inondées, dont certaines par environ un mètre d'eau dans la rue du parc des sports, zone qui constitue le point le plus bas de l'ancienne lagune remblayée (Figure 39).

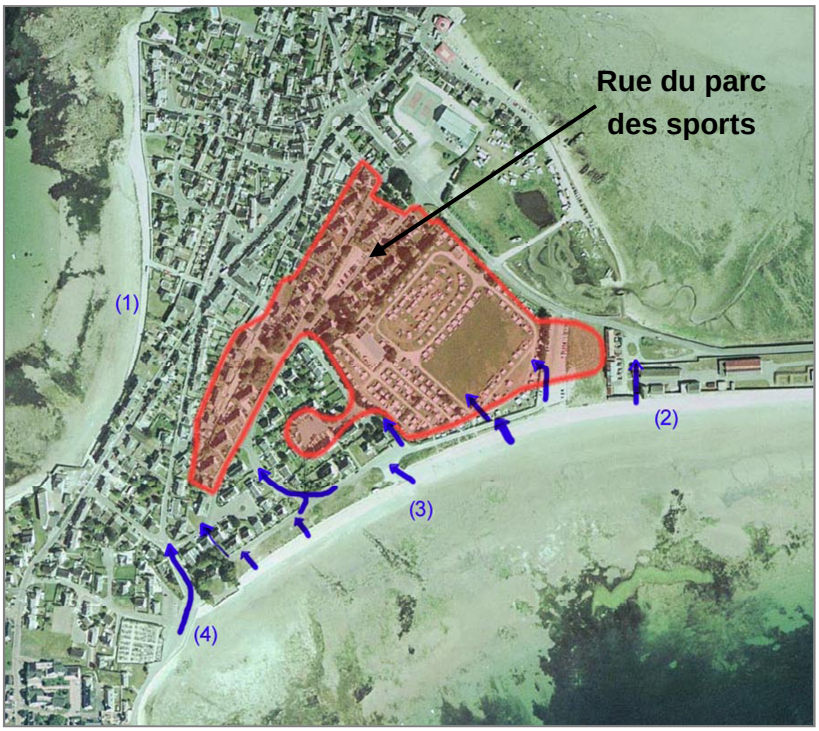


Figure 39 : Carte des zones de passage (flèches bleues) et de stagnation de l'eau (surface rouge) de la submersion lors de la tempête Johanna à Gâvres (source : Mairie de Gâvres).

De nombreux dommages sont également observés sur les propriétés construites en front de mer dans l'anse de Goërem, les chocs de vagues ayant provoqué des affouillements des terrains supportés par le mur de protection. Les dégâts ne concernent heureusement que des terrasses et des murets de clôture, la stabilité des habitations n'étant pas engagée (Figure 40).

Figure 40 : Photos de la submersion de la rue du parc des sports (A et B), des dommages sur la digue de protection de la grande plage (C) et de dommages à des terrasses de particuliers en front de mer dans l'anse de Goërem (D) (photos © Géos-AEL et DHI, 2008).

Suites de l'évènement

À la suite de l'évènement Johanna, les autorités locales ont décidé d'accélérer la mise en place du Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL), dont les études étaient à l'époque en cours (Géos-AEL et DHI, 2008). Celui-ci a été approuvé en 2010, après la réalisation d'un Schéma de Prévention des Risques Littoraux (SPRL) en 2009 (Géos-AEL, 2008). La tempête Johanna ayant été prise comme élément de référence pour l'évaluation de l'aléa extrême sur la commune, l'ensemble de la zone de l'ancienne lagune inondée en 2001 et en 2008 est placé en zone d'aléa « fort » ou « très fort », interdisant toute nouvelle construction d'habitation (Figure 41).

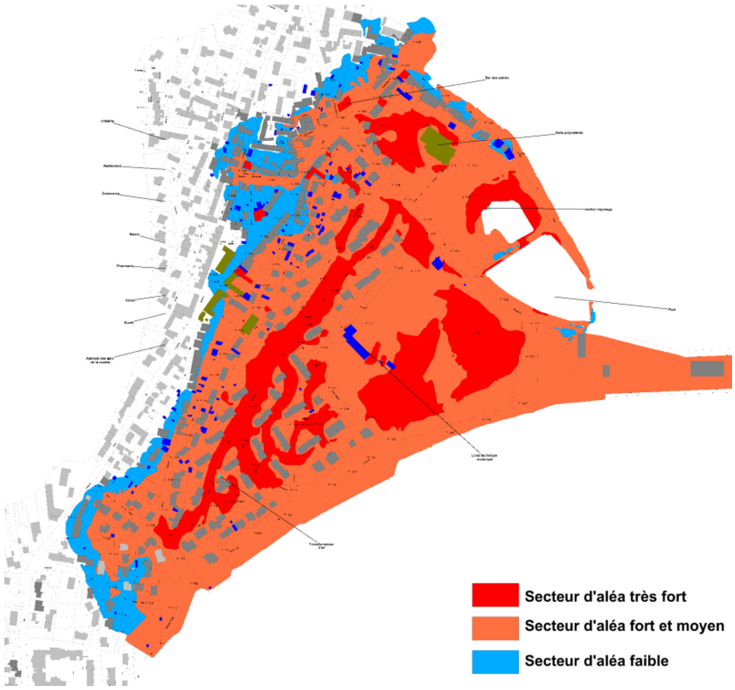


Figure 41 : Carte règlementaire du zonage du PPRL de Gâvres.

Des travaux d'urgence, peu de temps après la tempête, avaient consisté en la mise en place d'enrochements, d'une part au niveau de la digue de la grande plage, pour remplacer le parapet détruit (Figure 40), et d'autre part au pied du mur de l'anse de Goërem, pour le protéger de l'affouillement. En juillet 2012, un Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) littoral, élaboré à l'échelle de l'intercommunalité Lorient Agglomération, a été labellisé. Il comprend de nombreux aménagements de la presqu'île de Gâvres, dont un important rechargement en sable de la grande plage et de l'anse de Goërem et la construction de quatre épis transversaux pour empêcher le déplacement de ce sable par la dérive littorale. Ces rechargements, diminuant la profondeur d'eau sur la plage, ont pour but d'atténuer l'énergie des vagues avant qu'elles atteignent le pied des ouvrages de protection, et donc de diminuer le risque de submersion par franchissement de paquets de mer.

5.2.2. Le site des Bouchôleurs

Le quartier des Bouchôleurs se situe sur les communes de Châtelaillon-Plage et d'Yves, entre les agglomérations de La Rochelle et de Rochefort, en Charente-Maritime. À l'origine, ce quartier était un hameau de pêcheurs implanté à proximité du vieux Châtelaillon ; la plus grande partie du quartier actuel s'est développée sur le territoire d'Yves.

La commune d'Yves s'étend en grande partie sur les marais d'Yves et de Voutron, bornés au nord par le plateau rocheux de la pointe de Châtelaillon, sur lequel se trouve le vieux Châtelaillon, et au sud par celui de la pointe du Rocher, sur lequel se situe le vieux bourg

d'Yves. Les autres hameaux de la commune sont Voutron, également situé sur un promontoire, ainsi que le Marouillet et les Bouchôleurs, tous deux gagnés sur les marais et construits à une altitude beaucoup plus basse (Figure 42).

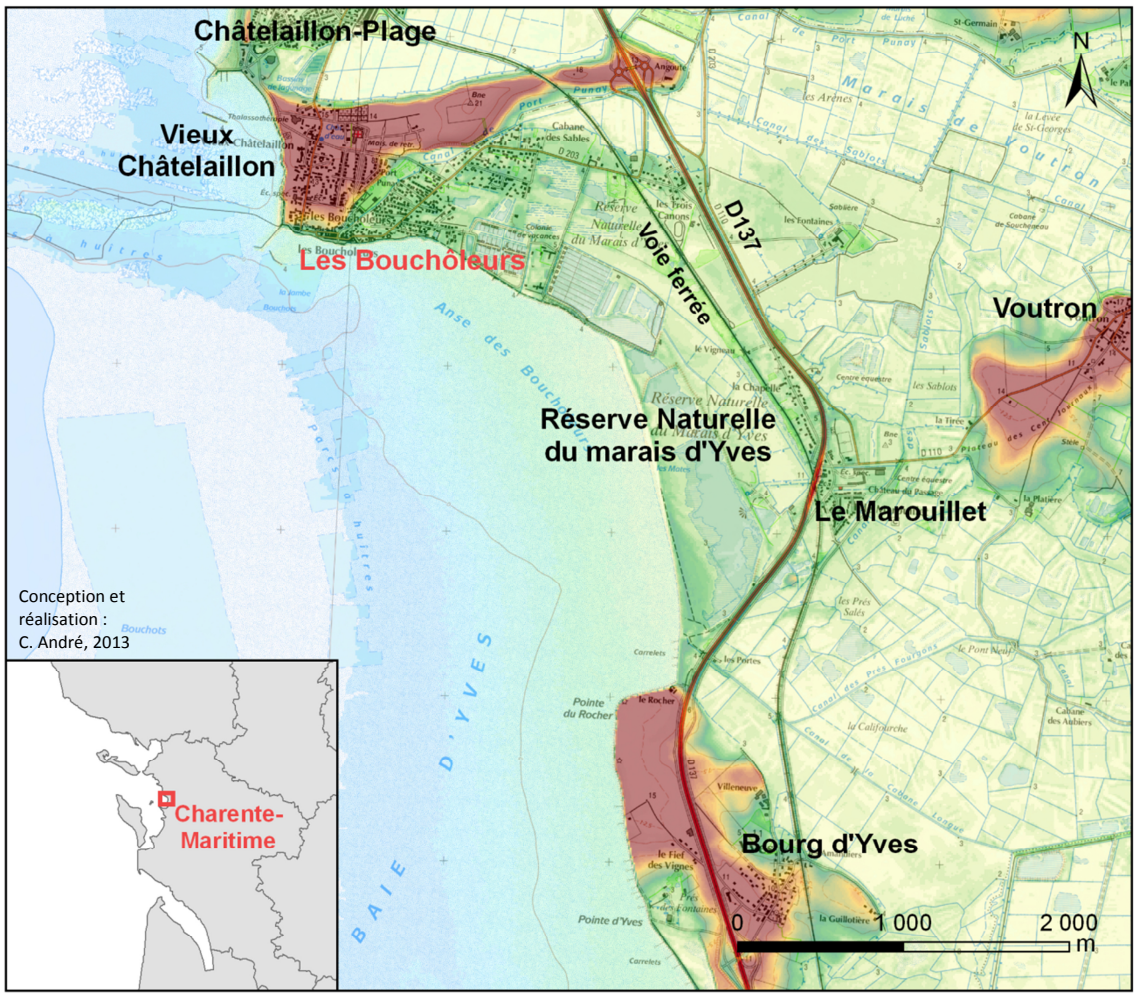


Figure 42 : Carte de localisation du site des Bouchôleurs (fond SCAN 25® et MNT BD ALTI® IGN).

L'anse des Bouchôleurs est constituée par un vaste platier rocheux de faible pente, localement envasé. En front de mer, en continuité du port des Bouchôleurs en direction du sud, s'étendent une zone conchylicole et la Réserve Naturelle du marais d'Yves, propriété du Conservatoire du Littoral, qui occupe 192 hectares. Le trait de côte est aménagé en quai surmonté d'un parapet au niveau du port, fixé par des enrochements au niveau des exploitations conchylicoles (Figure 43), et constitué d'un cordon dunaire sableux au niveau de la réserve naturelle. Le site est fermé à l'est par deux remblais sur lesquels passent la voie ferrée et la voie rapide (D137) reliant La Rochelle à Rochefort (SILYC, 2011).

Figure 43 : Photos des digues du vieux port (gauche) et de la zone conchylicole (droite) (photos © C. André et BRGM).

Les enjeux

En 2009, Châtelaillon-Plage et Yves comptent respectivement 6 081 et 1 425 habitants (données INSEE). La grande majorité de la population de Châtelaillon-Plage habite dans la zone balnéaire au nord du vieux Châtelaillon, tandis que celle d'Yves se répartit sur différents hameaux. Le quartier des Bouchôleurs (incluant les lieux-dits de la Cabane-des-Sables et les Trois-Canons), héberge plus de 700 personnes dans 431 logements sur la commune d'Yves. Côté Châtelaillon, on dénombre une soixantaine de logements (SILYC, 2011). En dehors des quelques maisons composant le front de mer du vieux port, l'essentiel de ces habitations sont très récentes. Ce sont à 95 % des maisons individuelles et à 83 % des résidences principales (données INSEE).

L'activité de pêche du port des Bouchôleurs ayant disparu, l'activité principale du site est la conchyliculture, comportant une quarantaine d'exploitations regroupées dans deux coopératives ostréicoles et mytilicoles. La seconde activité du site est le tourisme, attiré par la réserve naturelle et la pêche à pied. On trouve sur le site quelques commerces, notamment des restaurants en front de mer sur le port, et en retrait de 500 m, le camping de Port-Punay.

L'exposition aux aléas côtiers d'érosion-submersion

Le hameau des Bouchôleurs, avec un trait de côte orienté vers le sud, est protégé des houles océaniques d'ouest et de nord-ouest par la pointe de Châtelaillon, mais plus exposé aux vagues venant du sud. L'ensemble du littoral de la zone semble être en équilibre sédimentaire (la position du trait de côte n'a que très peu évolué en plus de 100 ans). Le cordon dunaire de la réserve naturelle, orienté vers l'ouest, reçoit par la dérive littorale de faibles apports sableux du nord (pointe de Châtelaillon) et du sud (pointe du Rocher). Les vagues arrivant jusqu'au fond de la baie sont habituellement atténuées par les hauts fonds

des Pertuis. Toutefois, au vu de sa faible largeur, le cordon reste vulnérable à l'érosion et à la submersion lors de houles anormalement fortes (SILYC, 2011).

Le quartier résidentiel des Bouchôleurs n'avait, à notre connaissance, pas subi de submersion importante avant la tempête Xynthia. La tempête Martin du 27 décembre 1999, qui avait provoqué des submersions sur l'île de Ré, et dans l'estuaire de la Gironde (ainsi qu'à Châtelaillon-Plage, Fouras et Port-des-Barques), avait inondé la quasi-totalité de la Réserve Naturelle du marais d'Yves, mais épargné la zone urbanisée (SILYC, 2011). En effet, cette tempête, pour laquelle le vent a atteint des vitesses bien supérieures à Xynthia (plus de 200 km/h sur l'île d'Oléron), a heureusement eu lieu par un faible coefficient de marée (de 77). Plus récemment, lors de la tempête Klaus du 23 janvier 2009, qui a touché le sud-ouest de la France, le vent a causé de très importants dégâts dans les forêts des Landes, les dunes du littoral aquitain ont subi une forte érosion due aux vagues, mais peu de submersions ont été à déplorer, excepté dans le bassin d'Arcachon.

La tempête Xynthia

Lors de la tempête Xynthia, c'est la surcote de plus d'1,8 m (Pedreros et al., 2010 ; Bertin et al., 2012), conjuguée à un coefficient de marée de 102 (cote prédite de 3 m NGF), qui est responsable de la submersion de l'ensemble du quartier des Bouchôleurs. Celle-ci a eu lieu d'une part par débordement au niveau de la digue du vieux port et de certains enrochements de la zone conchylicole, et d'autre part par l'ouverture de brèches et par l'arasement généralisé de la dune de la réserve naturelle (Figure 32, page 53), inondant les secteurs de la Cabane-des-Sables et les Trois-Canons par le sud.

Les habitations situées sur le front de mer du vieux port ont subi l'assaut de vagues et de forts courants, notamment au niveau des accès à l'estran qui n'étaient pas dotées de dispositifs de fermeture. Quelques bâtiments ont subi des dommages structuraux (notamment par la percussion d'une voiture contre un mur), et des dommages ont été constatés sur les vérandas du front de mer (Figure 44).

Figure 44 : Photos illustrant les dommages observés aux Bouchôleurs (photos haut © BRGM et bas © Reuters - Régis Duvignau).

La plupart des habitations du quartier, situées en retrait du front de mer, ont été inondées, parfois jusqu'à 1,5 m. La voie ferrée, pourtant située sur un remblai, a été franchie, permettant à la submersion d'atteindre le lieu-dit des Trois-Canons, et de se propager jusque dans le marais de Voutron, par des « buses d'écoulement » sous la D137. Au total, plusieurs centaines de maisons ont été inondées, dont 270 par plus de 1 m d'eau, et deux décès ont été déplorés (Pitié et al., 2011).

Suites de l'évènement

À la suite de la tempête, les habitations situées dans une bande de 50 m du front de mer ont été jugées comme dangereuses pour leurs habitants, et classées en « zones de solidarité » par le Ministère de l'Environnement, afin qu'elles soient acquises par l'État pour mettre en sécurité les habitants. La contestation des élus locaux et des riverains, ainsi que la présentation d'un important projet d'aménagements, a amené à la conclusion que le site pouvait être protégé, et que toutes les expropriations n'étaient pas nécessaires (Pitié et al., 2011).

Ce projet, labellisé en PAPI littoral, comprend notamment :

- La maitrise de l'urbanisation par la mise en place d'un PPRL sur les deux communes,
- Le confortement et le rehaussement de l'ensemble des digues protégeant les Bouchôleurs, ainsi que la mise en place de fermetures amovibles au niveau des accès à l'estran,
- L'amélioration de l'évacuation des eaux pluviales par les différents canaux présents dans le marais (notamment le canal de Port-Punay) et la mise en place de clapets « anti-retour » pour les vannes d'évacuation vers l'océan,
- L'utilisation de la réserve naturelle comme « zone tampon » de stockage des eaux de submersion, en endiguant, en retrait de la côte, ses zones de contact avec les zones conchylicoles et urbanisées, et en rehaussant la voie ferrée pour éviter sa submersion (SILYC, 2011).

Conclusion de la première partie

Les submersions marines étant relativement peu fréquentes en France, le risque de submersion est souvent méconnu des habitants d'un littoral dont l'accélération de l'urbanisation est récente. L'imbrication des nombreux phénomènes physiques générant l'aléa submersion fait que son évaluation est complexe et que la survenance probable d'évènements extrêmes a souvent été sous-estimée. Comme l'a montré la tempête Xynthia, ni les résidents ni les pouvoirs publics ne s'attendaient et n'étaient préparés à un tel évènement, ce qui explique en partie les pertes humaines liées à cette catastrophe.

Pour les mêmes raisons, les dommages des submersions marines et leurs processus sont encore insuffisamment connus en France, car ils ont été très peu traités à ce jour. La fréquence et l'intensité des cyclones sur les côtes américaines, comme l'illustrent l'ouragan Katrina de 2005 (FEMA, 2006 ; Cutter et al., 2006), et plus récemment l'ouragan Sandy de 2012, expliquent l'existence d'une bibliographie développée sur le risque et la vulnérabilité face à la submersion marine aux États-Unis. Il faut cependant noter que l'intensité de l'aléa produit par les cyclones n'est pas comparable à celle des tempêtes hivernales européennes. Par ailleurs, les enjeux bâtis des côtes américaines présentent des caractéristiques particulières, pour des raisons culturelles (constructions en bois, sur pilotis, etc.) et règlementaires (codes de construction), qui rendent difficile la comparaison de l'endommagement lié au risque cyclonique à celui lié aux submersions marines susceptibles d'affecter l'Europe.

On a vu que les notions de vulnérabilité et de dommages sont fortement imbriquées, les paramètres de la première expliquant l'intensité des seconds. Pour ce travail de thèse, nous

nous concentrerons sur l'évaluation des dommages matériels (directs et tangibles) à l'enjeu habitation. La vulnérabilité sera donc employée dans son sens intrinsèque, et non systémique.

L'évaluation des dommages des risques naturels est une problématique des assureurs, mais également des gestionnaires des risques. Dans un contexte de restriction des budgets publics alloués à la prévention, la pertinence des projets est de plus en plus évaluée par des Analyses Coûts-Bénéfices. Là encore, il existe des lacunes importantes : peu d'études ont porté sur la réalisation de modèles d'endommagement pour l'évaluation des dommages (et des bénéfices de la protection) en France et aucune n'a concerné spécifiquement le risque de submersion marine. Les dommages produits par les submersions marines peuvent être appréhendés soit par une approche physique, comme ceux des séismes, soit par une approche économique, comme les inondations fluviales, par le biais des fonctions d'endommagement. Dans le cadre de cette thèse, basée sur des données d'assurance, et par analogie avec les méthodes utilisées pour le risque inondation, nous privilégions l'approche économique. Elle est cependant mise en lien avec l'approche physique au long de cette thèse.

De par la démarche d'analyse de dommages d'évènements passés pour la construction d'un modèle d'évaluation des dommages *ex ante*, c'est sur une méthode empirique (*ex post*), que se base ce travail de recherche. Le problème fondamental de cette approche réside dans l'accès et dans la collecte des données de dommages elles-mêmes, pour lesquelles il n'existe pas d'organisation particulière ni de règles méthodologiques d'archivage en France. La collecte de données sur les dommages *ex post*, et en particulier de données d'assurance, est décrite dans la partie suivante de cette thèse, qui précède l'analyse explicative des observations de dommages par différents paramètres de l'aléa et des enjeux, nécessaire dans le but de mettre en place un modèle pour la prédiction *ex ante* des dommages.

Partie II. Les données de l'évaluation des dommages

Introduction

Comme indiqué dans la partie précédente, notre approche est basée sur une analyse empirique des dommages des tempêtes Johanna et Xynthia, en particulier grâce aux données d'assurance.

En France, il n'existe pas de procédure de retour d'expérience (REX) systématique pour le recueil de données post-catastrophes (Hubert et Ledoux, 1999 ; Vinet, 2007 et 2010). Après un évènement catastrophique, une quantité plus ou moins importante de données est produite, concernant aussi bien les paramètres de l'aléa que les dommages subis, ou encore les modalités de la gestion de crise, mais sans coordination spécifique. Il existe deux principales sources de données : des données provenant de bases de données spécifiques aux risques ou de rapports et de comptes-rendus, et des données qu'il faut collecter pour l'évaluation des dommages, par le biais, par exemple, d'enquêtes de personnes affectées ou de campagnes d'observations de terrain.

Suivant la gravité de l'évènement, les données du premier type seront plus ou moins nombreuses et détaillées. Les REX sur les tempêtes Johanna et Xynthia sont d'un niveau de détail très différent, en raison des différences d'ampleur des deux évènements. Pour Johanna, malgré des dommages liés à la submersion marine répartis sur l'ensemble de la région Bretagne, ces derniers sont restés assez isolés et l'impact médiatique de l'évènement

a été limité ; on ne trouve de références à la tempête que dans des médias locaux. Au contraire, la tempête Xynthia, au vu de l'ampleur des dommages qu'elle a causés, en particulier le nombre de décès, a eu un impact médiatique national et a même été évoquée chez nos voisins européens (par ex. Kolen et al., 2010). L'évènement a entrainé un nombre important de réformes de la politique nationale de gestion des risques littoraux, dont la prescription de nouveaux PPRL dans toute la France. Elle a aussi considérablement accéléré la réalisation du projet de cartographie LIDAR (*LIght Detection And Ranging*) Litto3D®[20] dans les régions Pays de la Loire et Poitou-Charentes, et participé à initier de nombreuses nouvelles études et travaux de recherche sur le risque de submersion marine. Plus de trois ans après la tempête, l'activité médiatique autour des suites de cet évènement est encore importante, en partie à cause de la polémique sur les zones de solidarité et des suites judiciaires de l'évènement[21].

Les sources de données sur les dommages, de toutes sortes et sous différentes formes, sont donc potentiellement nombreuses, même si leur quantité et leur qualité sont très inégales suivant les évènements. Cette partie de la thèse a pour objectif la présentation des différentes sources de données disponibles *ex post* sur les dommages. Nous présentons les données issues de la procédure de reconnaissance de catastrophe naturelle, les données que l'on peut trouver dans les différents documents de retour d'expérience, ainsi que les bilans produits par le secteur de la réassurance, les informations que l'on peut tirer de la presse, et celles qui sont généralement collectées à partir de campagnes d'observations de terrain ou d'enquêtes.

Enfin, nous nous penchons plus en détail sur les données brutes d'assurance, sur lesquelles se base ce travail, et présentons la démarche de reconstitution de l'aléa à l'aide de modélisations hydrauliques, utiles notamment pour une meilleure compréhension des mécanismes physiques d'endommagement.

1. Inventaire des données de retours d'expérience

1.1. Arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle

La base de données publique « Gaspar » (Gestion ASsistée des Procédures Administratives relatives aux Risques naturels[22]), gérée par le Ministère de l'Environnement, contient la liste des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle des communes depuis la

[20] Coordonné par l'IGN et le SHOM, http://www.shom.fr/les-activites/projets/modele-numerique-terre-mer.
[21] Voir par exemple le site de recueil de témoignages et de relai d'actualités en rapport avec la commune de la Faute-sur-Mer, http://www.lafautesurmer.net, toujours actif plus de trois ans après Xynthia.
[22] http://macommune.prim.net/gaspar

création du régime CatNat en 1982. Ces arrêtés indiquent, pour chaque commune, la date de survenance de l'évènement ainsi que le type d'aléa associé aux sinistres. Ils permettent donc d'identifier les communes touchées par des catastrophes naturelles selon le type d'aléa, et de connaitre la récurrence des évènements. Des études proposent des indicateurs réalisés à partir de ces données ; c'est le cas d'un indicateur de sinistralité pour les inondations diffusé par l'Observatoire National des Risques Naturels (ONRN[23]). Par ailleurs, un indicateur spécifique à la submersion marine avait été produit à partir des mêmes données par le CETMEF (2011).

Un des problèmes de la base de données Gaspar, mentionné par J. Douvinet (2006 et 2010), réside dans la codification de l'aléa (dit « nature du phénomène »), qui ne suit malheureusement pas une logique rigoureuse : certains intitulés sont généraux et assez explicites, par exemple « Séisme » ou « Tempête ». D'autres sont des combinaisons de multiples types d'aléas, par exemple : « Inondations par remontée de nappe phréatique et mouvements de terrain » ou « Inondations et coulées de boue, Chocs mécaniques liés à l'action des vagues et vents cycloniques ». Ce phénomène est dû au recours insuffisant à l'expertise scientifique pour la prise de décision de la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, déjà mentionné (cf. partie I, section 3.5). On peut par exemple noter que certains codes d'intitulés d'aléa n'ont servi que pour un seul évènement, voire pour un seul département ou même une seule commune.

L'analyse des arrêtés de catastrophe naturelle parus pour les évènements Johanna et Xynthia souligne que toutes les communes dont l'arrêté est publié au Journal Officiel un même jour, portent en général le même intitulé d'aléa, alors que des communes reconnues lors d'une session différente peuvent porter un intitulé d'aléa différent, même si elles ont été touchées par le même évènement.

Pour la tempête Johanna, sur 125 communes reconnues en état de catastrophe naturelle, 119 ont été reconnues sous l'intitulé d'aléa « Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues » et 6 autres sous l'intitulé d'aléa « Chocs mécaniques liés à l'action des vagues », pour la seule raison apparente que ces décisions ont été prises à des dates différentes, alors que rien ne peut en première analyse différencier ces communes du point de vue de l'aléa (Figure 45).

[23] http://www.onrn.fr/site/rubriques/indicateurs/cartographie.html, indicateur préalablement diffusé sur les portails cartographiques de la CCR E-risk - https://erisk.ccr.fr (public) et Ceres - https://ceres.ccr.fr (accès restreint aux compagnies d'assurances et aux services de l'État). Voir aussi recueil (MEDDE, CCR et MRN, 2013).

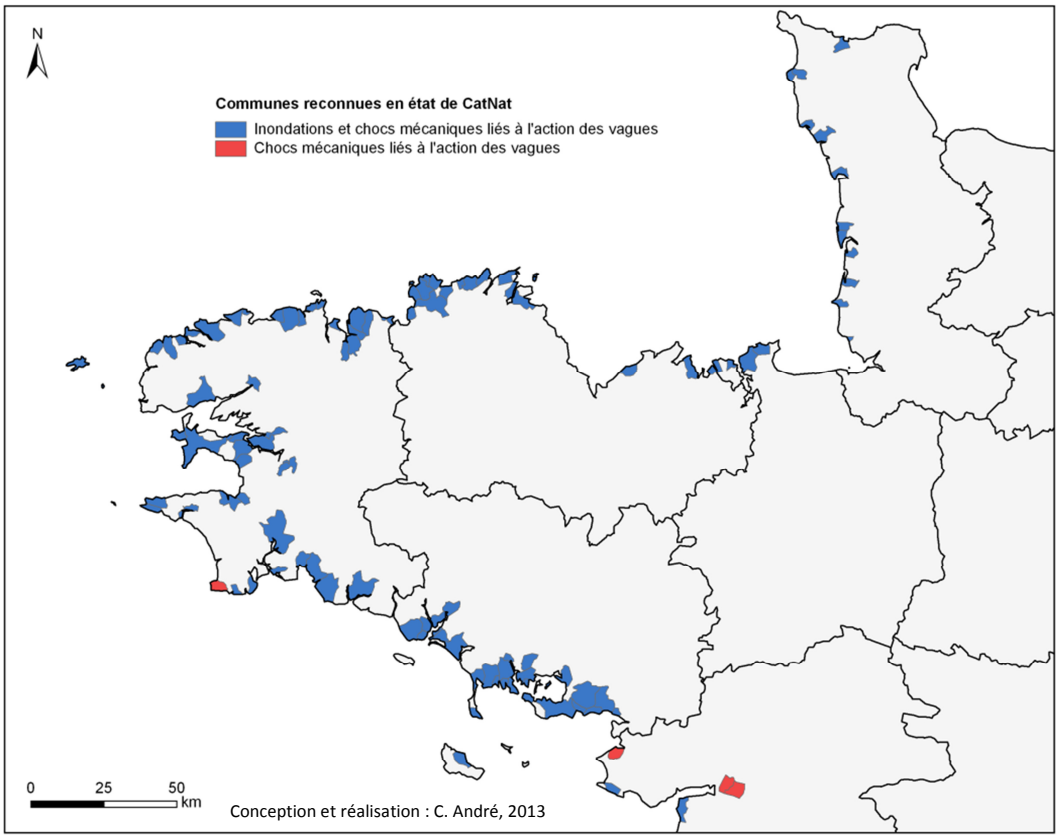


Figure 45 : Carte des communes reconnues en état de catastrophe naturelle après la tempête Johanna (source : base de données Gaspar).

Pour la tempête Xynthia, on retrouve le même phénomène, avec 1 553 communes reconnues sous différentes appellations :

- 24 communes en « Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues »,
- 77 communes en « Chocs mécaniques liés à l'action des vagues »,
- 110 communes en « Inondations et coulées de boue » (dont certaines se trouvent sur le littoral),
- 2 communes en « Inondations, coulées de boue et chocs mécaniques liés à l'action des vagues » (dont une dans les terres et l'autre sur le littoral),
- les 586 communes des départements des Deux-Sèvres et de la Vienne en « Inondations, coulées de boue et mouvements de terrain »,
- les 754 communes des départements de Charente-Maritime et de Vendée en « Inondations, coulées de boue, mouvements de terrain et chocs mécaniques liés à l'action des vagues » (Figure 46).

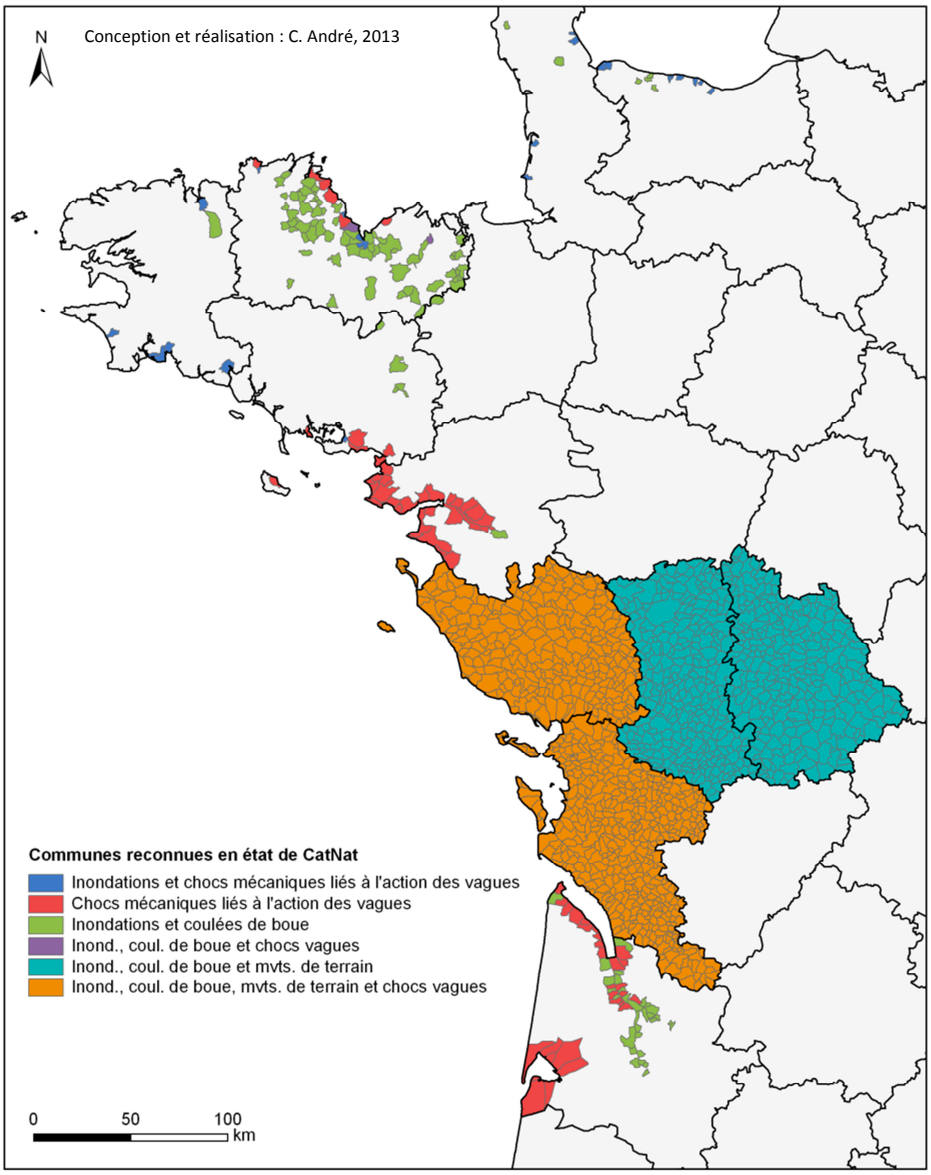


Figure 46 : Carte des communes reconnues en état de catastrophe naturelle après la tempête Xynthia (source : base de données Gaspar).

Même si l'élément « Chocs mécaniques liés à l'action des vagues » est logiquement lié au phénomène de submersion marine, puisqu'il est principalement attribué aux communes littorales, il n'est pas strictement lié à la question de l'inondation par de l'eau de mer, et encore moins au constat que les dommages sont réellement dus aux vagues, les variantes paraissant, comme pour la tempête Johanna, être liées aux dates de reconnaissance. De plus, pour les deux derniers cas spécifiques d'intitulés de l'aléa, l'ensemble des communes des quatre départements les plus touchés ont été reconnues dès le 1er mars 2010, au lendemain de la tempête, sans aucun compte-rendu détaillé sur les dommages subis et le type d'aléa impliqué, contrairement à ce que définit la procédure habituelle de reconnaissance.

Ainsi, les 586 communes des Deux-Sèvres et de la Vienne ont été reconnues en état de catastrophe naturelle, alors que la majorité des dommages dans ces départements sont dus au vent, et les 754 communes de Charente-Maritime et de Vendée sont indiquées comme ayant subi des « Chocs mécaniques liés à l'action des vagues », alors que seules 83 d'entre elles sont situées sur le littoral. Les intitulés d'aléa attribués pour la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, en particulier ceux renseignés en période de crise, ne permettent donc pas de définir avec précision le type d'aléa responsable des dommages, en dehors des grandes catégories comme les inondations (au sens large), la sécheresse (mouvements liés à la déshydratation et la réhydratation des sols) ou les séismes.

De plus, comme indiqué en partie I, les critères scientifiques utilisés pour caractériser « l'intensité anormale » de l'évènement, notamment pour les inondations, sont peu fiables et la reconnaissance de certaines communes est biaisée, par exemple à proximité des grandes villes. Certaines communes ont d'ailleurs été reconnues en état de catastrophe naturelle suite à des inondations à une fréquence bien supérieure à la fréquence décennale, seuil de fréquence au-dessus duquel elles n'auraient en théorie pas dues être reconnues (Douvinet 2006 et 2010 ; Gérin, 2011).

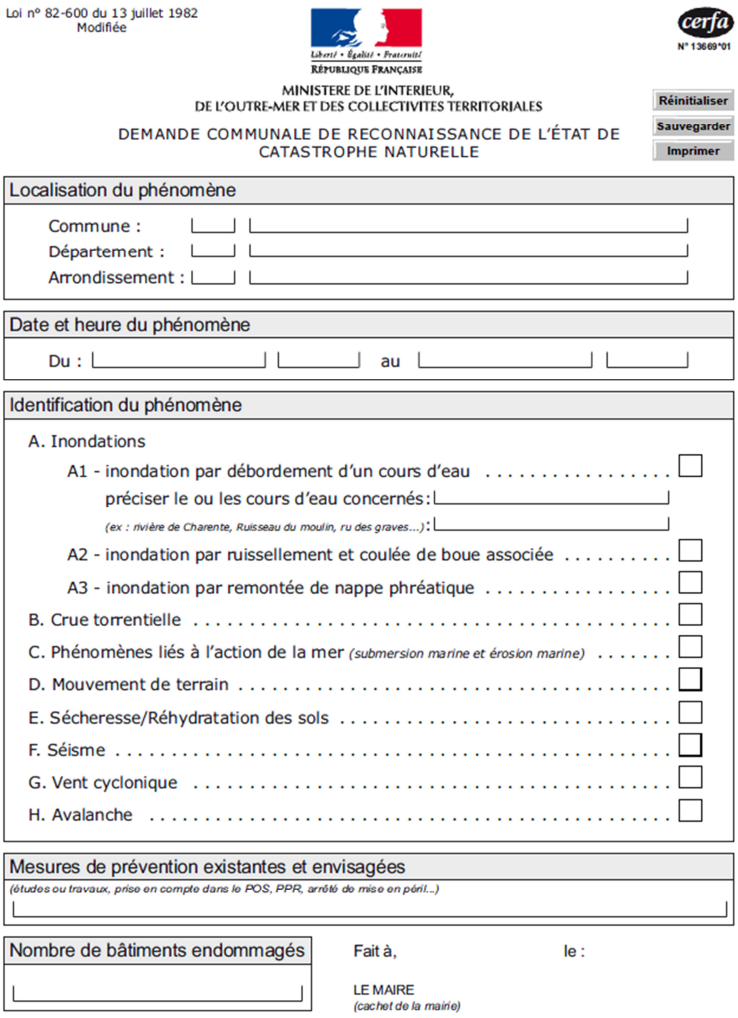
Un autre problème majeur pour l'évaluation des dommages à partir de la base de données Gaspar est que l'ampleur de ces derniers n'est pas prise en compte pour la reconnaissance en état de catastrophe naturelle : une commune reconnue pour des dommages très limités a le même arrêté qu'une commune complètement inondée ; l'état de catastrophe naturelle ne donne donc aucune information sur la gravité des dommages. En toute rigueur, l'ampleur des dommages concernant des biens assurés pourrait être prise en compte pour la reconnaissance, puisque l'état de catastrophe naturelle ne sert qu'à permettre l'indemnisation de ces dommages par les assureurs ; une commune n'a donc pas lieu d'être reconnue pour des dommages non assurés. Cependant, ces éléments n'ont pas de poids dans la décision de la reconnaissance. Au final, la répétitivité des petits sinistres est surestimée au détriment des inondations importantes, et les secteurs les plus reconnus ne sont pas les plus peuplés, ni forcément les plus exposés à des aléas forts. Enfin, la relativement courte existence de la base (création en 1982) ne permet pas d'avoir des statistiques significatives pour les aléas à période de retour moyenne ou longue, tels que les séismes et dans une moindre mesure, les inondations fluviales et les submersions marines (Gérin, 2011 ; Douvinet et Vinet, 2012a et b).

L'utilisation de la base de données Gaspar montre donc de nombreuses limites, d'un côté pour la détermination de la fréquence des évènements, et de l'autre pour l'analyse des dommages, qui ne font pas partie des critères de reconnaissance. Pour ces raisons, nous

avons donc décidé de ne pas utiliser cette source dans le cadre de cette thèse. Cependant, les dossiers présentés par les communes « candidates » à la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle peuvent contenir des informations plus détaillées sur l'impact des évènements.

1.2. Dossiers communaux de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle

Pour la reconnaissance des communes en état de catastrophe naturelle, la procédure implique que chaque commune produise une demande auprès de la préfecture, qui rassemble les dossiers et les transmet à une commission interministérielle chargée de donner un avis favorable ou défavorable sur la reconnaissance. Pour cette procédure, les communes ont à remplir un formulaire, dont la version actuelle (en vigueur lors de Xynthia) est présentée en Figure 47.



Loi n° 82-600 du 13 juillet 1982
Modifiée

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

cerfa
N° 13669*01

MINISTERE DE L'INTERIEUR,
DE L'OUTRE-MER ET DES COLLECTIVITES TERRITORIALES

DEMANDE COMMUNALE DE RECONNAISSANCE DE L'ÉTAT DE CATASTROPHE NATURELLE

Réinitialiser
Sauvegarder
Imprimer

Localisation du phénomène

Commune :
Département :
Arrondissement :

Date et heure du phénomène

Du : au

Identification du phénomène

A. Inondations
A1 - inondation par débordement d'un cours d'eau
préciser le ou les cours d'eau concernés :
(ex : rivière de Charente, Ruisseau du moulin, ru des graves...) :
A2 - inondation par ruissellement et coulée de boue associée
A3 - inondation par remontée de nappe phréatique
B. Crue torrentielle
C. Phénomènes liés à l'action de la mer *(submersion marine et érosion marine)*
D. Mouvement de terrain
E. Sécheresse/Réhydratation des sols
F. Séisme
G. Vent cyclonique
H. Avalanche

Mesures de prévention existantes et envisagées

(études ou travaux, prise en compte dans le POS, PPR, arrêté de mise en péril...)

Nombre de bâtiments endommagés

Fait à, le :

LE MAIRE
(cachet de la mairie)

Figure 47 : Formulaire de demande communale de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle[24].

[24] http://www.interieur.gouv.fr/Le-ministere/La-Securite-civile/Nos-missions/La-protection-des-personnes-des-biens-et-de-l-environnement/Le-dispositif-de-reconnaissance-de-l-etat-de-catastrophe-naturelle

Ce document d'une page, relativement concis, rassemble les informations suivantes :

- Nom de la commune,
- Date et heure de début et de fin du phénomène,
- Identification du phénomène, selon les principales catégories suivantes : inondations, crue torrentielle, phénomènes liés à l'action de la mer, mouvement de terrain, sécheresse, séisme, vent cyclonique, avalanche (avec les limites signalées plus haut),
- Mesures de prévention existantes et envisagées,
- Nombre de bâtiments endommagés.

Le document en vigueur au moment de la tempête Johanna, légèrement différent, comportait quelques informations supplémentaires, notamment une catégorie « dommages » plus étoffée, listant les types de dommages recensés selon les catégories suivantes : biens privés, pertes d'exploitation agricoles et commerciales, biens publics, terrains emportés, autres dommages,

Ces informations sont trop peu détaillées pour pouvoir alimenter de manière significative une évaluation des dommages. Cependant, bien souvent, les communes joignent à ce formulaire un nombre plus ou moins important de documents, cherchant à justifier la nécessité de la reconnaissance de leur territoire en état de catastrophe naturelle. Parmi eux on peut trouver :

- Des descriptions plus détaillées des dommages subis, concernant soit les biens publics de la commune dont les ouvrages de défense (premiers éléments impactés par les submersions), soit les biens assurés (par le biais de copies de courriers de particuliers ou de professionnels envoyés à la commune suite à la catastrophe).
- Les dommages sont parfois localisés sur une carte de la commune ainsi que les étendues inondées, accompagnés de photos, et même d'estimations de leur coût.

Ces éléments fournis par les communes concernant les observations de leurs dommages peuvent donc apporter une information synthétique sur les dommages, information qui n'existe pas par ailleurs. Ces documents sont généralement archivés par les préfectures, la plupart du temps sous la forme de dossiers papier, que nous avons été autorisés à consulter dans les départements des Côtes-d'Armor et du Morbihan pour la tempête Johanna. Cependant, les éléments listés ne sont en aucun cas obligatoires pour la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. Seul le formulaire d'une page est demandé à toutes les communes, les autres éléments mentionnés sont donc souvent absents, soit très hétérogènes en quantité et qualité. Pour la tempête Xynthia, l'ensemble des communes des quatre départements les plus touchés ayant été reconnues dès les 1er mars, elles n'ont pas

eu à constituer de dossiers. Au final, il a été décidé de ne pas utiliser les informations de ces dossiers pour la quantification des dommages, au regard de la précision supérieure des données d'assurance. Leur intérêt réside toutefois dans l'inventaire des dommages non assurés, concernant par exemple les infrastructures publiques, les ouvrages de protection, qui y sont souvent plus renseignés que les dommages des particuliers, et pour lesquels il n'existe bien souvent pas d'autre source d'information, excepté celles contenues dans les documents de retour d'expérience des évènements.

1.3. Rapports et comptes-rendus institutionnels

Après une catastrophe naturelle, différents types de rapports et de comptes-rendus sont réalisés aux différents niveaux des services de l'État.

Pour un évènement régional comme la tempête Johanna, des études et documents sont produits par les services déconcentrés de l'État tels que les Centres d'Études Techniques de l'Équipement (CETE), les Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) ou les Directions Départementale des Territoires et de la Mer (DDTM), avec l'aide de bureaux d'études spécialisés dans les risques naturels. Ces études portent sur des synthèses d'observation des niveaux d'aléa, ainsi que des dommages associés. De plus, des comptes-rendus sur les aspects de la gestion de crise peuvent éventuellement être produits par les Services Interministériels de Défense et de Protection Civile (SIDPC) des préfectures (Tableau 3).

Sélection de rapports pour la tempête Johanna
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.
DDTM 29, 2010. Cartographie des submersions et des dégâts côtiers de la tempête de mars 2008 dans le Finistère.
Géos-AEL, 2011. Atlas des risques littoraux sur le département du Morbihan. Phase 1 : recensement et conséquences des tempêtes et coups de vent majeurs, 476p.

Tableau 3 : Sélection de rapports pour la tempête Johanna.

Pour un évènement comme Xynthia, dont les conséquences ont été dramatiques, et pour lequel des procédures spécifiques d'expropriation ont été mises en place, outre ces études « locales », ont été réalisées de nombreuses études sous un pilotage national, par le Ministère de l'Environnement, l'Assemblée Nationale, le Sénat, la Cour des Comptes, etc. et par les instituts de recherche nationaux concernés (BRGM, CETMEF, SHOM, etc.). Ces études concernent des expertises détaillées des dommages sur le terrain, des recueils de témoignages d'experts scientifiques et de responsables locaux, des réflexions sur la

responsabilité des différentes parties prenantes dans la catastrophe, et des projets d'adaptations de la règlementation sur la prévention des risques (Tableau 4).

Sélection de rapports pour la tempête Xynthia

Rapports d'observations de terrain sur l'aléa et les dommages pour le retour d'expérience, incluant les deux rapports spécifiques à la gestion des zones de solidarité :

Pedreros, 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, 43p, http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-58261-FR.pdf.

Garcin, M., Pedreros, R., Monfort, D. et Krien, Y., 2011. Base de données d'observation des effets de la tempête Xynthia sur le littoral, rapport BRGM/RP-59395-FR, 23p, http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-59395-FR.pdf.

Kolen, B., Slomp, R., Van Balen, W., Terpstra, T., Bottema, M. et Nieuwenhuis, S., 2010. Learning from French experiences with storm Xynthia: damages after a flood, rapport HKV lijn in water et Rijkswaterstaat, Waterdienst, Pays-Bas, 73p, http://www.rijksoverheid.nl/documenten-en-publicaties/rapporten/2010/09/01/learning-from-french-experiences-with-storm-xynthia-damages-after-a-flood.html.

Pitié, C. et Puech, P., 2010. Expertise complémentaire des zones de solidarité délimitées en Vendée suite à la tempête Xynthia survenue dans la nuit du 27 au 28 février 2010, 58p.

Pitié, C., Bellec, P., Maillot, H., Nadeau, J. et Puech, P., 2011. Expertise des zones de solidarité Xynthia en Charente-Maritime, rapport principal, 66p.

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.

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, 78p, http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/le-retour-d-experience-de-la-a1792.html.

Rapports nationaux sur la gestion de la crise et les responsabilités de la catastrophe :

MEEDDM, MEFI et MIOMCT, 2010. Tempête Xynthia - retour d'expérience, évaluation et propositions d'action, 92p.

Anziani, A., 2010. Rapport d´information fait au nom de la mission commune d'information sur les conséquences de la tempête Xynthia, Sénat, session ordinaire de 2009-2010, n° 647, rapport et auditions, 227p et 247p.

Léonard, J.-L., 2010. Rapport d'information de la mission d'information sur les raisons des dégâts provoqués par la tempête Xynthia, Assemblée Nationale, n° 2697, 487p.

Cour des comptes, 2012. Les enseignements des inondations de 2010 sur le littoral atlantique (Xynthia) et dans le Var, Rapport public thématique, 305p.

Tableau 4 : Sélection de rapports pour la tempête Xynthia.

Sélection de rapports pour la tempête Xynthia (suite)
Évolutions de la législation en matière de prévention des risques découlant de Xynthia :
MEDDTL, MIOMCT, MEFI et MBCPFPRE, 2011. Plan submersions rapides, submersions marines, crues soudaines et ruptures de digues, 79p.
MEDDTL, 2012. Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, vers la relocalisation des activités et des biens, 19p.
Prescription nationale de nombreux PPRL et publication d'une nouvelle version du guide méthodologique pour la réalisation de ces PPR (MEDDE/DGPR, 2013).
Labellisation pour la première fois de projets PAPI littoraux liés au risque de submersion marine.
Mise en place de la vigilance Météo-France « vagues-submersion ».

Tableau 4 (suite) : Sélection de rapports pour la tempête Xynthia.

Au sein de la communauté scientifique, Xynthia a également donné lieu à de nombreux colloques nationaux et à une importante production de publications, dont des recueils d'E. Garnier et F. Surville (2010) et de V. Przyluski et S. Hallegatte (2012). Ces différents documents contiennent des informations sur les dommages, à différents niveaux, mais aucun d'entre eux n'a pour vocation de faire un bilan exhaustif des dommages subis sur tous les types d'enjeux confondus, et très peu abordent l'aspect économique des dommages.

Seule exception à cette règle, on peut mentionner que pour la tempête Xynthia, deux recueils exceptionnels de l'impact économique de la catastrophe ont été réalisés, en vue d'évaluer l'éligibilité des sinistrés à l'obtention de subventions, dans le cadre du programme national « 122 » destiné aux collectivités territoriales et dans celui de l'aide fournie par le Fonds de Solidarité de l'Union Européenne (FSUE) en cas de catastrophe majeure (Tableau 5).

Rapports pour l'évaluation économique des dommages de Xynthia
MEEDDM, MIOMCT et MBCPFPRE, 2010. Rapport sur l'évaluation des dommages causés par la tempête Xynthia aux biens non assurés des collectivités territoriales à prendre en compte au titre de la mise en œuvre du programme 122, 46p.
MEEDDM, MIOMCT, MBCPFPRE et MAAP, 2010. Rapport sur l'évaluation des dommages causés par la tempête Xynthia des 27 et 28 février 2010 à prendre en compte a titre du Fonds de Solidarité de l'Union Européenne, 48p.

Tableau 5 : Rapports pour l'évaluation économique des dommages de Xynthia.

Ces deux rapports relèvent d'une procédure tout à fait exceptionnelle du fait de l'ampleur de l'évènement. Les informations qu'ils contiennent sont utiles pour la réalisation d'un bilan global du coût des dommages, mais ne donnent pas de clés particulières pour la compréhension de ces derniers et la réalisation de méthodologies pour l'évaluation de dommages, les données restituées étant trop agrégées. Pour l'obtention de données

économiques sur les catastrophes, on se tourne donc logiquement vers les assureurs et les réassureurs.

1.4. Bilans et modélisations du secteur de la réassurance

Il existe, au sein du secteur de l'assurance et de la réassurance, une production d'informations sur les dommages liés aux catastrophes naturelles. Réalisées en particulier par les réassureurs et les agences de modélisation économique, des études chiffrées des dommages sont régulièrement publiées, réalisées soit à partir du recueil des coûts réels indemnisés par les sociétés d'assurance « cédantes », soit grâce à des modèles d'évaluation des pertes.

Les bilans issus des informations fournies par les compagnies d'assurance servent la plupart du temps à la publication *ex post* d'indicateurs synthétiques (coût moyen des sinistres pour un évènement, fréquence des sinistres pour un type de risque, etc.) le plus souvent agrégés spatialement, par exemple à une résolution départementale ou communale. Là encore, des données sont publiées depuis peu en France par l'Observatoire National des Risques Naturels (MEDDE, CCR et MRN, 2013).

D'un autre côté, des résultats de modélisations en temps réel du coût probable des dommages, pour les évènements importants, sont publiés par la presse spécialisée du milieu de l'assurance. Ces estimations, souvent disponibles dès les premiers jours suivant un évènement, sont affinées tout au long de la période de traitement des sinistres pas les assureurs, puis validés et publiés dans des rapports plus détaillés, une fois la phase de gestion de crise passée. Pour Xynthia, on peut par exemple citer les articles de l'Argus de l'assurance[25], qui indiquent que les premières modélisations, rectifiées les semaines suivantes, avaient eu tendance à sous-estimer les pertes de l'évènement. Les études de modélisation *ex ante* du secteur de la réassurance (Munich Re, Swiss Re, etc.), des courtiers en réassurance (Aon Benfield, Guy Carpenter, Willis) et des agences de modélisation (AIR, RMS, EQECAT) sont assez peu développées en France du fait de la situation de monopole de la CCR sur le marché des catastrophes naturelles. Les données issues de leurs modèles ne sont le plus souvent publiées qu'à l'échelle d'une estimation globale du coût des dommages par pays pour un évènement donné.

[25] « Xynthia : les premières estimations » du 04 mars 2010 (http://www.argusdelassurance.com/acteurs/xynthia-les-premieres-estimations.42496) et « Xynthia : la facture se précise » du 15 mars 2010 (http://www.argusdelassurance.com/a-la-une/xynthia-la-facture-se-precise.42721).

Les assureurs eux-mêmes ne possédant chacun qu'une part limitée du marché, leurs données ne représentent donc qu'une partie des biens assurés touchés par une catastrophe, et ils ne publient généralement pas de données sur le coût des dommages. De plus, les assureurs ne faisant que peu appel aux Systèmes d'Information Géographique (SIG), ils ne disposent la plupart du temps pas de données spatialisées sur les dommages (Chemitte, 2008).

L'exception, pour la tempête Xynthia, est un bilan assez détaillé des coûts réalisé par les organismes représentants des deux familles d'assurance en France : la FFSA (Fédération Française des Sociétés d'Assurance) et le GEMA (Groupement des Entreprises Mutuelles d'Assurance) en 2011 (FFSA et GEMA, 2011). Ce rapport, issu du recensement du coût des dommages pour presque l'ensemble de la profession française, détaille notamment les dommages en fonction des différents grands types d'enjeux tels que définis par les contrats d'assurance (biens résidentiels, entreprises/commerces, exploitations agricoles, véhicules, etc.). Cette initiative reste cependant exceptionnelle. Ce document a notamment pu être utilisé dans le présent travail pour déterminer la représentativité de l'échantillon de données d'assurance collecté par rapport à l'ensemble des dommages de la tempête Xynthia.

Les données produites *ex post* dans le secteur de l'assurance peuvent donc servir à comparer plusieurs évènements, ou à identifier les zones statistiquement plus exposées à certains types d'aléas. Cependant, dans le cadre de l'analyse des dommages, et du développement de modèles d'évaluation des coûts *ex ante*, ces données sont généralement trop agrégées. Comme la plupart du temps, elles ne sont pas accompagnées d'informations descriptives et qualitatives, elles sont peu détaillées et elles ne peuvent être géolocalisées : elles ne peuvent donc pas servir à l'analyse détaillée des relations entre les dommages et l'aléa. Ce n'est donc pas à cette échelle que les données d'assurance peuvent aider à une meilleure compréhension des processus d'endommagement.

Au contraire des données *ex post* indiquées jusqu'à présent, les sources de données détaillées dans les sections suivantes, y compris les données brutes d'assurance, ne sont pas des données organisées, mais des données qu'il faut aller recueillir à leur source pour la description et la compréhension des dommages.

1.5. Informations issues d'articles de la presse généraliste

Les catastrophes naturelles sont des évènements qui font parler d'eux dans la presse ; suivant l'ampleur de l'évènement, la couverture médiatique de celui-ci est très différente. Les évènements météorologiques étant la plupart du temps anticipés lors de bulletins

spécialisés, les journaux relayent dans un premier temps les alertes de tempête et les cartes de vigilance. Ensuite, dès le jour de l'évènement, des premières informations sur les dommages se retrouvent dans la presse, sous la forme de reportages de terrain, d'interview d'élus ou de sinistrés, etc. Les informations relayées se limitent souvent aux plus exceptionnelles : les décès, les dommages les plus spectaculaires, concernant par exemple les ouvrages de protection en milieu urbain, le nombre de foyers privés d'électricité suite aux dégâts dus au vent sur les lignes électriques, etc. Quand les articles abondent sur un évènement, on constate que ces informations issues de témoignages individuels, recueillies et diffusées « dans le feu de l'action » sont assez imprécises, parfois contradictoires selon les sources, les journalistes n'ayant pas le temps de vérifier toutes les informations (Hay-Lepêtre, 2005). D'une manière générale, les informations disponibles sont plus qualitatives que quantitatives, et peuvent être déformées par la couverture médiatique de l'évènement : on ne peut donc pas les considérer comme très fiables et encore moins comme exhaustives et représentatives des dommages.

L'évaluation des dommages pour les évènements historiques repose souvent sur des récits des faits issus de la presse, qui sont dans ce cas la seule source d'information disponible. Pour les évènements récents, les articles de presse ne sont pas une source de données précise pour l'évaluation des dommages, leur intérêt réside toutefois dans l'archivage d'images (photo ou vidéo), qui sont souvent la seule source de données audiovisuelles de l'évènement et de ses dommages.

1.6. Données de terrain

Après une catastrophe, les scientifiques et experts des risques (chercheurs et bureaux d'études) vont naturellement chercher à dresser le bilan des dommages afin d'en analyser les modalités, même sans aller jusqu'à des évaluations économiques. Le meilleur moyen d'obtenir des données descriptives sur les dommages ainsi que sur l'aléa, à un niveau suffisamment détaillé pour en tirer des conclusions scientifiques, est de réaliser des campagnes d'observation de terrain. En effet, après un évènement d'inondation, des traces laissées par l'eau restent visibles pendant plusieurs jours à plusieurs semaines. Des levés de terrain, éventuellement associés au recueil de témoignages des résidents, permettent de récupérer une information sur les hauteurs d'inondation et d'observer sur place le type de dommages produits par l'aléa.

1.6.1. Présentation des données de terrain collectées après les tempêtes Johanna et Xynthia

De tels levés ont eu lieu après des deux tempêtes. Pour la tempête Johanna, la DDTM du Finistère a réalisé un atlas des submersions et des « dégâts côtiers » (concernant principalement les ouvrages de protection et les équipements publics) sur tout le département (Figure 48).

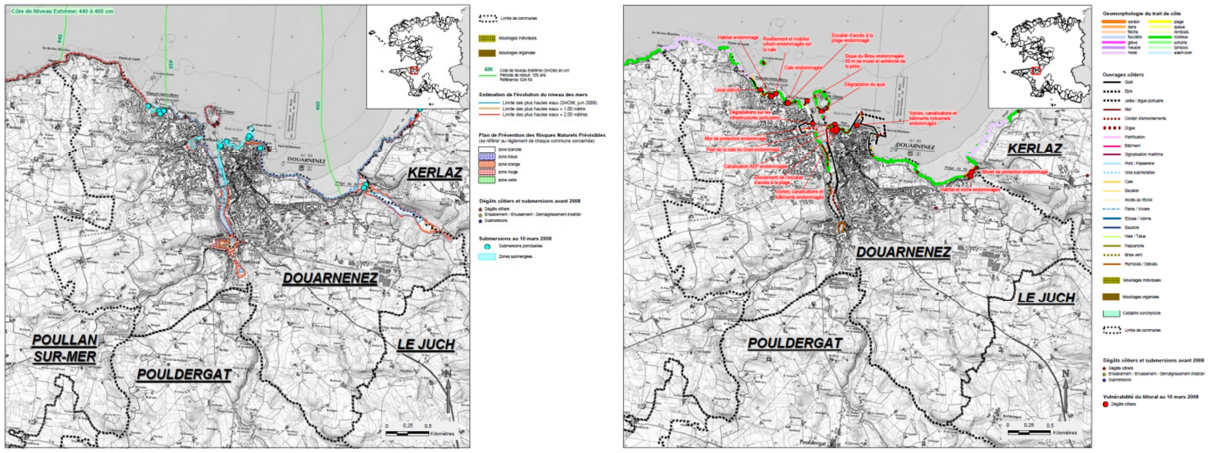


Figure 48 : Extrait de l'atlas des submersions et des dégâts côtiers de Johanna dans le Finistère, d'après DDTM 29, 2010.

Dans le cadre de sa thèse, J.-M. Cariolet (2011) a cartographié la submersion et relevé des hauteurs d'eau, à partir de mesures et des témoignages des habitants, sur plusieurs sites inondés en Bretagne, dont la commune de Gâvres (Figure 49).

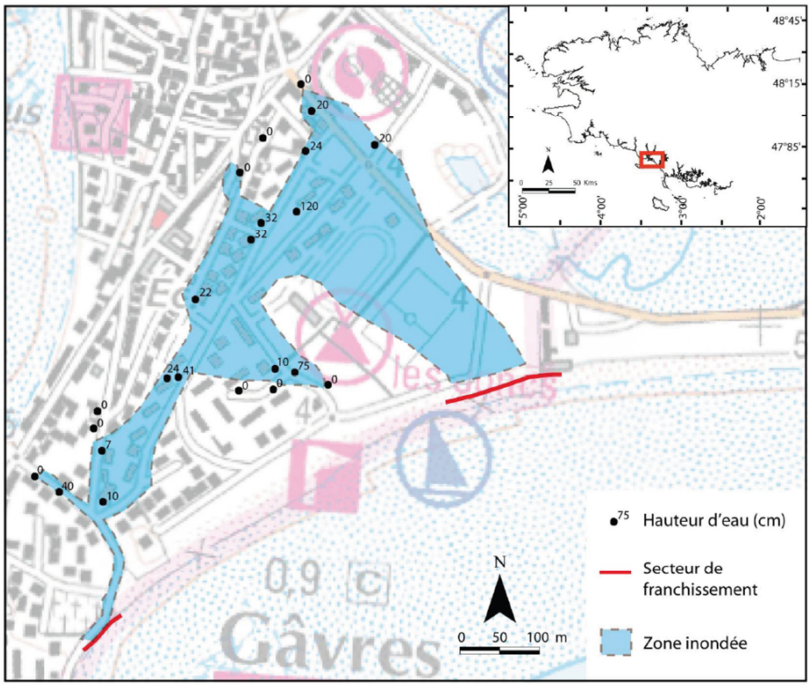


Figure 49 : Carte de la zone de Gâvres inondée lors de Johanna, d'après Cariolet, 2010 et 2011.

Pour Xynthia, les deux documents officiels de retour d'expérience (REX), en Charente-Maritime et en Loire-Atlantique et Vendée, compilent des cartographies de la submersion indiquant les étendues inondées, des levés de hauteur d'eau réalisés par des cabinets de géomètres et les services techniques de l'État, ainsi que les zones d'érosion du trait de côte et les zones de franchissement et de rupture des digues sur l'ensemble des sites inondés dans les deux départements, afin de conserver une mémoire précise de l'évènement (Figure 50).

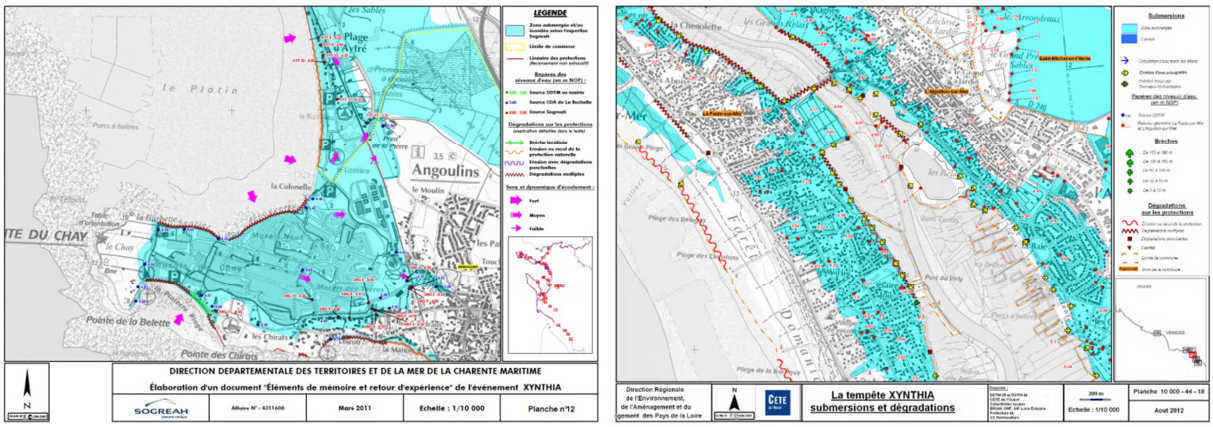


Figure 50 : Extraits des cartographies du REX Xynthia à Angoulins et Aytré en Charente-Maritime et à la Faute et l'Aiguillon-sur-Mer en Vendée, d'après Sogreah, 2011 et Devaux et al., 2012.

1.6.2. Reconstitution des hauteurs d'eau par interpolation des levés de terrain

Les hauteurs d'eau relevées par J.-M. Cariolet (2010 et 2011) après Johanna sur le site de Gâvres étant assez dispersées, elles donnent un ordre de grandeur qui permettra de valider les données de hauteur d'eau provenant des dossiers d'assurance ou des modèles hydrauliques, mais elles ne permettent pas de reconstituer la hauteur pour chaque habitation.

Au contraire, les données des deux documents de retour d'expérience des départements de Vendée et de Charente-Maritime, pour la tempête Xynthia (Sogreah, 2011 ; Devaux et al., 2012), sont beaucoup plus nombreuses et détaillées. Les levés de la Sogreah sont par exemple associés à des fiches dans lesquelles sont précisées la méthode de mesure, la cote NGF maximale de l'inondation, et celle du seuil du bâtiment sur lequel a été réalisée l'observation, ce qui permet de retrouver la hauteur d'eau exacte dans le bâtiment en question. Grâce au grand nombre de levés et grâce aux données de topographie LIDAR disponibles en Vendée et en Charente-Maritime, nous avons réalisé, pour chaque site inondé comportant suffisamment de mesures, une cartographie des hauteurs d'eau en utilisant une méthode d'interpolation des cotes maximales atteintes entre les points de

levés sous SIG. Cette méthode permet d'obtenir une hauteur d'eau approximative de la submersion pour toutes les habitations des zones inondées, de manière plus précise que grâce à une simple projection du niveau d'eau à la côte sur la topographie (Figure 51).

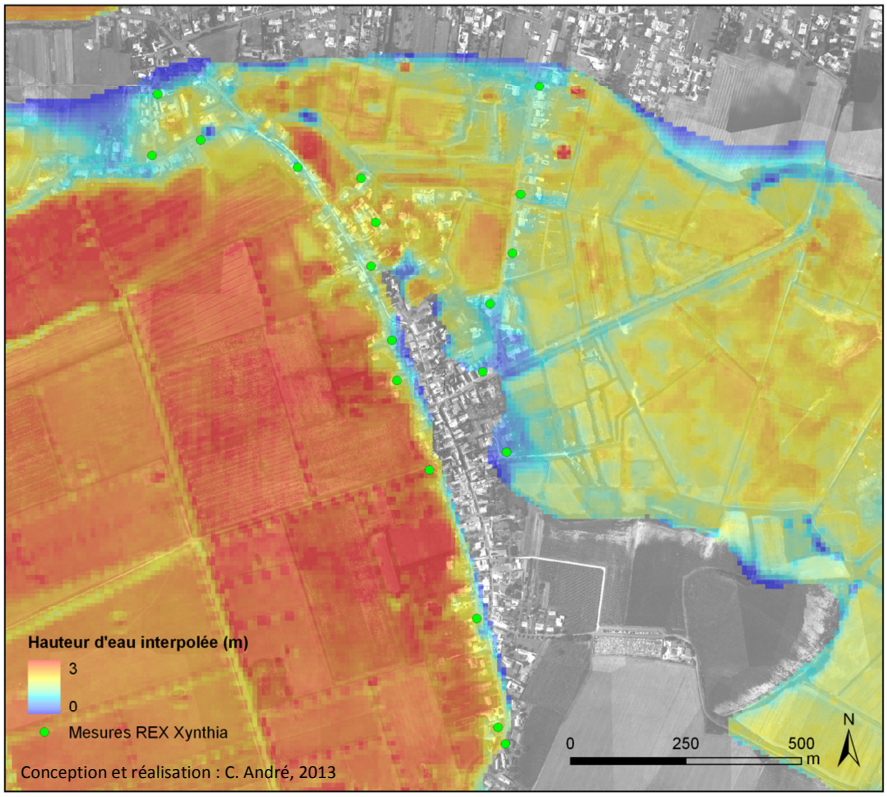


Figure 51 : Carte du résultat de l'interpolation des hauteurs d'eau mesurées dans le cadre du REX Xynthia à Charron en Charente-Maritime (données REX Xynthia Sogreah, 2011 ; MNT LIDAR DREAL Poitou-Charentes ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN).

1.7. Données d'enquêtes

Pour obtenir un recensement qualitatif et quantitatif des dommages sur les habitations et leurs coûts, quand ces derniers ne sont pas toujours visibles depuis l'extérieur des bâtiments et que leur chiffrage est complexe, comme c'est souvent le cas après une inondation, un des moyens est la réalisation d'une enquête auprès de la population.

Ces enquêtes peuvent prendre différentes formes : des entretiens au domicile des habitants, des questionnaires soumis par téléphone ou par courrier, etc. L'enquête doit être réalisée dans le bon « timing » : elle ne peut être menée trop tôt, car pendant la période de gestion de crise, tous les dommages ne sont pas encore connus ; il est par ailleurs nécessaire de laisser aux sinistrés le temps de se remettre du traumatisme, raison pour laquelle les enquêtes ne sont en général pas réalisées juste après la catastrophe. Cependant, elles ne doivent pas non plus être réalisées trop tard, auquel cas la mémoire précise des dommages

et de leurs circonstances peut être altérée. Du fait de ces différents points, un délai compris entre une et quelques années après la catastrophe semble être le plus adapté (Hubert et Ledoux, 1999). Ce type de collecte de données sur les dommages est coûteux et demande un investissement important en temps. De plus, les enquêtes doivent être effectuées par des spécialistes pour que leurs résultats soient exploitables : de nombreux biais sont en effet à corriger, dont ceux concernant la représentativité de l'échantillonnage. Parmi les modèles d'endommagement présentés en partie I (section 2.2), notamment pour les inondations, plusieurs ont été réalisés sur la base de résultats d'enquêtes. Dans le cadre de cette thèse, c'est sur les données d'assurance qu'est basé le recueil d'informations chiffrées sur le coût des dommages : nous ne présentons donc pas plus en détail le sujet des enquêtes, qui a déjà fait l'objet de nombreux travaux (Torterotot, 1993 ; Gissing et Blong, 2004 ; Thieken et al., 2008 ; Kreibich et al., 2010).

Cette présentation des différentes sources d'informations disponibles sur les dommages après une catastrophe confirme le manque de données pour l'évaluation de ces derniers en France.

Les arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle (base Gaspar), souvent utilisés pour l'analyse de la fréquence des évènements, montrent de nombreux biais, autant sur la question de leurs intitulés que sur leur lien effectif avec la survenance de dommages. L'utilisation de ces données pour l'évaluation de la fréquence des dommages (et de leurs coûts) nécessiterait donc une redéfinition et une standardisation des critères de reconnaissance, qui ont, à ce jour, un lien insuffisant avec l'expertise des dommages.

Cet inventaire nous permet également de confirmer l'absence de retours d'expérience systématiques en France, permettant la collecte et l'archivage de données, aussi bien qualitatives que quantitatives, sur l'aléa et sur dommages. Il n'existe en effet pas de méthodologie précise pour le recueil de données *ex post*, et celles-ci sont rarement regroupées au sein de documents de référence, excepté pour les évènements particulièrement importants, comme Xynthia, pour lesquels on dispose de beaucoup plus d'informations que pour Johanna.

Même dans le cas de ce type d'évènement, où les données abondent (rapports institutionnels, missions de terrain, etc.) les données économiques détaillées restent rares, et celles publiées par les assureurs ou les réassureurs sont trop agrégées pour une analyse fine du coût des dommages et de leurs relations avec les caractéristiques de l'aléa ou des enjeux, dans le but de mieux comprendre les mécanismes d'endommagement.

2. Les données brutes issues de l'assurance

En dehors des enquêtes de la population, seules les données d'assurance peuvent permettre d'accéder à des informations détaillées sur le coût des dommages subis. Ces données, habituellement inaccessibles pour des raisons de confidentialité et de protection de la vie privée qui lient les assureurs à leurs clients, ont été mises à notre disposition par trois compagnies d'assurance, AXA, la MAAF et la MAIF dans le cadre de cette thèse. C'est sur elles que reposent les travaux menés d'analyse des dommages et de développement de modèles de prédiction du coût des dommages pour le risque de submersion marine.

2.1. Présentation des données

Nous faisons ici référence aux données d'assurance « brutes », c'est-à-dire les données originales possédées par les compagnies d'assurance, et non les synthèses publiées par les réassureurs déjà évoquées.

À la survenance d'une catastrophe naturelle, le travail des assureurs consiste à évaluer les dommages de leurs assurés et à les indemniser dans les délais les plus courts, ainsi qu'à les renseigner sur toutes les mesures à prendre suite aux dommages, les démarches à effectuer, afin de permettre un retour à la normale le plus rapide possible. En dehors de ce rôle d'aide à la gestion des dommages et des procédures que l'assureur peut apporter à ses clients sinistrés, son regard sur le suivi des indemnisations est surtout statistique : les assureurs gèrent la provision de fonds nécessaire aux indemnisations, le paiement des indemnités aux assurés, les éventuels litiges qui peuvent survenir avec leurs clients ou entre l'assuré et l'entreprise chargée de la réparation, etc. Les personnes chargées de l'évaluation des dommages sont les « experts dommages » (ou *loss adjusters*) de cabinets d'expertise indépendants spécialisés. Ces experts se déplacent chez l'assuré, constatent les dommages, déterminent les réparations à effectuer, réalisent leur chiffrage et indiquent à l'assureur les sommes à indemniser.

Il y a donc deux niveaux de données produites pour le règlement des sinistres : un premier niveau désigne les données produites par les assureurs eux-mêmes, elles concernent essentiellement la gestion de la crise et le suivi financier du règlement des indemnisations de chaque assuré. D'autre part, un deuxième niveau de données rassemble toutes les informations produites par les experts dommages lors des expertises de terrain. Les sections suivantes décrivent le contenu de ces deux niveaux de données et définissent comment ces dernières peuvent être utilisées pour l'analyse des dommages.

La définition du terme « sinistre », utilisée dans le cadre de cette thèse sera celle utilisée couramment par les assureurs, qui désigne l'ensemble des dommages indemnisés sous un même contrat (ou police) d'assurance, liés par exemple à une habitation pour un contrat Multirisque-Habitation (MRH), ayant donc donné lieu à une seule expertise et dont les descriptions sont regroupées dans un « dossier-sinistre ».

2.2. Fonctionnement de l'expertise des dommages

À la survenance de dommages, liés ou non à un évènement naturel, l'assureur est contacté par ses clients qui lui déclarent leurs sinistres ; il décide alors si l'évaluation des dommages peut se faire par téléphone, ou s'il doit mandater sur place un expert indépendant pour chiffrer le sinistre. L'évaluation téléphonique ne concerne que les dommages légers pour lesquels la réclamation de l'assuré est faible (de l'ordre de quelques centaines ou quelques milliers d'euros, suivant l'importance de l'évènement) : le remplacement de quelques tuiles sur un toit, un dégât des eaux sans conséquence importante, etc. Dans le cas d'une catastrophe naturelle, un grand nombre de sinistres atteignent des montants suffisamment importants pour être expertisés.

Une fois le cabinet d'expertise missionné par l'assureur pour évaluer un sinistre, l'expert désigné se rend au minimum deux fois sur place :

- Une première fois dans les jours qui suivent l'évènement, afin de définir la cause principale du dommage et si la garantie « catastrophe naturelle » est impliquée (dommages liés au vent ou à la submersion). Il visite le bien pour vérifier la conformité de celui-ci avec la déclaration du client à l'assureur (nombre de pièces, surface habitable, véranda, piscine, etc.), il fait une première liste des éléments endommagés et il établit, dans un rapport de reconnaissance, un montant prévisionnel des dommages, ainsi qu'un montant d'ouverture de l'indemnisation, qui sera versé à l'assuré, lui permettant d'engager les premiers travaux urgents.
- La seconde visite est dédiée au chiffrage détaillé des dommages, réalisé à l'aide de la connaissance de l'expert du marché local de la construction, parfois avec l'appui de devis d'artisans pour le remplacement d'éléments immobiliers spécifiques. Pour le mobilier, le chiffrage est basé sur une liste établie par l'assuré, appuyée par des photos et des factures.

Le « taux de vétusté » de chaque élément est également évalué par l'expert. Ce dernier est lié à l'usure des éléments au moment de la survenance du sinistre : il équivaut au rapport de l'âge des éléments avec leur durée de vie totale (un papier peint d'une durée de vie estimée à 30 ans et posé il y a 10 ans a un taux de vétusté de 33 %). Cette évaluation donne lieu à la

définition d'un montant de versement immédiat (qui complète l'éventuel versement d'ouverture du dossier), qui correspond à la valeur dépréciée ou « vétusté déduite » des éléments immobiliers et mobiliers. En fonction des clauses du contrat d'assurance, la différence entre la valeur « vétusté déduite » et la valeur de remplacement à neuf, que débourse effectivement l'assuré pour réaliser les réparations, peut lui être indemnisée lors d'un versement différé (sous certaines conditions). Ce versement différé est versé à l'assuré dans la limite du montant des factures de réalisation des travaux qu'il présente à l'assureur, sans que l'indemnisation ne puisse au total dépasser la valeur à neuf des éléments.

Suivant les clauses contractuelles, c'est donc la valeur de remplacement à neuf ou la valeur vétusté déduite qui sera indemnisée par l'assureur. La plupart des contrats garantissent, pour les catastrophes naturelles, l'indemnisation de la valeur de remplacement à neuf des dommages, au moins immobiliers, si le bâtiment ne se trouve pas dans un état de vétusté excessif. La valeur indemnisée se rapproche donc le plus souvent de la valeur de remplacement à neuf des éléments immobiliers, mais différents seuils et plafonds d'indemnisation existent selon les assureurs et les options de leurs différents contrats. Pour le mobilier, un plafond d'indemnisation fixé par l'assuré lors de la souscription du contrat limite la valeur qu'il peut toucher en cas de destruction de tous ses meubles.

Un litige peut intervenir quand la déclaration des caractéristiques du bien de l'assuré n'est pas conforme à la réalité : par exemple dans le cas d'une extension de la maison créant une surface supplémentaire, ou de la construction d'une amélioration sans mise à jour du contrat d'assurance et de la prime annuelle que le client paye à son assureur. Les éléments non déclarés ne sont alors pas indemnisés, ou le dommage est indemnisé au prorata de la surface déclarée par rapport à la surface réelle. Le plus souvent, les négociations entre le client et l'assureur concernent plutôt des montants de réparation jugés trop bas par les sinistrés après réalisation des travaux, ou l'apparition de coûts supplémentaires liés à des dommages non constatés par l'expert lors de ses visites. Dans ce cas, une visite supplémentaire peut avoir lieu, effectuée soit par le même expert, soit par un contre-expert mandaté par l'assuré, afin de réévaluer les dommages et l'indemnisation. Ces types de litiges peuvent amener à des réévaluations importantes des dommages, mais restent relativement rares.

Une fois les dernières factures fournies et les dernières indemnités différées versées, le dossier est clos sur l'accord du sinistré et de son assureur. La procédure complète dure en pratique de quelques mois à plusieurs années selon l'ampleur des travaux à réaliser et les litiges qui peuvent intervenir sur certains sinistres.

Les rapports d'expertise et les documents de gestion des sinistres sont gérés de différentes manières par les assureurs. De plus en plus, ces derniers s'orientent vers l'Échange de Données Informatisées (EDI). C'est ainsi que fonctionne le système DARVA[26], qui permet des échanges numériques des documents entre les cabinets d'expertise, les assureurs des centres nationaux et leurs antennes locales, et qui prend également en charge les ordres de mission et les facturations des expertises. Néanmoins, la plupart des assureurs ne sont pas équipés de ce système. Dans ce cas, les rapports d'expertise et tous les documents échangés entre l'assureur, l'expert et le client sont conservés au format papier, ce qui représente pour les dossiers importants des volumes de papier non négligeables. Les documents sont conservés pendant quelques années, suivant l'importance du dossier et de l'évènement, puis sont détruits. L'assureur ne conserve alors que les données numériques saisies lors de la gestion du dossier, soit les données du premier niveau défini précédemment. Les données du deuxième niveau, soit les données d'expertise concernant les chiffrages détaillés des dommages, sont alors perdues. De plus, quand un dossier est géré par une antenne locale de l'assureur, il n'existe pas de copie au centre principal, ce qui complique l'accès et la gestion de ces documents.

2.3. Méthodologie de collecte des données

La collecte des données d'assurance s'est effectuée en plusieurs phases. Dans un premier temps, les trois assureurs partenaires (AXA, MAAF et MAIF) nous ont donné accès aux listings de l'ensemble de leurs sinistres pour les évènements Johanna et Xynthia, c'est-à-dire, selon notre classification, des données de niveau 1. Seuls les sinistres déclarés sous le régime CatNat ont été retenus, c'est-à-dire les sinistres liés à une inondation (sans distinction entre les dossiers d'inondation marine ou fluviale lors d'un même évènement). L'ensemble des dommages dus au vent lors des deux tempêtes, déclarés sous le régime TGN (Tempête-Grêle-Neige), a été dès le départ exclu de la sélection (un même dossier peut toutefois être couvert par les deux garanties, si le bien a subi à la fois des dommages dus à la submersion et au vent ; dans ce cas, les dommages indemnisés sous les deux régimes sont indiqués par des catégories différentes). La sélection des dossiers des deux évènements dans les bases de données d'assurance a été réalisée, pour Xynthia, grâce à un identifiant spécifique attribué à la tempête, et pour Johanna, par une extraction des sinistres en fonction de leur date de survenance, dans les départements touchés par la tempête. Pour des raisons de confidentialité, ces données ont été anonymisées et les noms des assurés n'apparaissent pas dans les documents fournis.

[26] http://www.darva.com

Les listings contiennent pour chaque sinistre :

- L'adresse postale du sinistre,
- Le type de bien touché, par le biais du type de police d'assurance souscrite : habitation (MRH), entreprise, exploitation agricole, véhicule, etc.,
- La somme indemnisée, sans différentiation des éléments immobiliers et mobiliers,
- Quelques informations supplémentaires dans le cas des sinistres MRH (nombre de pièces, surface habitable, type d'occupation) qui ne sont pas systématiquement renseignées.

À partir de ces listings, il est possible de déterminer les coûts moyens et la distribution des indemnisations : ces derniers sont exhaustifs pour les trois assureurs, même s'ils ne représentent qu'une fraction du marché français de l'assurance (ce point sera précisé ultérieurement). De plus, c'est à partir de ces listings qu'ont été sélectionnés les rapports d'expertise que nous avons consultés pour obtenir des données plus détaillées sur les dommages, soit les données de niveau 2.

Pour la tempête Johanna, nous n'avons consulté que les rapports d'expertise de la MAIF et l'ensemble des dossiers a pu être consulté, aussi bien pour des sinistres d'habitations, que de locaux professionnels d'associations, ou de véhicules endommagés. Pour la tempête Xynthia, nous avons eu accès aux rapports d'expertise des trois assureurs, cependant, la sélection des dossiers à consulter n'a pas été aléatoire. En premier lieu, tous les sinistres ne donnent pas lieu à une expertise, seuls ont été expertisés les dommages évalués par téléphone à une somme de l'ordre de plusieurs milliers d'euros minimum. De plus, les dossiers auxquels nous avons eu un accès facilité étaient les dossiers parmi les plus importants, en particulier les sinistres situés dans les zones de solidarité, dont la gestion sur le long terme a nécessité leur rapatriement dans les centres de traitement, alors que les dossiers de plus faibles montants, étant réglés plus rapidement, sont restés archivés dans les antennes locales des assureurs. Les dossiers disponibles se démarquent donc par des hauteurs d'eau importantes et des indemnisations élevées. De fait, ce sont également ceux pour lesquels les rapports d'expertise sont les plus détaillés, et contiennent le plus d'informations : il était donc normal de les étudier en priorité. Il faudra cependant être conscient de ce biais d'échantillonnage dans l'analyse des résultats de cette collecte des données.

Afin de pouvoir analyser le plus possible de dossiers concentrés sur des territoires réduits, les rapports d'expertise consultés pour Xynthia ont également été sélectionnés dans un nombre limité de communes. Les sites choisis ont tous été fortement impactés par la tempête, et concentrent beaucoup de sinistres, tout en illustrant des situations différentes,

aussi bien sur l'aspect des processus de l'aléa que sur celui des caractéristiques des enjeux endommagés. Ce sont les communes de la Faute-sur-Mer, de l'Aiguillon-sur-Mer et de la Tranche-sur-Mer en Vendée, et les communes de Charron, Aytré, Angoulins, Châtelaillon-Plage, Yves, Fouras, la Flotte et la Couarde-sur-Mer (île de Ré) en Charente-Maritime (Figure 34, page 58).

Les rapports d'expertise contiennent, dans tous les cas, les informations de référence qui permettent à l'assureur de gérer le dossier :

- L'adresse du lieu du sinistre et les coordonnées de l'assuré si elles sont différentes (résidence secondaire, logement loué, relogement temporaire, etc.)
- La définition de l'aléa responsable du sinistre pour l'attribution des dommages au régime CatNat ou TGN,
- La vérification de la conformité du bien avec le contrat souscrit et le rappel des garanties du contrat et de la franchise applicable,
- Une description succincte des dommages indiquant les éléments touchés : par exemple le bâtiment principal ou des dépendances, si les dommages sont importants et impliquent un relogement, etc.,
- La définition d'un montant d'ouverture et de montants d'indemnités immédiates et différées pour les éléments immobiliers et mobiliers,
- Le détail, plus ou moins précis, du calcul amenant à ces montants par éléments touchés, y compris les taux de vétusté correspondants,
- Des pièces administratives obligatoires telles que les actes de propriété de l'assuré.

En plus de ces informations, des informations facultatives liées à la description de l'évènement et des dommages peuvent être présentes :

- L'indication de la hauteur d'eau maximale dans l'habitation, soit mesurée ou estimée par l'expert, soit reposant sur le témoignage de l'assuré quand les traces ne sont plus visibles au moment de la visite,
- D'autres informations qualitatives sur les circonstances des dommages et les paramètres de l'aléa : durée d'inondation, présence d'un courant important, effet de choc mécanique des vagues, etc.,
- Une description du bâtiment touché : nombre de pièces et surface habitable, bâtiment de plain-pied ou avec étage, présence de sous-sol, de garage, de véranda, ou de dépendances, âge et matériaux de construction, etc.

L'expertise est parfois appuyée par des documents annexes tels que des photos des dommages et/ou du bâtiment avant le sinistre, des devis ou factures de travaux ou de remplacement de mobilier, etc. On trouve également dans les dossiers des pièces

règlementaires tels que des actes de propriété notariés, et des courriers d'échanges entre l'assuré et son assureur. Cependant, il n'existe à ce jour pas de standardisation du contenu des rapports d'expertise : chaque cabinet d'expertise possède son propre modèle de rapport, qu'il adapte en fonction des demandes spécifiques des différents assureurs. Pour la tempête Xynthia, des mesures exceptionnelles ont été prises au vu de l'ampleur de l'évènement, et un modèle de rapport a été utilisé par la plupart des experts, en particulier pour les sinistres situés dans les zones de solidarité. Ce rapport contenait plus de détails qu'à l'habitude : la hauteur d'eau était presque toujours renseignée, le chiffrage des éléments immobiliers et mobiliers était plus précisément détaillé, et des plans des bâtiments servant au chiffrage des travaux étaient joints, afin de rendre l'expertise la plus claire possible.

Pour la collecte des données des rapports d'expertise, nous avions donc deux cas de figure : les dossiers au format papier et les dossiers numériques transmis sous le système DARVA. Les dossiers informatisés étant stockés par les assureurs sous un format « pdf » (pas de base de données), les deux types de rapports ont nécessité une nouvelle saisie des informations lors de la phase de collecte.

Dans le cadre du présent travail, une structure de base de données a donc été construite pour rassembler les informations utiles à l'analyse des dommages, ces éléments ayant été définis à partir des informations disponibles dans les premiers rapports consultés. La base de données est accompagnée d'un formulaire de saisie, afin d'optimiser l'efficacité de la collecte (Figure 52). Elle contient 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. Cependant, devant l'hétérogénéité des modèles de rapports et le manque d'exhaustivité dans la précision des informations obligatoires, et *a fortiori* facultatives, certains des champs de la base de données ont rarement pu être complétés.

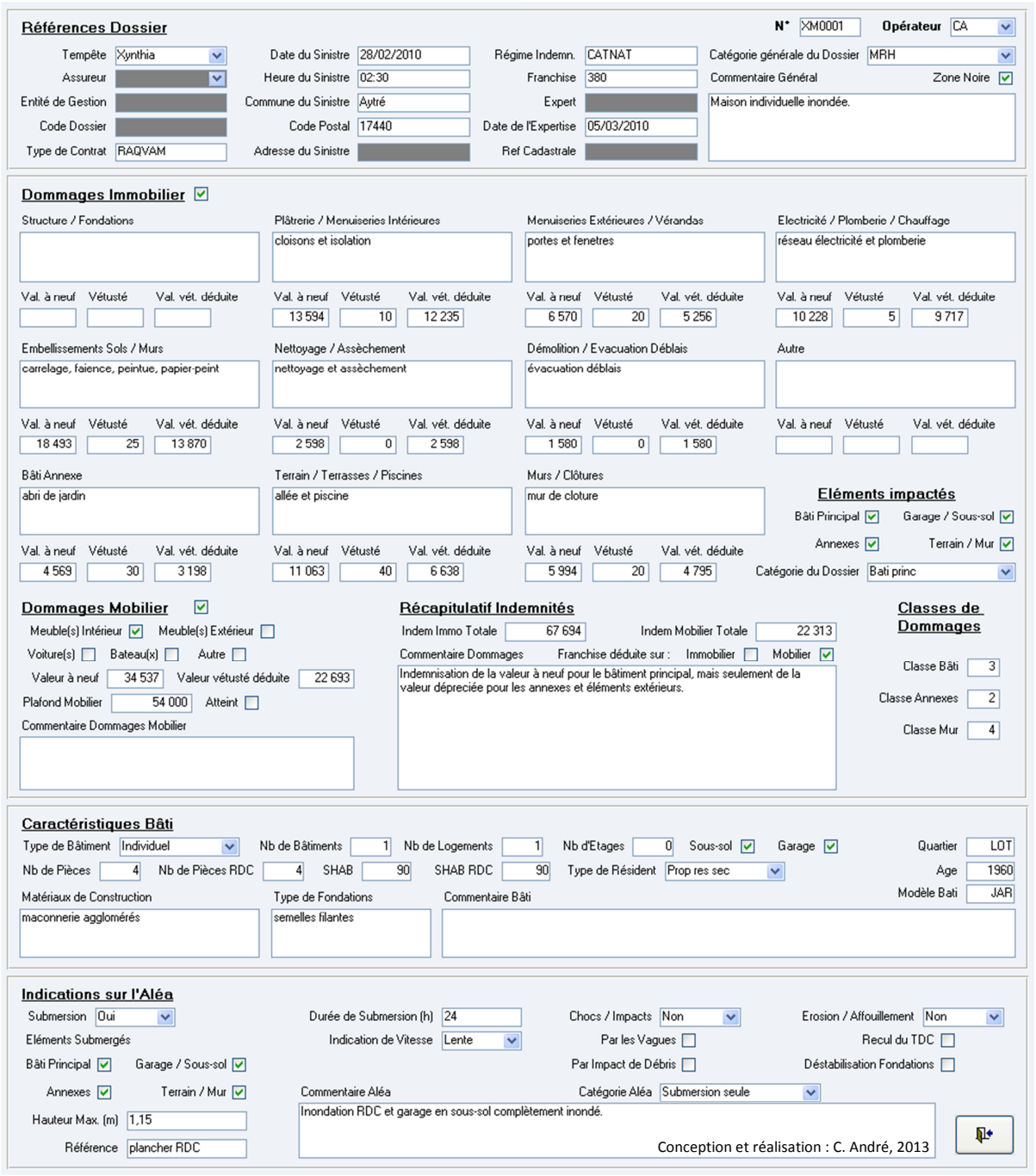


Figure 52 : Formulaire de saisie des données des rapports d'expertise d'assurance pour la constitution de la base de données de niveau 2 (réalisé sous Microsoft Access®).

Les informations à recueillir sont classées dans quatre catégories :

La première catégorie, « références du dossier », indique l'évènement, l'assureur, le cabinet d'expertise, l'adresse du sinistre, et une description succincte des dommages ainsi que des particularités du dossier, suivie d'une classification du dossier dans une catégorie indiquant les principaux types de sinistres observés. Un identifiant unique est attribué à chaque dossier et permet de rendre anonymes les informations personnelles. En effet, l'adresse postale du sinistre est saisie pour la localisation des dossiers mais n'est jamais mentionnée

par la suite dans les résultats de ces travaux de recherche. Le nom de l'assuré, quant à lui, n'est pas saisi dans la base.

Le second volet, « dommages », recense le détail des dommages directs et les indemnisations associées aux éléments mobiliers et immobiliers, classés par « postes de dommages ». On entend par ce terme les dommages sur les différents corps d'état du bâtiment, appelés également « lots » de construction : d'un côté le gros œuvre correspond à la structure du bâtiment et regroupe les fondations, la maçonnerie, la charpente et la couverture, de l'autre, le second œuvre rassemble les travaux de plâtrerie (cloisonnement, doublage, isolation), menuiserie (ouvertures), embellissements (revêtements de sol et murs) et les lots techniques (électricité, plomberie sanitaire, chauffage, ventilation). Sont également renseignés les éventuels frais de nettoyage et d'assèchement du bâtiment, et les frais de démolition et d'évacuation des déblais suite aux travaux de réparation, qui sont inclus dans l'indemnisation. Pour chaque catégorie, la valeur de réparation ou de remplacement à neuf est renseignée, ainsi que le taux de vétusté et la valeur « vétusté déduite » des dommages, qui correspond à l'indemnité immédiate. Pour le mobilier, le plafond d'indemnisation est également indiqué. Un récapitulatif des indemnités issu de la somme des différents versements de l'assureur permet de vérifier que le total des différents éléments correspond bien à l'indemnisation finale. Si des éléments ont été chiffrés comme dommages, mais non indemnisés pour des raisons uniquement contractuelles ou spécifiques, ils sont comptabilisés dans les dommages, mais l'information est notée en commentaires (c'est par exemple le cas spécifique des frais de nettoyage des bâtiments dans les zones de solidarité : ces coûts ont été chiffrés mais n'ont pas été indemnisés du fait de la non-réhabilitation des bâtiments).

La troisième catégorie concerne les « caractéristiques du bâti » endommagé : le nombre de pièces principales, la surface habitable, la présence d'étage(s), d'un sous-sol et/ou d'un garage, qui définissent la taille du bâtiment. Ils sont indiqués quand l'information est disponible. Enfin, les champs concernant l'âge, les matériaux de construction et le type des fondations du bâtiment sont prévus afin de définir sa vulnérabilité intrinsèque à la submersion ; cependant, ces trois dernières caractéristiques sont rarement renseignées dans les rapports d'expertise. D'autres informations peuvent avoir leur importance, comme la présence d'éléments bâtis annexes qui augmentent le potentiel de dommages : dépendances, piscines, et vérandas sont mentionnées si l'information est disponible. Il est également indiqué si l'habitation est à usage de résidence principale ou secondaire (ce qui peut éventuellement jouer sur la valeur des éléments). Si le logement de l'assuré est destiné à la location, seuls les frais immobiliers sont connus, et à l'opposé, si l'assuré est locataire du logement, son assureur ne prend en charge que les frais mobiliers, laissant l'immobilier à la

charge de l'assureur du propriétaire. Cela ne facilite donc pas le traitement de ces dossiers pour lesquels on ne possède qu'une information partielle sur les dommages.

Le quatrième et dernier volet concerne les « indications sur l'aléa » ayant entrainé les dommages : dans les dossiers d'expertise sont souvent indiquées la hauteur d'eau, et parfois la durée de submersion. Sous forme de commentaires, on peut également trouver, de manière qualitative, mention de la vitesse du courant, de l'impact de chocs de vagues ou de débris, de l'érosion d'une partie du terrain de la propriété pouvant provoquer l'affouillement localisé des fondations des bâtiments. Ces derniers éléments ne sont cependant que rarement renseignés par les experts. Si le paramètre hauteur d'eau est le plus souvent disponible, il manque en général de précision ou d'une indication de la référence de la mesure. Il est en général relevé à l'intérieur du bâtiment, parfois dans le niveau de plain-pied, parfois dans le sous-sol, ou enfin dans un niveau semi-enterré du bâtiment. Dans la mesure où le niveau du plancher considéré n'est jamais indiqué par rapport au terrain naturel, il est difficile de comparer ces valeurs de hauteur avec des valeurs issues de mesures de terrain réalisées à l'extérieur des bâtiments.

2.4. Présentation des données recueillies

De l'examen des données recueillies dans les rapports d'expertise, ressort, en premier lieu, l'hétérogénéité de l'information disponible, principalement du fait de la non-standardisation des rapports et du peu d'informations obligatoires sur les caractéristiques de l'enjeu touché et des processus d'endommagement. La quantité et la qualité des renseignements dépend donc de :

- La volonté de l'expert et de son cabinet d'être précis et exhaustif sur les éléments facultatifs,
- L'ampleur de l'évènement et son contexte médiatique qui pousse les experts à être attentifs aux demandes des assurés et à davantage documenter leurs rapports (l'information hauteur d'eau est beaucoup plus souvent présente pour les dossiers Xynthia que Johanna),
- Le volume de sinistres, qui joue sur l'urgence dans laquelle se déroulent les expertises et le temps qui leur est accordé, donc sur leur précision.

Le nombre de dossiers recensés dans les listings (premier niveau des données) et le nombre de rapports d'expertises consultés (deuxième niveau) sont indiqués pour les deux tempêtes dans le Tableau 6. L'enjeu habitation étant de loin le plus représenté parmi les dossiers collectés, et celui sur lequel on se concentrera par la suite, il est également précisé dans le

tableau le nombre de dossiers Multirisque-Habitation (MRH) pour les deux niveaux de donnés.

	Tempête Johanna			Tempête Xynthia		
	Total dossiers niveau 1	Dossiers MRH niveau 1	Dossiers MRH niveau 2	Total dossiers niveau 1	Dossiers MRH niveau 1	Dossiers MRH niveau 2
MAIF	135 (45%)	75 (43%)	75 (88%)	1 320 (29%)	1 148 (29%)	113 (39%)
AXA	162 (55%)	100 (57%)	10 (12%)	2 102 (46%)	1 655 (42%)	80 (28%)
MAAF				1 153 (25%)	1 153 (29%)	97 (33%)
Total	297	175	85	4 575	3 956	290

Tableau 6 : Résultat de la collecte de données d'assurance pour les deux niveaux de données.

La comparaison des données collectées auprès des trois assureurs montre immédiatement que le nombre de sinistres liés aux submersions marines n'est pas comparable pour les deux tempêtes. En effet, la tempête Xynthia a généré 15 fois plus de dossiers de sinistres que la tempête Johanna. Le coût total des deux évènements est également très différent : au sein de notre échantillon, la somme des indemnisations s'élève à près de 4 millions d'euros pour la tempête Johanna et à plus de 125 millions d'euros pour Xynthia (dont respectivement 1,2 et 105 millions d'euros pour les dossiers MRH).

2.5. Géolocalisation des données

En plus de l'analyse statistique des données, une analyse spatiale a été réalisée, sous SIG, aussi bien sur les données de niveau 1 (listings) que sur les données détaillées de niveau 2 (rapports d'expertise). La géolocalisation des sinistres permet en effet de mettre en relation les caractéristiques des sinistres avec les caractéristiques de l'aléa et des enjeux en rattachant les dossiers localisés à des données spatiales externes telles que les modélisations hydrauliques de l'aléa, les informations issues de campagnes de terrain, ou des informations caractérisant les enjeux affectés, issus de bases de données institutionnelles (INSEE, IGN, etc.).

La méthode de géolocalisation des dossiers de sinistre, appelée « géocodage » a été mise en place avec l'aide d'un stagiaire de Master 2 (Aminot, 2011), à partir des adresses postales ou des références cadastrales des propriétés sinistrées. L'opération de géocodage est basée sur l'utilisation d'une base de données spatiale de référence et permet d'attribuer à chaque adresse postale des coordonnées géographiques afin de représenter les lieux sur une carte. Pour la France, l'IGN commercialise la base BD ADRESSE® qui permet de réaliser l'opération dans un logiciel de SIG. Il existe également des solutions gratuites en ligne, relayées notamment par tous les sites de recherche et de visualisation cartographique de type « Google Maps® ».

Les deux principaux fournisseurs de cartographies numériques mondiales dédiées à Internet, et aux programmes de navigation de récepteurs GPS, sont TeleAtlas® et NavTeq®. Les cartographies du premier sont utilisées par les GPS de marque TomTom® et les sites Google Maps®, Google Earth®, Mappy®, ViaMichelin®, PagesJaunes®, etc. Les données du second sont utilisées par les GPS Garmin® et Magellan® et par les sites de cartographie Bing Maps® et Yahoo! Maps®.

Après avoir testé l'efficacité du géocodage des deux fournisseurs via les sites Google Maps et Yahoo! Maps sur les adresses postales des listings de données collectées, la base de données de TeleAtlas a été retenue, le processus de géocodage ayant été effectué grâce au site internet gratuit « Batch Géocodeur[27] ».

Cependant, la précision du géocodage n'est jamais parfaite, et dépend grandement de la qualité des données d'adresses postales qui lui sont indiquées en entrée. En effet, les adresses comportant des erreurs ou fautes de frappe ne sont pas reconnues correctement par le géocodeur. Celui-ci renvoie une information sur la précision du résultat du géocodage, selon qu'il ait réussi à localiser le dossier :

- À l'adresse postale,
- À la voie (non reconnaissance du numéro ou non indexation des numéros dans la base),
- Au lieu-dit (non reconnaissance de la voie mais reconnaissance d'une localité plus précise que la commune),
- À la commune (non reconnaissance de la voie, renvoie par convention les coordonnées de la mairie de la commune).

Un certain nombre d'erreurs dans les adresses ayant pu être corrigées à la main, la majorité des dossiers des listings ont été localisés au niveau de l'adresse (46 %) ou de la rue (21 %). Les sinistres localisés au lieu-dit représentent 8 % et ceux localisés à la commune 25 % des dossiers. Un certain nombre d'erreurs reste du fait qu'il peut y avoir, quand le sinistre concerne une résidence secondaire, une confusion dans les listings entre la commune de la résidence principale de l'assuré et la résidence réellement affectée. Les bases de données de référence utilisées pour le géocodage ne sont pas non plus parfaitement à jour : les rues récentes peuvent notamment ne pas figurer dans ces cartographies.

[27] http://www.batchgeocodeur.mapjmz.com

Enfin, il faut prendre en compte le fait que la position réelle d'un bâtiment peut avoir des coordonnées qui diffèrent relativement de la localisation finale obtenue, même quand celle-ci a été possible à l'adresse. En effet, quand la base de données de référence n'est pas entièrement renseignée, le géocodeur est amené à segmenter les voies en autant de tronçons d'égale distance qu'il existe de numéros pairs ou impairs sur la voie, afin d'attribuer une position à chaque numéro. Pour les voies très longues dont la répartition des numéros n'est pas homogène sur toute la longueur, les adresses peuvent se trouver significativement décalées par rapport à leur position réelle.

Pour pallier ce problème, les dossiers consultés au niveau détaillé (niveau 2) ont également été géocodés à l'aide des références cadastrales, quand elles étaient mentionnées dans les dossiers d'expertise, ce qui offre une précision bien meilleure que celle de l'adresse postale. Pour ces dossiers, la quasi-totalité des sinistres a été localisée précisément. Des cartographies des résultats du géocodage sont présentées dans les parties suivantes de cette thèse, portant sur l'analyse des dommages.

2.6. Utilisation des données d'assurance pour l'analyse des dommages

Dans le cadre de cette thèse, le terme « coût des dommages » sera utilisé pour désigner de façon générale le montant monétaire de ces derniers. Cependant, nous avons vu dans les sections précédentes qu'il existe plusieurs manières d'exprimer le montant des dommages, selon que l'on adopte un point de vue économique ou financier. Dans les parties suivantes de cette thèse, en fonction de l'objectif poursuivi et des données disponibles à chaque étape de l'analyse, nous utiliserons tour à tour les termes « indemnisation », « valeur à neuf » ou « valeur dépréciée » pour désigner différentes évaluations du coût des dommages à partir des données d'assurance. Ces termes sont définis dans le Tableau 7.

Conception et réalisation : C. André, 2013

	Définition et description	Disponibilité	Utilisation
Indemnisation ou indemnité d'assurance	Valeur totale payée par l'assureur à l'assuré pour un sinistre. Pas de détail immobilier/mobilier ni sur les différents postes de dommages. Selon les contrats, correspond davantage à la valeur dépréciée ou à la valeur à neuf, prend en compte la déduction de la franchise et les éventuels plafonnements d'indemnisation.	Niveau 1 (listings)	Pour l'analyse et l'évaluation *ex post* du coût d'un évènement (dommages assurés) à une échelle macro (seule donnée disponible). Valeur utilisée dans la partie III.
Valeur à neuf ou de remplacement à neuf (TTC)	Valeur totale de remplacement des éléments endommagés évaluée par l'expert : somme payée par l'assuré (TTC) pour réaliser l'ensemble des travaux de réparation (dommages directs). Séparation des coûts immobiliers/mobiliers pour les différentes parties du bâti et par postes de dommages. Valeur indépendante du contrat d'assurance : non-déduction de la franchise, les éléments non garantis sont tout de même comptés, les plafonds d'indemnisation éventuels ne sont pas appliqués.	Niveau 2 (expertise)	Meilleure source d'information pour l'analyse détaillée des dommages et des processus d'endommagement (liens entre le coût des dommages avec l'aléa et les enjeux) à une échelle micro. Valeur utilisée dans la partie IV.
Valeur dépréciée ou valeur vétusté déduite (HT)	Valeur à neuf à laquelle on retranche la dépréciation des biens au moment du sinistre (taux de vétusté évalué par l'expert) et les taxes (TVA) : correspond à la valeur économique des dommages, ne prenant pas en compte le gain apporté par la rénovation du bien après réparation.	Niveau 2 (expertise)	Adaptée à l'évaluation économique des dommages à l'échelle micro, et donc à la réalisation de modèles d'endommagement. Valeur utilisée dans la partie V.

Tableau 7 : Description des différents termes utilisés dans le cadre de cette thèse pour décrire le « coût des dommages ».

Pour l'analyse des données, au cours de laquelle on cherchera à comprendre les dommages et à établir une relation entre les coûts et différents paramètres de l'aléa et des enjeux, on utilisera donc, suivant l'échelle de travail et les données disponibles, les valeurs d'indemnisation ou les valeurs à neuf des dommages. Dans les deux cas, le coût des dommages n'inclut qu'une partie des dommages réellement subis : les dommages assurés, c'est-à-dire essentiellement les dommages directs tangibles. Cependant, alors que la valeur à neuf des dommages est seulement dépendante de l'évaluation de l'expert, l'indemnisation dépend également des clauses du contrat d'assurance : elle est limitée aux éléments garantis, dépend de l'existence de garanties « à neuf » des dommages, elle est parfois plafonnée, et la franchise qui reste à la charge de l'assuré en est déduite. Pour toutes ces raisons, la valeur finale d'indemnisation possède de nombreux biais et doit être utilisée avec précaution. À une échelle fine et pour des calculs détaillés, on lui préfèrera donc la valeur à neuf des dommages. Enfin, pour la conception de modèles d'endommagement, c'est la valeur dépréciée et hors taxes, reflétant la valeur économique réelle des dommages, qui sera utilisée (cf. partie V, section 1.1).

Les données brutes d'assurances recueillies dans le cadre de cette thèse sont de deux niveaux de détail : le premier niveau consiste en des listings de synthèse des sinistres des assureurs et le second niveau consiste en un échantillon de sinistres dont les informations ont été collectées dans les rapports d'expertise des dommages. Les rapports d'expertise n'étant pas standardisés, et en général stockés par les assureurs sous un format papier, la collecte d'informations est une tâche lourde qui n'a pas pu être réalisée pour tous les dossiers de sinistre. La méthode d'échantillonnage n'a pas pu être identique pour les deux tempêtes.

Le niveau de détail croissant entre les deux types de données permet de prendre en compte différentes estimations du coût des dommages selon l'échelle de travail (valeur indemnisée, à neuf, ou dépréciée). Ce sont des éléments qu'il faut garder à l'esprit pour tout changement d'échelle lors de l'utilisation de ces données. Les enseignements tirés de cette phase de collecte de données seront résumés à la fin de cette thèse sous forme de recommandations pour une mise à disposition simplifiée des données d'assurance pour des travaux de recherche sur les risques naturels.

3. Les données produites par modélisation de l'aléa

Comme indiqué précédemment, les informations sur l'aléa après un évènement proviennent principalement des campagnes d'observations ou de mesures sur le terrain (qui peuvent, selon les cas, être compilées dans des documents de retour d'expérience, comme cela a été le cas pour Xynthia). Pour les évènements d'inondations majeures, les données satellitaires et les photographies aériennes peuvent également contribuer à délimiter l'étendue des zones inondées. Quoi qu'il en soit, les données d'observations sont ponctuelles (en général, des hauteurs d'eau, et parfois des durées de submersion) et ne permettent pas de connaitre tous les paramètres de l'aléa submersion, tels que les informations dynamiques sur la vitesse du courant ou sur la montée des eaux.

Comme détaillé en partie I (section 2.2.4), les paramètres hauteur d'eau, durée de l'inondation, et vitesse du courant présentent un intérêt pour l'étude des relations entre l'intensité des processus physiques de l'aléa et les dommages induits. On a vu que l'accès aux données d'assurance sur les sinistres, même les plus détaillées, ne résout pas ce manque de données précises sur les processus de l'aléa : cette lacune a donc été compensée par le recours à des modélisations numériques *ex post* de l'aléa.

Dans le cadre du projet JOHANNA et de cette thèse, la reconstitution de l'aléa lors des deux tempêtes a été réalisée aux deux échelles de travail de l'étude : premièrement, des

indicateurs des forçages de la submersion (surcote, vagues) ont été réalisés à l'échelle régionale ou « macro » (emprise de l'ensemble des évènements) ; deuxièmement, une modélisation détaillée de la submersion a été réalisée à l'échelle locale ou « micro » (site inondé) sur les deux sites sélectionnés (la commune de Gâvres et le lieu-dit les Bouchôleurs).

Il est à noter que les types de modèles utilisés pour la reconstitution détaillée de la submersion sont également ceux qui sont utilisés pour l'évaluation de l'aléa submersion *ex ante*, sous forme de scénarios (approche déterministe), dans le cadre de l'établissement des PPRL ou des PAPI. Le développement de ces méthodes, en plus de fournir des informations sur l'aléa d'évènements passés, permet donc d'évaluer leur capacité à reproduire correctement ces évènements et donc leur capacité à simuler des scénarios prospectifs de submersion pour les évaluations des dommages *ex ante*.

La réalisation des indicateurs de forçages régionaux, la préparation des Modèles Numériques de Terrain (MNT) nécessaires aux simulations à l'échelle locale, ainsi que l'exploitation des résultats obtenus, ont été réalisés dans le cadre de cette thèse, en étroite collaboration avec l'équipe « Risques Côtiers et Changement Climatique » de la « Direction Risques et Prévention » du BRGM, qui a assuré les tâches de modélisation numérique.

3.1. Indicateurs de forçages à l'échelle régionale

3.1.1. Sources des données utilisées

Pour l'analyse des forçages de l'aléa submersion marine à l'échelle régionale, et la réalisation d'indicateurs pour les deux tempêtes, les données nécessaires proviennent de modélisations des surcotes et des vagues.

Pour la tempête Johanna, les données de niveaux d'eau, de surcote et de vagues utilisées pour la réalisation des indicateurs sont issues du projet d'océanographie côtière opérationnelle PRÉVIMER. Créé en 2006 et coordonné par l'Ifremer et le SHOM, l'objectif de PRÉVIMER est de produire en routine des analyses et des prévisions à court terme (96 à 120 h) de température, de salinité, de courant, de niveaux d'eau et de surcotes, de vagues et de concentration en particules ou en plancton des eaux côtières en Manche, Atlantique et Méditerranée (Magne et al., 2010). Ces données, dont l'échelle spatiale de restitution va de la façade maritime à la baie, sont archivées et diffusées gratuitement via un site internet (Figure 53).

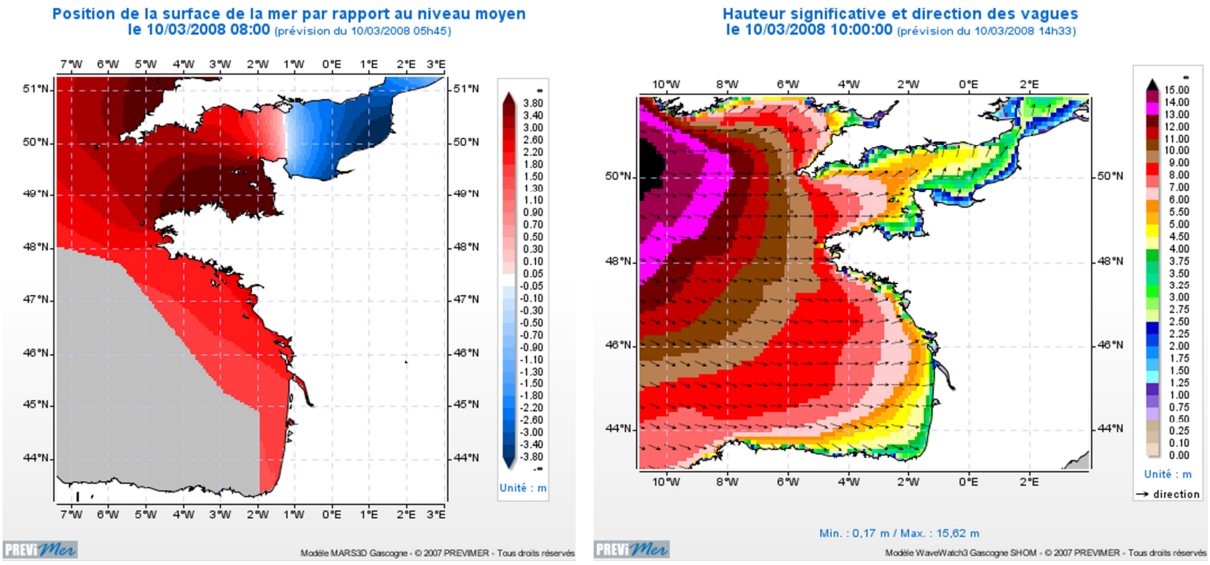


Figure 53 : Cartes des forçages (niveau d'eau et hauteur des vagues) pour Johanna extraits du site PRÉVIMER[28].

Pour la tempête Xynthia, les données proviennent de modèles implantés sur les Pertuis Charentais dès 2006 par le BRGM, dans le cadre de projets de recherche (Pedreros et al., 2007 ; Idier et al., 2010). De nouvelles simulations de la surcote et des vagues ont été réalisées spécifiquement pour la tempête Xynthia (Figure 54).

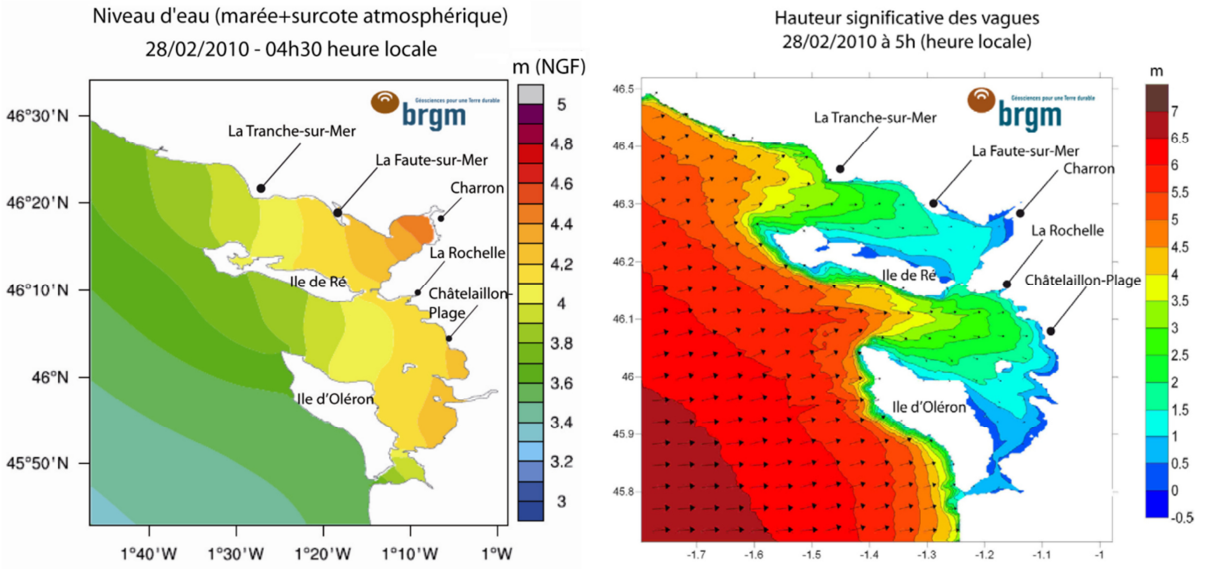


Figure 54 : Cartes des forçages (niveau d'eau et hauteur des vagues) pour Xynthia issus de travaux de modélisation du BRGM (Pedreros et al., 2010).

3.1.1. Production des indicateurs

À partir de ces modélisations, un calcul de la surcote et des hauteurs de vagues maximales atteintes, au moment de la marée haute, a été réalisé pour les deux tempêtes. Les valeurs

[28] http://www.previmer.org

de surcote ont été extraites à proximité de la côte et rapportées à la ligne de trait de côte, tandis que les valeurs de vagues ont été extraites le long des isobathes (lignes d'isoprofondeurs de la bathymétrie) de 10, 20 et 50 m de profondeur.

Pour la tempête Johanna, seule la surcote atmosphérique est représentée, les modèles de PRÉVIMER ne simulant pas la surcote liée aux vagues. Pour Xynthia, le *wave setup* étant pris en compte par les modèles utilisés, la surcote totale est représentée. Par ailleurs, pour la tempête Johanna, des submersions ayant été observées lors des deux marées hautes (le matin et le soir) du 10 mars 2008, la valeur maximale de surcote et de vagues entre les deux marées a été conservée.

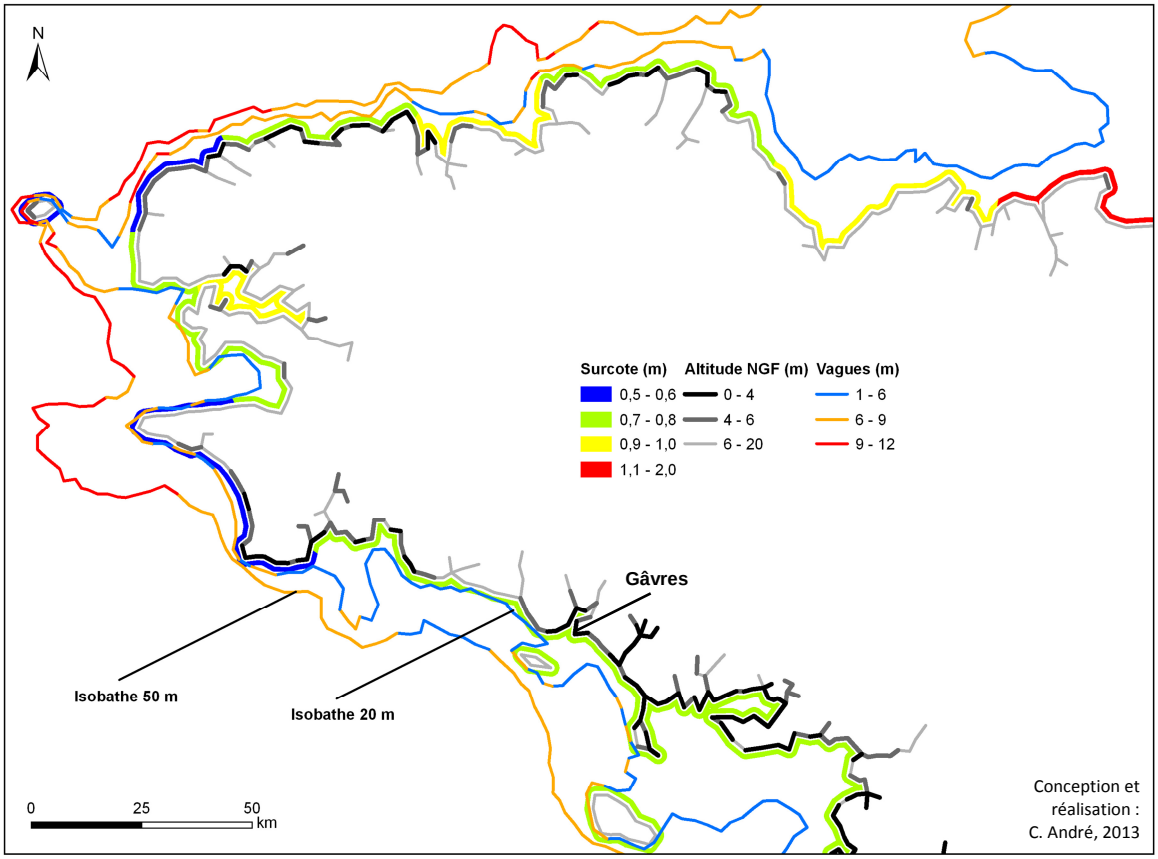


Figure 55 : Cartes des indicateurs des forçages produits pour la tempête Johanna (source : PRÉVIMER).

Afin de mettre en relation ces indicateurs de l'aléa avec l'altitude moyenne des côtes, pour évaluer, à l'échelle régionale, les zones susceptibles d'avoir été submergées lors des deux évènements, les altitudes du MNT de la BD ALTI® de l'IGN (résolution horizontale de 25 m et précision verticale de 1 m) ont été extraites dans une « zone tampon » de 100 m du trait de côte (produit Histolitt® développé par l'IGN et le SHOM). Du fait de l'échelle régionale du rendu, le trait de côte a été simplifié pour atteindre une résolution spatiale de quelques kilomètres, du même ordre de grandeur que les modèles de surcote et de vagues, et les

valeurs d'altitude ont été moyennées pour chaque tronçon ainsi obtenu. Les altitudes indiquées n'ont donc pas une valeur absolue très précise, mais donnent un aperçu convenable des variations relatives d'altitudes le long des côtes des deux régions d'étude (Figure 55 et Figure 56).

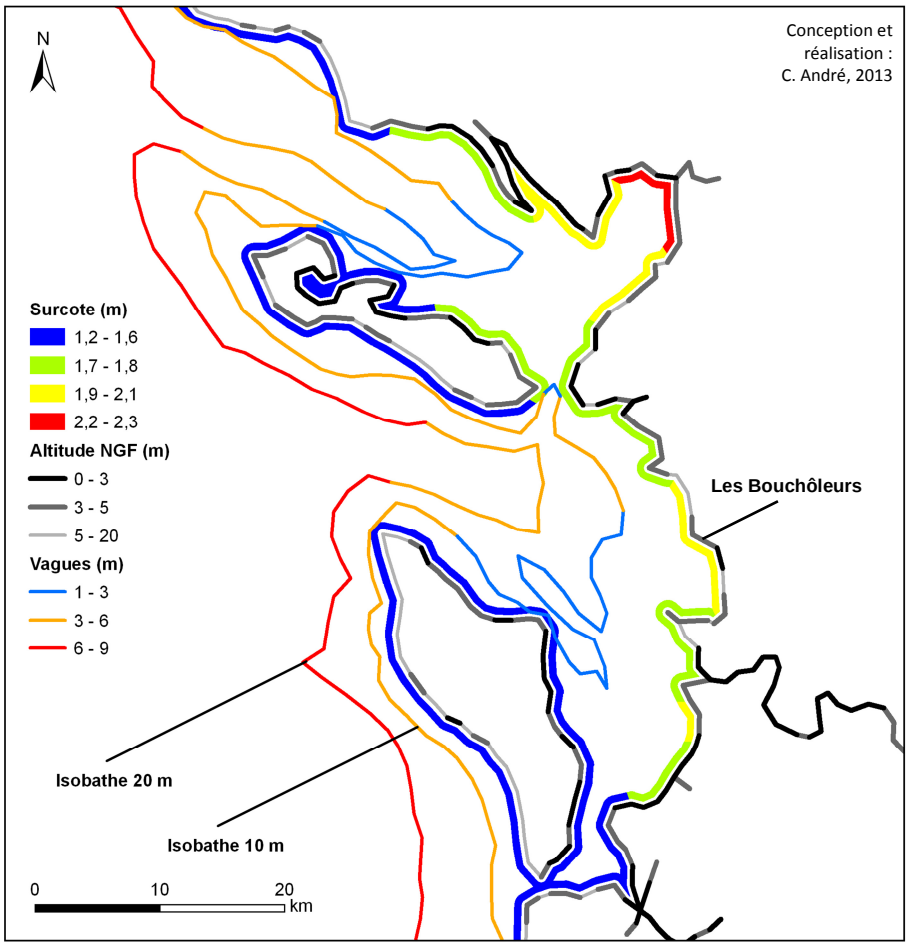


Figure 56 : Cartes des indicateurs des forçages produits pour la tempête Xynthia (source : modélisation BRGM).

Les indicateurs des forçages ainsi obtenus peuvent légèrement différer des mesures locales de niveaux d'eau issues de marégraphes ou de hauteurs de vagues issues de bouées. En effet, du fait des incertitudes des modèles et de leur résolution spatiale de l'ordre du kilomètre, ces indicateurs n'ont pas pour vocation de restituer la valeur exacte de surcote ou de hauteur des vagues en un point, mais d'indiquer un ordre de grandeur de ces dernières, et de permettre de comparer leurs intensités relatives pour les différentes zones touchées par chaque tempête. Dans la partie suivante de cette thèse, ils seront mis en relation avec la répartition des sinistres afin de voir s'il est possible, à l'échelle régionale, d'établir un lien entre l'intensité de l'aléa et les dommages observés.

3.2. Modélisation hydraulique de la submersion à l'échelle locale

La collecte des informations sur les sinistres, même au niveau détaillé des rapports d'expertise, a montré que les paramètres de l'aléa sont souvent absents des données d'assurance. Dans le but de pouvoir mettre en relation les dommages observés avec les processus d'endommagement de l'aléa sur les bâtiments, tels que la hauteur de submersion à terre, la vitesse du courant ou de montée de l'eau, et l'impact des chocs de vagues, il est donc nécessaire de réaliser une simulation de la submersion à l'échelle locale. Parmi les différentes méthodes d'évaluation de la submersion évoquées en partie I (section 4.4), c'est une méthode de modélisation hydraulique très haute résolution qui a été développée par l'équipe R3C du BRGM.

3.2.1. Présentation du procédé de modélisation

Comme indiqué précédemment, les deux sites retenus pour ces modélisations sont la presqu'île de Gâvres (Morbihan), l'une des communes les plus touchées par la tempête Johanna, et le site des Bouchôleurs, situé sur les communes d'Yves et de Châtelaillon-Plage (Charente-Maritime) pour la tempête Xynthia. Ces sites ont été choisis du fait du nombre important de dommages observés grâce aux données d'assurance, ainsi que pour la diversité des processus de l'aléa auxquels ils ont été exposés.

La méthodologie de modélisation consiste en un chainage (ou « emboitement ») de modèles de simulation successifs, d'étendue décroissante et de résolution spatiale de plus en plus fine, du large vers la côte, pour lesquels les conditions de sortie d'une grille de simulation sont reportées en entrée de la grille suivante (Pedreros et al., 2011). Cette méthode permet une restitution des forçages et de l'aléa avec une précision grandissante, et la prise en compte de tous les paramètres qui régissent l'interaction de la surcote et des vagues avec la bathymétrie et la configuration de la côte (Figure 57). Le modèle MARS (Lazure et Dumas, 2008), développé par l'Ifremer a été utilisé pour la simulation des niveaux d'eau, et le modèle SWAN (TU Delft, 2013), développé par l'Université de Delft aux Pays-Bas, pour la simulation des champs de vagues.

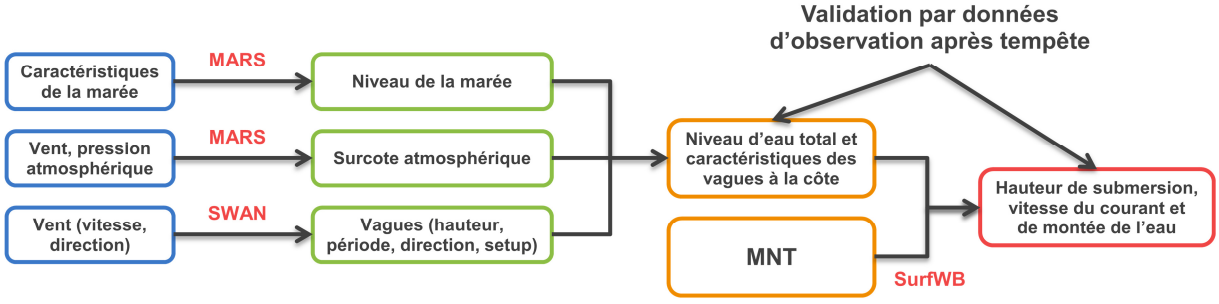


Figure 57 : Schéma du procédé de chainage pour la modélisation à l'échelle locale.

Les conditions aux limites (données d'entrée) pour ces modèles sont issues des données de marée astronomique du SHOM et des données de vent et de pression CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) pour la tempête Johanna. Pour la tempête Xynthia, les modèles déjà réalisés par le BRGM ont été réutilisés (Pedreros et al., 2010).

Pour la modélisation de la submersion à terre, réalisée sur la grille finale de simulation, le code à résolution de phase (dit « vague à vague ») SurfWB (Marche, 2005 ; Marche et al., 2007), développé à l'Université de Bordeaux, a été utilisé. Ce code permet de simuler des écoulements en milieu urbain, grâce à la mise en place de schémas à capture de choc bien équilibrés (*well-balanced*), capables de gérer la présence d'ouvrages de protection et de bâti sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT). Il est issu de la dérivation d'un modèle de Saint-Venant bidimensionnel à partir des équations de Navier-Stokes, et inclut des termes de diffusion, de friction, de Coriolis et de tension de surface. Par ailleurs, il converge vers l'état stationnaire au repos après le passage d'une onde, et gère les découvrements et recouvrements de manière satisfaisante. Il convient de souligner que ce modèle ne gère pas le déferlement des vagues, son domaine d'application est donc restreint aux zones de « *shoaling* » et de « jet de rive » (Figure 29, page 51). Il est cependant capable de reproduire aussi bien les submersions par débordement (cas des simulations réalisées aux Bouchôleurs), que par franchissement de paquets de mer (cas des simulations réalisées à Gâvres).

Pour que les paramètres de l'aléa modélisés soient correctement restitués et puissent être mis en relation avec les sinistres géolocalisés, il a été décidé de réaliser la modélisation à l'aide de MNT très détaillés, de résolution spatiale d'un ou deux mètres, intégrant les bâtiments, c'est-à-dire des Modèles Numériques d'Élévation (MNE). Ce type de modèle a rarement été mis en place à un tel niveau de détail, et demande, même pour des étendues réduites, une puissance de calcul élevée. Un des éléments les plus déterminants pour la configuration de la simulation sur la grille finale est donc la construction du MNE, dont la précision est un paramètre essentiel pour la restitution correcte de la submersion.

3.2.2. Préparation des Modèles Numériques d'Élévation

Au niveau de détail envisagé pour la réalisation de ces simulations (résolution spatiale de l'ordre du mètre), seules les données topographiques LIDAR, basées sur le calcul du temps de trajet d'un signal laser émis depuis un avion volant à basse altitude, possèdent une densité d'acquisition de données suffisante à la réalisation des MNE. En France, des données LIDAR sont en cours d'acquisition sur tout le pourtour littoral dans le cadre du projet de

cartographe Litto3D®. Ces données, distribuées gratuitement, sont depuis peu disponibles pour les régions de la Bretagne, des Pays de la Loire et du Poitou-Charentes, et sont incontestablement un apport majeur à la réalisation d'évaluations de l'aléa submersion marine.

Les données LIDAR disponibles ne couvrent que la partie terrestre du littoral, ainsi que l'estran émergé à marée basse. En effet, si la technologie LIDAR permet de déterminer la profondeur des fonds au travers des eaux peu profondes et relativement claires, ce type d'acquisition est plus coûteux que celui de la partie terrestre, et doit en général être complété par des méthodes de sondage acoustique sous-marin, encore plus coûteuses à mettre en place. La partie sous-marine des levés n'a donc pour l'instant été réalisée que pour quelques sites tests en France. Pour compléter les données LIDAR dans les parties sous-marines, les données bathymétriques utilisées proviennent du produit « dalles bathymétriques historiques » du SHOM. Elles ont une résolution spatiale de l'ordre de la centaine de mètres, bien moins précise que le LIDAR. Pour la combinaison des deux données, une attention particulière a été portée aux références altimétriques, différentes pour les deux jeux de données. Toutefois, l'emprise des grilles de simulation réalisées pour SurfWB étant peu étendue vers le large, le LIDAR couvre dans les eux cas une bonne partie de ces emprises sur l'estran.

Les bâtiments et les divers ouvrages et infrastructures sont autant d'obstacles à la propagation d'une inondation dans une zone basse. Ces derniers peuvent avoir un impact important sur l'écoulement et les débordements, ce qui jouera sur l'étendue et les hauteurs de submersion, et donc sur les dommages. Pour la plupart des modélisations classiques réalisées actuellement, la résolution spatiale n'est pas suffisante pour prendre en compte des bâtiments individuels dans le MNT. On attribue alors aux zones urbaines des coefficients de friction plus forts pour simuler la présence de bâtiments. Le code SurfWB permettant de simuler de manière détaillée les flux en milieu urbain, et grâce à la résolution spatiale élevée des données LIDAR, il est ici proposé de réaliser les simulations sur un MNE intégrant les bâtiments. L'élévation des bâtiments est inclue dans les données LIDAR brutes, cependant, les MNT produits et diffusés dans le cadre de Litto3D® ne représentent que le sol, les signaux réfléchis par tous les autres éléments étant exclus lors des traitements de la donnée. Pour l'obtention du MNE, nous devons donc réintégrer les ouvrages de protection et les bâtiments au MNT original, ce qui peut se faire de deux manières :

- Soit en utilisant des bases de données de représentation vectorielle des bâtiments, comme la BD TOPO® de l'IGN, qui a l'inconvénient de ne pas être mise à jour assez souvent pour prendre en compte les constructions récentes,

- Soit en réutilisant la donnée LIDAR brute, dont les signaux sont réfléchis par tous les éléments de taille supérieure à la résolution d'acquisition, dont les bâtiments.

À partir de la donnée LIDAR brute, c'est-à-dire les fichiers des points des réflexions laser d'origine, l'information sur la hauteur des bâtiments peut être retrouvée, mais elle est mélangée à des points réfléchis par d'autres éléments, tels que la végétation, des véhicules stationnés, etc. Les différents éléments doivent être triés avant de pouvoir réaliser le MNE, car tous ne perturbent pas de la même manière la propagation de la submersion. La sélection des points correspondant réellement aux bâtiments a été réalisée grâce au programme libre LasTools[29] (Hug et al., 2004), spécifiquement développé pour le traitement des données LIDAR, qui utilise des algorithmes permettant de différentier les bâtiments de la végétation grâce à leur forme. Une rectification manuelle de la classification a été réalisée à l'aide de photos aériennes, puis les MNE intégrant les hauteurs réelles des bâtiments ont été construits (Figure 58).

Figure 58 : Extraits du MNT, de la photo aérienne et du MNE réalisé intégrant les bâtiments et les murs de clôture à Gâvres (données LIDAR DDTM 56 ; orthophoto BD ORTHO® IGN).

Pour la reconstitution de submersions réelles *ex post*, le MNE utilisé doit également refléter l'état des ouvrages de protection au moment de l'évènement. En effet, après les tempêtes Johanna et Xynthia, les ouvrages des deux sites d'étude ont été endommagés par endroits, puis rehaussés lors des réparations qui ont suivi, avant la date d'acquisition des données LIDAR. Pour être en mesure de simuler correctement la submersion, il faut donc reproduire l'état de ces ouvrages au moment de la tempête et non après les réparations et éventuels rehaussements.

Aux Bouchôleurs par exemple, le parapet surmontant la digue du vieux port a été surélevé après Xynthia, et les accès à la plage par des escaliers ont été fermés par des portillons amovibles qui n'existaient pas lors de la tempête (Figure 59).

[29] http://rapidlasso.com/lastools

Figure 59 : Illustrations de la surélévation du parapet (gauche) et de l'installation de portillons (droite) sur le vieux port des Bouchôleurs après Xynthia (photos © C. André et BRGM).

À Gâvres, le parapet de la digue de la grande plage a été complètement détruit sur une centaine de mètres et remplacé par un enrochement temporaire. Sans pouvoir savoir à quel moment précis le parapet s'est effondré, rendant possible la submersion de la zone habitée en arrière, il nous a fallu supposer que celui-ci a cédé dès les premiers chocs de vagues, et reconstituer le MNE dans la situation la plus défavorable, c'est-à-dire sans le parapet ni les enrochements, pour pouvoir reproduire le plus fidèlement possible la submersion à terre (Figure 60).

Figure 60 : Illustrations de l'état du parapet sur la digue de la grande plage de Gâvres avant la tempête Johanna (gauche), le lendemain de la tempête (centre) et après la construction de l'enrochement (droite) (photos © Géos-AEL et DHI, 2008 et C. André).

Ce travail a également été nécessaire pour la reconstitution de l'état de la dune des marais d'Yves lors de Xynthia, qui a subi d'importantes brèches et un arasement général lors de la tempête (Figure 32, page 53), causant l'inondation du marais qui est l'une des voies d'entrée de la submersion dans le quartier des Bouchôleurs. D'autre part, il a fallu reconstituer les passages souterrains de la submersion au niveau de la voie ferrée et de la D137 en réalisant des abaissements locaux de l'altitude du MNE (Figure 42, page 66).

La grande plage de Gâvres, quant à elle, a bénéficié d'un rechargement de sable en 2012, après l'acquisition des données LIDAR. Si le rechargement avait été visible sur ces données, il

aurait rendu impossible la simulation de la tempête Johanna dans ses conditions initiales, en modifiant complètement le comportement des vagues sur la plage, alors qu'elles sont responsables de la submersion par franchissement de la digue. Ce rechargement rend donc partiellement obsolètes les données LIDAR de l'estran, pour la réalisation d'une simulation d'évènements potentiels futurs, sans mise à jour du levé. La Figure 61 et la Figure 62 représentent les MNE finaux obtenus pour les deux sites de modélisation.

Figure 61 : Représentation en 3 dimensions du MNE utilisé pour la modélisation de la submersion avec SurfWB sur le site de Gâvres (données LIDAR DDTM 56).

Figure 62 : Représentation en 3 dimensions du MNE utilisé pour la modélisation de la submersion avec SurfWB sur le site des Bouchôleurs (données LIDAR DREAL Poitou-Charentes).

3.2.3. Résultats des modélisations

L'objet de cette thèse n'est pas de donner plus de détail sur les aspects de modélisation hydraulique de la submersion. Pour plus d'informations sur les techniques utilisées, la présentation des résultats des grilles intermédiaires, la validation des résultats finaux obtenus, et sur les aspects novateurs de la méthode mise en place, voir les rapports produits dans le cadre du projet JOHANNA (André et Vinchon, 2011 ; André et al., 2012 ; Vinchon et al., 2014) et l'article de S. Le Roy et al. (en préparation).

Pour la commune de Gâvres, les résultats de hauteur d'eau et de vitesse du courant lors de la tempête Johanna sont présentés en Figure 63 et Figure 64.

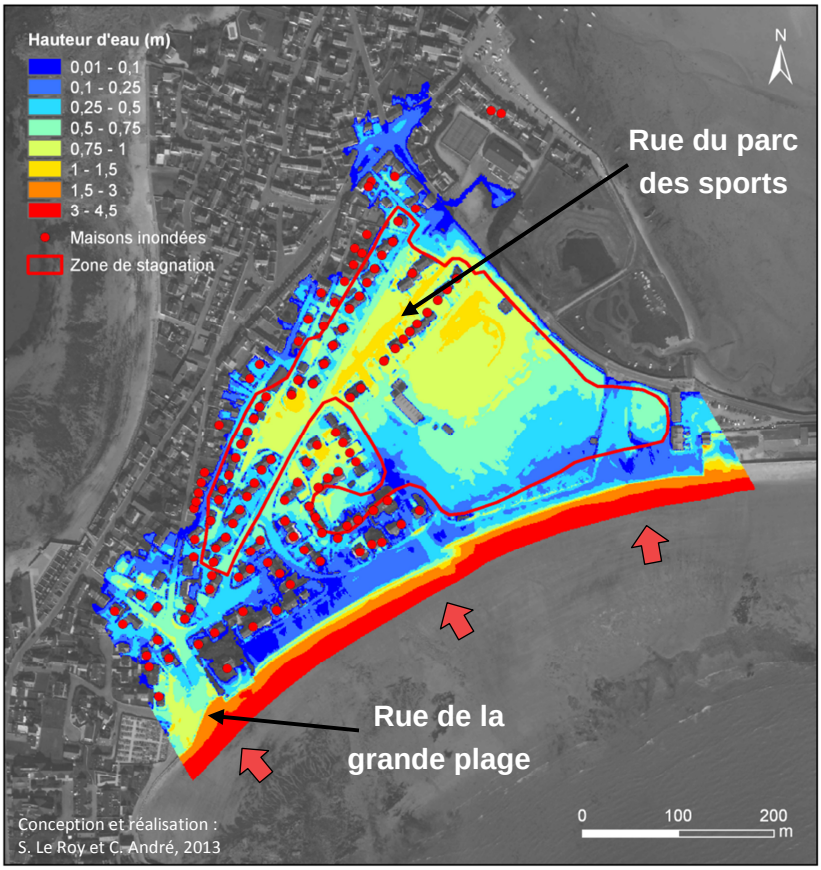


Figure 63 : Carte de résultat de la modélisation des hauteurs d'eau maximales à Gâvres lors de Johanna (modélisation BRGM ; adresses des habitations inondées et zone de stagnation de la submersion fournies par la Mairie de Gâvres ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN).

L'étendue de l'inondation est assez proche de celle donnée par la simulation de l'évènement réalisée dans le cadre de la réalisation du PPRL de Gâvres (Géos-AEL et DHI, 2008). Elle concorde également avec l'emplacement des habitations inondées, dont la liste nous a été communiquée par la Mairie de la commune. Les hauteurs d'eau modélisées sont toutefois inférieures à celles reconstituées par le bureau d'études DHI, et concordent davantage avec les observations réalisées par J.-M. Cariolet (2010 et 2011), et avec les témoignages des riverains. La hauteur atteint son maximum, entre 1 et 1,5 m, dans la rue du parc des sports.

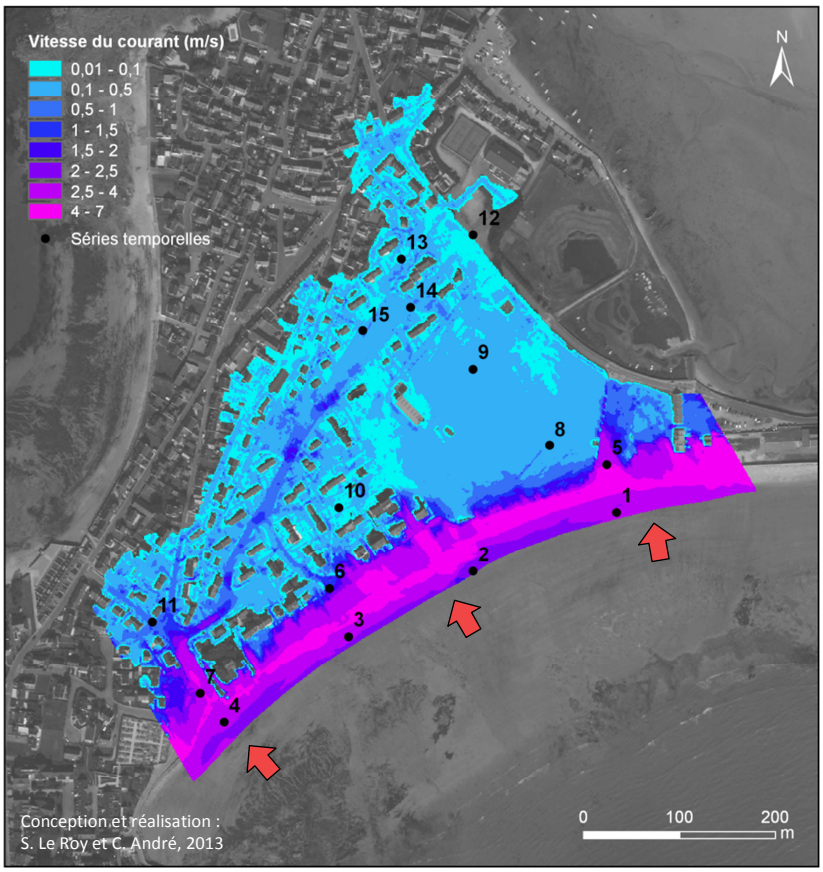


Figure 64 : Carte de résultat de la modélisation des vitesses maximales du courant à Gâvres lors de Johanna, et localisation des extractions de séries temporelles (modélisation BRGM ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN).

La carte des vitesses du courant montre que celles-ci sont restées assez faibles sur l'ensemble de la zone inondée, en général inférieures à 1 m/s, excepté pour les maisons situées juste en arrière de la digue de la grande plage. En effet, la submersion ayant eu lieu principalement par franchissement de paquets de mer au-dessus de la digue, l'eau s'est ensuite écoulée dans les rues jusqu'au point le plus bas (le centre de l'ancienne lagune remblayée) pour y stagner pendant de nombreuses heures, jusqu'à leur évacuation par pompage.

Ce déroulement, décrit par les riverains dans le compte-rendu de l'évènement de Géos-AEL et DHI (2008), est confirmé par l'analyse de séries temporelles d'évolutions de la hauteur d'eau et de la vitesse pendant la submersion, extraites du modèle en quelques points représentatifs (Figure 65).

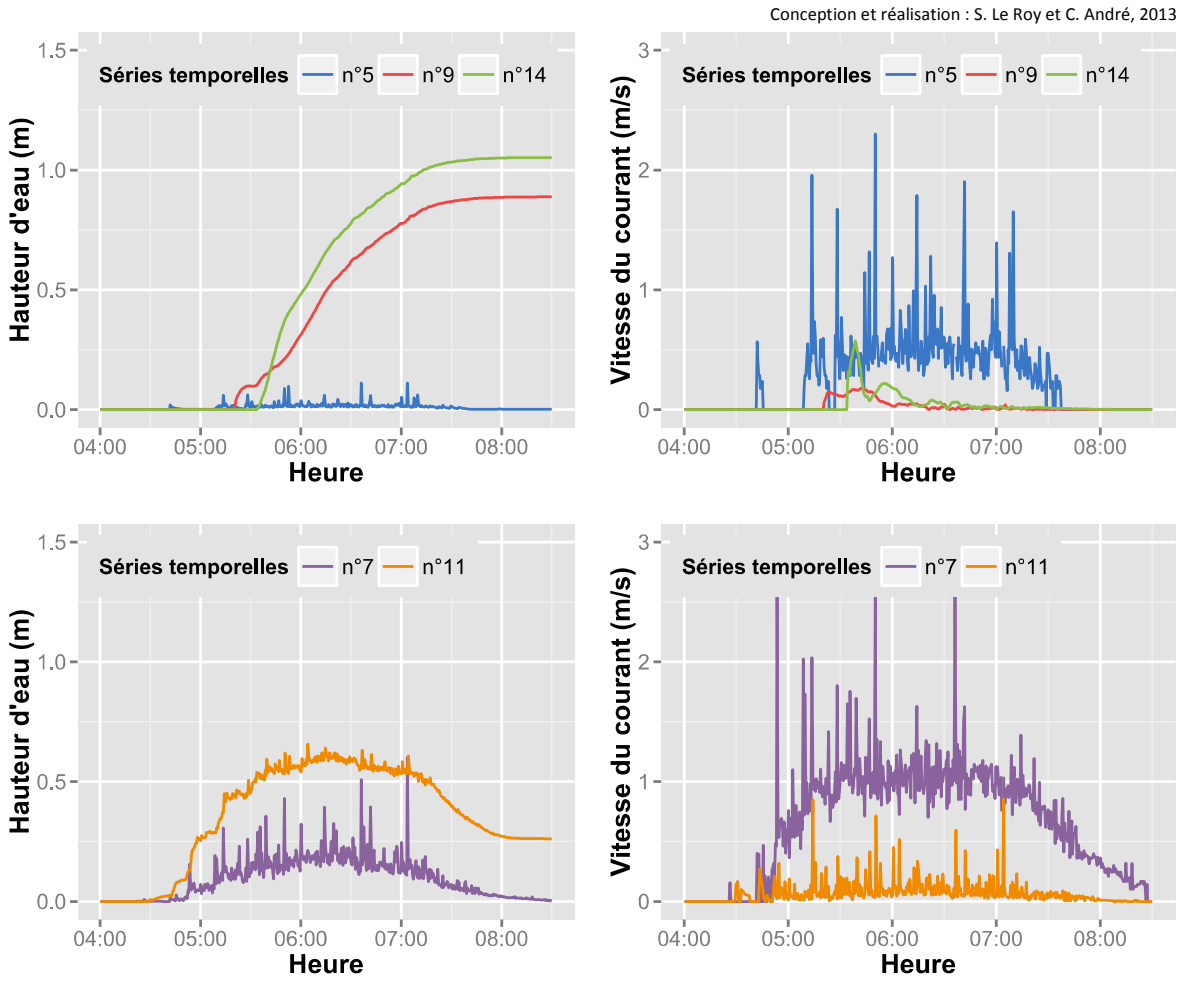


Figure 65 : Exemples de séries temporelles de la hauteur d'eau et de la vitesse du courant extraites des modélisations de la submersion à Gâvres lors de Johanna.

À l'emplacement n° 5 (Figure 64 et Figure 65), on observe que la hauteur d'eau reste très faible, mais que la vitesse atteint par moments près de 2 m/s : on est dans une zone de d'écoulement de l'eau, juste en retrait de la digue, qui ne s'accumule pas à cet endroit. Au contraire, on voit l'eau commencer à s'accumuler aux points n° 9 et n° 14, respectivement à 5h20 et 5h30. Le niveau monte ensuite progressivement pour atteindre son maximum aux deux points vers 7h30, quand la marée entame sa redescente. À ces deux emplacements, où l'eau arrive par ruissellement depuis la digue, les vitesses restent relativement faibles, inférieures à 0,5 m/s. Par ailleurs, au niveau de la rue de la grande plage (Figure 63), où la digue est moins haute, l'eau est entrée plus violemment dès 4h30, les hauteurs d'eau aux emplacements n° 7 et n° 11 restant faibles (respectivement de 25 à 60 cm) mais avec des vitesses plus importantes, atteignant à plusieurs moments 2,5 m/s au point n° 7. Sur les graphiques correspondants, les oscillations indiquent que les paquets de vagues ont un impact jusque plusieurs dizaines de mètres après le franchissement de la digue.

Pour le site des Bouchôleurs, des résultats similaires de hauteur d'eau et de vitesse du courant ont été calculés pour la tempête Xynthia. Une carte de la vitesse de montée de l'eau est également présentée (Figure 66 à Figure 68).

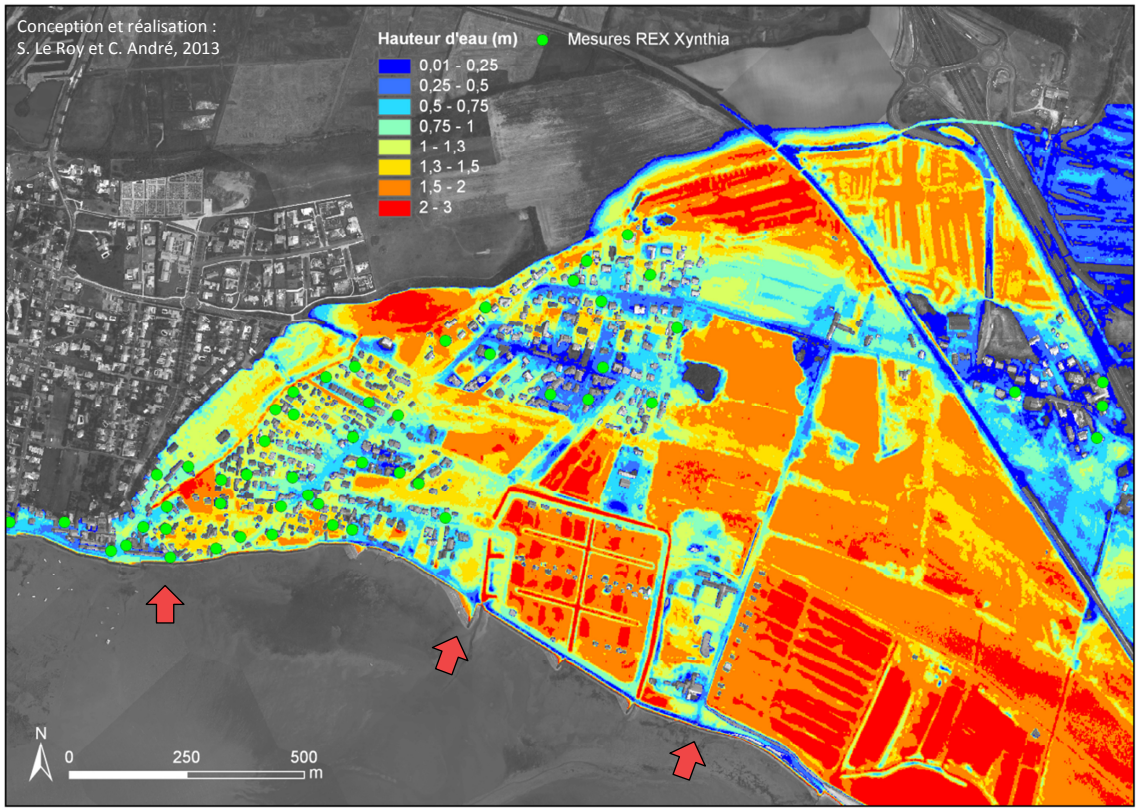


Figure 66 : Carte de résultat de la modélisation des hauteurs d'eau maximales aux Bouchôleurs lors de Xynthia (modélisation BRGM ; mesures de terrain du REX Xynthia issues de Sogreah, 2011 ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN).

L'étendue et les hauteurs d'inondation ont pu être validées par les données de terrain du retour d'expérience de Xynthia (Sogreah, 2011). Par rapport aux nombreuses laisses mesurées par la Sogreah après l'inondation, le modèle obtenu à une légère tendance à la sous-estimation des hauteurs d'eau, majoritairement inférieure à 20 cm. Il faut ici rappeler que la précision en altitude des données LIDAR, dont dépend la modélisation, est évaluée à la dizaine de centimètres. Les hauteurs d'eau varient de 0,25 à 2 m dans les zones résidentielles et atteignent jusqu'à 3 m dans la zone conchylicole et le marais (Figure 66).

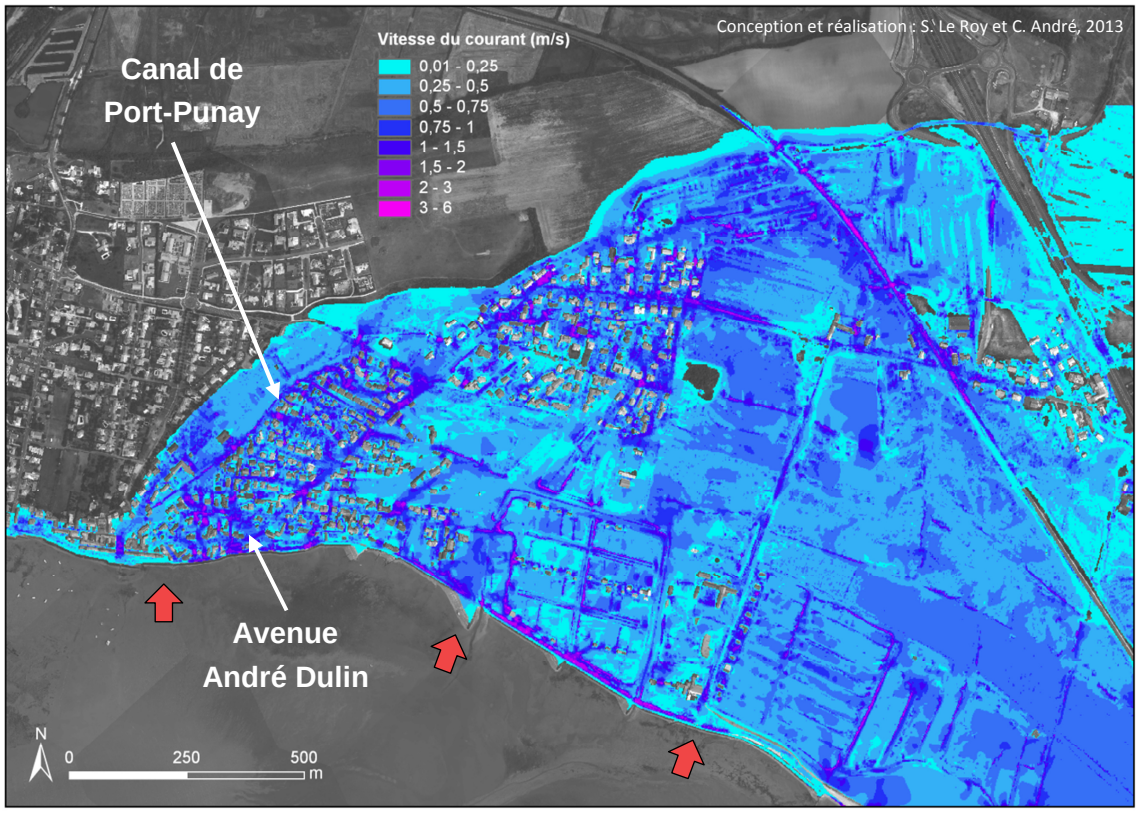


Figure 67 : Carte de résultat de la modélisation des vitesses maximales du courant aux Bouchôleurs lors de Xynthia (modélisation BRGM ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN).

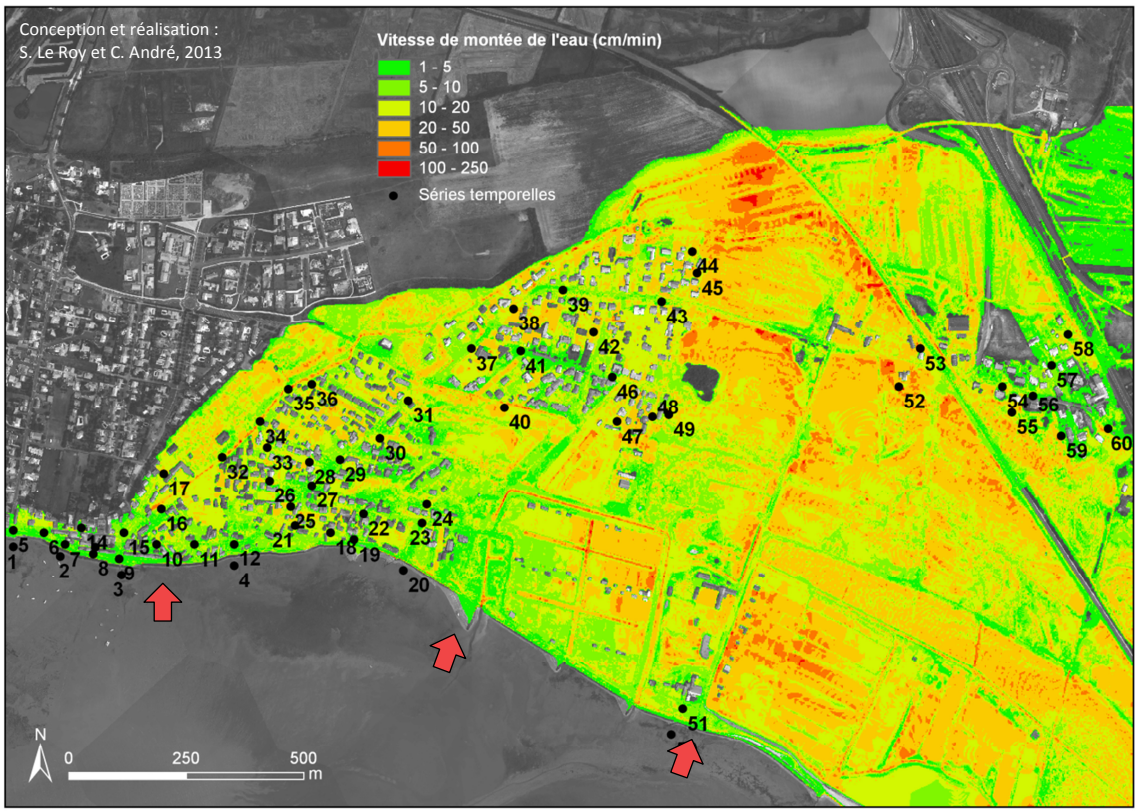


Figure 68 : Carte de résultat de la modélisation des vitesses maximales de montée de l'eau aux Bouchôleurs lors de Xynthia, et localisation des séries temporelles (modélisation BRGM ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN).

Les vitesses de courant les plus importantes se concentrent le long du canal de Port-Punay et de l'avenue André Dulin (Figure 67), qui favorisent les écoulements, et en arrière de la digue du vieux port, submergée par débordement. Elles peuvent atteindre à ces endroits les 2 m/s. Les bâtiments en eux-mêmes, qui sont souvent situés en retrait par rapport aux voies, semblent avoir été affectés par des vitesses peu élevées, sauf exceptions. Là encore, on peut analyser les séries temporelles de quelques points pour mieux comprendre les processus ayant affecté les différentes zones inondées (Figure 69).

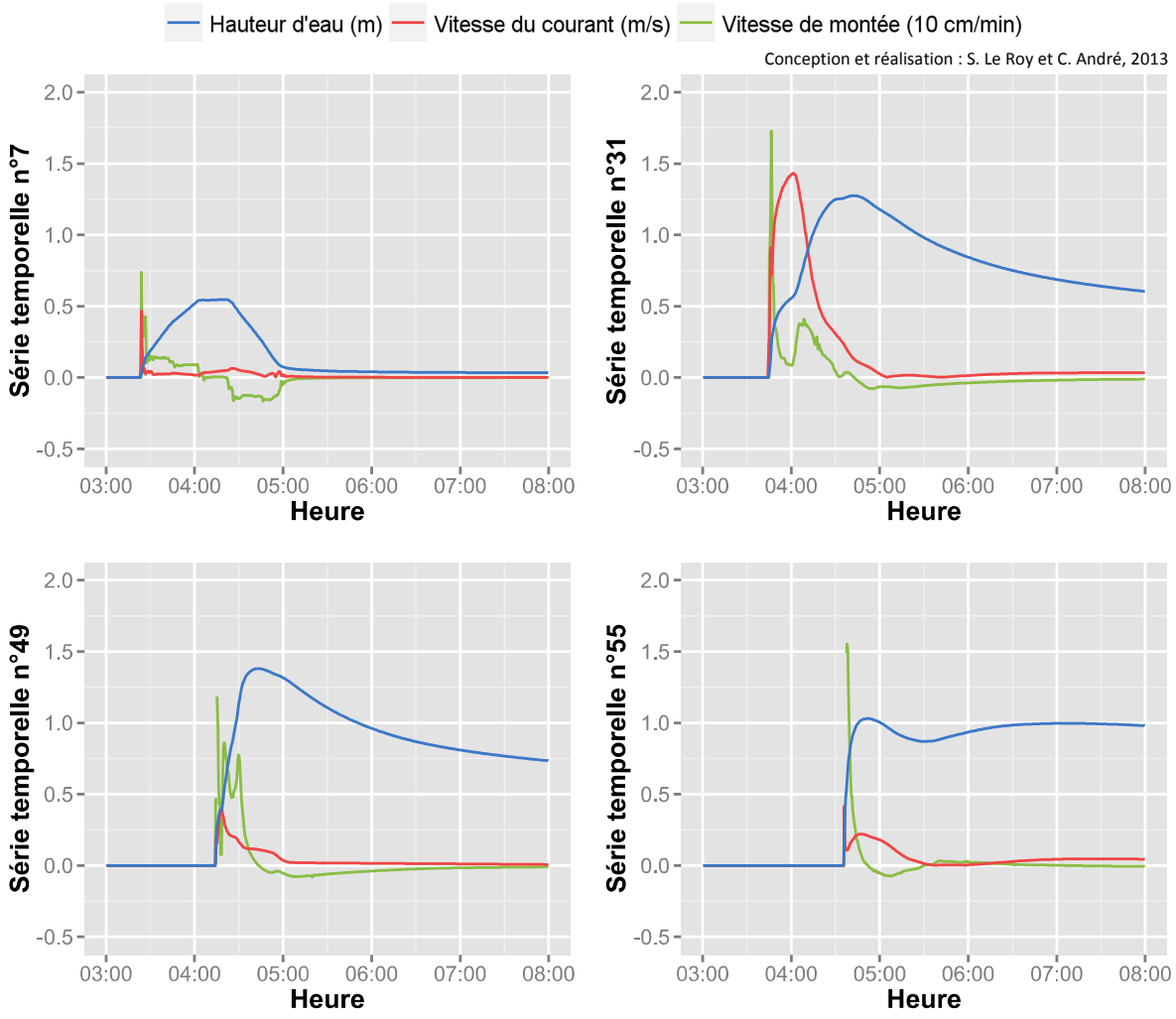


Figure 69 : Exemples de séries temporelles de la hauteur d'eau et de la vitesse du courant et de montée de l'eau, extraites des modélisations de la submersion aux Bouchôleurs lors de Xynthia.

À l'emplacement n° 7 (Figure 68 et Figure 69), sur le quai côté Châtelaillon, la hauteur d'eau commence à monter à 3h20, mais n'atteint que 50 cm ; la vitesse du courant et celle de la montée de l'eau restent faibles. À l'emplacement n° 31, dans l'avenue André Dulin, la vitesse du courant et la vitesse de montée de l'eau atteignent respectivement 1,5 m/s et 17 cm/min vers 3h45, l'eau monte jusqu'à 1,25 m à cet endroit puis redescend progressivement. On a

un phénomène similaire au point n° 49, où l'eau arrive un peu plus tard, en provenance du marais d'Yves au sud-est, avec une vitesse moins importante. Enfin, à l'emplacement n° 55, l'eau ne commence à monter qu'à 4h35, mais avec une vitesse importante, après le franchissement de la voie ferrée. Contrairement aux zones plus proches de la mer, l'eau a stagné plus longtemps dans le lieu-dit des Trois-Canons, ne pouvant repartir en mer à la redescente de la marée.

3.2.4. Affectation des paramètres de l'aléa aux dossiers de sinistres

Ces modélisations permettent de corréler des paramètres précis de l'inondation aux types et aux montants de dommages des sinistres géolocalisés sur les sites de Gâvres et des Bouchôleurs. Pour ces deux sites, ont été attribués aux dossiers de sinistres l'ensemble des paramètres modélisés ; pour les autres sites sur lesquels il a été possible de réaliser une interpolation des hauteurs d'eau à partir de mesures de terrain du REX Xynthia (Figure 51, page 89), ces hauteurs d'eau ont également été affectées aux dossiers géolocalisés.

Pour les données interpolées, l'attribution des hauteurs d'eau aux points représentant les dossiers de sinistres a été réalisée par une simple « jointure spatiale » sous SIG. Pour les paramètres issus des modélisations numériques, l'utilisation du MNE entraine une difficulté : les dossiers de sinistre représentés par des points sont placés, s'ils sont localisés à l'adresse postale ou à la référence cadastrale, à l'emplacement du bâtiment. Or, les modèles ne donnent pas de résultat à l'intérieur de l'emprise des bâtiments, qui sont considérés comme étanches. Les valeurs de hauteur d'eau, de vitesse du courant et de montée de l'eau ont donc été extraites à l'intérieur de « zones tampon » de quelques mètres autour des bâtiments, afin de récupérer les valeurs au plus près de ces derniers (Figure 70). La moyenne des valeurs autour de chaque bâtiment a été utilisée pour l'analyse du lien entre les paramètres de l'aléa et les dommages.

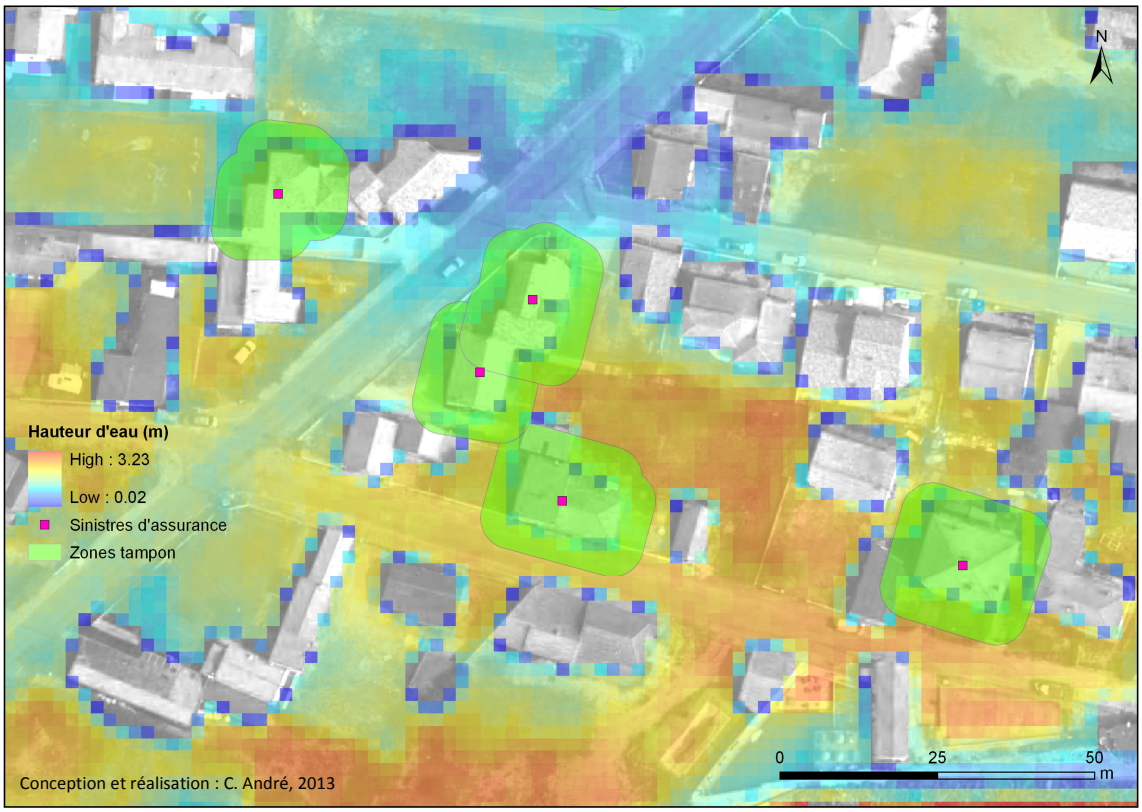


Figure 70 : Illustration de la procédure d'affectation des paramètres de l'aléa simulés aux dossiers sinistres à l'aide d'une « zone tampon » autour des bâtiments (modélisation BRGM ; contours bâtiments BD TOPO® IGN).

Il est à noter que les hauteurs d'eau ainsi obtenues ne représentent pas la hauteur de l'inondation dans les habitations, mais la hauteur par rapport au terrain naturel, puisque les modélisations numériques et les interpolations de mesures de terrain sont basées sur l'altitude du MNT LIDAR. Aux incertitudes inhérentes aux processus de modélisation et d'interpolation, s'ajoutent donc celles de la précision de l'altitude du MNT.

Dans le cadre de cette thèse et du projet JOHANNA, différentes techniques de modélisation hydraulique numérique ont été utilisées pour reconstituer les paramètres des forçages et de l'aléa des tempêtes Johanna et Xynthia, afin de les mettre en relation avec les dommages observés. Ce travail a été réalisé à deux échelles pour les deux évènements de submersion.

Des indicateurs des forçages (surcote, hauteur des vagues) ont été réalisés à une échelle régionale, dans le but de pouvoir comparer relativement l'intensité de ces paramètres sur l'ensemble des zones affectées. Par ailleurs, des modélisations haute résolution de la submersion à terre ont été réalisées sur un site pour chaque tempête, permettant de reproduire les valeurs de hauteur d'eau et de vitesse du courant, pour étudier les interactions de ces paramètres avec les types de dommages observés et leurs coûts à une échelle locale.

Conclusion de la deuxième partie

L'inventaire des données existantes et disponibles sur les dommages et sur l'aléa suite aux évènements catastrophiques confirme le manque de données disponibles en France, en particulier économiques, nécessaires à la compréhension des phénomènes d'endommagement *ex post*, et à la construction de modèles empiriques d'évaluation des dommages *ex ante*.

Dans le cadre de cette thèse, la démarche, qui repose sur les données brutes d'assurance auxquelles nous avons eu accès, propose d'évaluer l'apport de ces données à l'analyse et à l'évaluation des dommages liés à la submersion marine à partir des deux évènements Johanna et Xynthia, en les croisant avec des reconstitutions des paramètres de l'aléa de ces deux tempêtes, obtenues par modélisation numérique. Cette partie, dédiée à la présentation de ces données d'assurance, méconnues, et des techniques de modélisation de l'aléa utilisées, donne donc les clés pour l'analyse menée dans les deux prochaines parties de cette thèse, dans le but d'expliquer les dommages observés et leurs coûts.

La démarche suivante consiste à réaliser l'analyse des données en deux étapes, d'une échelle globale, dite « régionale », à une échelle « locale ». Pour ces deux échelles spatiales, les approches suivies ont été différentes, s'adaptant à la quantité de données et au niveau de détail des informations disponibles. L'échelle « régionale » ne désigne pas les limites régionales administratives, mais l'ensemble de la région touchée par chaque tempête : on parle aussi d'échelle « macro », en référence à l'évènement considéré, c'est-à-dire l'étendue de l'ensemble des zones affectées par cet évènement. À cette échelle, le nombre de dossiers d'assurance est maximal, mais les informations sur les dommages sont peu détaillées. Au contraire, l'échelle locale, ou échelle « micro », désigne une focalisation sur quelques sites, sur lesquels on peut analyser les dommages individuellement et avec plus de précision.

Partie III. Analyse des données d'assurance à l'échelle régionale : une synthèse des dommages des évènements

Introduction

Première partie de l'étude des données d'assurance recueillies, l'analyse des dommages à l'échelle régionale a pour but une description des caractéristiques globales des submersions marines survenues lors des tempêtes Johanna et Xynthia. À cette échelle, une première recherche de paramètres pouvant expliquer *ex post* les coûts des dommages est menée, afin de définir les éléments utiles à la mise en place d'un modèle de prédiction du coût des dommages *ex ante*.

Les données analysées à cette échelle proviennent principalement des listings des sinistres, c'est-à-dire le premier niveau des données d'assurance, qui représentent de manière exhaustive les dommages indemnisés par les trois assureurs AXA, MAAF et MAIF pour les tempêtes Johanna et Xynthia. Ces données n'étant pas les plus détaillées, l'objectif est ici de cerner les paramètres pouvant expliquer les dommages. Ces paramètres sont de deux grands types : ils sont soit liés aux caractéristiques de l'aléa impliqué dans les dommages, soit en rapport avec les spécificités des enjeux endommagés et leur vulnérabilité à l'aléa.

Cette analyse sera poursuivie dans la partie suivante de cette thèse. L'intérêt de l'étude, à cette échelle, porte davantage sur l'analyse de la répartition des dommages des deux évènements dans l'espace, et des liens de cette répartition avec l'aléa et les enjeux, pour Johanna et Xynthia. Ces éléments apportent une vision globale de l'impact des deux

tempêtes, et une synthèse des principales caractéristiques de l'endommagement associé aux deux évènements. Enfin, une analyse plus poussée des variations spatiales des coûts est également réalisée pour la tempête Xynthia, à partir des données d'indemnisations agrégées à une résolution communale.

1. Description et analyse des indemnisations des deux tempêtes

1.1. Indemnisations par type d'enjeux

La première analyse menée porte sur les différences de coût entre les deux tempêtes pour les principaux types d'enjeux impactés ; le terme « enjeux » étant utilisé ici dans le sens de « biens assurés ». Les catégories d'enjeux sont établies en groupant les biens similaires par classes correspondant aux grands secteurs d'activités de l'assurance : les habitations, les entreprises, les exploitations agricoles, etc. (Tableau 8). Le tri est réalisé en fonction du type de police d'assurance souscrite[30]. Les données utilisées sont les données de niveau 1 (listings des assureurs) : les valeurs de coût des dommages correspondent donc aux valeurs d'indemnisations d'assurance (Tableau 7, page 104).

	Nb dossiers Johanna	Indemnité moyenne	Erreur type de la moyenne[31]	Nb dossiers Xynthia	Indemnité moyenne	Erreur type de la moyenne
Habitations	175 (59 %)	7 128 €	1 510	3 956 (86 %)	26 622 €	768
Entreprises	52 (18 %)	45 469 €	17 568	344 (8 %)	47 866 €	10 118
Exploitations agricoles	12 (4 %)	4 637 €	1 820	139 (3 %)	27 452 €	4 662
Véhicules	19 (6 %)	4 674 €	862	120 (3 %)	7 834 €	529
total	297	13 254 €	3 303	4 575	27 677 €	1 024

Tableau 8 : Nombre de sinistres des listings et indemnisations moyennes par type d'enjeu et par évènement.

On confirme ici que l'ampleur des dommages a été très différente pour les tempêtes Johanna et Xynthia. Au même titre que le nombre des sinistres, les indemnisations moyennes sont plus élevées pour la tempête Xynthia, mais les différences ne sont pas les mêmes selon les enjeux touchés. Le type d'enjeu le plus affecté est le type « habitation » (dossiers MRH), qui représente 59 % des sinistres pour Johanna et 86 % des sinistres pour Xynthia ; les dommages de la tempête Xynthia sont donc particulièrement concentrés sur les habitations. Les sinistres des autres catégories, c'est-à-dire les enjeux professionnels (entreprises et commerces), agricoles, ou les véhicules, sont proportionnellement plus représentés pour Johanna que pour Xynthia. Cependant, le nombre de sinistres des deux

[30] Les analyses statistiques de cette thèse ont été réalisées sous le logiciel R. Les figures ont été produites à l'aide du package « ggplot2 » et les cartes à l'aide du logiciel ArcGIS®.

[31] L'erreur type de la moyenne ou *Standard Error of the Mean* (SEM) décrit la précision de la moyenne estimée à partir d'un échantillon de données. Elle se calcule par l'écart-type de l'échantillon divisé par la racine carrée du nombre d'observations de celui-ci.

dernières catégories, dans le cas de Johanna, est trop faible pour être statistiquement valable.

Pour ces comparaisons, il faut tenir compte du fait que ces données d'indemnisation représentent le coût des dommages pour l'assureur, ce qui signifie que les franchises ont été retranchées des sommes indemnisées. Celles-ci sont différentes selon les enjeux considérés, de par la règlementation imposée par le régime CatNat (380 € pour une habitation, 10 % du montant des dommages pour une entreprise) ; elles suivent par contre les mêmes règles pour les deux évènements.

À noter que les sinistres de type professionnel ont à peu près le même coût pour les deux tempêtes, alors que la moyenne des coûts pour les exploitations agricoles est beaucoup plus élevée pour Xynthia que pour Johanna : cela s'explique par le fait que les étendues submergées lors de Xynthia sont extrêmement plus importantes que pour Johanna (cf. partie I, section 5.1), les parcelles agricoles ont donc souvent été inondées dans leur intégralité et pour des durées plus importantes que lors des submersions générées par Johanna. Ces données soulignent en particulier l'écart important sur le coût moyen des dommages aux biens d'habitation entre les deux évènements, qui s'élève à 7 100 € pour Johanna et 26 600 € pour Xynthia. En première analyse, l'écart entre ces coûts moyens peut être lié aux différences de hauteur d'inondation dans les logements ; cette information étant disponible au niveau détaillé des données, ce point sera rediscuté ultérieurement.

1.2. Répartition géographique des sinistres et des coûts associés

La géolocalisation de l'ensemble des dossiers de sinistres a permis de réaliser une carte de la répartition spatiale des sinistres pour les deux tempêtes (Figure 71).

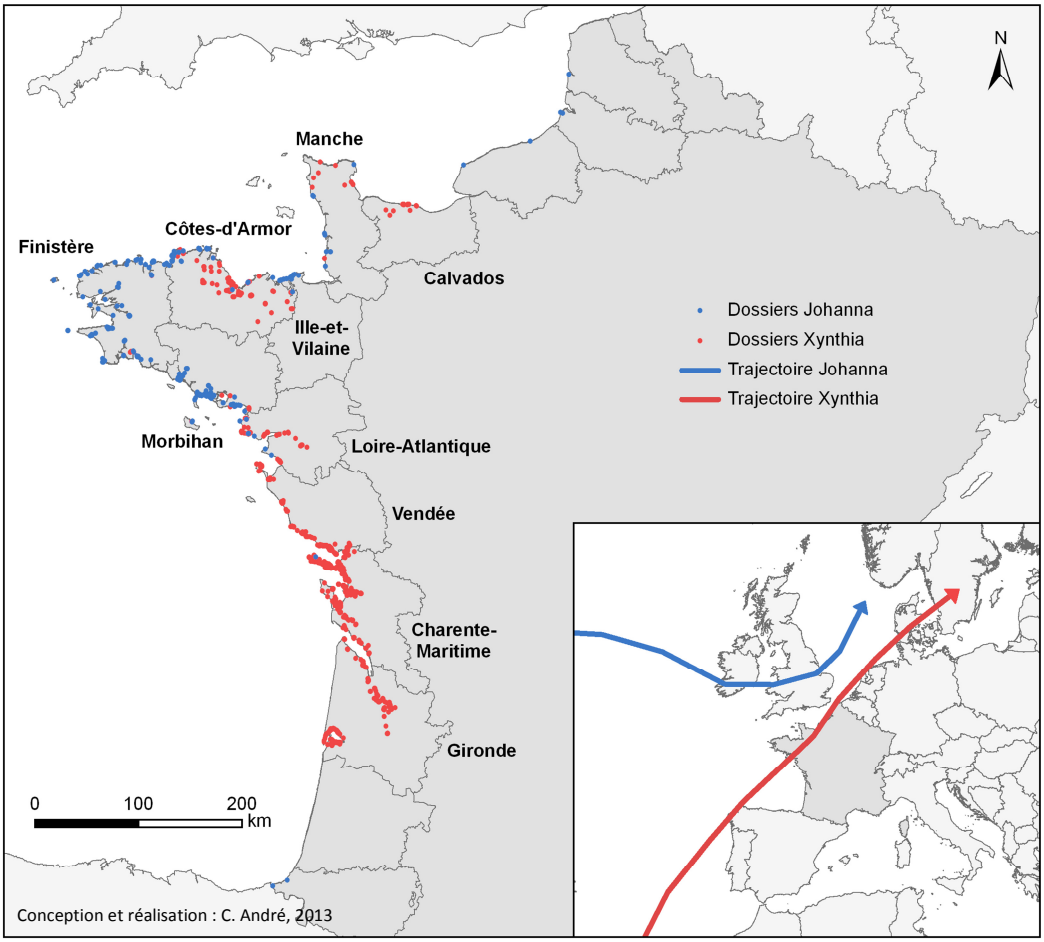


Figure 71 : Carte de la répartition des sinistres et du trajet des deux tempêtes.

La répartition des sinistres permet d'identifier les zones touchées par les deux tempêtes. Leur densité, peu visualisable à cette échelle, est beaucoup plus forte pour la tempête Xynthia que pour Johanna. Un zoom sur les communes de la Faute-sur-Mer et de l'Aiguillon-sur-Mer, en Vendée, sites les plus impactés par la tempête Xynthia, permet de se rendre compte de la densité des dossiers d'indemnisation, à partir des données géolocalisées des listings des trois assureurs (Figure 72).

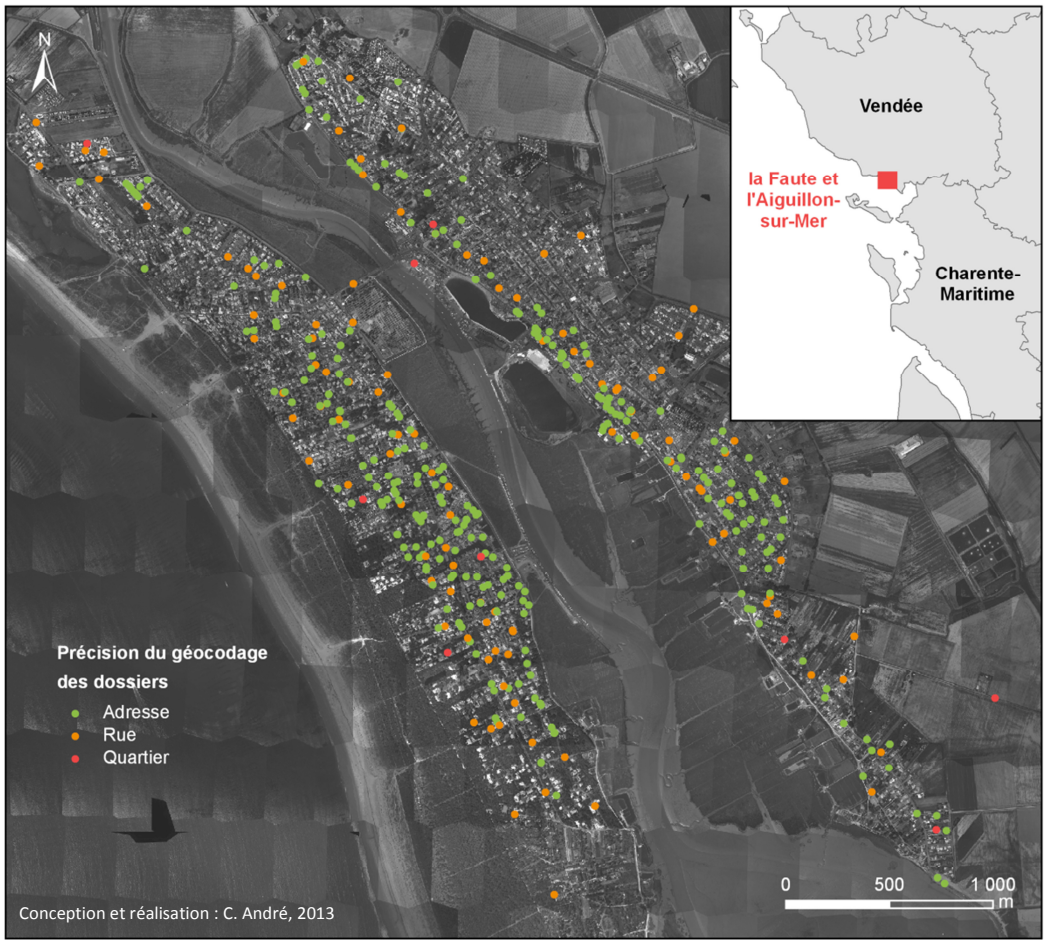


Figure 72 : Carte de la répartition des sinistres sur les communes de la Faute et de l'Aiguillon-sur-Mer.

Les statistiques de la répartition par département des sinistres aux habitations (dossiers MRH), pour les deux tempêtes, sont indiquées dans le Tableau 9.

	Nb dossiers Johanna	Indemnité moyenne	Erreur type	Nb dossiers Xynthia	Indemnité moyenne	Erreur type
Calvados				55 (1%)	6 055 €	1 750
Manche				24 (1%)	5 014 €	1 020
Ille-et-Vilaine	13 (8%)	2 050 €	456			
Côtes-d'Armor	21 (12%)	5 609 €	1 123	188 (5%)	6 778 €	819
Finistère	53 (30%)	4 506 €	886			
Morbihan	72 (42%)	6 168 €	840	23 (1%)	4 604 €	1 882
Loire-Atlantique				165 (4%)	8 589 €	1 092
Vendée				1 108 (28%)	31 571 €	1 245
Charente-Maritime				1 889 (48%)	32 655 €	1 248
Gironde				447 (11%)	11 551 €	2 552
total	173	5 174 €	506	3 956	26 622 €	768

Tableau 9 : Nombre de sinistres MRH des listings et indemnisations moyennes par département et par évènement.

Les sinistres de la tempête Johanna se répartissent sur les quatre départements bretons, le plus touché étant le Morbihan, où le nombre de dossiers et le coût moyen des sinistres sont les plus élevés. Pour la tempête Xynthia, les deux départements de la Charente-Maritime et de la Vendée concentrent plus des trois quarts des sinistres pour plus de 90 % des indemnisations. Le coût moyen des sinistres dans ces deux départements est plus élevé que dans tous les autres et dépasse les 30 000 €.

À cette échelle, plus le nombre de sinistres est important dans un département, plus leur coût moyen est élevé. Cela peut être dû à plusieurs facteurs : le nombre de sinistres et leur coût sont à la fois liés à l'intensité de l'aléa (hauteurs d'inondation) et à la concentration d'enjeux dans des zones urbaines exposées à la submersion. Ces deux éléments doivent être réunis pour qu'un nombre important de sinistres survienne, et ils entrainent également des coûts de dommages élevés. Au contraire, du fait de l'éloignement du centre de la dépression et de l'exposition moins importante des enjeux, les coûts moyens de Xynthia dans les départements bretons sont plus faibles que ceux observés en Vendée et en Charente-Maritime. Dans ces départements, les coûts des dommages sont du même ordre de grandeur que ceux de la tempête Johanna. En l'absence d'informations suffisamment détaillées sur les dommages à cette échelle, les raisons précises de ces différentes seront abordées plus précisément dans la partie suivante de cette thèse.

1.3. Distribution statistique des indemnisations

L'analyse de la distribution des indemnisations montre que les coûts des sinistres ne sont pas répartis de manière uniforme. En effet, le nombre de dossiers de faible coût est beaucoup plus important que celui des dossiers de coût élevé, et ce pour les deux tempêtes, comme le montrent les histogrammes des indemnisations (Figure 73).

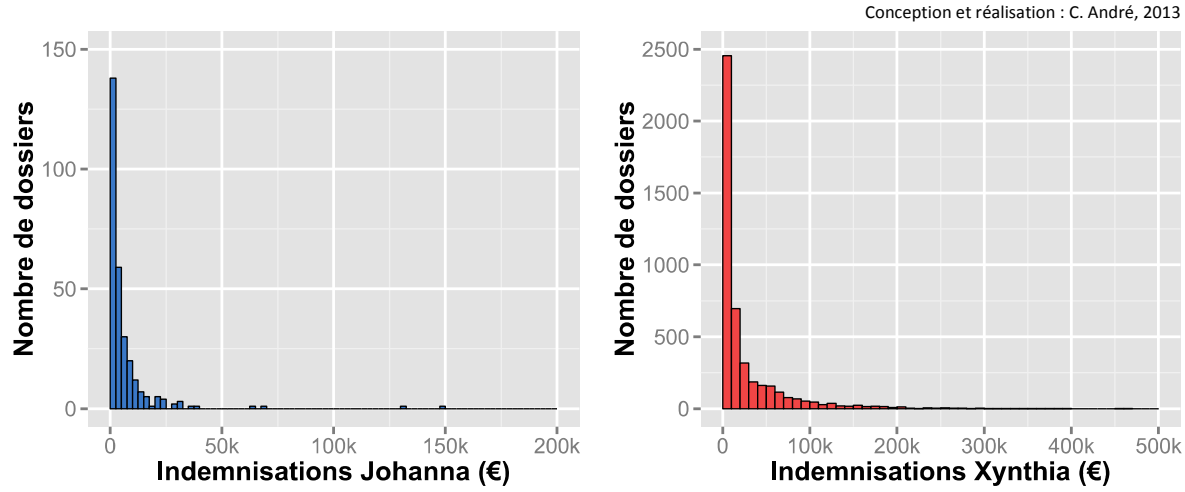


Figure 73 : Histogrammes de la distribution des indemnisations par évènement, tous types d'enjeux confondus.

Puisque nous avons montré que les coûts moyens sont différents selon les types d'enjeux impactés (Tableau 8), il est possible de faire l'hypothèse que les coûts les plus extrêmes soient portés par certains types d'enjeux, comme par exemple les entreprises. La proportion des sinistres aux habitations (dossiers MRH) étant la plus importante pour les deux tempêtes, il a été choisi de cibler la distribution de ces sinistres, qui sont ceux sur lesquels nous nous concentrons par la suite (Figure 74).

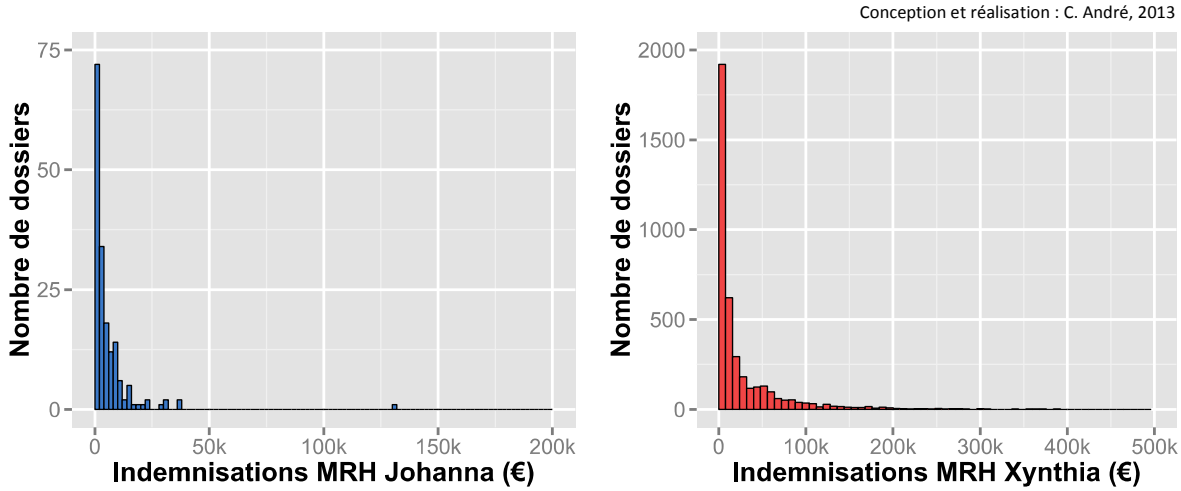


Figure 74 : Histogrammes de la distribution des indemnisations par évènement pour les dossiers MRH.

La répartition des indemnisations pour l'enjeu habitation est semblable à celle de l'ensemble des enjeux : ce n'est donc pas un type d'enjeu particulier qui explique la forme de ces distributions. En effet, même pour les biens d'habitation seuls, plus de la moitié des indemnisations de Xynthia sont portées par seulement 10 % des dossiers (la seconde moitié étant répartie sur les 90 % restants). En conséquence, la moyenne des indemnisations (7 100 € pour Johanna et 26 600 € pour Xynthia) est très éloignée du centre de l'étendue des valeurs, qui va de quelques centaines d'euros à plusieurs centaines de milliers d'euros ; la représentation des indemnisations sous forme d'histogramme avec des classes de coût d'intervalle constant est donc peu adaptée.

La forme de ces distributions, très asymétrique, évoque une distribution de type log-normale (phénomène répandu en analyse de données économiques, notamment immobilières), ce qui signifierait que le logarithme du coût des dommages serait normalement distribué. L'analyse d'une variable suivant une loi normale, permettant l'utilisation de nombreux tests d'hypothèses dits « paramétriques », est beaucoup plus simple que celle d'une variable suivant une loi non définie. On réalise donc, pour les deux tempêtes, une transformation de la variable « coût des dommages », nommée Y, en son logarithme, telle que la nouvelle variable obtenue $\mathrm{Y}' = \log(\mathrm{Y})$. Les classes des histogrammes de cette nouvelle variable, ainsi

que les axes des abscisses, ne sont donc plus à intervalle constant de coût, mais du logarithme du coût (Figure 75 et Figure 76).

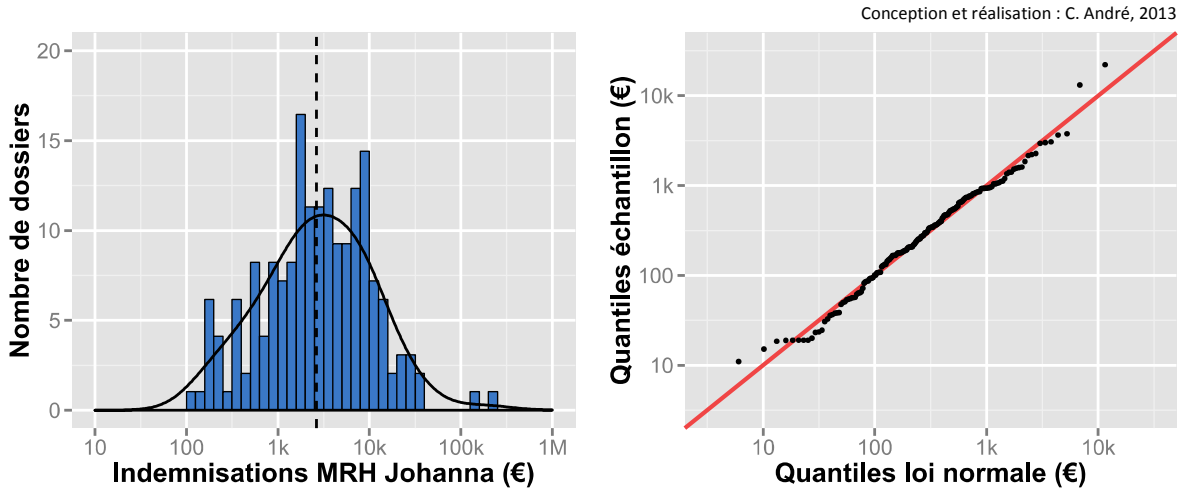


Figure 75 : Histogramme et *Q-Q plot* de la variable Y' (axes logarithmiques) pour la tempête Johanna. La courbe noire représente la fonction de densité de probabilité, et la ligne en pointillés, la moyenne de la variable Y'.

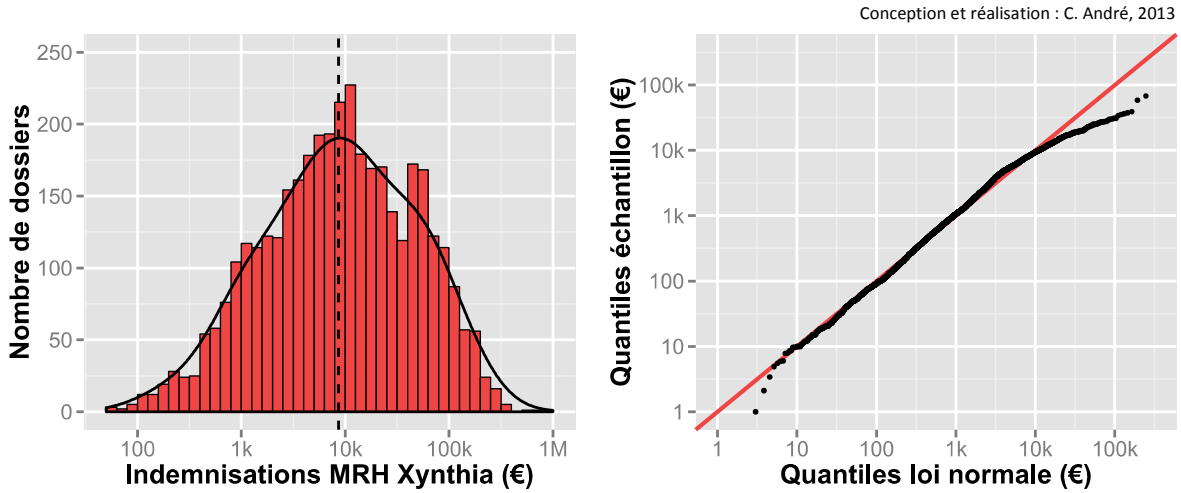


Figure 76 : Histogramme et *Q-Q plot* de la variable Y' (axes logarithmiques) pour la tempête Xynthia. La courbe noire représente la fonction de densité de probabilité, et la ligne en pointillés, la moyenne de la variable Y'.

La forme des histogrammes des variables Y' évoque bien celle d'une loi normale, pour les deux évènements, en particulier pour la tempête Xynthia, dont le nombre de dossiers est plus élevé. Le diagramme quantile-quantile (*Q-Q plot*), qui compare les valeurs des quantiles des observations des variables Y' à ceux d'une loi normale théorique, montre un bon alignement des valeurs sur la droite, confirmant la distribution normale des valeurs du logarithme des indemnisations.

Lors de la recherche d'éléments expliquant les variations des sommes indemnisées, il sera donc nécessaire de tester non seulement la corrélation des différentes variables explicatives des dommages (concernant l'aléa et les enjeux) avec la variable coût des dommages (Y),

mais également avec la variable logarithme des coûts (Y'), celle-ci possédant les propriétés de la loi normale, dont la symétrie autour de la médiane et de la moyenne ; ces deux valeurs sont donc plus représentatives de la distribution de la variable Y' que de celle de la variable Y.

1.4. Indemnisations en fonction de la source des données

Après cette première analyse de la distribution des indemnisations, et avant d'entamer la recherche d'éléments expliquant les variations du coût des dommages, il est nécessaire de vérifier que les données collectées chez les trois assureurs, AXA, MAAF et MAIF, suivent bien la même répartition, afin de confirmer que ces trois sources différentes de données n'ont pas de biais entre elles, et qu'il est possible de considérer que les variations d'indemnisations ne dépendent pas de l'assureur. La distribution des indemnisations des sinistres de submersions d'habitations pour chaque assureur est représentée, séparément pour les deux tempêtes, sous la forme de boites de dispersion (*box plots*) (Figure 77).

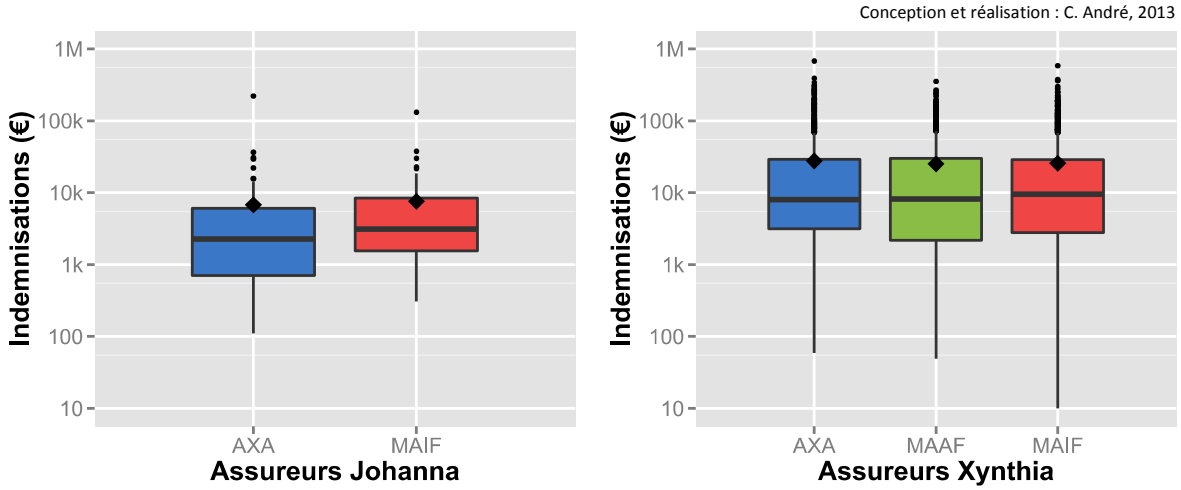


Figure 77 : Boites de dispersion de la distribution des indemnisations en fonction de l'assureur pour les deux tempêtes (axe logarithmique).

Cette comparaison des coûts de chacun des deux évènements montre des distributions des indemnisations semblables pour les différents assureurs. Il n'y a donc pas de différences significatives entre ces trois différentes sources de données sur le coût des dommages et il est possible d'analyser l'ensemble des jeux de données recueillis comme un seul et même échantillon.

1.5. Représentativité du jeu de données

Enfin, on se pose la question de la représentativité de l'échantillon collecté par rapport à l'ensemble des dommages produits par les submersions marines liées aux deux tempêtes.

Le rapport de synthèse des dommages de la tempête Xynthia, réalisé par la FFSA et le GEMA (2011) grâce à une enquête menée auprès de l'ensemble des assureurs français, permet d'estimer la représentativité du jeu de données acquis et de valider sa cohérence par rapport au marché total de l'assurance dommages pour cet évènement. Le coût total de Xynthia est estimé dans ce rapport à 2,5 Md € pour les dommages directs, dont 1,5 Md € de dommages assurés (pris en charge par les assureurs et réassureurs) pour 470 000 sinistres, ce qui représente un coût moyen de 3 150 € par sinistre.

Cependant, ces données représentent les coûts de l'ensemble des sinistres, aussi bien liés aux submersions marines que causés par le vent. Il est possible de séparer les deux grands types de dommages selon que le sinistre ait été indemnisé sous le régime CatNat ou le régime TGN, ce qui permet de préciser que, tous types d'enjeux confondus :

- Les dommages assurés imputés à la tempête (vent) s'élèvent à 735 M € pour 435 000 sinistres, soit un coût moyen de 1 700 €.
- Les dommages assurés imputés à la submersion marine représentent l'autre moitié des indemnisations (745 M €), mais pour 35 000 sinistres, soit seulement 7 % du total. Cela porte le coût moyen des sinistres de submersion à 21 300 €.

Le coût moyen d'un sinistre MRH de submersion est estimé dans le rapport cité à 23 700 € ; il est du même ordre de grandeur que le coût moyen des submersions de Xynthia estimé à partir de notre échantillon, à 26 600 € pour les dossiers MRH. La différence entre notre estimation de la valeur moyenne du coût des dommages et celle du rapport cité, provient en partie du fait que nous avons ignoré, dans les listings des trois assureurs, les dossiers de sinistres ouverts n'ayant finalement pas donné lieu à une indemnisation, pour diverses raisons possibles (valeur des dommages inférieure à la franchise, non-conformité des biens sinistrés avec le contrat, déclaration abusive de dommages, etc.). D'après le nombre de sinistres MRH liés aux submersions marines (19 000) et leur coût total (450 M €) donné par le rapport cité, l'échantillon de données des trois assureurs (de 3 956 dossiers pour 105 M €) représente entre 20 % et 25 % du total des dommages MRH de la tempête Xynthia[32] (là encore, nous ne retenons pas les dossiers pour lesquels les indemnisations sont nulles, alors que des dommages peuvent avoir été constatés pour ces derniers pour une valeur inférieure à la franchise de 380 €).

[32] Pour information, les parts du marché français des trois assureurs en assurance dommages sont évaluées à 17 % pour AXA, 16 % pour le groupe Covéa (GMF, MAAF et MMA) et 4 % pour la MAIF (comptes de 2009, Facts & Figures, 2011).

Pour la tempête Johanna, dont l'impact en termes de dommages a été bien moindre, il n'existe pas de bilan des dommages réalisé à l'échelle du marché français de l'assurance. L'ensemble des dommages assurés de la tempête, liés aussi bien au vent qu'aux submersions, pour la France, le Royaume-Uni et l'Espagne, est évalué à 250 M € par le réassureur Swiss Re (2009). En l'absence d'informations plus détaillées, l'hypothèse est faite que les données collectées chez AXA et la MAIF sont représentatives de l'évènement, dans les mêmes proportions que pour Xynthia.

Pour les deux tempêtes Johanna et Xynthia, l'enjeu constituant la part la plus importante des sinistres est l'enjeu habitation (dossiers MRH). Les coûts des dommages montrent pour les deux évènements des distributions très asymétriques, de type log-normale. Les données recueillies auprès des différents assureurs n'ont pas de biais entre elles, et peuvent donc être assimilées à un seul et même échantillon, qui représente, pour Xynthia, entre 20 % et 25 % des dommages indemnisés par l'ensemble des compagnies d'assurance françaises au titre du régime CatNat.

À la suite de cette première description statistique des données collectées, l'étape suivante consiste à rechercher quels sont les facteurs qui, à l'échelle régionale, expliquent la répartition géographique et les variations d'indemnisations entre les sinistres. Comme nous l'avons montré, les deux évènements Johanna et Xynthia ont eu une ampleur très différente à l'échelle régionale, et les jeux de données disponibles n'ont pas été collectés suivant les mêmes contraintes (cf. partie II, section 2.3) : leur analyse, qui se concentre dorénavant sur les enjeux habitation, est donc réalisée individuellement. Pour chacun des deux évènements, l'analyse est menée en deux temps : elle concerne d'abord l'influence sur les dommages observés des paramètres de l'aléa, puis des caractéristiques des enjeux.

2. Analyse des dommages de la tempête Johanna

2.1. Dommages et caractéristiques de l'aléa

Pour Johanna, tous les rapports d'expertise relatifs aux sinistres MRH de la MAIF ont été consultés. Pour chacun de ces dossiers, les types de processus physiques de l'aléa ayant causé les dommages sont répertoriés, ce qui permet leur analyse dès l'échelle régionale.

La connaissance des circonstances des sinistres à l'aide des commentaires présents dans les rapports d'expertise a d'abord permis de construire une typologie des sinistres au sein des dossiers de type MRH, constituée de trois grandes catégories : les dommages au bâtiment

principal d'habitation, les dommages aux bâtiments annexes, et les dommages aux éléments extérieurs aux bâtiments (Figure 78).

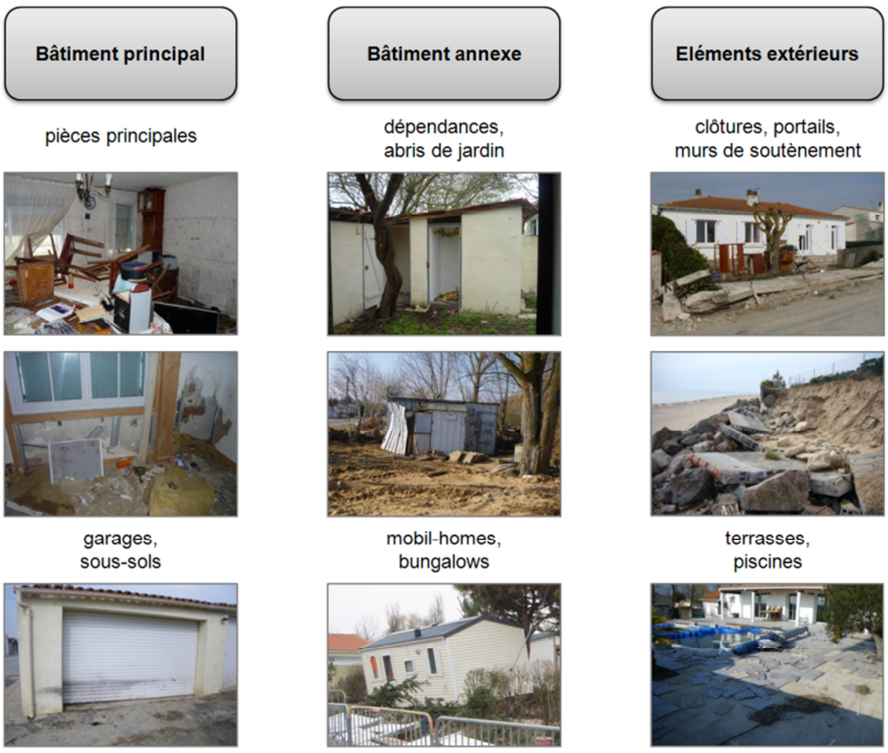


Figure 78 : Typologie des sinistres d'habitation liés à la submersion marine (photos © C. André et BRGM).

Cette typologie permet de distinguer des sinistres de types très différents, au-delà de la comparaison de leurs coûts (par exemple, une maison complètement inondée et une simple clôture arrachée par la submersion). Elle est également liée aux différents processus d'endommagement : d'après les données des dossiers d'expertise de Johanna, les cas où le bâtiment principal est touché concernent majoritairement des processus de simple submersion, alors que les bâtiments annexes et les éléments extérieurs aux bâtiments, le plus souvent situés en périphérie de parcelle (par exemple, des murs de soutènement en front de mer), sont davantage affectés par des processus de chocs mécaniques de vagues ou d'affouillement (déstabilisation des ouvrages liée à un fort courant).

Ces éléments nous permettent de réaliser une carte croisant les indicateurs synthétiques caractérisant l'aléa lors de la tempête, présentés dans la partie II (section 3.1), avec la répartition des dossiers selon les types de sinistres et de processus d'endommagement observés. Les types de sinistres et les processus d'endommagement ont été séparés en deux grandes catégories : les sinistres où le type de processus dominant est la simple submersion et les sinistres où des phénomènes de chocs des vagues ont pu entrainer des projections d'objets sur le bâti ou des affouillements. Sont également séparés les dossiers pour lesquels

le bâtiment d'habitation principal est touché, et ceux pour lesquels seuls des bâtiments annexes ou des éléments extérieurs sont touchés (Figure 79).

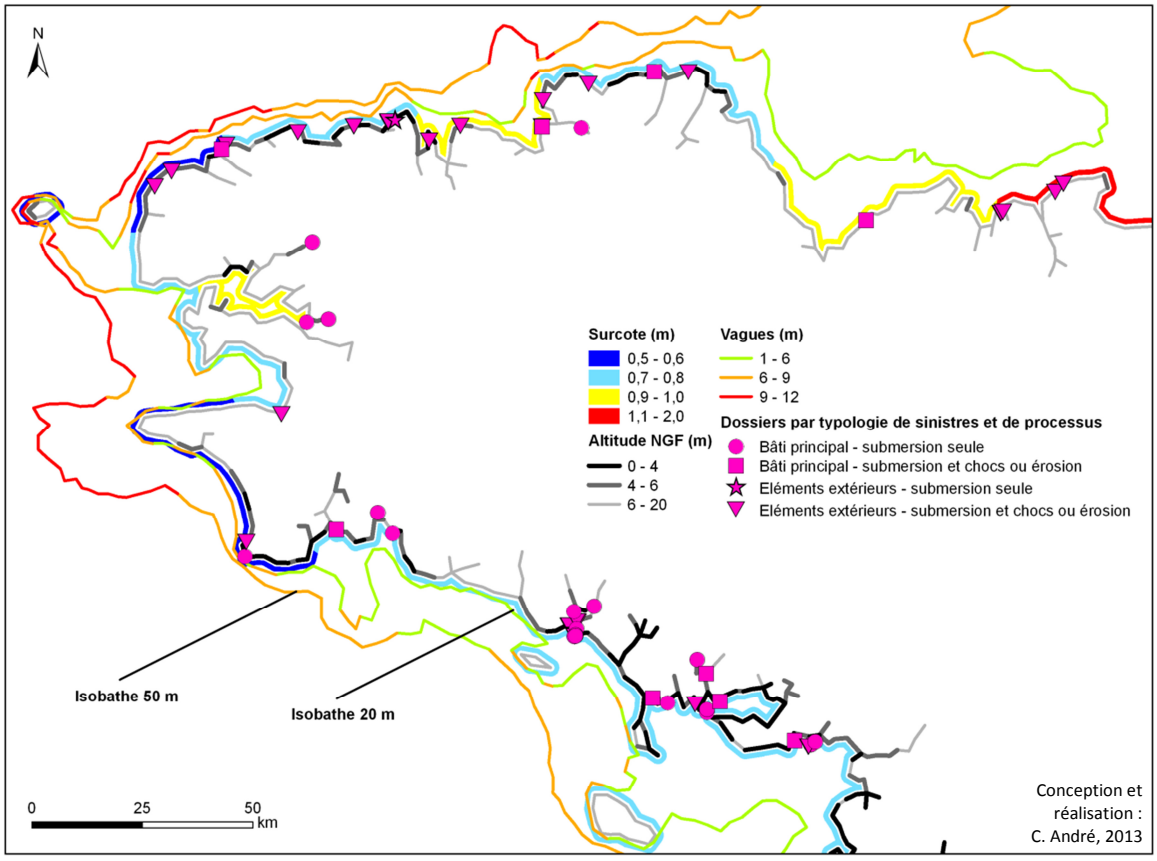


Figure 79 : Carte des indicateurs de l'aléa et de la répartition des sinistres de la tempête Johanna en Bretagne.

On constate ici que les deux principaux types de sinistres aux enjeux de type habitation sont inégalement distribués sur les côtes bretonnes : en effet, la majorité des dommages aux bâtiments d'habitation en eux-mêmes se situent sur la façade sud de la Bretagne, notamment dans le département du Morbihan, et impliquent principalement des cas de simple submersion, alors que les dommages observés dans le Finistère Nord et les Côtes-d'Armor se sont majoritairement limités à des éléments extérieurs aux bâtiments, avec d'importants phénomènes de chocs de vagues et d'érosion.

Ceci s'explique par les types de processus de l'aléa qui ont été assez différents pour les deux façades : le Morbihan et le Finistère Sud ont été atteints par des vagues modérément hautes (moins de 6 m de haut le long de l'isobathe des 20 m), tandis que le nord et l'ouest de la Bretagne ont, quant à eux, subi des vagues plus importantes (entre 9 et 12 m en Finistère Nord). Les vagues ont eu d'autant plus d'impact dans le Finistère Nord que les pentes sous-marines sont importantes dans ce secteur, limitant l'atténuation des vagues à leur arrivée à la côte.

La surcote atmosphérique, relativement faible dans le Finistère (excepté en rade de Brest), a été beaucoup plus importante dans le Morbihan, les Côtes-d'Armor et la baie du Mont-Saint-Michel. La topographie des côtes a manifestement joué un rôle important sur la répartition des dommages ; c'est là où elle est la plus basse que les dommages sont les plus nombreux : notamment autour du golfe du Morbihan et de la rade de Lorient. Ce point est également confirmé par la répétition d'évènements de submersions dans le département du Morbihan (Géos-AEL, 2011). C'est également dans ces zones basses (ainsi qu'au fond des estuaires) que se situe la plupart des sinistres affectant les bâtiments principaux eux-mêmes : il faut souligner que de nombreux quartiers urbanisés se trouvent dans ces zones basses submersibles. Au contraire, les dommages de la façade rocheuse du nord concernent essentiellement des murs de soutènement construits en front de mer, fortement impactés par les hautes vagues, sans que le reste des propriétés ne soit forcément inondé.

La Figure 80 représente la répartition des sinistres MRH de la tempête Johanna en fonction de leur distance au trait de côte et de leur altitude NGF, classés par processus d'endommagement, puis par département.

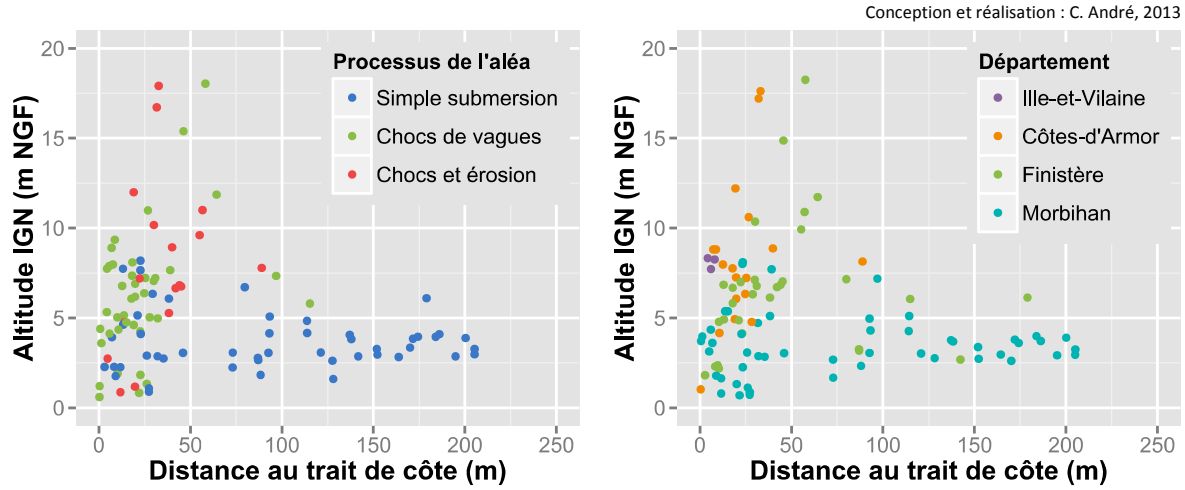


Figure 80 : Graphiques des sinistres de Johanna représentés en fonction de leur distance au trait de côte et de l'altitude[33]. Les couleurs indiquent les différents processus de l'aléa et le département de survenance.

Les sinistres impliquant une simple submersion se trouvent aux altitudes les plus faibles, parfois en retrait de plusieurs centaines de mètres par rapport au trait de côte, tandis que les dossiers concernant des dommages dus à des chocs de vagues ou des phénomènes

[33] Distance au trait de côte calculée à partir du produit Histolitt®, altitude à partir de la BD ALTI® de l'IGN. Les estimations des altitudes présentent une incertitude, même pour les sinistres géocodés à l'adresse : un sinistre localisé à une altitude de 15 m n'indique pas que les vagues ont atteint ce niveau, mais que le terrain comporte des dénivelés importants : des dommages peuvent être constatés sur un mur de soutènement au pied d'une petite falaise, alors que l'habitation (point géolocalisé) se trouvant au sommet de celle-ci, n'a pas été atteinte.

d'érosion, se situent pour la plupart dans une bande proche du trait de côte, à des altitudes plus fortes. En accord avec la Figure 79, la localisation des sinistres dans les différents départements touchés semble confirmer l'influence des disparités morphologiques des littoraux de ces derniers et des variations de processus de l'aléa lors de la tempête Johanna, et donc les différents types de dommages.

Enfin, le Tableau 10 indique que les deux grandes catégories de sinistres MRH (d'un côté, les bâtiments principaux majoritairement affectés par une simple submersion, et de l'autre, les éléments extérieurs principalement endommagés par les chocs de vagues) sont à peu près autant représentées pour la tempête Johanna.

	Nb dossiers Johanna	Indemnité totale	Indemnité moyenne	Erreur type
Bâti principal	45 (53%)	274 493	6 100	823
Extérieur	40 (47%)	341 388	8 535	3 375
total	85	615 881	7 246	1 641

Tableau 10 : Indemnisations en fonction du type de sinistre pour Johanna.

Les coûts moyens des dommages touchant les éléments extérieurs sont, par contre, supérieurs à ceux affectant les bâtiments principaux, alors que ces derniers incluent des dommages au mobilier, ce qui n'est pas le cas des premiers. Les fortes vagues observées lors de la tempête Johanna sont donc la cause d'une part très importante des dommages (plus de la moitié des coûts), par le biais de chocs mécaniques sur les éléments extérieurs au bâti (Figure 81).

Figure 81 : Photos de dommages à des murs en front de mer, caractéristiques de la tempête Johanna, à Locquirec (gauche) et Larmor-Plage (droite) (photos © Le Télégramme et François Trinel).

2.2. Dommages et caractéristiques des enjeux

La répartition dans l'espace des dommages est évidemment due aux paramètres de l'aléa, mais également aux caractéristiques de l'implantation humaine sur les territoires exposés. La distribution et les caractéristiques des enjeux, c'est-à-dire les biens bâtis dans les zones exposées à l'aléa, est donc un paramètre primordial pour comprendre et expliquer les dommages aux habitations et leurs coûts.

Différentes informations sur les enjeux, comme par exemple la taille des habitations (nombre de pièces, surface habitable), la présence d'étage et de sous-sol, peuvent expliquer les dommages et les variations d'indemnisations octroyées aux sinistrés. Comme indiqué précédemment, les rapports d'expertise de l'ensemble des dossiers MAIF sont disponibles pour la tempête Johanna ; cependant, si ces derniers contiennent des informations précieuses quant aux circonstances de l'évènement, les informations concernant des descriptions des habitations endommagées sont la plupart du temps sommaires, voire inexistantes.

Ces informations peuvent souvent être obtenues par ailleurs, à partir, par exemple, des données publiques de recensement de la population de l'INSEE[34]. Cependant, ces données sont en général synthétisées et diffusées à une résolution communale. Pour travailler avec ces données, il faut donc avoir un nombre minimum de dossiers par commune. Pour Johanna, le faible nombre de sinistres recensés par commune ne permet donc pas de réaliser, à l'échelle régionale, une analyse spatiale des dommages en fonction de différentes caractéristiques des enjeux affectés. La commune de Gâvres dans le Morbihan, la plus touchée lors de la tempête Johanna, est l'exception à ce constat, et fera l'objet de l'étude des dommages à l'échelle locale.

[34] http://www.insee.fr/fr/bases-de-donnees/default.asp?page=recensements.htm

Pour la tempête Johanna, on démontre dès l'échelle régionale une relation nette entre les types de sinistres, les différents processus de l'aléa sur différents types de côtes, et le coût des dommages. Au vu de la faible densité des dossiers disponibles, dispersés sur tout le pourtour de la Bretagne, il n'est pas possible de relier, à cette échelle, les caractéristiques des dommages au bâti avec celles des enjeux endommagés à l'aide de données externes comme celles de l'INSEE, le plus souvent de résolution communale.

Cependant, on tire des données d'assurance des informations intéressantes pour la compréhension de la vulnérabilité de la région à ce type d'évènement : alors que dans le Morbihan et le Finistère Sud, les sinistres sur des bâtiments d'habitation sont dus principalement à la surcote et à la topographie des côtes relativement basse, dans le Finistère Nord et les Côtes-d'Armor, les dommages concernent principalement des murs de soutènement situés en front de mer, affectés par des chocs de vagues et des phénomènes locaux d'érosion. De manière inattendue, c'est ce deuxième type de sinistres, pour les enjeux de type MRH, qui a coûté le plus cher pour l'ensemble de l'évènement Johanna.

Cela montre que, dans les conditions de la tempête Johanna, où la surcote, conjuguée à une forte marée de vive-eau, a été importante, le nombre d'enjeux d'habitation exposés à la submersion sur la façade nord de la Bretagne n'a pas été si élevé. Au contraire, sur la façade sud, la situation est préoccupante pour de nombreuses communes du Morbihan.

3. Analyse des dommages de la tempête Xynthia

3.1. Dommages et caractéristiques de l'aléa

L'analyse des aléas pour la tempête Xynthia montre que la surcote (incluant ici la surcote atmosphérique et la surcote liée aux vagues) a été bien plus forte que pour Johanna, du fait de la dépression plus importante et de l'orientation des vents vers la côte (Figure 82). La surcote totale dépasse le mètre sur les côtes des îles de Ré et d'Oléron, atteint 1,8 m dans une bonne partie des Pertuis Charentais, et atteint son maximum de plus de 2 m dans la baie de l'Aiguillon, où l'eau s'est accumulée sans pouvoir s'échapper pendant la durée de la tempête, du fait de la forme de cette anse de très faible profondeur (cf. partie I, section 5.1).

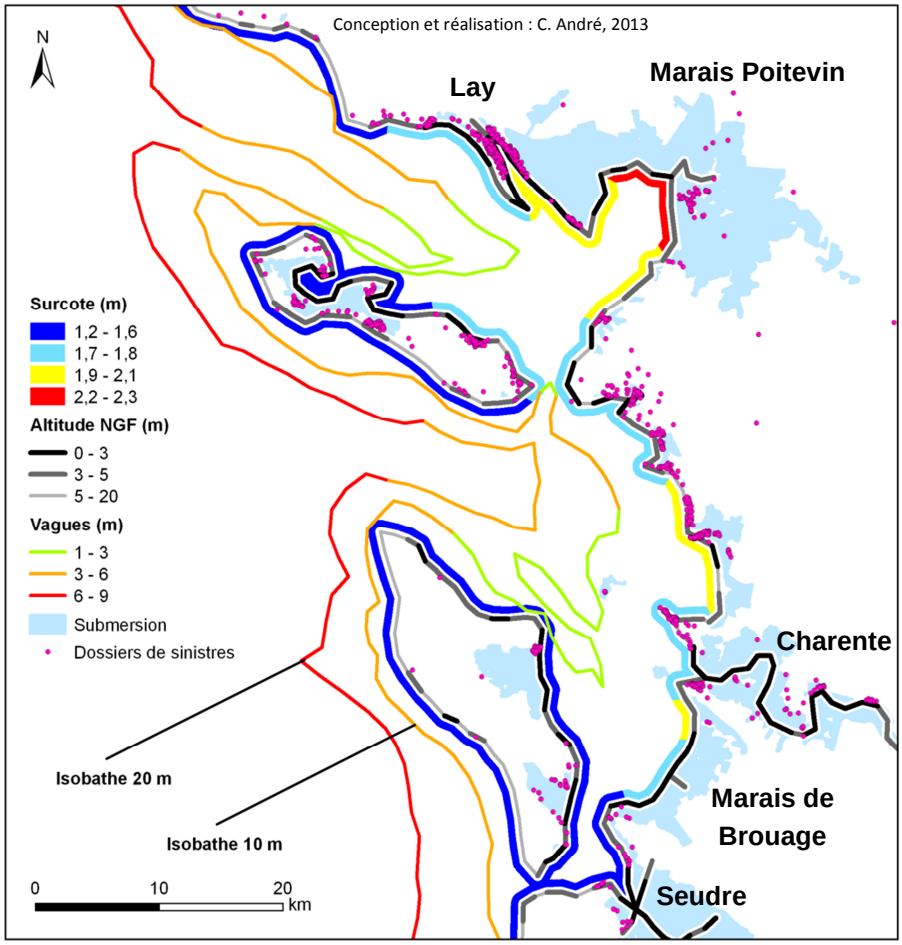


Figure 82 : Carte des indicateurs de l'aléa, des zones submergées (Sogreah, 2011 ; Devaux et al., 2012) et de la répartition des sinistres de la tempête Xynthia en Vendée et en Charente-Maritime[35].

Les étendues inondées lors de Xynthia, mises en évidence en bleu sur la Figure 82, sont ainsi beaucoup plus importantes que celles de la tempête Johanna, de par la présence de zones basses étendues dans le fond des Pertuis (polders du marais poitevin et du marais de Brouage). Au niveau des estuaires du Lay, de la Charente et de la Seudre, des inondations ont également eu lieu par la remontée d'eaux marines dans les cours d'eau, empêchant l'écoulement des eaux fluviales. Des quartiers urbanisés de certaines communes littorales (dont la Faute et l'Aiguillon-sur-Mer, mais également Charron, Aytré, Yves, etc.) ont été entièrement inondés ; l'ensemble de ces phénomènes entraine une densité de sinistres beaucoup plus élevée que lors de Johanna.

Au contraire, les vagues de la tempête Xynthia sont moins importantes que celles observées lors de la tempête Johanna. Les Pertuis étant relativement protégés des houles, c'est sur les

[35] Certains sinistres sont localisés en dehors des zones inondées, soit à cause du manque de précision du géocodage, soit à cause de phénomènes isolés, par exemple de ruissèlement, indemnisés sous le régime CatNat mais non liés à une submersion marine. Sur l'ensemble des dossiers recensés, ces phénomènes restent très marginaux.

façades ouest et sud-ouest des îles de Ré et d'Oléron que les vagues ont causé le plus de dommages, entrainant une importante érosion des dunes, avec des reculs du trait de côte allant jusqu'à plus de 10 m (Pedreros et al., 2010). Le front de mer sur ces zones est heureusement le plus souvent naturel, composé de grands massifs dunaires peu urbanisés.

Le graphique des sinistres MRH de la tempête Xynthia issus des listings, représentés en fonction de leur distance au trait de côte et de leur altitude (Figure 83), en comparaison de celui de Johanna (Figure 80, page 138), montre que les dommages ont eu lieu en grande majorité dans des zones très basses (en dessous de 5 m d'altitude), et qu'ils peuvent s'étendre beaucoup plus loin dans les terres (au-delà de 2 km).

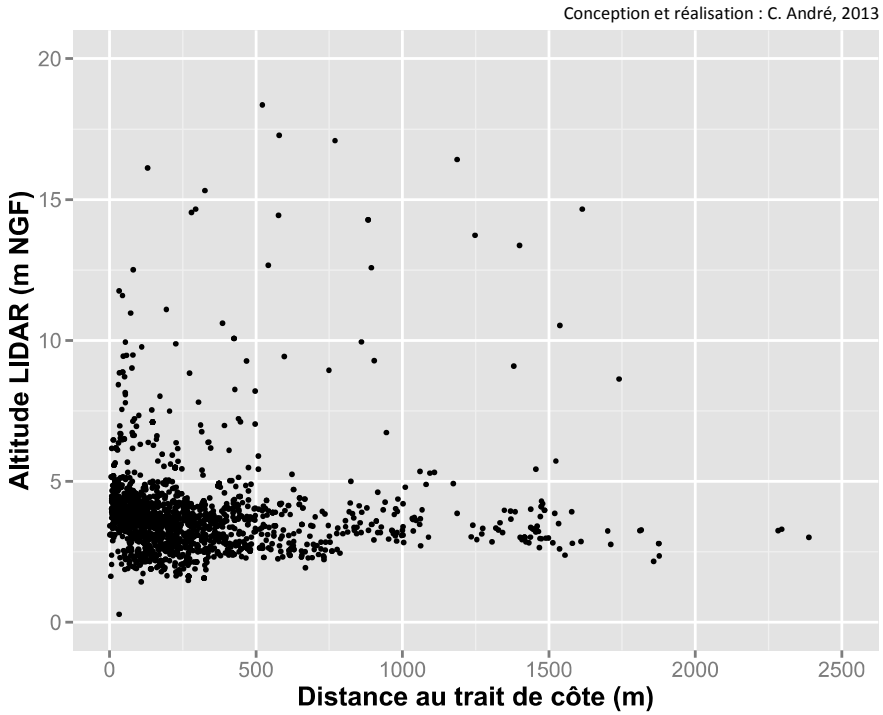


Figure 83 : Graphique des sinistres de Xynthia représentés en fonction de leur distance au trait de côte et de l'altitude (données LIDAR DREAL Poitou-Charentes).

Le lien entre la répartition spatiale des dossiers, les types de sinistres et les processus de l'aléa n'a pas pu être fait pour Xynthia à l'échelle régionale : l'ensemble des dossiers d'expertises n'ayant pu être consulté, les processus de l'aléa ne sont connus que pour une sélection de sinistres de quelques communes (cf. partie II, section 2.3). On peut cependant conclure que pour Xynthia, ce sont les hauteurs très importantes de surcote, sur un littoral très bas et fortement urbanisé, en dépit de son caractère inondable, qui ont engendré la plupart des sinistres, plus que l'impact des vagues.

Il est difficile de réaliser, à cette échelle, une analyse du coût des dommages avec les caractéristiques de l'aléa, sans plus de détail sur les processus d'endommagement

impliqués. C'est donc lors de l'analyse à l'échelle locale des sites sélectionnés que nous étudierons les coûts en fonction de différentes situations d'exposition à l'aléa.

3.2. Dommages et caractéristiques des enjeux

Pour la tempête Xynthia, le grand nombre de dossiers concentrés en Vendée et en Charente-Maritime permet, contrairement à Johanna, une analyse de la répartition dans l'espace des sinistres, et du lien que montre cette dernière avec la répartition des enjeux.

La Figure 84 représente la densité des sinistres MRH de Xynthia et celle des logements dans les communes affectées, d'après les données de recensement de la population de l'INSEE.

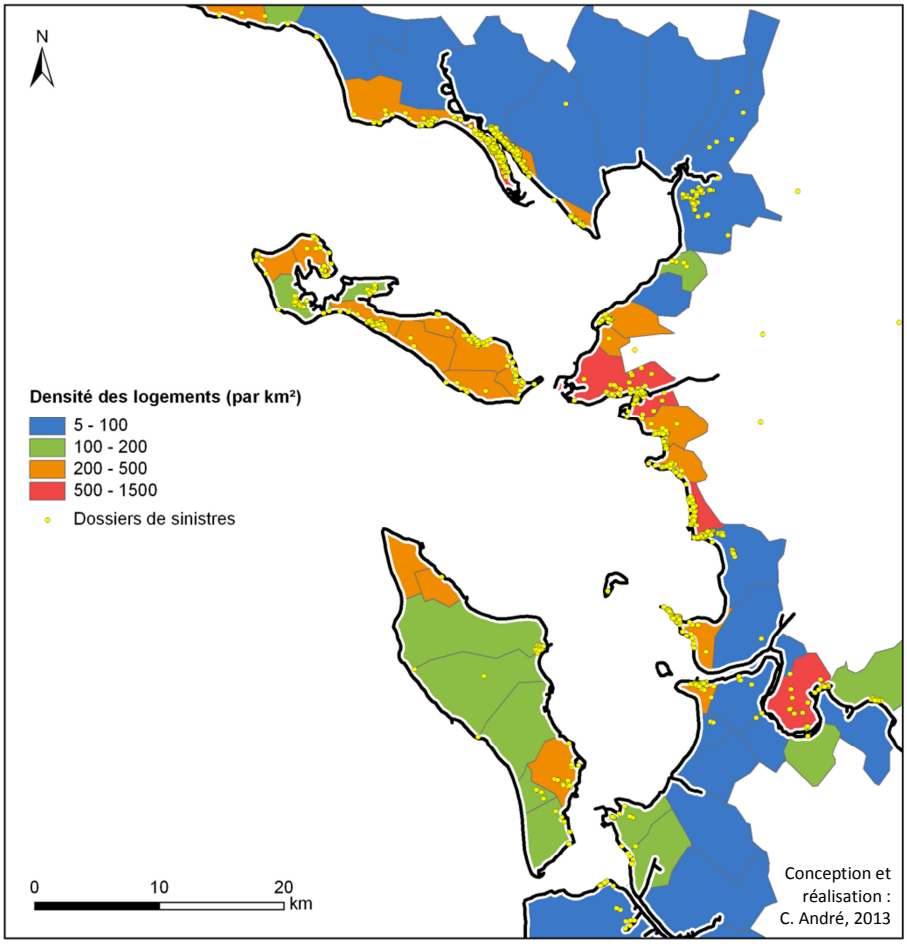


Figure 84 : Carte de la densité des logements (données INSEE recensement 2009) en lien avec la répartition des sinistres de Xynthia.

Même indépendamment des variations de l'intensité de l'aléa au sein de la région étudiée, les sinistres sont plus nombreux dans les communes ayant une densité de logements plus élevée : ce sont les communes de la Tranche, la Faute et l'Aiguillon-sur-Mer en Vendée, la

plupart des communes littorales entre La Rochelle et Rochefort et la plupart des communes de l'île de Ré.

Cependant, les communes sont de taille variable et les logements sont le plus souvent répartis de façon hétérogène sur l'ensemble d'un territoire communal. Le constat de lien entre la répartition des sinistres et des enjeux est donc encore plus précis avec les données de résolution infracommunale de l'INSEE (Figure 85), de densité de la population sous forme carroyée (nombre d'habitants par carrés de 1 km de côté[36]).

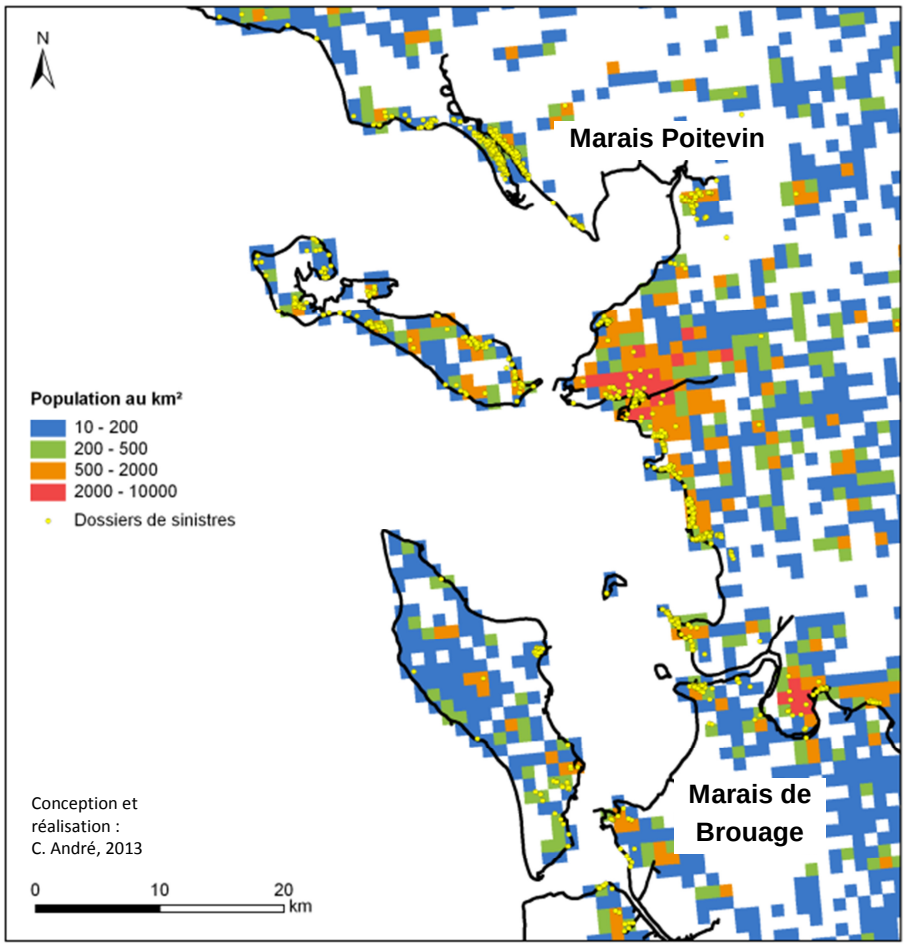


Figure 85 : Carte de la densité de la population (données INSEE carroyées 2010) en lien avec la répartition des sinistres de Xynthia.

Là encore, les zones fortement peuplées montrent une plus forte concentration de dommages (Figure 85). Cela permet d'expliquer pourquoi on trouve très peu de sinistres d'habitations dans la majeure partie du marais Poitevin et dans le marais de Brouage, qui ont été complètement inondés, mais qui concentrent essentiellement des enjeux agricoles.

[36] http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=0&ref_id=donnees-carroyees&page=donnees-detaillees/donnees-carroyees/donnees-carroyees-km.htm

D'un autre côté, l'île d'Oléron a une population répartie sur l'ensemble de son territoire, mais la topographie plus élevée de sa façade ouest a permis d'éviter qu'il y ait de grandes submersions, à l'exception notable du hameau de Boyardville, sur la façade est de l'île. Enfin, les agglomérations de La Rochelle et de Rochefort ont été partiellement inondées, mais une grande partie de leur superficie, développée historiquement sur des points hauts, s'est heureusement trouvée hors d'eau. C'est donc dans les villes de taille moyenne de bord de mer, développées par l'attrait pour le littoral depuis les années 1950, et sur les polders, que l'on trouve le plus de dommages.

Une limite des données de recensements de l'INSEE concerne la question de la population saisonnière, problème qui se pose en particulier sur les communes littorales. En effet, si le nombre de résidences principales et secondaires est comptabilisé pour chaque commune, les données détaillées sur les logements et sur la population ne concernent que les résidents principaux. La Figure 86 présente le taux de résidences secondaires des communes littorales de Vendée et de Charente-Maritime.

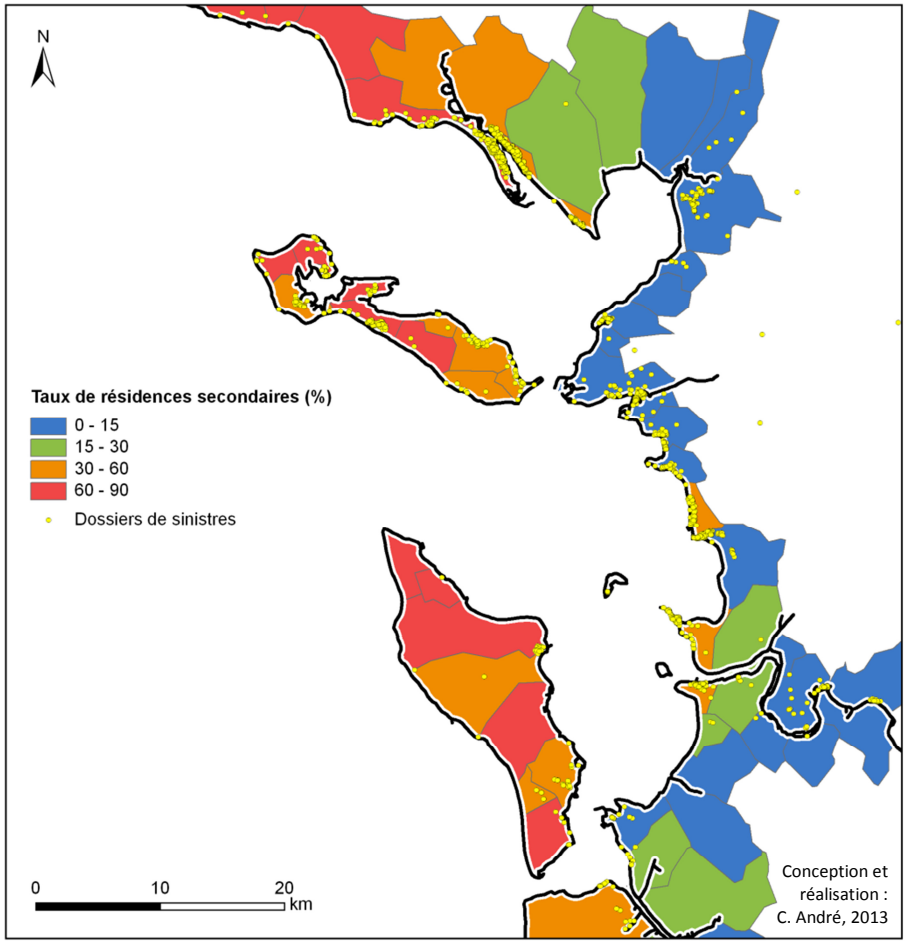


Figure 86 : Carte du taux des résidences secondaires (données INSEE recensement 2009) en lien avec la répartition des sinistres de Xynthia.

Les communes balnéaires sinistrées lors de Xynthia ont une forte proportion de résidences secondaires, et de manière générale, de structures d'accueil destinées à la population saisonnière. Elles comportent donc bien plus d'enjeux bâtis que ce qui peut être évalué à partir de la population de résidents principaux. C'est le cas des communes littorales du sud de la Vendée, et en Charente-Maritime, de l'ensemble des communes de l'île de Ré et d'Oléron. Sur le continent, les communes de Charente-Maritime ayant un taux élevé de résidences secondaires sont Châtelaillon-Plage, Fouras et Port-des-Barques. Les communes faisant partie des agglomérations de La Rochelle et de Rochefort sont nettement moins touchées par ce phénomène, abritant une grande majorité de résidents principaux (Figure 86). On a donc ici différents types d'occupation des logements sur les communes affectées par les submersions, dont il faut tenir compte dans toutes les analyses de données détaillées des recensements de l'INSEE sur les caractéristiques de la population ou des logements.

Les indemnisations des sinistres MRH de Xynthia, même s'ils concernent davantage des maisons inondées que des dommages sur les éléments extérieurs aux bâtiments observés lors de Johanna, sont très dispersées : elles s'étendent de quelques milliers à quelques centaines de milliers d'euros (Figure 76, page 132). Les variations de coût des dommages sont évidemment dues aux variations d'intensité de l'aléa, dont la hauteur d'inondation des maisons. Cependant, il apparait dès maintenant que l'aléa n'explique pas à lui seul les indemnisations observées, et que les caractéristiques des enjeux, c'est-à-dire les biens bâtis endommagés, expriment aussi bien leur vulnérabilité à la submersion que leur « valeur » totale, et jouent un rôle important dans l'explication des coûts des dommages.

En particulier, la « valeur » d'une habitation définit le coût théorique maximal des dommages, dans le cas où le bien est totalement détruit. On peut donc relier la valeur des biens exposés à un « potentiel de dommage » maximal. La connaissance de cette valeur pour chaque dossier de sinistre, permettrait de pondérer les indemnisations observées pour exprimer ces derniers en « taux d'endommagement », qui peut être plus facilement corrélé à l'intensité de l'aléa et aux caractéristiques de vulnérabilité physique des biens, que la valeur absolue des dommages.

La valeur immobilière des habitations est accessible, par exemple via des données notariales comme celles de la base de données PERVAL[37]. Cependant, cette valeur est liée à de nombreux paramètres tels que la taille du terrain, la situation géographique (comme la proximité à la mer ou au centre-ville le plus proche), ou encore le rapport entre l'offre et la demande sur le marché de l'immobilier local. Les indemnisations d'assurance étant basées

[37] http://www.immoprix.com

sur les coûts de réparation ou de remplacement des éléments immobiliers et mobiliers endommagés après un sinistre, la valeur immobilière ne peut donc pas être prise en référence pour la pondération des coûts des dommages.

Pour le calcul d'un taux d'endommagement des biens, ce sont les prix de réparation totale (ou de construction) des habitations et de leur contenu qu'il faudrait utiliser. L'Enquête sur le Prix des Terrains à Bâtir (EPTB[38]) du Service Observation et Statistiques (SOeS) du Ministère de l'Environnement, dont les données sont recueillies chaque année auprès de tous les particuliers achetant un terrain et y faisant construire une maison, donne des coûts de construction moyens des maisons neuves à une résolution régionale. Cette donnée, trop peu détaillée pour affecter un coût de construction individuel à chaque habitation, ne permet donc pas non plus pondérer les indemnisations.

D'autre part, les assureurs définissent, en fonction de certains critères, la valeur des biens qu'ils assurent, afin de déterminer le montant des primes d'assurance. Cette valeur peut être qualifiée de « valeur assurée » des habitations. Cette donnée, issue des bases de données « contrats » des assureurs, dissociées des bases de données « sinistres », n'a pas pu être obtenue pour notre étude.

La donnée de capital mobilier assuré, disponible pour environ 1 300 dossiers MRH d'AXA, correspond au plafond d'indemnisation des dommages mobiliers ; elle représente donc bien, à condition d'être correctement évaluée, le potentiel de dommages mobiliers. En pratique, cette valeur se corrèle mal aux indemnisations des sinistres, du fait qu'elles regroupent le coût des éléments mobiliers et immobiliers. Cette donnée pourra être analysée plus en détail à l'échelle locale, à laquelle la part des dommages immobiliers et mobiliers est connue. Il faudrait cependant idéalement connaitre également la valeur assurée de l'immobilier pour pouvoir expliquer le coût des dommages à partir de ce paramètre.

Pour la tempête Xynthia, un certain nombre d'informations sur les caractéristiques des enjeux sont néanmoins disponibles dans les listings (données de niveau 1), pour certains assureurs : on trouve par exemple le type de logement (individuel ou collectif) le nombre de pièces principales et la surface habitable, ainsi que le type d'occupation des logements. C'est donc à partir de ces informations que nous pouvons tenter de déterminer des indicateurs de la valeur assurée de l'immobilier des habitations endommagées. Dans un premier temps, est analysée sur la Figure 87, la distribution des indemnisations en séparant les logements

[38] http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/r/enquete-prix-terrains-batir-eptb.html

individuels et les logements collectifs (information disponible pour environ 1 000 dossiers MRH de la MAAF).

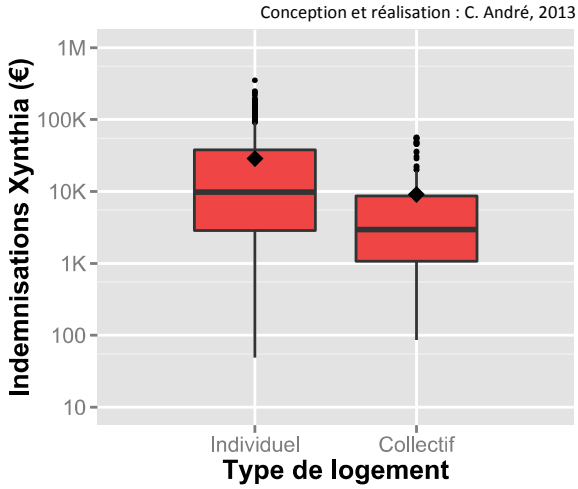


Figure 87 : Graphique des indemnisations des listings exprimées en fonction du type de logement (axe logarithmique).

Sans surprise, le coût moyen des dommages est beaucoup plus élevé pour les maisons individuelles (env. 28 800 €) que pour les appartements (env. 9 100 €), qui, quand ils sont situés à l'étage, n'ont de dommages à déplorer que dans les caves situées en rez-de-chaussée ou en sous-sol. Il est à noter que les logements collectifs représentent seulement 13 % du total des sinistres pour lesquels le type de logement est renseigné. Le nombre de logements collectifs dans les zones exposées à l'aléa lors de la tempête Xynthia est donc faible : la grande majorité des habitations inondées étaient des maisons individuelles.

Dans un deuxième temps, est réalisée une analyse des indemnisations en fonction du nombre de pièces principales des biens endommagés (disponible pour environ 2 500 dossiers MRH d'AXA et de la MAAF) et de la surface habitable des habitations (disponible par classes dans le listing de la MAAF, pour environ 850 dossiers MRH) (Figure 88 et Figure 89).

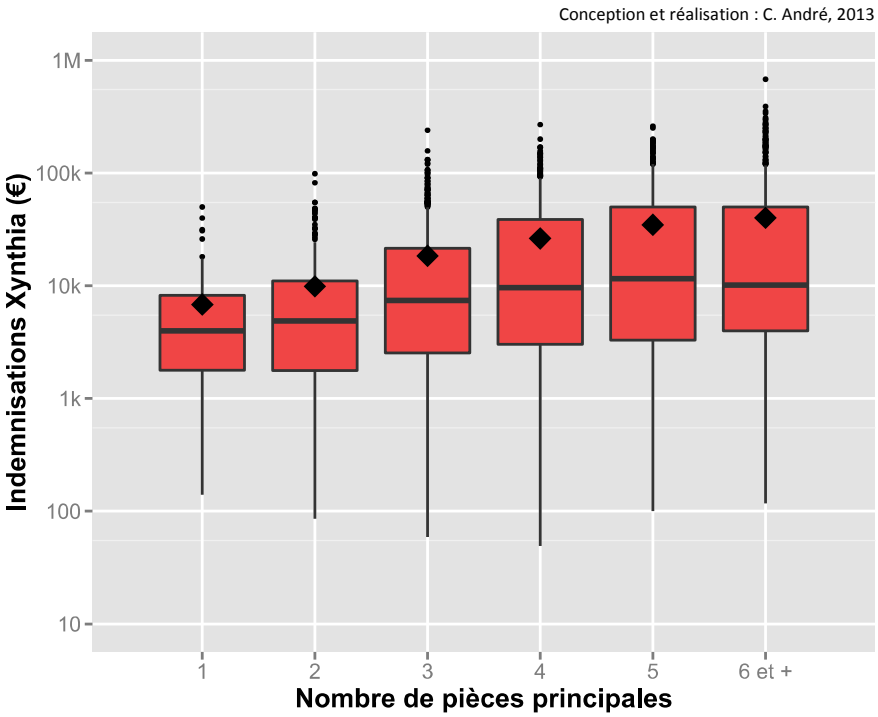


Figure 88 : Graphique des indemnisations des listings exprimées en fonction du nombre de pièces principales des logements sinistrés (axe logarithmique).

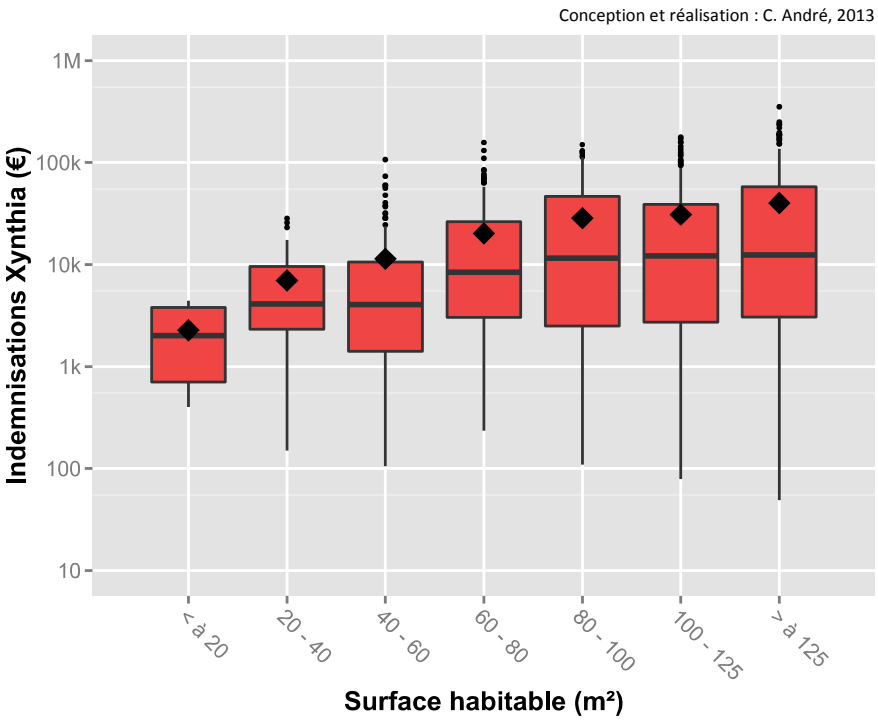


Figure 89 : Graphique des indemnisations des listings exprimées en fonction de classes de surface habitable des logements sinistrés (axe logarithmique).

Le coût des dommages des sinistres augmente aussi bien en fonction du nombre de pièces principales que de la surface habitable de l'habitation touchée, bien que la dispersion des indemnisations soit importante. En effet, ces deux variables n'expliquent évidemment pas à elles seules les montants indemnisés.

Ce phénomène provient de plusieurs facteurs, notamment du fait que c'est la surface totale du logement, répartie sur les différents niveaux du logement pour les habitations à étages, qui est indiquée dans les listings, alors que la surface qui a réellement été exposée à la submersion lors de Xynthia est uniquement la surface du rez-de-chaussée des habitations. Il serait donc nécessaire, pour obtenir un meilleur indicateur de la valeur exposée des biens, de rapporter le coût des dommages la « surface exposée » à la submersion plutôt qu'à la surface totale. Quoi qu'il en soit, ces deux variables semblent être une bonne piste pour l'explication des dommages à l'échelle locale, conjointement avec les paramètres de l'aléa.

Une dernière variable, disponible dans les listings (pour environ 3 700 dossiers), est le « type d'occupation » des biens sinistrés, suivant que le logement soit une résidence principale ou secondaire (Figure 90). Dans notre échantillon de sinistres de Xynthia, les résidences secondaires représentent un taux élevé de 45 % des sinistres.

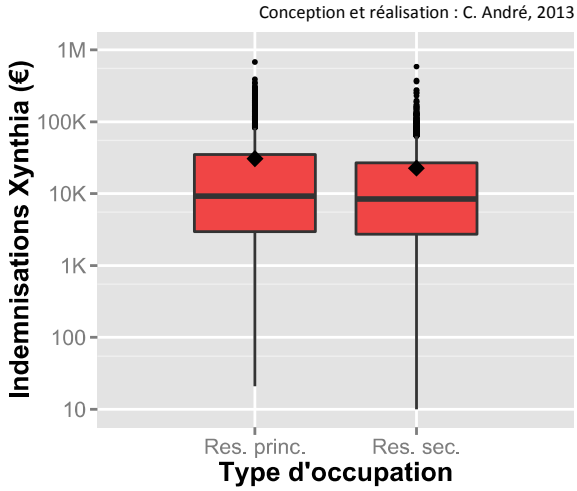


Figure 90 : Graphique des indemnisations des listings exprimées en fonction du type d'occupation des logements sinistrés (axe logarithmique).

En effet, les logements secondaires, qui sont en général moins grands et moins meublés que les logements principaux, ont un coût de dommages moyen (env. 22 600 €) inférieur à celui des résidences principales (env. 30 700 €). La variable type d'occupation est donc également une information qui sera étudiée plus en détail dans la prochaine partie de cette thèse.

Le constat de l'intérêt des variables citées concernant la taille et les caractéristiques des enjeux se heurte, de manière générale, au nombre limité de dossiers des listings pour lesquels ces informations sont disponibles. De plus, d'autres caractéristiques, comme le nombre d'étages des habitations, seraient nécessaires pour une meilleure explication de l'endommagement.

Des informations sur la surface habitable, le nombre de pièces principales, le nombre d'étages des logements, ainsi que sur l'âge et le confort des bâtiments, sur le mode d'occupation et sur les revenus des occupants, sont disponibles dans les bases de données des « fichiers fonciers » (MAJIC II[39]) ou du FIchier des LOgements à la COMmune (FILOCOM[40]), renseignées par la Direction Générale des Finances Publiques (DGFiP) du Ministère de l'Économie et des Finances, à partir des déclarations d'impôts des particuliers. Cependant, ces bases de données ne sont, à ce jour, accessibles que pour les études menées par les services de l'État et les collectivités territoriales.

L'explication des indemnisations en fonction des caractéristiques des enjeux à l'échelle régionale est donc limitée, du fait du manque de données détaillées, et surtout de l'absence d'informations, à cette échelle, sur l'intensité de l'aléa ayant entraîné ces dommages. Ce sont toutefois des pistes intéressantes qui seront reprises pour l'analyse des coûts à l'échelle locale, où les rapports d'expertise contiennent des informations beaucoup plus détaillées.

3.3. Synthèse des dommages de Xynthia a une résolution communale

Le nombre important de sinistres de Xynthia permet, à l'échelle régionale, au-delà de l'analyse individuelle des caractéristiques des sinistres présentes dans les listings d'assurance, la réalisation d'une analyse spatiale du nombre de dossiers et du coût des dommages, agrégés à une résolution communale. On peut dans un premier temps réaliser une carte de « l'intensité des dommages » par commune affectée par la submersion lors de Xynthia, en calculant le rapport du nombre de sinistres de notre échantillon de données de niveau 1 (des trois assureurs) par le nombre de logements des communes littorales (Figure 91).

[39] http://www.observation-urbaine.certu.equipement.gouv.fr/fichiers-les-fonciers-standards-a382.html
[40] http://www.observation-urbaine.certu.equipement.gouv.fr/article.php3?id_article=241

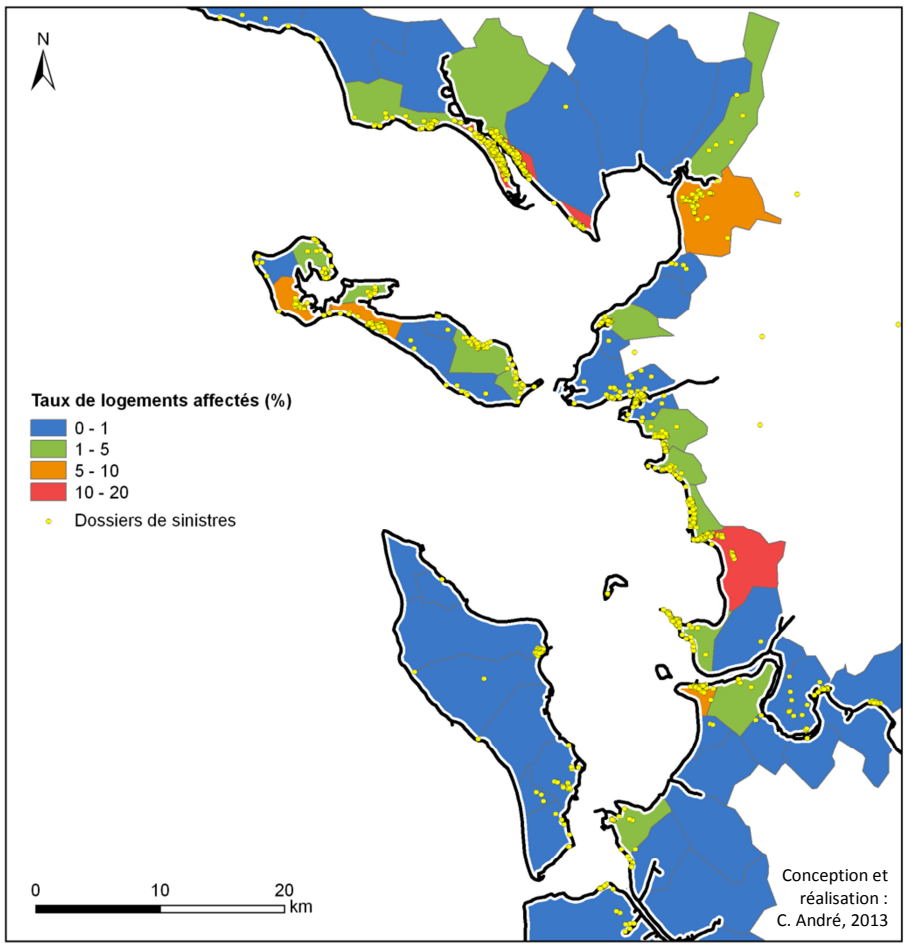


Figure 91 : Carte de l'intensité des dommages (taux de logements affectés) dans les communes affectées par Xynthia (à partir de l'échantillon de données de niveau 1 des trois assureurs et des données INSEE du recensement 2009).

Les communes les plus touchées par l'évènement, d'après ce critère, sont la Faute et l'Aiguillon-sur-Mer, Yves, Charron, Ars-en-Ré, la Couarde-sur-Mer et Port-des-Barques. Ce sont également, de manière générale, des communes qui ont subi des submersions par des hauteurs d'eau importantes, l'eau atteignant parfois 1,5 à 2 m dans les habitations.

L'analyse de la distribution des indemnisations dans ces communes est réalisée à l'aide de la Figure 92.

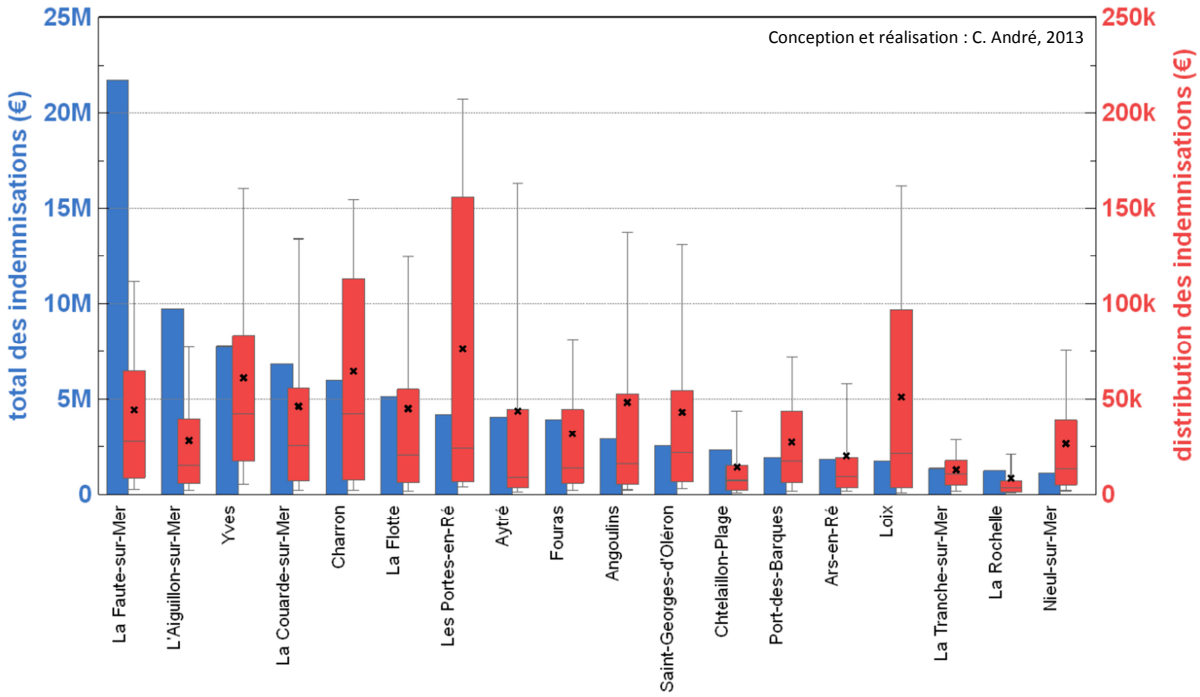


Figure 92 : Graphique du total et de la distribution des indemnisations pour les communes les plus touchées par Xynthia (à partir de l'échantillon de données de niveau 1 des trois assureurs).

Les deux communes où les totaux d'indemnisation sont les plus élevés sont la Faute et l'Aiguillon-sur-Mer. 16 autres communes atteignent une indemnisation cumulée de 1 million d'euros lors de Xynthia, pour l'échantillon de données des trois assureurs. Cependant, les indemnisations moyennes de ces 18 communes ayant subi des dommages conséquents sont très variables, de 10 000 € à 75 000 €, et ne se corrèlent pas aux indemnisations totales.

Ces variations de coût moyen sont en partie attribuées aux variations d'intensité de l'aléa frappant les différentes communes. Cependant, les coûts moyens de la Faute et de l'Aiguillon, où les hauteurs d'eau étaient parmi les plus fortes, ne sont pas particulièrement élevés. L'analyse des données détaillées provenant des rapports d'expertise, pour lesquelles la hauteur d'eau est disponible, permettra d'éclaircir ce point.

À l'échelle régionale, il est enfin possible de croiser les coûts moyens des dommages par commune avec différentes informations sur les communes affectées. Les paramètres qui expliquent le mieux les coûts moyens communaux des sinistres sont, concernant l'exposition à l'aléa, l'altitude moyenne des sinistres (à défaut de la hauteur d'eau réellement observée dans les habitations), et concernant la taille des enjeux, le nombre moyen de pièces principales des maisons dans les communes affectées (Figure 93).

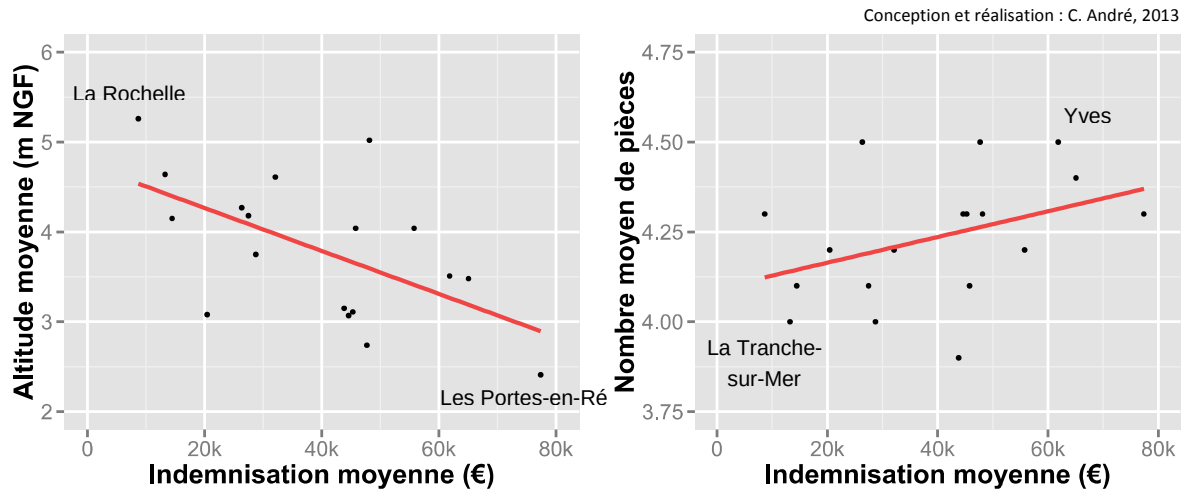


Figure 93 : Graphique des indemnisations moyennes des 18 communes les plus affectées par Xynthia, en fonction de l'altitude moyenne des sinistres (données LIDAR DREAL Poitou-Charentes) et du nombre moyen de pièces principales des maisons (données INSEE recensement 2009).

Ces éléments confirment une fois de plus la pertinence de ces deux paramètres pour l'explication des coûts individuels des sinistres à l'échelle locale, à partir de données plus détaillées des rapports d'expertise (niveau 2 des données d'assurance).

Pour la tempête Xynthia, en comparaison avec Johanna, le principal processus d'endommagement des habitations est davantage lié à la submersion qu'aux chocs de vagues. La surcote très importante, sur un littoral bas composé de polders, a causé l'inondation de grandes étendues, dont beaucoup sont urbanisées, ce qui explique les coûts si élevés des dommages et le nombre important de victimes.

Le manque d'informations détaillées sur l'aléa à partir des données d'assurance de niveau 1 ne permet pas de lier, à l'échelle régionale, le coût des dommages à la hauteur d'inondation. On montre cependant dès à présent que le coût des dommages varie en fonction de nombreux paramètres, liés non seulement à l'intensité de l'aléa, mais aussi à la vulnérabilité et à la valeur des biens endommagés. L'étude de ces paramètres est poursuivie dans la partie suivante de cette thèse, à l'aide des données détaillées des rapports d'expertise.

4. Les facteurs de dommages non liés à la vulnérabilité intrinsèque des habitations

En dehors de la vulnérabilité intrinsèque et de la taille des habitations, des facteurs liés à la perception des risques, et au comportement des populations exposées, peuvent avoir un impact important sur les dommages. En effet, des personnes ayant déjà fait l'expérience d'inondations peuvent être considérées comme moins vulnérables à cet aléa, si leur vécu leur fait prendre des mesures de protection individuelles pour limiter les dommages : par

exemple, une utilisation limitée des pièces situées au rez-de-chaussée des habitations, ou l'utilisation de batardeaux pour les faibles hauteurs d'eau (MEDDE, 2012). En partie pour cette raison, les zones dans lesquelles les inondations sont récurrentes sont en effet connues pour subir des dommages moins importants que les zones rarement affectées (Elmer et al., 2010). Par ailleurs, le fait d'alerter les populations d'une inondation proche, leur permet d'évacuer leurs habitations, et éventuellement de mettre une partie de leur mobilier en sécurité aux étages. Ces éléments sont reconnus influencer les dommages et sont pris en compte dans certains modèles d'endommagement (Torterotot, 1993 ; Penning-Rowsell et al., 2005 ; Parker et al., 2007).

L'efficacité des politiques de prévention, notamment par la règlementation de l'exposition et les prescriptions d'aménagements des Plans de Prévention des Risques Littoraux, ainsi que par l'information des populations, participent également à limiter les dommages liés aux inondations.

Pour la tempête Xynthia, les documents de retour d'expérience estiment qu'aucun de ces paramètres n'a joué en faveur de la réduction des dommages : les habitants des communes littorales inondées de Vendée et de Charente-Maritime ont pour la grande majorité été surpris par la submersion, aucune alerte n'ayant été formulée en rapport avec le risque de submersion, et aucune évacuation n'ayant été organisée, ce qui explique le nombre si élevé de décès (Anziani, 2010 ; Cour des Comptes, 2012).

Au moment de la tempête Xynthia, aucun PPRL n'avait été approuvé dans les communes de Vendée ou de Charente-Maritime, excepté sur les îles de Ré et d'Oléron (PPRL prescrits à la suite de la tempête Martin de 1999), où l'urbanisation est de toute façon limitée, pour d'autres raisons que celle de la limitation de l'exposition au risque. Sur ces deux points, Xynthia peut donc être considérée comme un cas extrême de vulnérabilité ; ce ne sont toutefois pas ces éléments qui expliquent les différences de dommages d'un sinistre à l'autre pour cet évènement.

Pour la tempête Johanna, le constat peut être nuancé par le fait que certains sites disposaient d'un PPRL au moment de la tempête, et surtout que certains d'entre eux sont plus régulièrement frappés par les aléas côtiers. En effet, la commune de Gâvres avait connu plusieurs submersions avant Johanna, dont un évènement majeur en 2001. Ces éléments peuvent contribuer à expliquer en partie les différences de coûts des dommages entre les deux évènements, du fait de l'expérience acquise par les habitants suite aux évènements récurrents (Elmer et al., 2010), et de la meilleure préparation de ces derniers dans les communes dotées d'un PPRL ou d'une alerte liée au risque de submersion.

Cependant, sans la réalisation d'enquêtes auprès des habitants, à propos de leur perception des risques et de leur comportement avant et pendant les évènements de tempêtes, le rôle de ces facteurs sur le coût des dommages aux habitations est très difficile à quantifier. Dans tous les cas, l'intégration de ces paramètres dans l'analyse *ex post* des dommages ne peut se faire qu'avec des données concernant de multiples évènements, touchant des régions différentes, à partir desquelles des différences pourraient être observées. Pour le présent travail, ces éléments ne pouvant être quantifiés, on ne les prendra par en compte lors de la phase de modélisation des dommages, mais il faut les garder à l'esprit pour l'interprétation et l'explication des coûts observés.

Conclusion de la troisième partie

L'analyse des données d'assurance à l'échelle régionale a permis de réaliser une ébauche globale des caractéristiques de l'endommagement des deux tempêtes sur les enjeux d'habitation. D'un côté, les deux évènements ont des points communs : les habitations sont dans les deux cas le type d'enjeu le plus affecté, et la distribution des indemnisations de type log-normale, commune aux deux tempêtes, est un point clé dont il faudra tenir compte pour la mise en place de modèles de prédiction des dommages. D'un autre côté, les deux évènements sont très différents, à la fois de par leur ampleur et leurs types de sinistres et de dommages.

On constate que les deux évènements Johanna et Xynthia ne peuvent être étudiés de la même manière : du fait du très grand nombre de sinistres de Xynthia, les rapports d'expertises n'ont pu être consultés que pour un échantillon des dossiers, ce qui exclut leur analyse à l'échelle régionale. En revanche, l'agrégation communale des données d'assurance de niveau 1, réalisable seulement pour Xynthia, permet une analyse prometteuse à cette échelle.

Ces premiers éléments permettent d'ores et déjà de mieux comprendre la répartition des dommages, leurs montants, et leurs causes, à l'échelle de la Bretagne pour Johanna et des départements de la Vendée et de la Charente-Maritime pour Xynthia. Ces éléments sont donc un premier pas vers la priorisation des actions de protection et de réduction de la vulnérabilité à mener sur ces territoires littoraux.

Cette analyse est poursuivie dans la partie suivante de cette thèse, dans laquelle on cherche à comprendre plus en profondeur les raisons de ces différences de coûts si marquées entre les deux évènements. En effet, si elle permet de cerner de façon préliminaire les paramètres

explicatifs de la variation des coûts, l'analyse des données d'assurance à l'échelle régionale ne permet pas la compréhension complète du coût des dommages, du fait du manque de détail des données d'assurance de premier niveau collectées, notamment sur la description des dommages (agrégation de l'immobilier et du mobilier) et sur les processus d'endommagement, non renseignés.

L'absence d'information sur la hauteur d'inondation, non disponible dans les listings d'assurance, est handicapante pour l'explication des indemnisations à cette échelle, en particulier pour la tempête Xynthia, où les processus impliqués relèvent essentiellement de la simple submersion. Dans l'état actuel, la construction de modèles de prédiction des dommages à l'échelle régionale est limitée par l'absence de cette information. Elle est approchée par des indicateurs de l'aléa, qui ne prennent cependant pas en compte de nombreux paramètres influençant de manière importante la dynamique de la submersion à terre, comme la bathymétrie littorale et la topographie côtière, les ouvrages de protection en place, etc. Pour cette raison, les modèles de prédiction des dommages à l'échelle macro sont souvent des modèles ne considérant pas les enjeux individuellement, mais par unités administratives ou d'occupation du sol. Pour ce type de modèles, les données de sinistres individuels d'assurance ne sont pas les plus appropriées. Pour la réalisation de modèles de prédiction du type des fonctions d'endommagement, à ce stade, on ne peut donc que faire la recommandation que l'information sur la hauteur d'eau, *a minima*, soit disponible dans les listings d'assurance afin de pouvoir étudier ce paramètre essentiel de toute modélisation des dommages dus aux inondations à l'échelle la plus large.

Cette analyse montre toutefois que certaines caractéristiques des enjeux impactés sont probablement tout aussi importantes pour l'analyse et l'explication du coût des dommages : elles concernent la vulnérabilité des biens, ainsi que leur valeur totale, qui exprime le potentiel de dommage maximal. Le besoin d'un référentiel de la valeur des biens semble critique, afin d'exprimer les dommages, non pas en coûts absolus, mais en taux d'endommagement des biens. Les analyses menées, même préliminaires, montrent que des paramètres tels que la taille des logements (surface, nombre de pièces) ou le type d'occupation (résidence principale, secondaire) semblent expliquer une part importante des variations des coûts, et donnent des pistes pour l'analyse détaillée de la prochaine partie. Des informations, manquantes à cette échelle, seront recherchées pour compléter l'analyse, comme la présence d'étage, l'âge et les matériaux de construction des bâtiments, etc.

Partie IV. Analyse des données d'assurance à l'échelle locale : une recherche des paramètres explicatifs du coût des dommages

Introduction

Seconde partie de l'étude des données d'assurance recueillies, l'analyse des dommages à l'échelle locale a pour but l'exploitation des données détaillées issues des rapports d'expertise, afin de déterminer quels sont les paramètres de l'aléa et des enjeux qui permettent d'expliquer le plus finement possible les coûts des sinistres observés. Cette démarche poursuit l'objectif d'identifier les paramètres explicatifs des coûts des dommages les plus pertinents pour la mise en place de modèles d'endommagement, basés sur une ou plusieurs variables (modèles univariés ou multivariés) pour (i) expliquer les dommages observés (*ex post*) et (ii) être en mesure de les prédire (*ex ante*).

C'est essentiellement à partir des données des rapports d'expertise, c'est-à-dire les données de niveau 2, qui contiennent beaucoup plus d'informations sur les dommages que les listings (la description des circonstances des sinistres, le détail des coûts par postes de dommages, des informations sur les processus d'endommagement liés aux paramètres de l'aléa, et une description des caractéristiques des biens affectés), qu'une compréhension fine du coût des dommages est possible, pour les enjeux pris individuellement (et non plus à une unité d'agrégation communale).

De plus, contrairement à l'analyse basée sur les listings d'indemnisations, les coûts des dommages détaillés dans les rapports d'expertise peuvent être évalués par la valeur de

remplacement à neuf des éléments endommagés. Cela permet de s'affranchir des règles d'évaluation de la vétusté et des plafonnements d'indemnisation inhérents aux clauses des contrats d'assurance, qui compliquent l'analyse des coûts quand elle est pratiquée à partir des sommes indemnisées (Tableau 7, page 104).

Comme indiqué en partie II (section 2.3), ces données ont été consultées que pour un nombre restreint de dossiers, sélectionnés de manière différente pour les deux évènements Johanna et Xynthia. Alors que pour Johanna, les sinistres pour lesquels les rapports d'expertise ont été consultés sont situés sur tout le pourtour de la Bretagne et sont représentatifs de l'évènement, pour Xynthia, en raison de l'abondance des sinistres, les dossiers ont été sélectionnés dans certaines communes parmi les plus impactées pour l'évènement : ces données doivent donc être analysées en gardant à l'esprit cet élément.

Après exposition de l'apport des données détaillées sur la compréhension des types de sinistres et de dommages observés sur les habitations, la corrélation de différents paramètres avec les coûts des dommages est menée selon deux grandes catégories : les paramètres liés aux circonstances et à l'intensité de l'aléa, et ceux liés aux caractéristiques des enjeux impactés. Enfin, nous explorons une alternative à l'analyse classique des dommages cherchant à relier directement le coût des dommages à la hauteur d'eau (fonctions d'endommagement). Elle repose sur la description qualitative de niveaux d'endommagement, pour relier les paramètres de l'aléa au coût des dommages.

1. Description et analyse des coûts détaillés des dommages

1.1. Analyse des coûts par types de sinistres

La première analyse porte sur les détails du coût des dommages pour les différentes classes de la typologie des sinistres aux habitations décrite en partie III (Figure 78, page 136). À ce niveau de détail, l'échantillon de dossiers sélectionnés pour les deux tempêtes ne comporte plus que des sinistres à des maisons individuelles, au vu du faible nombre de logements collectifs endommagés lors des deux évènements Johanna et Xynthia.

À partir des données des rapports d'expertise, plus détaillés, il est possible d'indiquer séparément les coûts de réparation et de remplacement à neuf des éléments immobiliers et mobiliers. Les différents types de dossiers MRH ont des coûts moyens très différents pour les deux tempêtes (Tableau 11).

	Tempête Johanna				Tempête Xynthia			
	Nombre de dossiers	Coût moyen immobilier	Coût moyen mobilier	Coût moyen total	Nombre de dossiers	Coût moyen immobilier	Coût moyen mobilier	Coût moyen total
Bâti principal	26 (34%)	5 351 €	4 805 €	10 156 €	242 (89%)	59 530 €	29 721 €	89 251 €
Garage/sous-sol	10 (13%)	2 277 €	3 104 €	5 381 €	14 (5%)	13 958 €	7 952 €	21 910 €
Bâti annexe	7 (9%)	4 335 €	500 €	4 835 €				
Mur/terrain	33 (44%)	10 222 €	0 €	10 222 €				
Ann./mur/terrain					9 (3%)	11 991 €	3 249 €	15 240 €
Mobil-home					9 (3%)	29 019 €	9 846 €	38 865 €
total	76	6 968 €	2 098 €	9 066 €	274	54 638 €	27 087 €	81 724 €

Tableau 11 : Coûts moyens des dommages immobiliers et mobiliers par type de sinistre MRH et par évènement.

L'analyse des données des dossiers d'expertise confirme les conclusions issues de l'étude des données des listings d'assurance. Pour la tempête Johanna, les dommages aux murs de soutènement et aux clôtures (éléments extérieurs) occupent une part importante des sinistres répartis sur tout le territoire breton. Les sinistres aux éléments extérieurs sont ceux qui ont le coût moyen le plus élevé, bien que pour ce type de sinistre, seuls des dommages immobiliers sont constatés. Ce type de dommages est donc très caractéristique de la tempête Johanna, qui a peu atteint les bâtiments eux-mêmes.

Au contraire, sur les sites choisis pour l'analyse locale de la tempête Xynthia, la grande majorité des dossiers consultés représente des habitations inondées (89 %). Le coût de remplacement moyen des éléments immobiliers et mobiliers est bien supérieur à celui des sinistres de la tempête Johanna. Pour ces dossiers, lorsque le bâtiment principal est inondé, la valeur à neuf moyenne des dommages atteint 89 200 €, ce qui est bien plus fort que celle de l'ensemble des sinistres MRH de Xynthia (26 600 €).

Il faut rappeler que cet échantillon de dossiers a été sélectionné au sein des communes les plus affectées par Xynthia (beaucoup possédant des zones de solidarité), puisque ces derniers étaient plus facilement accessibles auprès des assureurs. On trouve parmi ces sinistres des habitations touchées par de fortes hauteurs d'eau : ce sont donc souvent des dossiers ayant conduit à de fortes indemnisations. Il faut donc tenir compte de cet élément pour l'interprétation des coûts de la tempête Xynthia à cette échelle.

1.2. Distribution des coûts immobiliers et mobiliers

Afin d'analyser la distribution complète des valeurs à neuf des éléments mobiliers en fonction de celle des éléments immobiliers, on représente, pour les sinistres de type bâtiment principal, le lien entre les deux séries à l'aide d'un nuage de points (Figure 94).

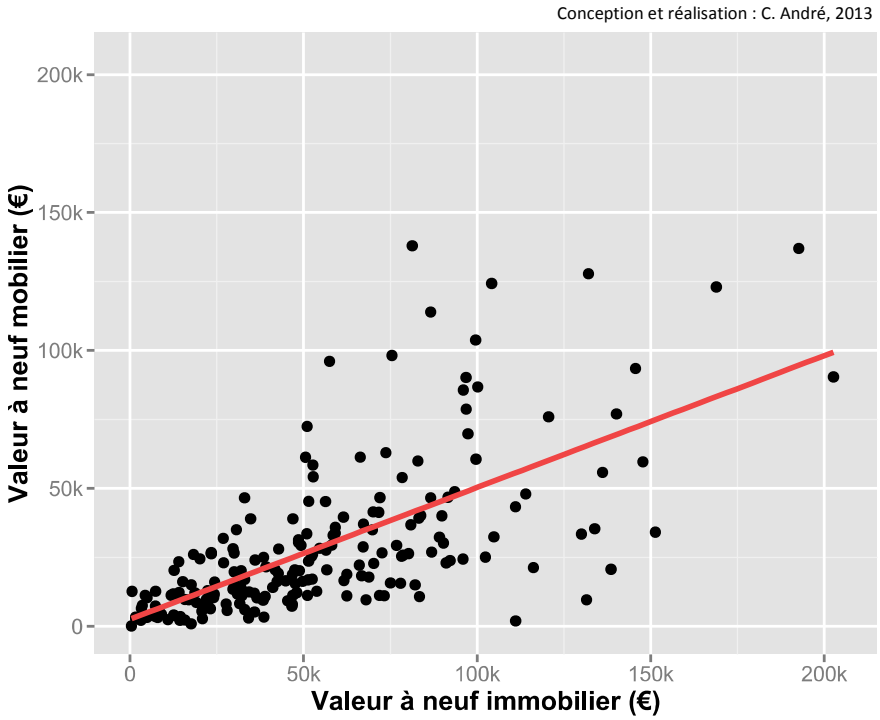


Figure 94 : Graphique de la relation entre les coûts mobiliers et immobiliers (en termes de valeur de remplacement à neuf) pour les dossiers MRH des deux évènements Johanna et Xynthia.

Le graphique indique une relation claire entre les coûts au mobilier et à l'immobilier. La droite de régression ajustée sur les données, avec un coefficient de détermination R^2 de 72 %, passe par l'origine, et sa pente indique qu'il existe un rapport d'environ 50 % entre les coûts immobiliers et mobiliers. Par la suite, l'analyse se concentre sur le détail des coûts immobiliers, en faisant l'hypothèse, à l'appui de ce graphique, que les coûts mobiliers sont proportionnels à ces derniers.

1.3. Analyse des coûts immobiliers par postes de dommages

Au sein des rapports d'expertise des sinistres, le chiffrage détaillé des dommages immobiliers rend possible l'analyse de l'endommagement par postes de dommages (Figure 95 et Figure 96), qui correspondent aux corps d'état du bâtiment (cf. partie II, section 2.3).

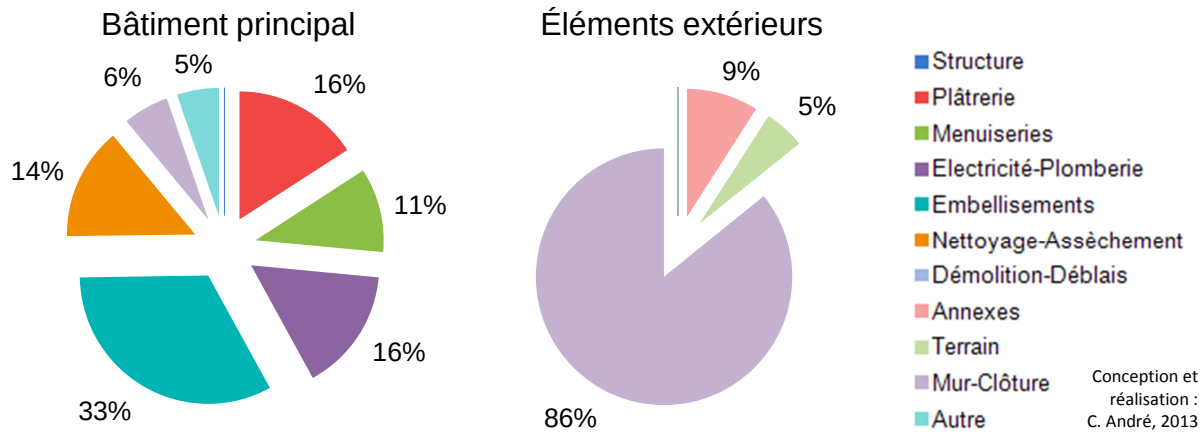


Figure 95 : Répartition des coûts des dommages par corps d'état pour Johanna, pour les catégories de sinistres au bâtiment principal et aux éléments extérieurs.

Pour la tempête Johanna, quand le bâtiment principal (pièces principales, garage ou sous-sol) est inondé, les embellissements représentent à eux seuls un tiers du coût des dommages immobiliers. Avec les dommages aux cloisons (plâtrerie), aux menuiseries (portes et fenêtres) et aux réseaux d'électricité et de plomberie, les dommages au second œuvre représentent les trois quarts des dommages immobiliers. Dans les cas où le sinistre concerne des éléments extérieurs (bâtiments annexes ou murs et clôtures), ce sont au contraire les dommages aux murs et aux clôtures qui représentent la quasi-totalité des coûts.

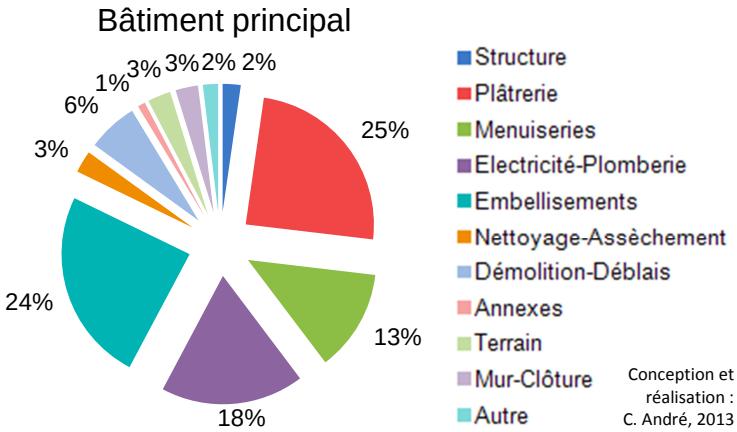


Figure 96 : Répartition des coûts des dommages par corps d'état pour Xynthia, pour les catégories de sinistres au bâtiment principal.

Pour la tempête Xynthia, la distribution des coûts des sinistres pour lesquels le bâtiment principal est inondé montre que les dommages immobiliers concernent principalement (à hauteur de 80 %) les éléments de second œuvre (cloisons, menuiseries intérieures et extérieures, réseaux d'électricité, de plomberie et de chauffage, revêtements du sol et des murs et embellissements, etc.). Le faible nombre de dossiers de notre échantillon pour les autres types de sinistres ne justifie pas d'étudier la distribution de leurs coûts.

Pour les deux tempêtes, on remarque que la part des dommages structuraux (fondations, murs porteurs, charpente) est très faible (nulle pour Johanna et de 2 % des coûts pour Xynthia), alors même que pour Xynthia, les sinistres sélectionnés pour l'analyse détaillée sont parmi les plus forts de l'évènement. Cela indique que les conditions de l'aléa lors des deux évènements étudiés ont entrainé très peu de destruction de bâtiments.

Les frais de nettoyage et d'assèchement des bâtiments, ainsi que de démolition des éléments de second œuvre et d'évacuation des déblais, représentent respectivement 14 % et 9 % des coûts pour Johanna et Xynthia.

Malgré des coûts des dommages d'ordres de grandeur différents, la répartition des postes de dommages concernant les bâtiments d'habitation inondés est assez similaire pour les deux tempêtes. La différence pour la tempête Johanna est qu'une part importante des coûts immobiliers sont associés à des sinistres touchant les éléments extérieurs, qui ne représentent, en comparaison, qu'une faible part des sinistres de Xynthia. Ce phénomène est lié aux différents processus de l'aléa qui ont entrainé les dommages des deux évènements.

Cette forte proportion des dommages aux éléments de second œuvre (Figure 96), sur des sinistres avec un coût immobilier moyen de l'ordre de 60 000 € pour Xynthia (Tableau 11, page 161) implique que pour certains dossiers, la quasi-totalité des éléments de second œuvre, en particulier les cloisons, a été remplacée. L'objectif de cette partie de la thèse est de comprendre comment ce choix des experts d'assurance est corrélé aux caractéristiques de l'aléa et des enjeux. Nous étudierons dans la cinquième partie de la thèse en quoi il diffère des mesures prises lors des inondations fluviales.

2. Coûts des dommages en fonction des paramètres de l'aléa

L'étape suivante de l'analyse consiste à rechercher, parmi les informations disponibles sur les paramètres de l'aléa (hauteur d'eau, processus de dommages, durée de submersion, etc.), quelles variables expliquent le coût des dommages. On commence par l'analyse des informations disponibles dans les rapports d'expertise, puis on cherche à enrichir le jeu de données par des informations sur l'aléa provenant de sources externes à notre base de données : des données issues des levers de terrain réalisés dans le cadre des retours d'expérience, et les données résultant des modélisations numériques de l'aléa réalisées par le BRGM à l'échelle locale.

Dans cette section, on fait l'hypothèse que c'est sur les sinistres pour lesquels le bâtiment principal est touché que l'on pourra évaluer le lien entre le coût des dommages et les paramètres de l'aléa. On focalise l'analyse sur ce type de sinistres, le plus onéreux et de loin le plus représenté pour la tempête Xynthia.

2.1. Paramètres de l'aléa issus des données d'expertise d'assurance

2.1.1. La hauteur d'eau

Pour évaluer le coût des dommages dus aux inondations, l'outil le plus couramment utilisé, aussi bien par les gestionnaires des risques que par les assureurs, est la fonction d'endommagement (cf. partie I, section 2.2.3). Les fonctions d'endommagement relient, soit le montant des dommages, soit le « taux d'endommagement » d'un type d'enjeu, à un paramètre de l'aléa, qui est le plus souvent la hauteur d'eau. En effet, ce paramètre est au cœur de toutes les méthodes d'évaluation des dommages des inondations utilisant des fonctions d'endommagement (Messner et al., 2007 ; Merz et al., 2010). C'est donc le premier paramètre que nous nous proposons de corréler à la valeur à neuf des dommages, à partir des informations contenues dans les rapports d'expertise (Figure 97).

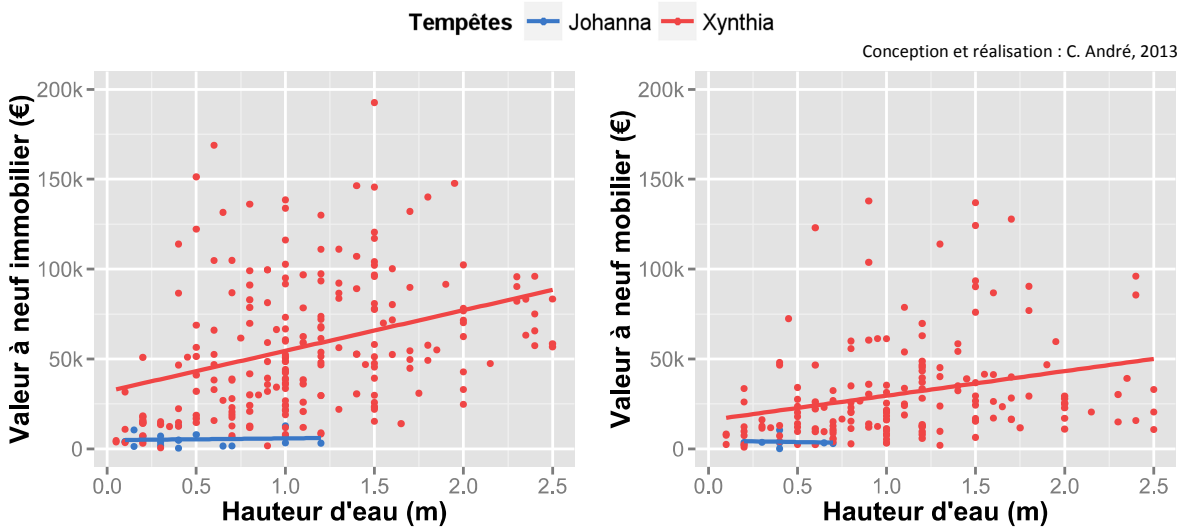


Figure 97 : Graphiques du coût des dommages immobiliers et mobiliers en fonction de la hauteur d'eau issue des rapports d'expertise pour Johanna et Xynthia.

Ne sont indiqués sur les graphiques que les sinistres pour lesquels le bâtiment principal est inondé, à l'exception des dossiers concernant une inondation du sous-sol uniquement (pour lesquels les hauteurs d'eau ne sont pas comparables, car elles ne sont pas mesurées par rapport à la même référence). Les coûts immobiliers liés aux éléments extérieurs au bâtiment principal (bâtiments annexes, murs et clôtures) sont extraits de l'analyse pour ne considérer ici que les dommages réellement liés à l'endommagement des bâtiments

d'habitation. La hauteur d'eau est disponible dans les rapports d'expertise pour 21 de ces dossiers pour Johanna et pour 215 de ces dossiers pour Xynthia.

La Figure 97 montre une relation positive entre les coûts des dommages (immobiliers et mobiliers) et la hauteur d'eau, en particulier pour Xynthia, malgré une importante dispersion (au vu du faible nombre de données disponibles pour Johanna, on ne peut considérer que la droite de régression sur ses coûts soit significative).

Les graphiques soulignent la différence très nette entre les coûts des tempêtes Johanna et Xynthia indiquée précédemment. En effet, les habitations touchées par la submersion lors de la tempête Johanna ont été inondées par des hauteurs d'eau de l'ordre de 1 m maximum, alors que la hauteur d'eau atteint jusqu'à 2,5 m dans certaines habitations inondées lors de Xynthia. Cependant, même en ne considérant que les hauteurs d'eau inférieures au mètre pour Xynthia, les coûts des dommages de Johanna restent largement inférieurs. Si cette différence de coût entre les deux évènements n'est pas due à la hauteur d'eau, elle peut être liée aux caractéristiques de vulnérabilité des enjeux, ou encore à différents paramètres liés la vulnérabilité systémique des territoires affectés (cf. partie III, section 4). Cependant, le faible échantillon de données concernant Johanna ne permet pas de tirer de conclusions précises sur ce point.

On constate également sur la Figure 97 un nombre important de points sur les valeurs rondes de hauteur d'eau, en particulier à 1 m, qui laisse présumer des approximations lors des mesures. En effet, la hauteur d'eau n'est pas une information exigée par les assureurs, et même si elle figure dans la majorité des rapports d'expertise pour Xynthia, elle ne découle pas systématiquement d'une mesure précise. De même, la référence de cette hauteur n'est pas exprimée clairement et doit souvent être déduite : la mesure est-elle réalisée dans le bâtiment ou à l'extérieur ? Au rez-de-chaussée, au sous-sol, dans un niveau surélevé, ou semi-enterré ? Une partie de la dispersion visible sur le nuage de points est probablement liée à ces imprécisions.

Même avec des précautions quant à l'interprétation des valeurs de hauteur d'eau, la dispersion indique immédiatement que l'on ne peut expliquer la répartition des coûts uniquement en fonction de ce paramètre. Notamment, les coûts des dommages de la tempête Xynthia sont déjà très élevés, pour des hauteurs d'eau de l'ordre de 50 cm seulement. Nous avons donc cherché à déterminer l'influence d'autres paramètres de l'aléa tels que la durée de submersion, ou la vitesse du courant, sur le coût des dommages aux habitations. Cette approche est focalisée sur les dommages de Xynthia, le faible nombre de

dossiers disponibles pour Johanna ne permettant pas de mener plus loin l'analyse de l'influence des paramètres de l'aléa.

2.1.2. Les types de processus de l'aléa

Au sein des rapports d'expertise, la description des dommages permet de déterminer qualitativement quels processus de l'aléa sont liés aux dommages, en dehors de la hauteur d'eau elle-même. En effet, certains bâtiments situés en front de mer ont été affectés par des phénomènes de chocs mécaniques de vagues, ou exposés à des vitesses de courant importantes pouvant causer des dommages, alors que d'autres n'ont été affectés que par une simple submersion. On cherche donc à évaluer l'influence de ce paramètre sur la distribution du coût des dommages immobiliers (Figure 98).

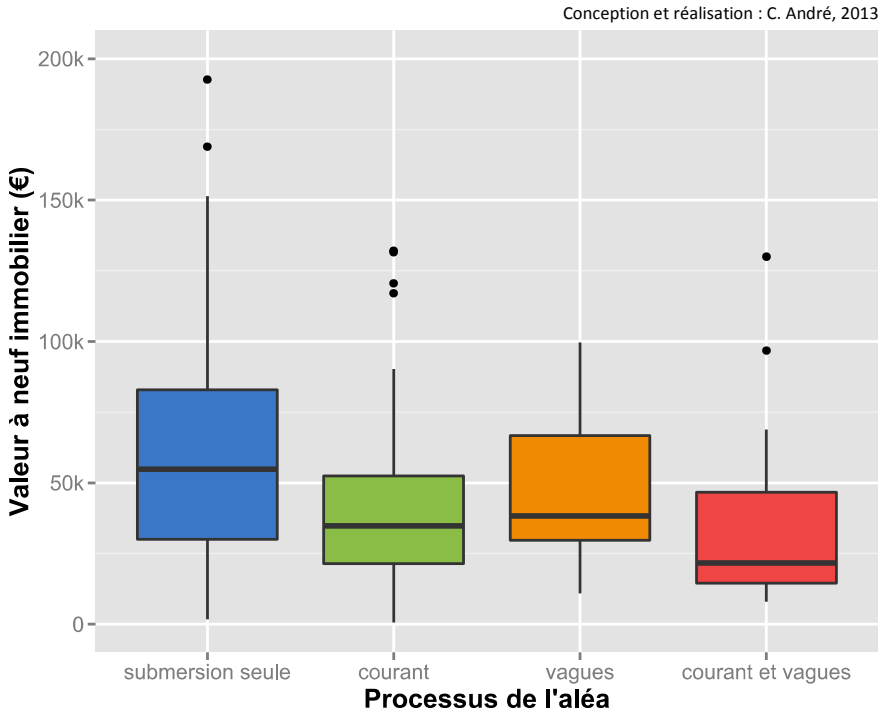


Figure 98 : Boites de dispersion du coût des dommages immobiliers en fonction des types processus de l'aléa pour Xynthia.

S'ils ont causé quelques dommages spectaculaires, notamment à la Tranche-sur-Mer, à l'Aiguillon-sur-Mer ou encore à Fouras, les phénomènes de chocs de vagues et d'érosion sont restés globalement assez rares et isolés lors de la tempête Xynthia, par rapport à l'ensemble des sinistres. La Figure 98 indique qu'au sein de notre échantillon, les habitations affectées par des phénomènes de courant ou de chocs des vagues n'ont pas des coûts de dommages plus élevés que les dossiers affectés par une simple submersion.

Cependant, des dommages concernant la structure des bâtiments ont été observés sur le terrain (Pedreros et al., 2010). Ces derniers sont manifestement dus à des chocs de vagues, et à des faiblesses spécifiques de certains de ces bâtiments. Ce ne sont toutefois pas ces paramètres qui expliquent les coûts les plus élevés sur l'ensemble des sinistres issus des données d'assurance. L'influence de ces processus dynamiques de l'aléa, pour la tempête Xynthia, se limite essentiellement aux dommages sur les éléments extérieurs aux bâtiments.

Après ces premiers tests de corrélation entre le coût des dommages et les paramètres de l'aléa, on arrive au constat que même au sein des rapports d'expertise, source d'information sur les dommages la plus détaillée parmi les données d'assurance, les informations disponibles manquent d'exhaustivité et de précision. Grâce à la géolocalisation des dossiers de sinistres, il a donc été entrepris de croiser les dommages avec des sources externes d'informations.

2.2. Paramètres de l'aléa issus des données de retours d'expérience

Pour compléter l'information qualitative et quantitative issue des rapports d'expertise, il est dans un premier temps fait appel aux données de retours d'expérience acquises sur le terrain après la tempête Xynthia (cf. partie II, section 1.6). Elles permettent de quantifier certains paramètres de l'aléa comme la hauteur d'eau et la durée de submersion.

2.2.1. La durée de submersion

La durée d'inondation est un autre paramètre souvent utilisé pour évaluer les dommages à l'aide de fonctions d'endommagement. En effet, la durée d'inondation peut jouer sur la corrosion des éléments métalliques, le gonflement d'éléments en bois (menuiseries) et sur l'apparition de moisissures qui rendent nécessaire le remplacement des embellissements muraux, parfois même au-dessus du niveau d'eau maximal. La plupart du temps, la durée est divisée en classes inférieures ou supérieures à 12, 24 ou 48 h, afin de regrouper les biens inondés pendant des durées différentes et de leur appliquer ainsi des fonctions d'endommagement différentes.

Dans les rapports d'expertise, la durée de submersion n'est le plus souvent pas indiquée, ou alors très approximativement, en nombre de jours pour les maisons inondées pendant une très longue durée. Cependant, les documents de retours d'expérience (REX) de la tempête Xynthia (Sogreah, 2011 ; Devaux et al., 2012), contiennent des fiches communales décrivant le déroulement de l'évènement et donnant des indications concernant la durée de

submersion par quartiers. Ces données, ainsi que des photos aériennes[41] prises dans les jours suivant la catastrophe, nous ont permis d'attribuer une durée de submersion approximative à la plupart des sinistres de l'échantillon.

Afin d'analyser l'influence de la durée de submersion sur le coût des dommages, ainsi que le lien entre ce paramètre et la hauteur d'eau, on représente sur un même graphique les trois informations (Figure 99). Les classes de durée de submersion, indiquées en couleur, peuvent ainsi être analysées en fonction des coûts immobiliers (variations le long de l'axe vertical) et en fonction de la hauteur d'inondation des habitations (variations le long de l'axe horizontal). Il est ainsi possible évaluer l'influence de la durée d'inondation sur le coût des dommages, pour différentes gammes de hauteur d'eau.

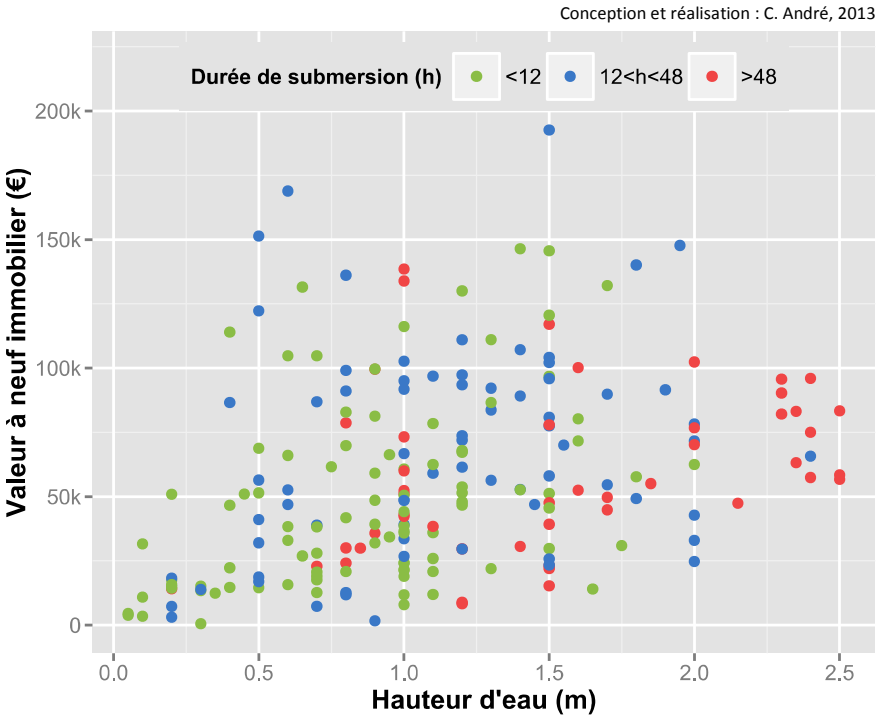


Figure 99 : Graphique du coût des dommages immobiliers en fonction de la hauteur d'eau et de la durée de submersion pour Xynthia.

L'analyse de la Figure 99 ne montre pas de tendance très claire reliant la durée d'inondation à la valeur de remplacement à neuf des dommages immobiliers. Cependant, si la corrélation entre les coûts et la durée de submersion n'est pas évidente, cette dernière augmente avec la hauteur d'eau. C'est en effet dans les zones où l'on trouve les hauteurs d'inondation les plus fortes, qui correspondent à des « cuvettes » dans lesquelles l'eau s'accumule, que les durées d'inondations sont généralement les plus importantes (cela a par exemple été le cas à la Faute-sur-Mer où les maisons sont restées inondées pendant plusieurs jours).

[41] Photos aériennes obliques du 28 février 2010, © Jean-Paul Bichon.

Au sein de l'échantillon de données d'expertise de Xynthia, la durée de submersion ne semble pas expliquer davantage le coût des dommages que la seule hauteur d'eau. Cela signifie que les experts ne se sont pas basés sur ce critère pour évaluer les éléments à remplacer et ceux qui pouvaient être laissés en place lors des expertises de Xynthia. Il ne semble donc pas que pour cet évènement, la durée de submersion soit un paramètre qui explique le coût des dommages.

2.2.2. La hauteur d'eau

Par l'interpolation des données de terrain rassemblées dans le cadre du REX Xynthia, une hauteur d'eau a pu être attribuée à la totalité des sinistres de l'échantillon localisés à l'adresse postale ou à la parcelle. Afin de déterminer si ces valeurs de hauteur d'eau permettent de réduire l'imprécision de l'information issue des rapports d'expertise, on confronte les deux sources de données (Figure 100).

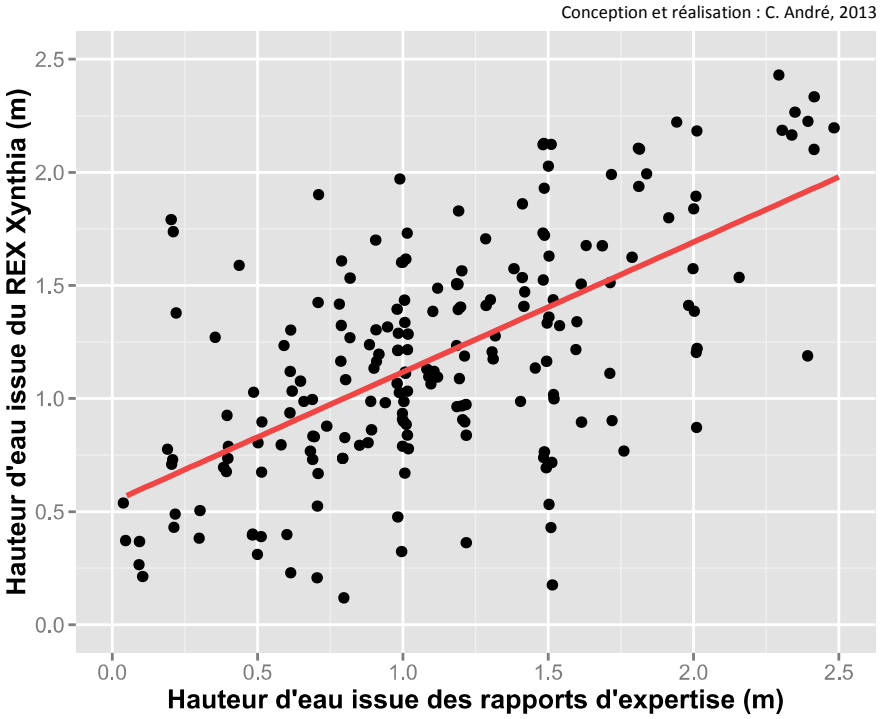


Figure 100 : Graphique de la relation entre la hauteur d'eau issue du REX Xynthia et celle issue des rapports d'expertise.

Le graphique indique une corrélation assez bonne des deux séries de hauteurs (la régression linéaire a un coefficient de détermination R^2 de 40 %). La dispersion observée est due aux approximations inhérentes à la méthode d'interpolation utilisée, en particulier dans les zones où les levés de terrain sont éloignés des bâtiments sinistrés. En considérant les hauteurs d'eau issues des rapports d'expertise comme les plus fiables, les données de retour

d'expérience sous-estiment la hauteur d'eau dans les zones où se produisent des phénomènes locaux d'accumulation de l'eau (cuvette de petite taille, zone d'étranglement, etc.). Au contraire, elles surestiment la hauteur d'eau pour les habitations dont le plancher du rez-de-chaussée est surélevé par rapport au terrain naturel, les hauteurs d'eau issues des rapports d'expertise et des levés de terrain étant mesurées respectivement à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.

Afin de déterminer si la hauteur d'eau issue du REX Xynthia offre une meilleure corrélation avec les dommages que la hauteur d'eau issue des rapports d'expertise, on réalise un graphique de la corrélation de cette nouvelle variable avec la valeur à neuf des dommages immobiliers (Figure 101).

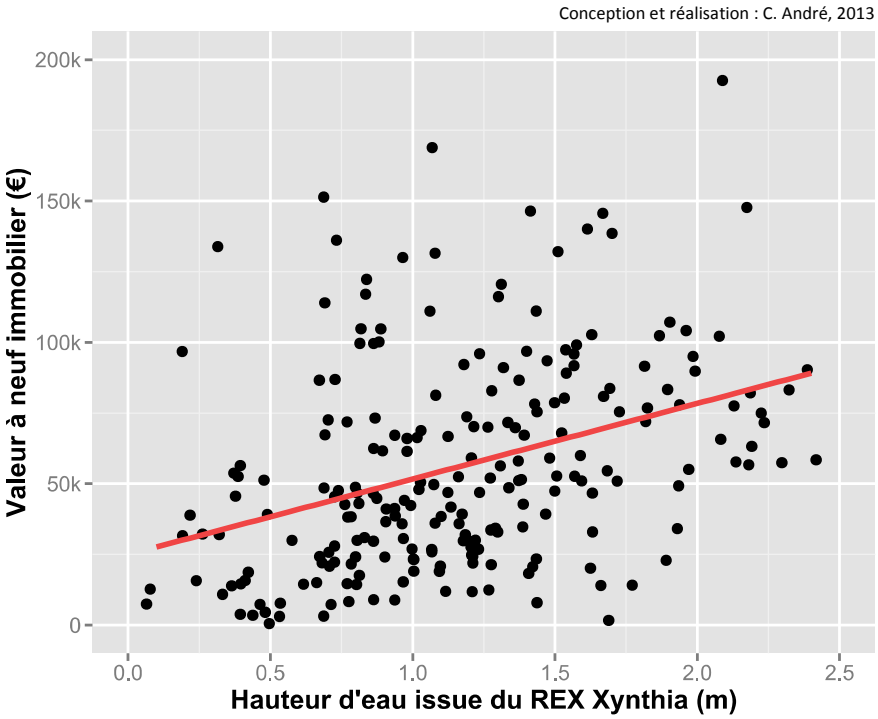


Figure 101 : Graphique du coût des dommages immobiliers en fonction de la hauteur d'eau issue du REX Xynthia.

Ce nouveau graphique est très semblable à celui réalisé avec les hauteurs d'eau issues des rapports d'expertise (Figure 97, page 165) : la relation entre les deux variables est positive, mais la dispersion reste importante.

Au vu des incertitudes liées à la méthode d'interpolation des levés de terrain, on peut donc conclure que les données d'interpolation des levés du retour d'expérience de Xynthia peuvent nous permettre de compléter de manière relativement fiable les informations de hauteur d'eau manquantes dans les rapports d'expertise, mais pas d'en améliorer la

précision, du fait de l'impact fort de la microtopographie sur l'évaluation de la hauteur d'inondation à l'échelle d'un bâtiment.

2.3. Paramètres de l'aléa issus des modélisations hydrauliques

Une troisième source de données pour la hauteur d'inondation correspond aux modélisations hydrauliques numériques des submersions réalisées par le BRGM à l'échelle locale. Comme indiqué dans la partie II (section 3.2), à la différence des méthodes de projection d'un niveau d'eau constant à terre, il a été fait appel à une modélisation dynamique « vague à vague » de la submersion, afin de tenir compte des variations temporelles du niveau d'eau à la côte et des volumes de débordement et de franchissement. Cette approche permet de ne pas surestimer les hauteurs d'inondation pour les zones basses étendues. De plus, ce type de modèle rend possible l'analyse de la vitesse des courants et de la vitesse de montée de l'eau lors de la submersion comme paramètres de l'aléa pouvant expliquer les dommages et leurs coûts. Cette analyse est réalisée sur les sites de Gâvres (Johanna) et des Bouchôleurs (Xynthia), pour les sinistres localisés à l'adresse postale.

2.3.1. La hauteur d'eau

Pour le site de Gâvres, 13 des rapports d'expertise consultés concernent des maisons inondées (9 au rez-de-chaussée et 4 en sous-sol) (Figure 102).

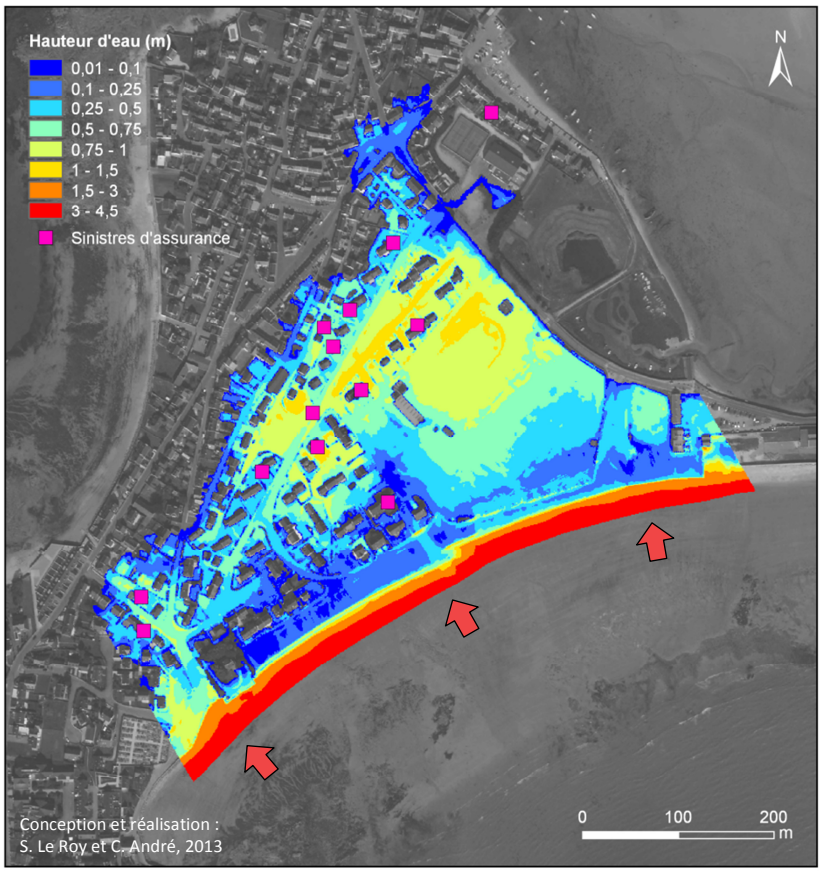


Figure 102 : Carte du résultat de la modélisation hydraulique des hauteurs d'eau maximales à Gâvres lors de Johanna avec la localisation des sinistres d'assurance (modélisation BRGM ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN).

La comparaison des hauteurs d'eau modélisées à celles issues des rapports d'expertise montre des différences, pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres, dues aux incertitudes liées aux estimations de la hauteur d'eau par les experts et à celles inhérentes à la modélisation hydraulique. Au vu du faible nombre de dossiers de sinistres disponibles dans la zone submergée, la comparaison de la hauteur modélisée à celle issue des rapports d'expertise n'est pas concluante. Il est donc difficile d'utiliser les hauteurs d'eau modélisées à Gâvres pour remplacer les valeurs issues des rapports d'expertise pour l'analyse des dommages.

Si pour la submersion de Gâvres lors de la tempête Johanna, le trop faible nombre de dossiers ne permet pas d'obtenir une corrélation fiable, sur le site des Bouchôleurs submergé lors de la tempête Xynthia, 56 dossiers de sinistres de maisons inondées se trouvent dans la zone modélisée (Figure 103), ce qui permet une comparaison instructive des résultats du modèle avec les hauteurs d'eau issues des données d'expertise d'assurance (Figure 104).

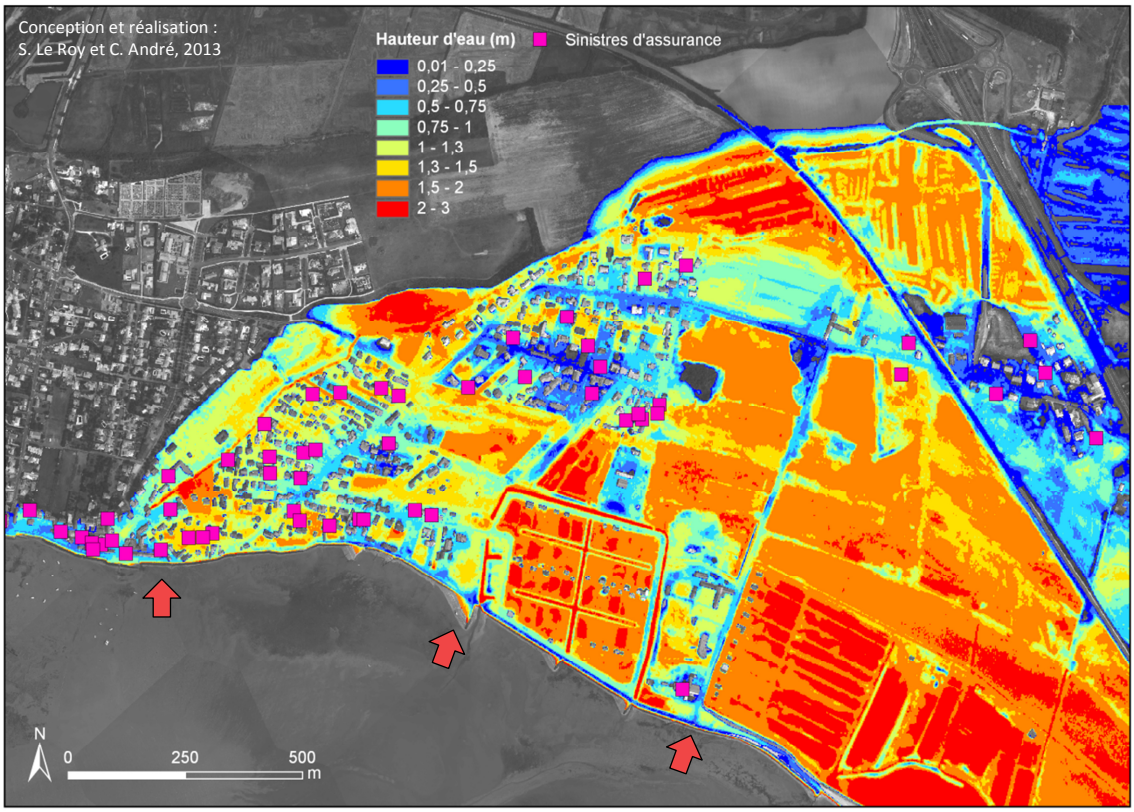


Figure 103 : Carte du résultat de la modélisation hydraulique des hauteurs d'eau maximales aux Bouchôleurs lors de Xynthia avec la localisation des sinistres d'assurance (modélisation BRGM ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN).

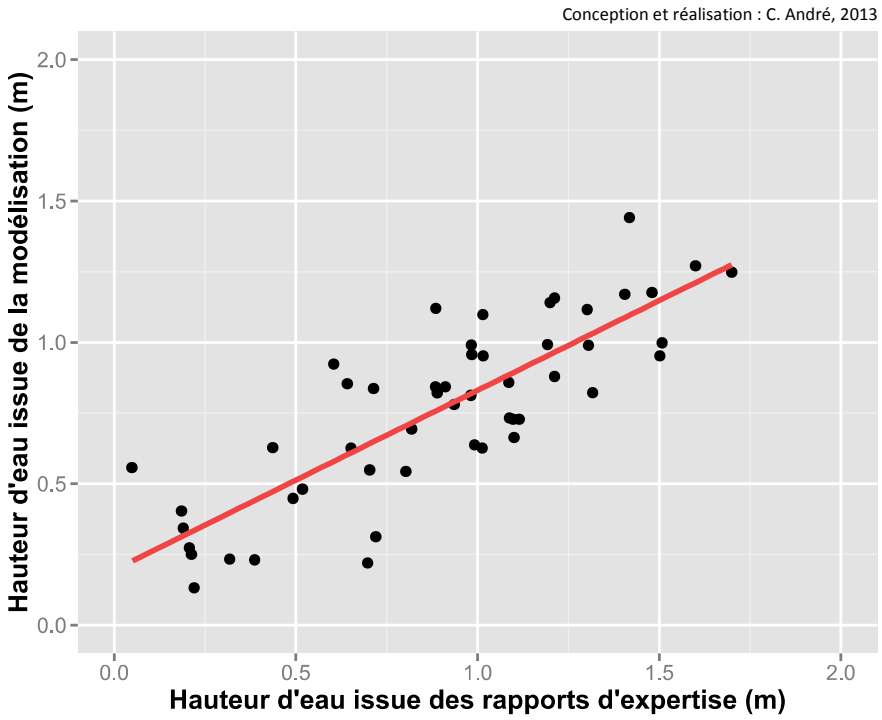


Figure 104 : Graphique de la relation entre la hauteur d'eau issue de la modélisation hydraulique et celle issue des rapports d'expertise des sinistres des Bouchôleurs.

La comparaison des hauteurs d'eau modélisées avec celles issues des rapports d'expertise montre une bonne corrélation des valeurs sur le site des Bouchôleurs (R^2 de 67 %), compte tenu des incertitudes connues sur les deux variables. Le modèle de la submersion réalisé avec le code SurfWB donne un meilleur résultat que l'interpolation des mesures de terrain du REX Xynthia pour la reproduction des hauteurs d'eau, avec toutefois une tendance à la sous-estimation des hauteurs d'eau, biais identifié lors de l'analyse des résultats de la modélisation (cf. partie II, section 3.2.3). Cependant, si les données de hauteur d'eau modélisées sont fiables, leur corrélation avec les coûts des dommages immobiliers reste très imparfaite (Figure 105).

Figure 105 : Graphique du coût des dommages immobiliers en fonction de la hauteur d'eau issue de la modélisation hydraulique aux Bouchôleurs.

De même que pour les données issues du REX Xynthia, on conclut donc que les données de hauteur d'eau issues de la modélisation hydraulique n'expliquent pas à elles seules le coût des dommages. Ces analyses de la corrélation des coûts des dommages avec la hauteur d'inondation provenant de différentes sources d'information confirment que la dispersion des données ne provient pas seulement de l'incertitude sur la mesure de la hauteur d'eau, mais du fait que d'autres paramètres sont nécessaires pour pouvoir expliquer davantage les coûts des dommages observés.

La bonne corrélation des hauteurs d'eau modélisées avec des hauteurs d'eau mesurées par les experts d'assurance ou lors des retours d'expérience souligne en revanche la possibilité d'utiliser des hauteurs d'eau modélisées dans le cadre de modélisations *ex ante* des

dommages. Ici, l'utilisation du code de simulation « vague à vague » SurfWB donne une meilleure concordance avec les observations que la simple projection de valeurs de hauteur d'eau par interpolation sous SIG, méthode couramment employée dans les études d'évaluations *ex ante* de l'aléa.

2.3.2. La vitesse du courant et de montée de l'eau

Outre la hauteur d'eau, la modélisation hydraulique fournit de nouveaux paramètres à l'analyse des coûts : la vitesse du courant, qui peut jouer un rôle sur les dommages de par la pression hydrodynamique qu'elle entraine, et la vitesse de montée de l'eau, qui peut jouer un rôle quand elle est suffisamment élevée pour créer un différentiel de niveau entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment, si les niveaux n'ont pas le temps ou la possibilité de s'équilibrer par infiltration. Dans ce cas, des dommages aux huisseries des portes et des fenêtres peuvent être constatés, voire à la structure des bâtiments pour des différentiels de niveau très importants.

Pour le site de Gâvres, la vitesse du courant est significativement importante (supérieure à 1 m/s) pour seulement deux dossiers, qui ont cependant des faibles coûts de dommages ; cela ne permet donc pas de vérifier, dans ce cas précis, le rôle de la vitesse du courant dans la production de dommages. De manière générale, les processus dynamiques ne semblent pas avoir joué de rôle important pour les habitations inondées par le franchissement de la digue de la grande plage. Ces dernières étant situées à une certaine distance de la digue, elles ont été inondées par le ruissèlement et l'accumulation de l'eau au point le plus bas de l'ancienne lagune, sans être atteintes par des vagues ou par un fort courant (Figure 65, page 118). Il est donc difficile d'établir une relation entre vitesse du courant et coût des dommages des habitations inondées à Gâvres.

En revanche, les chocs des vagues ont joué un rôle déterminant pour les habitations situées contre la digue de l'anse de Goërem (cf. partie I, section 5.2.1), dont les parapets et les terrasses ont subi d'importants dommages dus à l'érosion et l'affouillement des terrains. On ne retrouve pourtant pas de coûts de dommages extrêmement élevés pour ces dossiers, dans la mesure où il s'agissait uniquement de dommages aux murs de clôture et aux terrains. Ce type de dommages, pourtant spectaculaire, a donc été peu coûteux, ou n'a pas été indemnisé à la hauteur des coûts réellement supportés par les particuliers.

Pour le site des Bouchôleurs, la relation entre le coût des dommages et les vitesses du courant et de montée de l'eau reste à première vue également dispersée (Figure 106).

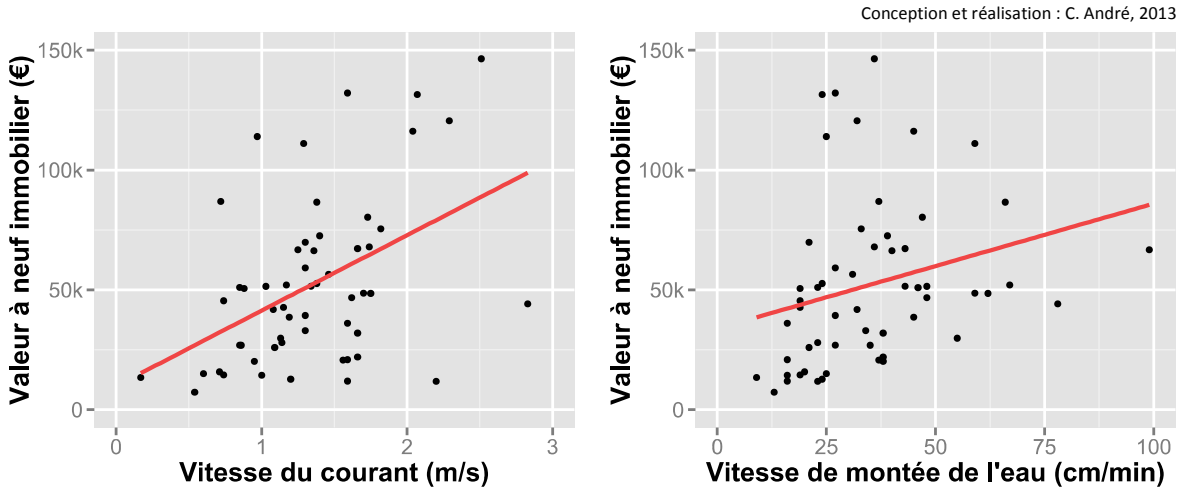


Figure 106 : Graphiques du coût des dommages immobiliers en fonction de la vitesse du courant et de la vitesse de montée de l'eau issues de la modélisation hydraulique aux Bouchôleurs.

Différents auteurs (Clausen 1989 ; Schwartz et Maiwald 2008 ; Kreibich et al., 2009 ; Pistrika et Jonkman 2010) observent une corrélation des dommages, non pas avec la vitesse du courant considérée seule, mais avec des paramètres de l'aléa composés, intégrant la hauteur d'eau et la vitesse du courant. Ces paramètres sont l' « intensité de l'inondation », la « force du courant » et l' « énergie hydraulique » (cf. partie I, section 2.2.4). Une carte de l'intensité de l'inondation (produit de la hauteur d'eau et de la vitesse du courant) est ainsi réalisée (Figure 107).

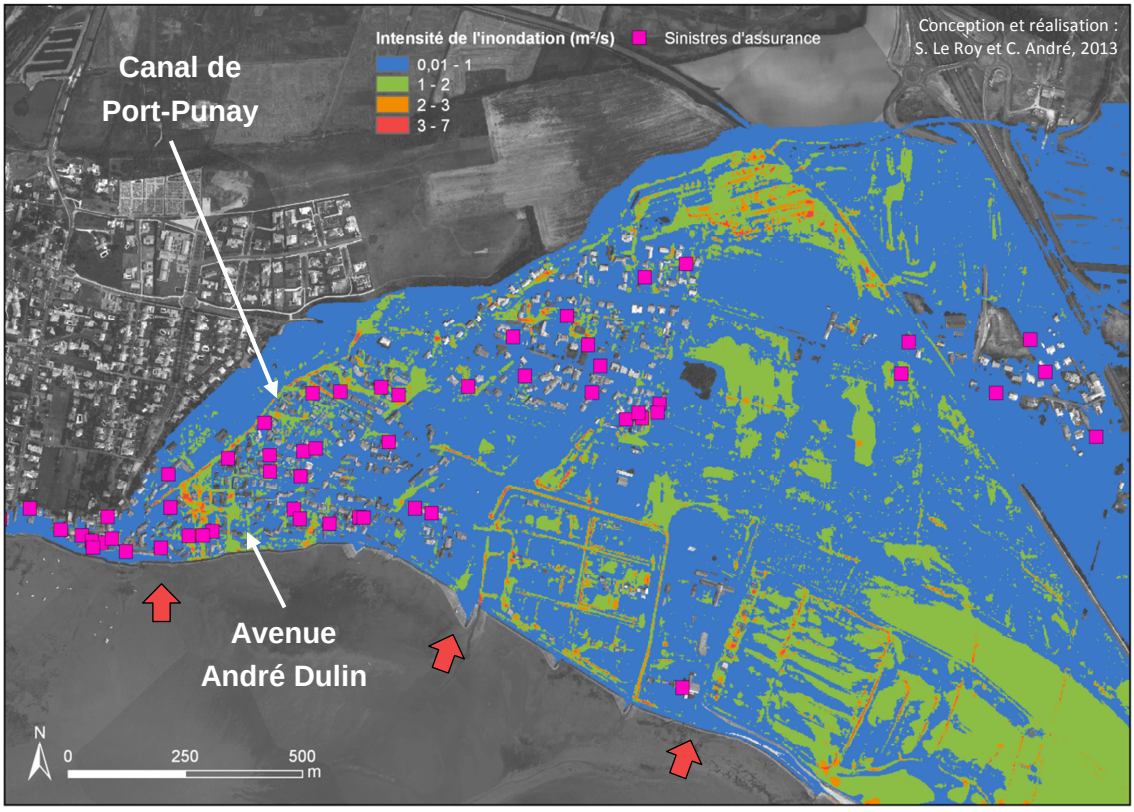


Figure 107 : Carte du paramètre « intensité de l'inondation » maximal, calculé à partir de la modélisation hydraulique aux Bouchôleurs lors de Xynthia (modélisation BRGM ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN).

Sur le site des Bouchôleurs, l'intensité de l'inondation calculée à partir de la modélisation des paramètres de l'aléa est presque toujours inférieure à 2 m/s au niveau des habitations lors de la tempête Xynthia. Au sein des zones urbanisées (hors marais et bassins ostréicoles) l'intensité de l'inondation est la plus élevée au niveau du début de l'avenue André Dulin (Figure 107), où des dommages structuraux avaient été observés sur quelques maisons lors de la mission de terrain post-Xynthia du BRGM (Pedreros et al., 2010), et le long du canal de Port-Punay, où la destruction d'une véranda liée au courant a également été observée. En dehors de ces zones, le paramètre intensité de l'inondation reste faible, et ce, même sur le front de mer du vieux port, où les quelques cas de dommages structuraux observés sont attribués aux chocs des vagues, la hauteur d'eau étant restée relativement faible.

On calcule également ce paramètre pour les dossiers de sinistres du site, qui sont représentés sur le diagramme hauteur / vitesse (Figure 108), avec les seuils de « dommages structuraux partiels » et de « destruction totale » définis par L. K. Clausen (1989) et A. K. Pistrika et S. N. Jonkman (2010) (Figure 24, page 36).

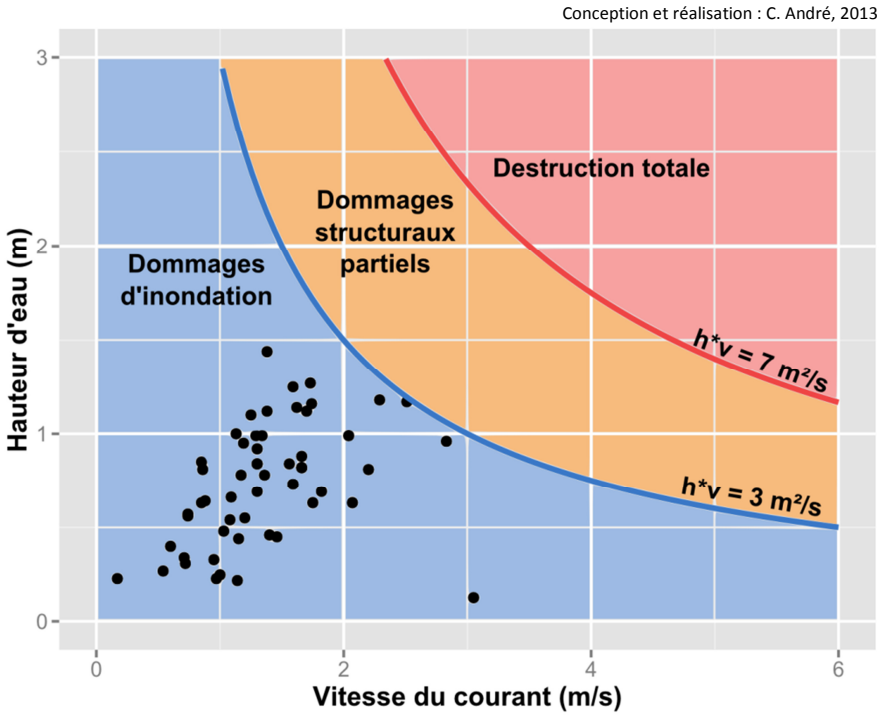


Figure 108 : Seuils des niveaux de dommages proposés par Pistrika et Jonkman (2010) en fonction du paramètre intensité de l'inondation, représentés avec la localisation des sinistres des Bouchôleurs lors de Xynthia sur le graphique hauteur d'eau / vitesse du courant.

La représentation des valeurs de l'intensité de l'inondation pour les sinistres du site montre que l'ensemble des dommages se situe dans la catégorie « dommages d'inondation », définie par L. K. Clausen (1989) sous le seuil de 3 m²/s. D'après ce critère, il est donc normal

que ces sinistres ne se caractérisent pas par des dommages à la structure des bâtiments, le seuil d'intensité nécessaire à l'observation de ce type de dommages n'étant pas atteint. Ainsi, le test de corrélation entre l'intensité de l'inondation et le coût des dommages ne montre pas de tendance nette ; en dessous du seuil nécessaire à l'observation de dommages structuraux, ce paramètre donc n'est pas plus pertinent que la simple hauteur d'eau pour expliquer le coût des dommages.

Les tests réalisés sur les autres paramètres mentionnés dans la littérature pour expliquer les dommages (la « force du courant » et l' « énergie hydraulique »), ne permettent pas non plus d'observer une relation significative avec le coût des sinistres. En effet, la force du courant (hauteur * vitesse²) est une variation de l'intensité de l'inondation donnant plus de poids à la vitesse du courant. Or, sur le site étudié, les vitesses sont faibles, ce paramètre n'explique donc pas mieux les dommages que l'intensité de l'inondation. D'autre part, l'énergie hydraulique (hauteur + vitesse² / 2 g) ne donne qu'un poids relativement faible à la vitesse du courant, l'influence de la hauteur d'eau étant prépondérante pour ce paramètre (Kreibich et al., 2009).

Appliqués à l'évènement Xynthia sur le site des Bouchôleurs, les trois paramètres utilisés dans la littérature pour exprimer l'endommagement en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse du courant se différencient peu de la hauteur d'eau, du fait des faibles vitesses considérées. Ce n'est que pour des vitesses plus élevées, non observées ici, que des dommages structuraux peuvent être imputés à la vitesse du courant. Dans l'échantillon des sinistres de Xynthia, constitué de dommages touchant principalement le second œuvre des bâtiments, la vitesse n'est donc pas un paramètre discriminant pour l'explication du coût des dommages immobiliers. Cette conclusion est en accord avec les études réalisées pour des cas d'inondations fluviales (Schwartz et Maiwald 2008 ; Kreibich et al., 2009) ou de submersions marines liées à des ouragans (Nadal, 2007 ; Nadal et al., 2010 ; Pistrika et Jonkman 2010).

Cette analyse du lien entre le coût des dommages et différents paramètres de l'aléa disponibles confirme que, sur les sites étudiés pour l'évènement Xynthia, le paramètre de l'aléa le plus corrélé au coût des dommages est bien la hauteur d'eau. La comparaison des hauteurs d'eau obtenues à partir des différentes sources d'information (rapports d'expertise, interpolation des levés du REX Xynthia et modélisation hydraulique) montre une bonne cohérence de ces trois variables entre elles, ce qui implique que les hauteurs d'eau modélisées sont pertinentes pour la construction d'un modèle d'endommagement, ainsi que pour la modélisation des dommages *ex ante*.

Cependant, au vu de la dispersion importante des points sur les graphiques de corrélation entre les différents types de hauteur d'eau et le coût des dommages, ce paramètre n'explique qu'une part des variations des coûts des dommages. Les autres paramètres de l'aléa testés pour expliquer les coûts ne se sont pas révélés pertinents, pour différentes raisons :

La durée de la submersion, utilisée comme paramètre dans plusieurs études pour la modélisation des dommages des inondations, ne semble pas jouer de rôle au sein de notre échantillon de données, ce qui signifie que ce n'est pas ce qui a guidé les experts dans le choix des éléments à remplacer suite à la submersion.

Les paramètres hydrodynamiques, tels que les chocs de vagues et la vitesse du courant, ou de la montée de l'eau, ont rarement atteint une intensité suffisante pour causer des dommages structuraux aux habitations, et ne sont donc pas corrélés au coût des dommages. Cela n'exclut pas que dans des circonstances différentes, ces paramètres de l'aléa puissent jouer un rôle, si davantage de destructions de bâtiments sont à déplorer. Bien que la tempête Xynthia soit déjà considérée comme un évènement « extrême », ces paramètres pourraient devenir significatifs dans le cas de dommages liés au phénomène de rupture de digue, peu observé dans les zones urbanisées pour Xynthia.

Les seuls paramètres de l'aléa ne suffisent donc pas à d'expliquer les coûts des dommages. Cela est dû au fait que les dommages dépendent également des caractéristiques des enjeux affectés, comme démontré à l'échelle régionale (cf. partie III). Il reste donc à identifier quels paramètres caractérisant les enjeux, parmi ceux disponibles à l'échelle locale, peuvent permettre d'expliquer les dommages, et seraient donc pertinents pour un modèle multivarié de prédiction des coûts, intégrant à la fois des paramètres sur l'aléa et sur les enjeux exposés.

3. Coûts des dommages en fonction des paramètres des enjeux

Les paramètres des enjeux qui ont une influence sur le coût des dommages sont de deux types : les paramètres liés à la vulnérabilité des enjeux, au sens physique, c'est-à-dire à leur propension à subir des dommages, et les paramètres liés à la « valeur » des enjeux, c'est-à-dire le « potentiel de dommage » maximal, atteint dans le cas où le bâtiment est complètement détruit (cf. partie III, section 3.2).

De manière à caractériser l'endommagement seulement par les paramètres de vulnérabilité des enjeux et indépendamment de leur valeur, nombre d'études ont produit des courbes d'endommagement relatives plutôt qu'en valeur absolue de dommages (Messner et al., 2007 ; Merz et al., 2010). De même, les modèles d'évaluation des dommages basés sur des fonctions d'endommagement regroupent souvent les enjeux en différentes classes selon des critères liés à leur vulnérabilité à l'aléa considéré. Pour les habitations (logements individuels), sont souvent utilisés comme critères de vulnérabilité la présence ou l'absence d'étage, de sous-sol, les types de matériaux de construction, l'âge du bâtiment, etc., afin d'ajuster pour chacune de ces classes une fonction d'endommagement différente et ainsi être plus précis dans la prédiction des dommages.

Dans le cas présent, la classification des dossiers de sinistres en sous-groupes en fonction des caractéristiques des habitations affectées est peu adaptée, du fait du nombre limité de données détaillées (242 dossiers Xynthia pour le bâti principal) et du nombre important d'informations non renseignées dans la description des biens endommagés. À défaut, chacun des critères est analysé, afin de déterminer s'il contribue à l'explication des dommages et si l'on doit envisager ou non de l'intégrer dans un modèle multivarié de prédiction des dommages.

3.1. Paramètres des enjeux issus des données d'expertise d'assurance

3.1.1. Les matériaux de construction

Le premier paramètre de vulnérabilité intrinsèque des bâtiments, puisque les dommages sont les coûts de remplacement des éléments endommagés, concerne la sensibilité physique des matériaux de construction à la submersion (Salagnac, 2006).

Au sein des rapports d'expertise d'assurance, les informations concernant les matériaux de construction des bâtiments sont finalement rarement indiquées, ce point n'étant pas exigé par l'assureur. Les matériaux sont en général liés à l'âge des bâtiments, mais là encore,

l'information est très peu mentionnée par les experts. De plus, les dommages observés étant essentiellement liés au second œuvre (Figure 96, page 163), les informations nécessaires à qualifier la vulnérabilité physique des bâtiments à la submersion concernent ces éléments : type de cloisons et d'isolation, de revêtements de sol (carrelages, moquettes, etc.), de menuiseries extérieures (bois, PVC, aluminium, présence de baies vitrées, de vérandas, etc.), spécificités des réseaux électriques, et de chauffage (central, convecteurs, chauffage au sol, etc.).

Ces caractéristiques, qui peuvent parfois expliquer des dommages particulièrement élevés, ne peuvent être analysées qu'au cas par cas, pour les quelques dossiers pour lesquels elles sont renseignées. Au final, si la présence d'une véranda ou d'un chauffage au sol sont deux cas pour lesquels les coûts des dommages sont élevés, il est impossible de déterminer une relation statistique entre ces éléments et le coût des dommages, au vu du trop faible nombre d'observations. Ce qui ressort de l'analyse des coûts détaillés est que même sans ces éléments, qui peuvent être considérés comme des facteurs aggravants, les coûts de remplacement du second œuvre sont importants, et ce même pour des faibles hauteurs d'eau. Pour tenter d'expliquer davantage les coûts de dommages observés, nous nous tournons donc vers des indicateurs de la valeur totale et de la taille des habitations (cf. partie III, section 3.2).

3.1.2. Le capital mobilier assuré

Comme indiqué dans la partie précédente de cette thèse, puisqu'il n'existe pas de base de données publique sur les coûts individuels de construction des habitations, il est nécessaire d'identifier des indicateurs de cette valeur au sein de notre base de données. Une information déjà évoquée, tirée des contrats d'assurance et renseignée dans les rapports d'expertise, est la valeur du capital mobilier assuré (cf. partie III, section 3.2). On tente donc de corréler cette valeur au coût des dommages afin de déterminer un taux d'endommagement des biens, approche classique parmi les fonctions d'endommagement existantes (Figure 109).

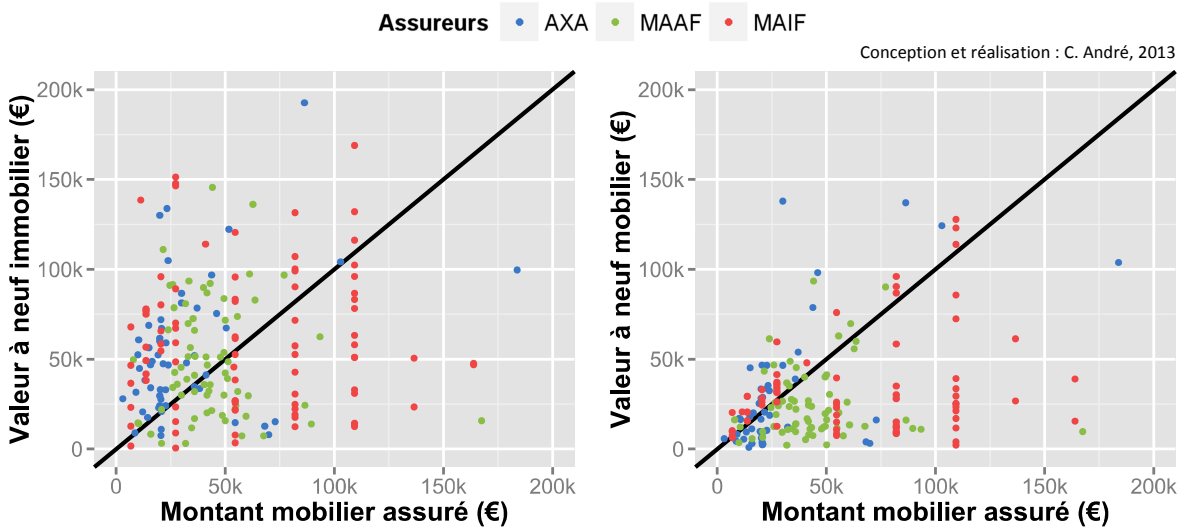


Figure 109 : Graphiques du coût des dommages immobiliers et mobiliers en fonction du montant mobilier assuré pour Xynthia.

La relation entre le capital mobilier assuré et le coût des dommages, aussi bien immobiliers que mobiliers, se révèle complexe. En effet, la façon dont le montant assuré est calculé est différente selon les assureurs : elle fonctionne soit selon une déclaration de l'assuré de la valeur de ses biens (AXA et MAAF), soit selon le choix de paliers de plafonnement d'indemnisation par l'assuré (MAIF).

L'ajustement du capital mobilier assuré au coût des dommages est logiquement meilleur avec les coûts au mobilier qu'avec ceux à l'immobilier (Figure 109). La valeur de remplacement des éléments mobiliers suite au sinistre est normalement comprise entre zéro et la valeur du plafond d'indemnisation définie dans le contrat d'assurance, en fonction de l'importance des dommages. Cependant, on voit sur le graphique de droite que pour certains sinistres, la valeur à neuf de remplacement des éléments mobiliers évaluée par l'expert dépasse le plafond d'indemnisation fixé dans le contrat. Dans ce cas, le capital mobilier a été sous-évalué. Des cas de surévaluation du capital mobilier existent également : dans ce cas, les dommages mobiliers n'atteignent pas le plafond d'indemnisation, même si l'habitation est complètement inondée. Comme nous ne disposons que du capital mobilier assuré et pas du capital immobilier, l'analyse du coût des dommages aux éléments immobiliers en fonction de ce paramètre est nécessairement imprécise. Dans ce cas, la majorité des dommages liés aux éléments immobiliers ont un coût supérieur au capital mobilier assuré. En raison de ces incertitudes, le capital assuré mobilier ne constitue pas un indicateur efficace pour évaluer la valeur des biens endommagés.

3.1.3. La surface habitable et le nombre de pièces du bâtiment

Deux autres indicateurs relatifs à la taille des biens affectés sont la surface habitable et le nombre de pièces principales[42] des habitations, disponibles dans la plupart des rapports d'expertise pour la tempête Xynthia. Ces paramètres, déjà analysés à l'échelle régionale, sont plus précis au sein des rapports d'expertise, qu'au sein des listings des sinistres. L'information de la présence ou de l'absence d'étage, ainsi que des plans des habitations sinistrées, permettent de connaitre la surface habitable et le nombre de pièces principales au rez-de-chaussée (RDC) et à l'étage des maisons.

Les hauteurs d'eau observées dans les habitations lors de la tempête Xynthia atteignant au maximum 2,5 m, les étages des bâtiments n'ont jamais été affectés. La comparaison est donc faite ici entre le coût des dommages et les surfaces habitables (et le nombre de pièces principales) du rez-de-chaussée des habitations, afin de rapporter le coût des dommages à la « surface exposée » et au « nombre de pièces exposées » de l'habitation (Figure 110).

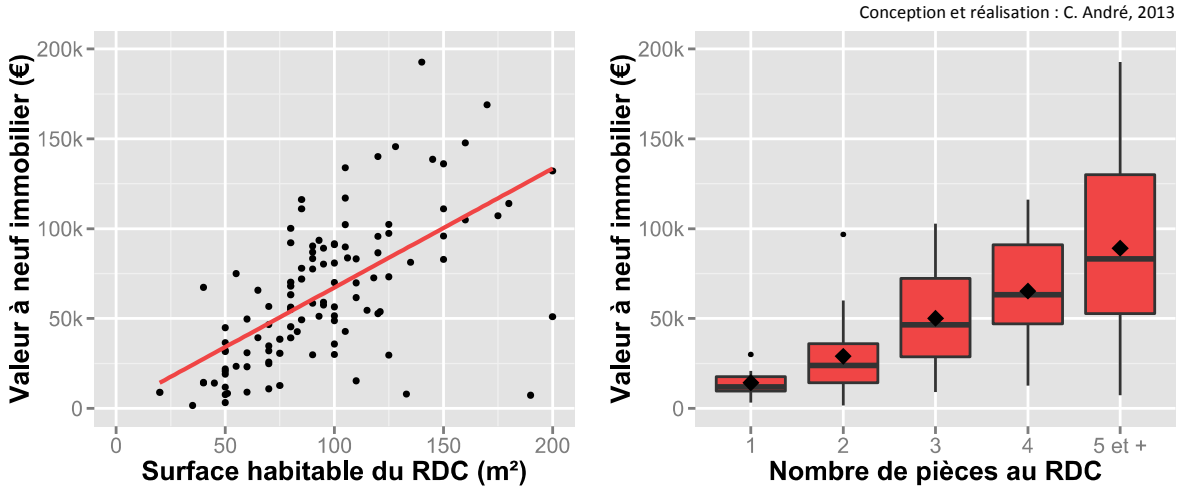


Figure 110 : Graphiques du coût des dommages immobiliers en fonction de la surface habitable et du nombre de pièces principales du rez-de-chaussée pour Xynthia.

Le coût des dommages immobiliers est très corrélé à ces deux paramètres, ce qui confirme les résultats formulés à l'échelle régionale, et le fait qu'il est important de se référer à la surface exposée à l'aléa plutôt qu'à la surface totale des bâtiments possédant un étage.

Afin d'approcher une expression des dommages en termes de taux d'endommagement plutôt qu'en valeur absolue des montants de dommages, on utilise la surface habitable et le

[42] Le décompte des pièces principales d'une habitation, en vigueur au sein des assurances, ne correspond pas exactement à la norme définie par l'INSEE, mais plutôt à celle utilisée par les agences immobilières : seules les pièces de vie (séjours, chambres) sont comptabilisées, les cuisines et salles de bains ne comptent pas comme pièce principale, mais les grands séjours (de plus de 40 m²) peuvent être comptabilisés comme deux pièces.

nombre de pièces du rez-de-chaussée comme indicateurs de la taille des biens. Le coût des dommages immobiliers rapportés à la surface et au nombre de pièces est calculé, et représenté en fonction de la hauteur d'eau (Figure 111). En effet, la hauteur d'eau étant le paramètre de l'aléa le plus important pour l'explication des coûts des dommages, il est intéressant d'afficher l'apport des variables surface et nombre de pièces à l'explication des coûts, en combinaison avec la hauteur d'eau, afin de ne pas comparer les enjeux ayant été submergés par de très faibles ou de très fortes hauteurs d'eau. On raisonne donc ici en analysant la dispersion des variables coût par m² et par pièce, à « gammes de hauteurs d'eau équivalentes ».

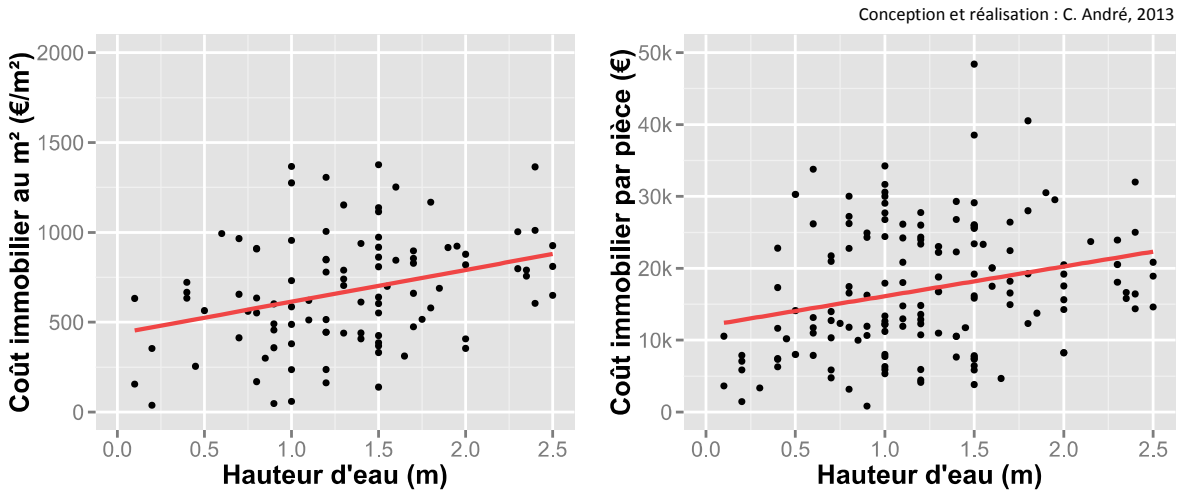


Figure 111 : Graphiques du coût des dommages immobiliers par mètre carré et par pièce en fonction du RDC en fonction de la hauteur d'eau pour Xynthia.

Grâce à ces transformations de variable, on explique mieux le coût des dommages en prenant en compte à la fois la hauteur d'eau (le paramètre de l'aléa le plus pertinent) et des indicateurs de la taille des enjeux. La dispersion des données est toujours présente, mais moins importante que celle obtenue avec la corrélation du montant absolu des dommages avec la hauteur d'eau.

3.1.4. La présence d'étage et de sous-sol

Indépendamment de la surface habitable et du nombre de pièces exposées de l'habitation, la présence d'étage ou de sous-sol sont des paramètres qui peuvent jouer sur les dommages : un bâtiment sans étage ou possédant un sous-sol peut être considéré comme plus vulnérable, car en comparaison avec un bâtiment possédant au moins un étage, davantage d'éléments sont exposés à l'inondation (les habitations de plain-pied ont souvent plus de pièces au rez-de-chaussée que les habitations à étage). L'influence de la présence d'étage et de sous-sol sur le coût des dommages immobiliers est représentée sur la Figure 112.

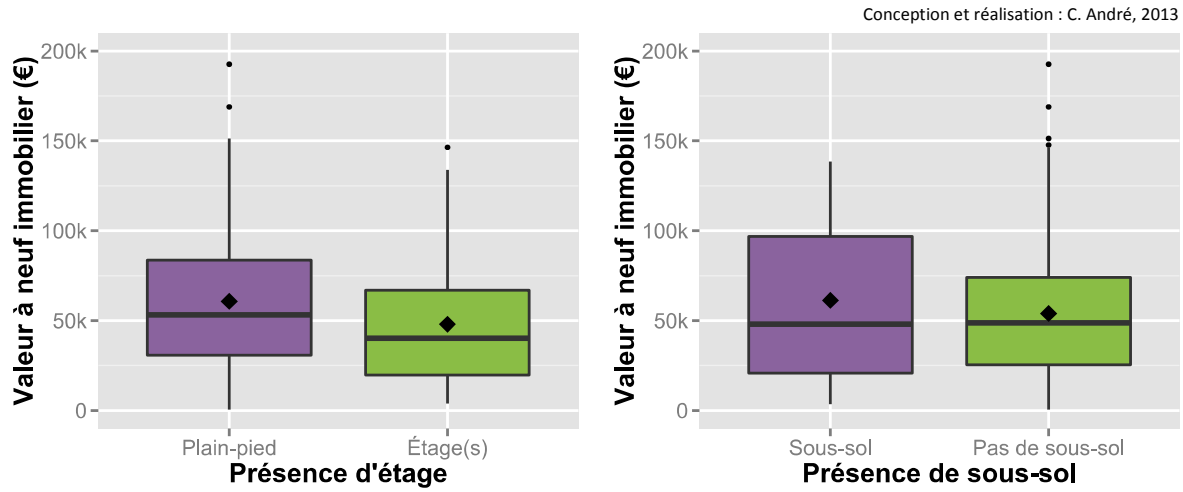


Figure 112 : Boites de dispersion du coût des dommages immobiliers en fonction de la présence d'étage et de sous-sol pour Xynthia.

Au sein de l'échantillon de données détaillées sur les habitations inondées lors de la tempête Xynthia, le coût des dommages immobiliers est en moyenne plus élevé pour les maisons sans étages, et pour celles possédant un sous-sol. De la même manière que pour les paramètres de l'aléa vus précédemment, le problème majeur pour l'utilisation de ces variables pour modéliser les dommages est le manque d'exhaustivité des informations au sein des rapports d'expertise. En effet, ces éléments ne sont pas systématiquement mentionnés par les experts, et les informations disponibles ne sont pas équivalentes pour tous les évènements : ce n'est qu'à cause du caractère exceptionnel de la tempête Xynthia que des pièces explicatives du chiffrage des dommages ont été inclues aux dossiers, tels que des plans cotés des habitations (cf. partie II, section 2.3).

Sur les 242 rapports d'expertise consultés concernant des bâtiments principaux inondés lors de Xynthia, le nombre de pièces principales du rez-de-chaussée n'est disponible que pour 173 dossiers (71 % des dossiers), et la surface habitable du rez-de-chaussée que pour 109 dossiers (43 % des dossiers). D'autres sources de données ont donc été recherchées pour mieux identifier les caractéristiques des enjeux qui influencent le coût des dommages.

3.2. Paramètres des enjeux issus de bases de données institutionnelles

3.2.1. Les statistiques communales des recensements de l'INSEE

Afin de compléter les données d'assurance sur la caractérisation des enjeux affectés par les submersions, les données issues des recensements de la population de l'INSEE ou des « fichiers fonciers » ont déjà été évoquées pour l'étude à l'échelle régionale (cf. partie III, section 3.2).

Alors que les bases de données MAJIC II et FILOCOM n'ont pas pu être accessibles dans le cadre du présent travail, les données INSEE présentent certaines limites :

- Elles ne distinguent pas la surface et le nombre de pièces au rez-de-chaussée (exposées) et à l'étage,
- En dehors des villes de plus de 10 000 habitants possédant des zones IRIS (Îlots Regroupés pour l'Information Statistique), elles sont agrégées à l'échelle communale, qui présente parfois des disparités importantes selon les quartiers (bourg / front de mer pour les communes littorales),
- Elles ne sont valables que pour les résidences principales, les résidences secondaires n'étant pas enquêtées lors des recensements, alors qu'elles représentent dans certaines communes une part très importante des habitations.

Pour toutes ces raisons, les données des recensements de l'INSEE ne sont pas adaptées à l'explication du coût des dommages sur des bâtiments individuels, et elles ne seront pas utilisées dans cette thèse à l'échelle locale.

3.2.2. L'emprise au sol des habitations

Par ailleurs, les bases de données géographiques de l'IGN (la BD TOPO®[43] et la BD PARCELLAIRE®[44]) permettent d'approcher la superficie au sol des habitations (Figure 113). Ces bases de données vectorielles ont l'avantage de permettre, à l'aide d'un logiciel de SIG, le calcul des superficies de chaque bâtiment, en particulier pour les maisons individuelles (les logements collectifs étant représentés comme un seul polygone dans les deux bases de données).

[43] http://professionnels.ign.fr/bdtopo
[44] http://professionnels.ign.fr/bdparcellaire

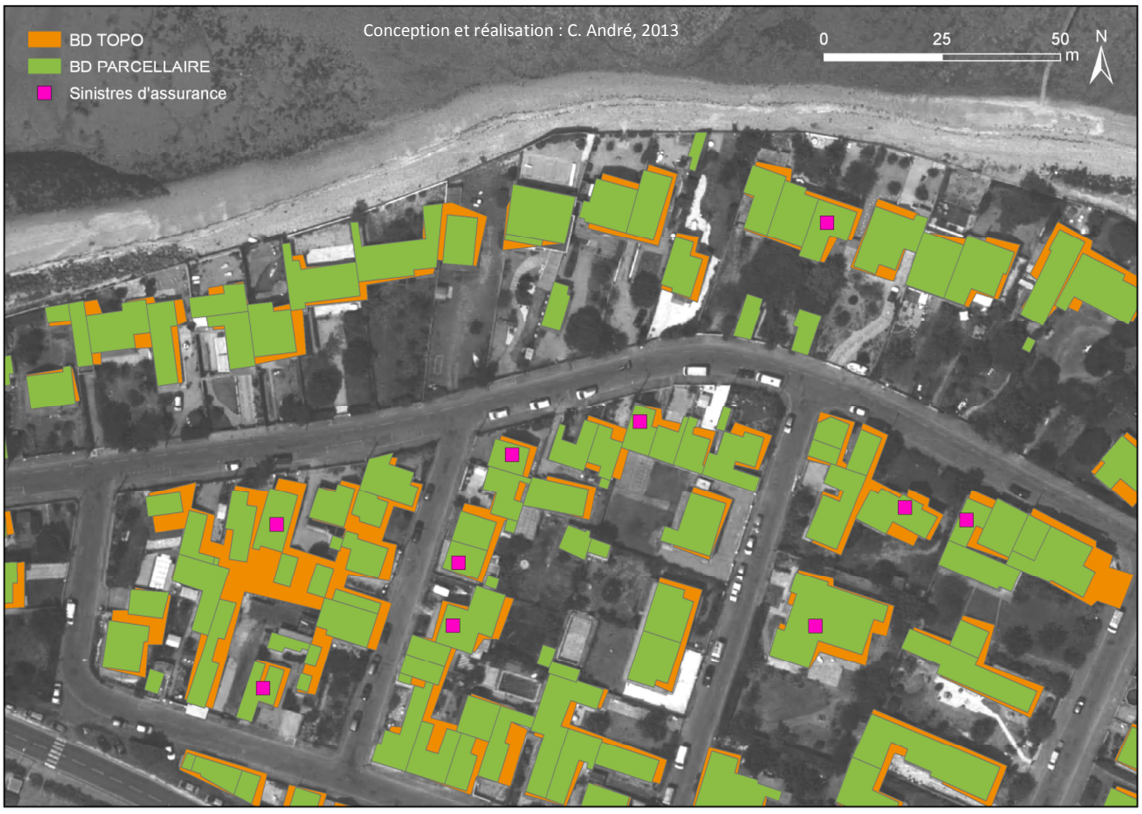


Figure 113 : Illustration de l'emprise des bâtiments d'après la BD TOPO® et la BD PARCELLAIRE® de l'IGN à Fouras, avec des sinistres d'assurance localisés à la référence cadastrale (fond orthophoto BD ORTHO® IGN).

La BD PARCELLAIRE® est plus précise que la BD TOPO® en termes de surface au sol. En effet, pour les zones à forte densité d'urbanisation, La BD PARCELLAIRE® différentie chaque propriété, alors que la BD TOPO® représente les bâtiments accolés sous forme de polygones uniques (Figure 113). En revanche, la BD TOPO® possède un attribut sur la hauteur des bâtiments à partir duquel on peut déduire approximativement le nombre d'étages. Dans les communes où le cadastre n'est pas encore vectorisé, elle est par ailleurs la seule source disponible.

Pour le présent travail, pour un maximum de précision, les superficies des maisons dans les communes ne possédant pas de BD PARCELLAIRE® à jour ont été numérisées à l'aide de photos aériennes récentes, et les dossiers de sinistres non localisés à la parcelle ont été si nécessaire recalés à la main après un contrôle des adresses lors de visites de terrain. Cette procédure a permis d'acquérir la superficie au sol pour l'ensemble des habitations de la base de données détaillée des sinistres (de niveau 2) de Xynthia.

Il faut néanmoins souligner que la superficie obtenue n'est pas équivalente à la Surface HABitable (SHAB) du rez-de-chaussée des habitations, mais à l'emprise au sol réelle des bâtiments, appelée la Surface Hors Œuvre Brute (SHOB) du rez-de-chaussée. Cette surface

comprend, contrairement à la SHAB, l'épaisseur des murs, les cages d'escalier, les surfaces de hauteur sous-plafond inférieures à 1,8 m, les débordements de toit, et la surface des garages accolés (Figure 114).

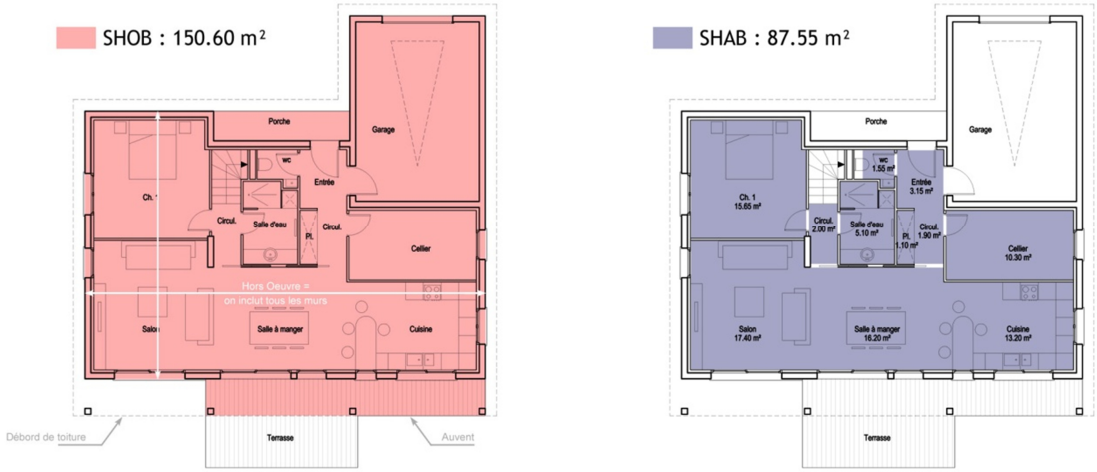


Figure 114 : Illustration des différences de superficie entre la SHOB et la SHAB[45].

Le croisement de ces deux informations pour l'ensemble des dossiers de sinistres est réalisé sur la Figure 115.

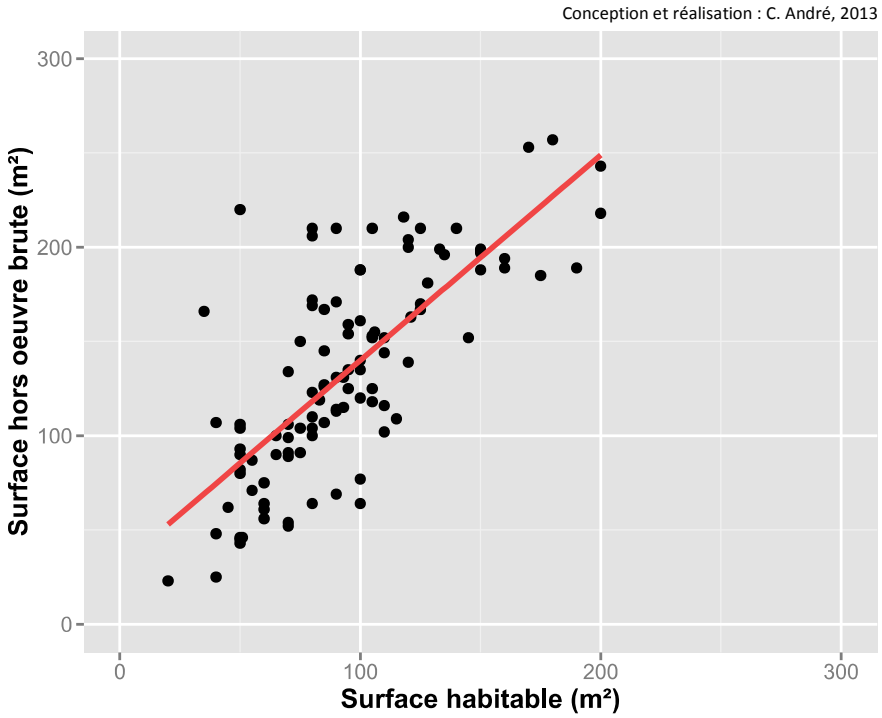


Figure 115 : Graphique de la relation entre la SHOB issue des polygones de la BD PARCELLAIRE® et la SHAB du RDC issue des rapports d'expertise des sinistres pour Xynthia.

[45] http://www.moinsde170.com/blog/shob-shon-shab-en-images

La corrélation des deux variables est relativement bonne (R^2 de 43 %) et indique que les surfaces hors œuvre brutes sont toujours supérieures aux surfaces habitables du rez-de-chaussée des bâtiments. L'équation de la régression linéaire résultante : $\mathrm{SHOB} = 1.14 * \mathrm{SHAB} + 30.51$ permet de convertir les valeurs d'une variable vers l'autre. On peut interpréter la pente de la droite, comme expliquant les différences entre les deux mesures de surface proportionnelles à la surface (comme l'épaisseur des murs et les débordements de toit) alors que l'ordonnée à l'origine explique les différences entre les deux mesures de surface ne dépendant pas de la surface elle-même (comme le fait qu'un garage accolé est compté dans la SHOB et pas dans la SHAB ; la valeur d'environ 30 m² que donne l'équation est cohérente avec la superficie moyenne des garages issue des plans disponibles).

La SHAB est donc calculée à partir de la SHOB à l'aide de la formule : $\mathrm{SHAB} = (\mathrm{SHOB}-30.51)/1.14$, complétant ainsi les valeurs manquantes de surface habitable du rez-de-chaussée dans la base de données des sinistres. La surface habitable peut donc être collectée individuellement pour chaque bâtiment à partir des données de l'IGN et d'un SIG. Il n'existe pas, en revanche, de base de données géographique équivalente renseignant le nombre de pièces principales.

Parmi les indicateurs de la taille des logements et de la vulnérabilité des habitations à la submersion marine introduits pour expliquer les coûts des dommages, la surface habitable et le nombre de pièces principales, ainsi que la présence d'étage et de sous-sol, sont des variables à prendre en compte pour réduire la dispersion des coûts des dommages observés lors de la tempête Xynthia. La surface habitable exposée a d'ailleurs une corrélation avec le coût des dommages immobiliers plus forte que la hauteur d'eau elle-même, cette variable apporte donc une explication conséquente de la dispersion des coûts des dommages.

Les variables surface habitable et nombre de pièces principales sont liées, mais n'apportent pas tout à fait la même information : tandis que la surface au sol renseigne directement l'étendue des revêtements de sol, le nombre de pièces est davantage lié à la surface des cloisons de l'habitation, corps d'état représentant la part la plus importante du coût des dommages lors d'une submersion marine. Les deux informations sont donc complémentaires et sont des indicateurs potentiellement intéressants pour la construction d'un modèle multivarié d'évaluation des dommages.

Aucune des variables analysées jusqu'à présent n'est cependant un indicateur parfait de la valeur totale des habitations, car d'autres critères que la seule taille du bâtiment interviennent dans son évaluation. En effet, différents paramètres peuvent jouer un rôle sur les coûts de construction du bâti et sa vulnérabilité à la submersion, tels que, par exemple,

les matériaux et les techniques de construction de l'habitation, qui sont en général liés à l'âge des bâtiments. Ces informations ne peuvent être déduites des rapports d'expertise que pour quelques rares dossiers, et ne permettent pas une analyse statistique de ces paramètres. Aucune autre base de données accessible n'étant suffisamment détaillée sur ces critères, il a donc été entrepris d'analyser ces paramètres sur la base de photographies aériennes anciennes et d'inspections de terrain, dans le but de pouvoir évaluer les coûts de construction des habitations de notre base de données.

3.3. Caractéristiques « constructives » et chiffrage de la valeur du bâti

3.3.1. Typologie de la morphologie urbaine et de l'âge du bâti à partir de photos aériennes anciennes

La première étape de ce travail a consisté à délimiter sous SIG, au sein des communes étudiées pour l'évènement Xynthia, des quartiers de morphologie urbaine et d'âge relativement homogènes. Cette méthode, inspirée de la méthodologie d'inventaire et de caractérisation de l'habitat développée par le BRGM pour l'élaboration d'un Scénario Départemental de Risque Sismique (SDRS - Sedan et al., 2008), se base sur l'analyse diachronique de photos aériennes afin de délimiter des ensembles de bâtiments d'âge homogène, et de classer ces ensembles ou « quartiers » selon une typologie du tissu urbain qui dépend de la densité des bâtiments, de leur organisation, etc.

Pour la définition de la vulnérabilité physique à la submersion marine, les paramètres étudiés sont différents de ceux nécessaires à l'analyse du risque sismique. En aléa sismique, l'âge des quartiers est dans la mesure du possible défini en fonction de périodes caractérisées par l'abandon de certaines techniques de construction et l'application de nouvelles, liées notamment à l'évolution des règles parasismiques : cela n'est pertinent au regard du risque de submersion. La typologie des morphologies urbaines mise en place est globalement identique à celle utilisée pour le risque sismique, en dehors du fait que nos sites d'étude, la plupart ruraux, ne possèdent pas de centre-ville moderne et peu de logements collectifs. Les types de quartiers retenus ici sont donc les bourgs (anciens), les lotissements (récents), les zones d'habitats isolés plus disparates, les quartiers de bourgs « balnéaires » et les campings (Figure 116 et Figure 117).

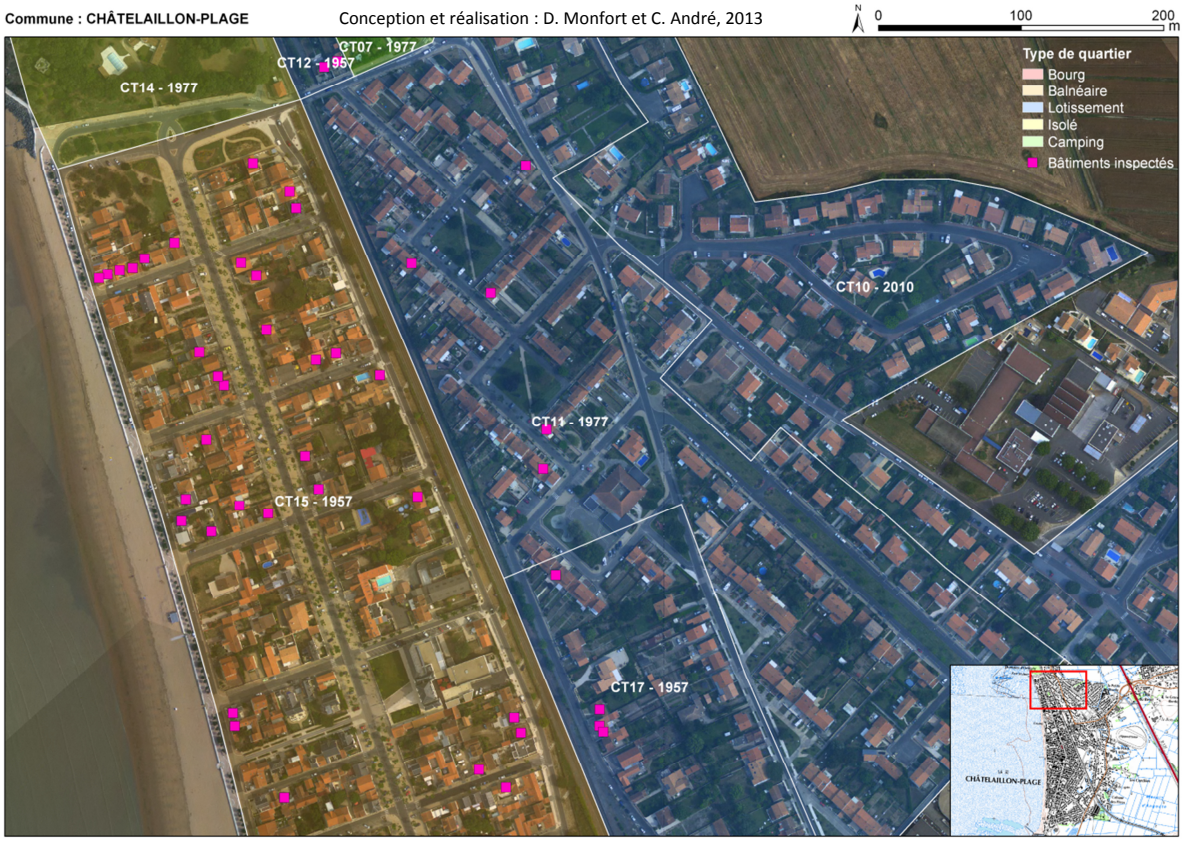


Figure 116 : Carte du découpage des quartiers de morphologie urbaine sur la commune de Châtelaillon-Plage (orthophoto BD ORTHO® IGN 2010).

Figure 117 : Carte du découpage des quartiers de morphologie urbaine sur la commune de Châtelaillon-Plage (orthophoto ancienne IGN 1957).

La délimitation des quartiers actuels a été réalisée à partir d'orthophotos récentes (BD ORTHO® de l'IGN ou orthophotos de très haute résolution acquises lors des levés LIDAR effectués juste après la tempête Xynthia). Les photos aériennes anciennes utilisées pour dater la construction des quartiers ont été recueillies auprès de l'Ifremer[46] et de l'IGN[47], sur trois plages de dates : une série dans les années 1920-1930, une série dans les années 1950 et une dernière dans les années 1970

Ce travail a la double utilité de préparer la campagne de terrain (lors de laquelle ont été observés un certain nombre de bâtiments au sein de chaque quartier délimité, afin de déterminer leurs caractéristiques de vulnérabilité) et de pouvoir ensuite extrapoler ces observations à l'ensemble des bâtiments du quartier, afin de leur attribuer des critères de vulnérabilité physique utiles à l'analyse des dommages.

3.3.2. Typologie du bâti à partir d'inspections de terrain

Lors de missions de terrain, chaque habitation inspectée a été classée dans une typologie définie et associée à une série de critères de vulnérabilité, reconnus pour être des facteurs aggravants de l'endommagement. Finalement, une estimation de la proportion des habitations de chaque type a été réalisée pour le quartier.

Pour le risque sismique, les classes de vulnérabilité EMS-98 ou RISK-UE sont en général utilisées (Grünthal et al., 1998 ; Sedan et al., 2008). Leurs critères de vulnérabilité sont principalement le type de structure (maçonnerie, béton armé, bois, etc.) ainsi que la forme et les irrégularités des bâtiments.

Pour la présente étude, la typologie des habitations a été réalisée dans le cadre d'un stage de Master 2 en architecture et urbanisme associé à la thèse (Daci, 2012), et repose sur une analyse bibliographique de l'habitat présent dans les zones littorales de Vendée et de Charente-Maritime. Basée sur des critères architecturaux et urbanistiques, elle a été élaborée notamment à l'aide de documents d'urbanisme de la ville de La Rochelle (AUP, 2009) et de documents des Conseils d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement de Charente-Maritime et de Vendée (CAUE 17, 2001 ; 2003 et 2005 ; CAUE 85, 2009).

Il apparait dans un premier temps que l'on puisse classer les habitations selon trois grandes phases d'urbanisation : une urbanisation « traditionnelle », présente jusqu'à la fin du XIXe siècle, une urbanisation « intermédiaire », présente du début du XXe siècle à la Seconde

[46] http://www.ifremer.fr/sextant/fr/web/photos-anciennes-littoral
[47] http://www.geoportail.gouv.fr/actualite/181/telechargez-les-cartes-et-photographies-aeriennes-historiques

Guerre mondiale, puis une urbanisation « moderne », depuis 1945 jusqu'à nos jours. Ces trois phases se caractérisent par l'emploi de matériaux de construction différents (de la pierre calcaire locale utilisée traditionnellement à l'emploi actuel de blocs agglomérés de béton) et une évolution de la morphologie urbaine : d'un maillage initial anarchique, on observe une densification du bâti dans les agglomérations puis une implantation récente plus homogène sous forme de lotissements.

Au sein de ces différentes phases de construction, plusieurs types de bâtiments d'habitation se sont développés. La typologie finale, représentative des bâtiments des zones littorales de Charente-Maritime et de Vendée, dépend donc de l'époque de construction, en lien avec les matériaux utilisés, ainsi que d'autres critères architecturaux ou portant sur la taille des bâtiments (Figure 78).

Figure 118 : Typologie du bâti en Charente-Maritime (photos © C. André et BRGM).

Dans le cas de l'analyse ex post des dommages des submersions de la tempête Xynthia, les bâtiments inspectés ont été sélectionnés parmi les habitations qui avaient réellement subi des dommages, en se référant aux listings d'assurance. La mission de terrain a eu lieu en avril 2012, sur les 8 communes littorales de Charente-Maritime affectées par les submersions de Xynthia déjà sélectionnées pour la collecte de données détaillées des rapports d'expertise d'assurance (cf. partie I, section 5.1.2). Chacune des habitations inspectées a été classée dans l'une des classes de la typologie du bâti, et des critères de vulnérabilité, visibles depuis l'extérieur des bâtiments, ont été renseignés. Ces critères sont ceux souvent absents des rapports d'expertise, ou susceptibles de contribuer à l'explication des dommages : présence d'étage, de sous-sol, surélévation du plancher du rez-de-chaussée, matériaux de construction (époque), type de menuiseries extérieures, présence de baie vitrée/véranda, présence de garage, d'annexes, de terrasse, de piscine, présence de jardin, type de mur et/ou de clôture, etc.

Les nouvelles données ainsi collectées permettent l'analyse statistique de la représentativité des types de bâti parmi les habitations inondées lors de Xynthia. Sur les 385 bâtiments endommagés par la submersion qui ont été inspectés, 44 % se situent dans des quartiers de type « lotissement », 26 % dans des quartiers « balnéaires », 19 % dans des « bourgs anciens » et 11 % dans des zones d' « habitats isolés ». Les communes présentant le plus de sinistres dans les quartiers de type lotissement sont Aytré (90 %), Angoulins (88 %), les Bouchôleurs (69 %) et la Couarde-sur-Mer (57 %). Les communes de Fouras et de Châtelaillon-Plage ont la majorité de leurs habitations sinistrées dans des quartiers de type « balnéaire » (85 et 63 %), tandis qu'à Charron, 53 % des sinistres ont lieu dans des quartiers de type « habitats isolés ». Enfin, à la Flotte, 87 % des sinistres ont lieu dans des quartiers de type « bourg anciens » : on a donc une majorité de sinistres dans un type de morphologie urbaine tout à fait différent pour cette commune.

Le type de bâti le plus représenté parmi les habitations sinistrées, en lien avec le type de quartier, est, sans surprise, le « pavillon moderne » (près de 40 %) pour les communes d'Angoulins, d'Aytré, des Bouchôleurs, de Charron et de la Couarde-sur-Mer (les deux dernières possèdent également un nombre de maisons rurales non négligeable). Les maisons sinistrées de la commune de Châtelaillon-Plage sont, pour la majorité, des maisons basses et des villas balnéaires, alors que Fouras possède deux fois plus de villas balnéaires et modernes que de pavillons modernes sinistrés. Enfin, la Flotte, qui a encore une fois un profil tout à fait différent, a une majorité de sinistres concernant des maisons rurales et des maisons de bourg.

La mission de terrain révèle également que dans l'échantillon d'habitations sinistrées de ces 8 communes, 60 % ne possèdent pas d'étage (c'est le cas pour 74 % des pavillons modernes) et 92 % ne possèdent pas de sous-sol, ce qui confirme les informations issues des rapports d'expertise. Les types de bâti possédant les plus grandes emprises au sol déduites de la BD PARCELLAIRE® de l'IGN, sont les villas modernes (180 m²), tandis que les pavillons modernes ont en moyenne une emprise de 135 m². Les maisons rurales, basses, de faubourg et sur garage ont une superficie comprise entre 105 et 120 m², les maisons de bourg et les villas balnéaires (le plus souvent à étage) font en moyenne 95 m², et les maisons de vacances 60 m².

La typologie des quartiers et du bâti est ensuite représentée sur le graphique de corrélation entre le coût des dommages des habitations inondées et la hauteur d'eau, afin d'évaluer la relation entre les caractéristiques des enjeux et ces deux paramètres (Figure 119 et Figure 120).

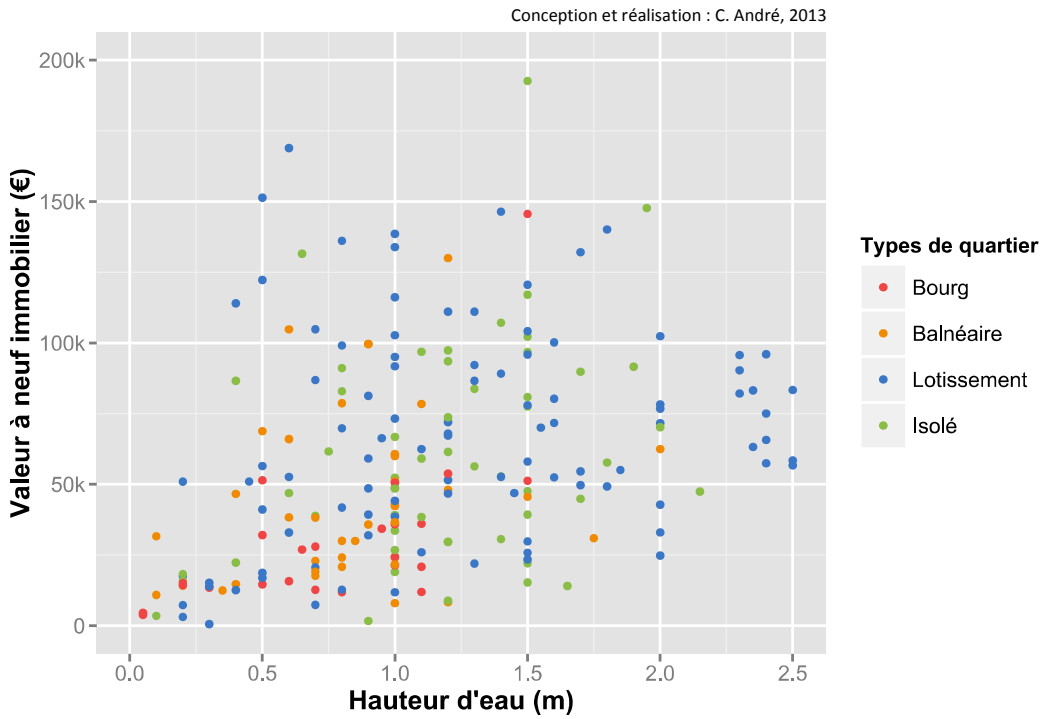


Figure 119 : Graphique du coût des dommages immobiliers en fonction de la hauteur d'eau et du type de quartier pour les sinistres de Xynthia.

À part quelques exceptions, les sinistres des quartiers les plus anciens, de type « bourg » et « balnéaire », sont caractérisés par des hauteurs d'eau et des coûts plus faibles que les sinistres qui ont lieu dans les quartiers récents de type « lotissement » ou « habitats isolés ». C'est dans ces derniers quartiers que les sinistres sont les plus nombreux et les plus coûteux.

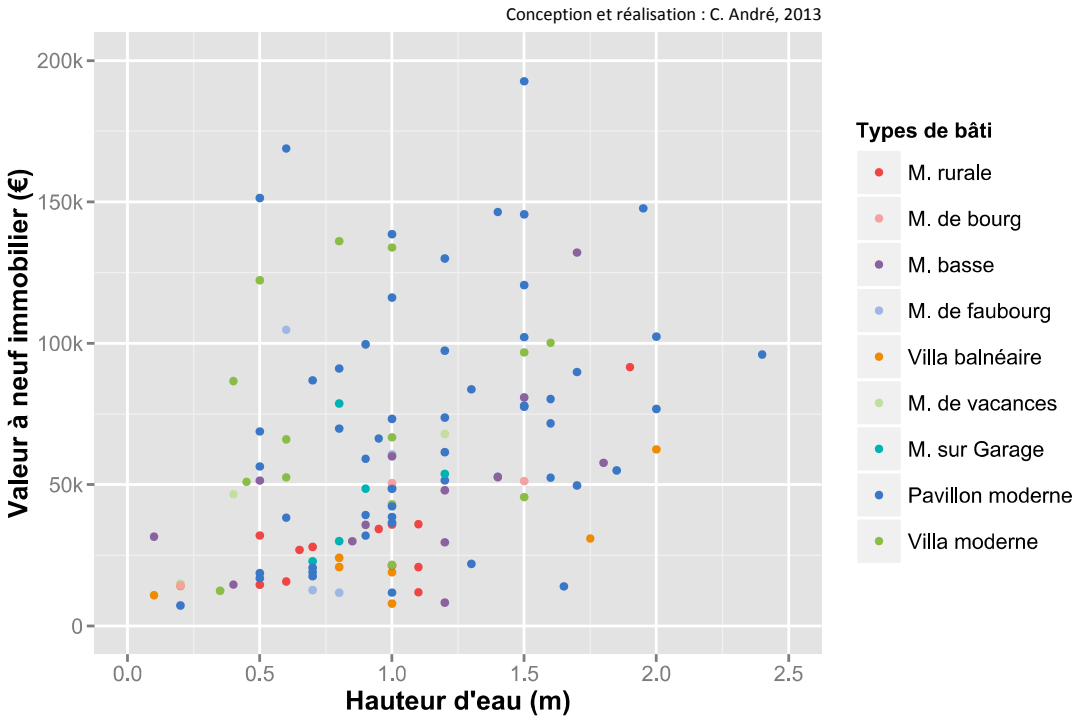


Figure 120 : Graphique du coût des dommages immobiliers en fonction de la hauteur d'eau et du type de bâti pour les sinistres de Xynthia.

Il ressort également que le pavillon moderne (le type de bâti le plus représenté) est présent dans toutes les gammes de hauteur d'eau et de coûts. Parmi les autres types de bâtiments de l'époque moderne, les maisons de vacances et les maisons sur garage ont des coûts de dommages situés dans la fourchette basse, alors que les villas sont plutôt associées à des coûts élevés, en particulier dans les gammes de hauteurs faibles (entre 0,5 et 1 m). Les bâtiments anciens (maisons rurales, basses, de faubourg, et villas balnéaires) sont de manière générale situés dans des zones inondées par des hauteurs d'eau moins importantes, et associées à des coûts plus faibles que la moyenne des sinistres.

Le type de quartier et l'âge des bâtiments, par classes d'époques de construction, semblent donc avoir un impact sur le coût des dommages, les bâtiments récents ayant des coûts plus importants que les anciens. L'âge de construction exprime en effet la « modernité » des éléments endommagés, notamment du second œuvre, qui est elle-même liée à leur coût de remplacement et à leur vétusté. Cependant, les différents types de quartiers et de bâti n'ont pas été exposés aux mêmes hauteurs d'eau lors de la tempête Xynthia.

Les informations caractérisant le bâti recueillies par l'analyse diachronique de photos aériennes et par inspection de terrain, indiquent que les quartiers de type « lotissement » et les habitations de type « pavillon moderne », sont de loin les plus représentées dans les zones affectées par les submersions de Xynthia. La majorité de ces bâtiments sont des habitations de plain-pied, ce qui les rend particulièrement dangereuses pour leurs habitants lors de submersions marines rapides, comme cela a été le cas pour Xynthia, en l'absence d'alerte adaptée et de consignes d'évacuation, qui a entrainé le drame humain que l'on connait.

De plus, ces données permettent également de démontrer que la morphologie urbaine et architecturale a une influence sur les montants d'indemnisation des dommages : l'endommagement plus important des bâtiments construits ces dernières décennies dans des lotissements s'explique donc par la combinaison de critères de vulnérabilité exacerbés (matériaux de construction plus sensibles à l'inondation, bâtiments de plain-pied et de grande taille), et d'une exposition plus forte à l'aléa. Ces éléments feront donc partie des variables utilisées lors de l'élaboration de modèles d'endommagement multivariés.

3.3.3. Chiffrage du coût de construction des habitations

L'étape suivante, réalisée dans le cadre du stage d'Houcine Daci, a consisté à réaliser, sur la base de la typologie du bâti et des informations acquises sur de terrain, des chiffrages du coût de construction de modèles d'habitations représentatifs des départements de Vendée et de Charente-Maritime, afin de pouvoir calculer le taux d'endommagement des habitations par le rapport du coût des dommages sur la valeur constructive des bâtiments sinistrés par Xynthia (Daci, 2012).

Le chiffrage a été réalisé à partir de la base de données de prix unitaires du bâtiment Batiprix© 2010[48]. Cette base de données ne référençant que des techniques et des matériaux de construction actuels, les modèles réalisés ont donc été établis pour des habitations « modernes », typologie du bâti la plus représentée parmi les habitations sinistrées. Le chiffrage a été réalisé pour sept modèles d'habitations : une maison de vacances, une maison sur garage, quatre pavillons modernes et une villa moderne (Figure 121).

[48] http://www.batiprix.com

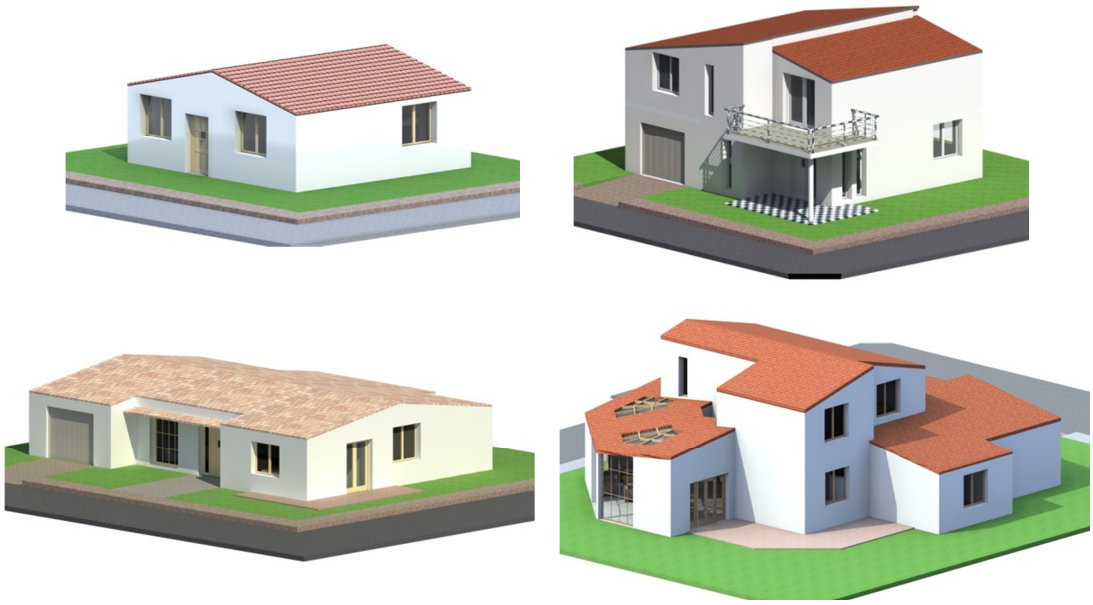


Figure 121 : Illustration de quatre des modèles d'habitations mis en place : une maison de vacances, une maison sur garage, un pavillon moderne et une villa moderne (Daci, 2012).

Pour chaque modèle, la surface habitable, la présence d'étage et de garage, ainsi que le nombre de pièces principales et leur type, ont été définis à partir des statistiques régionales de l'INSEE, des observations de terrain et des éléments présents dans les rapports d'expertise les plus complets. Au vu du très faible nombre de maisons inspectées possédant un sous-sol, il a été décidé qu'aucun des modèles d'habitations ne considèrerait ce paramètre. Pour chacun des modèles d'habitations, un plan côté a été réalisé, de manière à pouvoir déterminer les dimensions de tous les éléments constructifs (Figure 122).

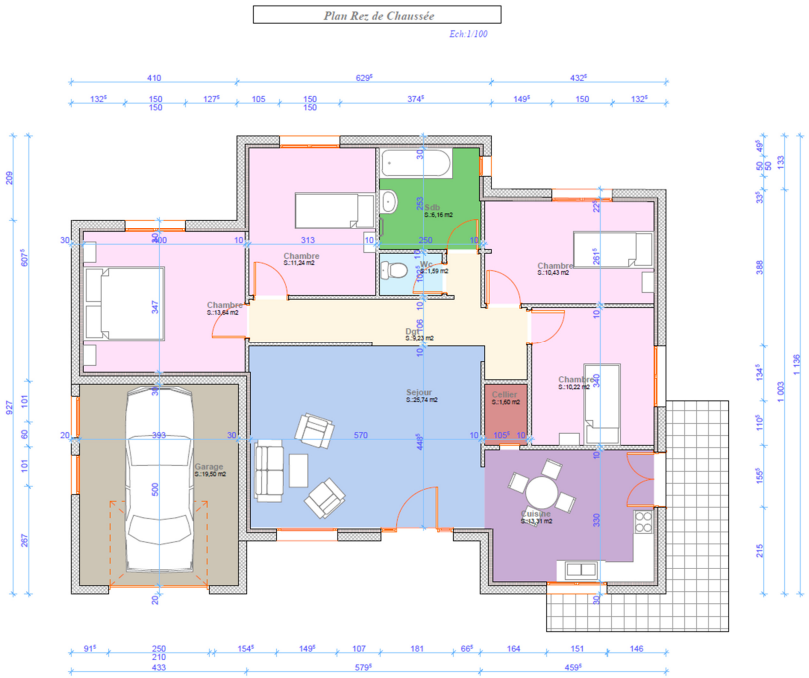


Figure 122 : Exemple de plan détaillé pour un modèle de pavillon récent de plain-pied avec garage (Daci, 2012).

Le chiffrage du coût de construction des modèles d'habitations a été réalisé selon les mêmes regroupements de corps d'états du bâtiment que les postes de dommages des rapports d'expertise d'assurance : le « gros œuvre » comprenant les lots de fondations, de structure du bâtiment, de charpente et de couverture, tandis que le « second œuvre » inclut les cloisons et l'isolation intérieure, les menuiseries intérieures et extérieures, les lots techniques (plomberie sanitaire, électricité, chauffage) et les embellissements.

Le choix des éléments de second œuvre à chiffrer a été déterminé grâce aux résultats d'une enquête sur les matériaux utilisés dans les constructions de maisons individuelles neuves dans toute la France entre 2004 et 2006, les résultats étant indiqués par région (AQC, 2009). Les coûts de construction sont évalués toutes taxes comprises (TTC), incluant la fourniture des matériaux, la main d'œuvre et la marge du constructeur (comme définis par la base Batiprix), comme s'il s'agissait de réels devis de construction, hors prix du terrain (Tableau 10).

Type de bâti	maison de vacances	maison sur garage	pavillon moderne 1	pavillon moderne 2	pavillon moderne 3	pavillon moderne 4	villa moderne	moyenne
	plain-pied	étage	plain-pied	plain-pied	étage	étage	étage	
SHAB	48 m²	111 m²	87 m²	103 m²	102 m²	112 m²	190 m²	108 m²
	3 pièces	5 pièces	4 pièces	5 pièces	4 pièces	5 pièces	6 pièces	4,5 pièces
	~~garage~~	garage	~~garage~~	garage	garage	~~garage~~	garage	
Gros œuvre	37 390 €	85 470 €	73 170 €	90 090 €	91 230 €	97 670 €	163 250 €	91 180 €
Second œuvre	34 460 €	81 860 €	54 580 €	62 530 €	57 070 €	70 790 €	115 490 €	68 110 €
Total	71 850 €	167 330 €	127 750 €	152 620 €	148 290 €	168 460 €	278 740 €	159 290 €
Total / SHAB	1 497 €/m²	1 507 €/m²	1 468 €/m²	1 482 €/m²	1 454 €/m²	1 504 €/m²	1 467 €/m²	1 483 €/m²

Tableau 12 : Résultat du chiffrage des coûts de construction des sept modèles d'habitation.

Les modèles, de caractéristiques et de tailles différentes, présentent des coûts de construction variant d'environ 70 000 € à 280 000 €, pour des surfaces habitables allant de 50 à 190 m², ce qui représente un coût de construction surfacique est à peu près équivalent pour tous les modèles, de l'ordre de 1 450 € à 1 500 € par mètre carré de surface habitable.

Selon les statistiques issues de l'Enquête sur le Prix des Terrains à Bâtir (EPTB[49]) du Ministère de l'Environnement (cf. partie III, section 3.2), le coût moyen de construction d'une maison individuelle en France en 2010 est évalué à 146 000 € pour une Surface Hors Œuvre Nette (SHON[50]) d'environ 135 m², ce qui représente un coût de 1 080 € TTC le m² de SHON (les coûts pour les régions Pays de la Loire et Poitou-Charentes étant équivalents à la moyenne nationale). Pour un rapport moyen entre la surface habitable (SHAB) et la Surface Hors

[49] http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/r/enquete-prix-terrains-batir-eptb.html
[50] http://www.moinsde170.com/blog/shob-shon-shab-en-images

Œuvre Nette (SHON) de 80 %, on peut estimer le coût de construction moyen des modèles réalisés compris entre 1 150 € et 1 200 € par mètre carré de Surface Hors Œuvre Nette, du même ordre de grandeur que celui donné par l'EPTB.

L'analyse des coûts de construction par corps d'état montre que pour tous les modèles, les lots du gros œuvre représentent plus de la moitié du coût de construction (en moyenne 57 % du total, contre 43 % pour le second œuvre). Comme indiqué en Figure 96, page 163, les sinistres analysés pour la tempête Xynthia concernent essentiellement des dommages au second œuvre (seuls 2 % des coûts sont associés à la structure des bâtiments). Le coût surfacique des dommages, même en cas de réfection complète du second œuvre, devrait donc, d'après les modèles de bâti réalisés, ne pas dépasser 50 % du coût surfacique moyen, soit un coût de l'ordre de 750 €/m² de SHAB. Dans la réalité, au sein de notre échantillon de dossiers, plus de 35 % des dossiers dépassent cette valeur, et 10 % des dossiers atteignent un coût de plus de 1 000 €/m², (Figure 111, page 185). Cela indique, soit que les coûts des dommages des dossiers les plus coûteux sont anormalement élevés, soit que les modèles d'habitations réalisés ne sont pas aptes à reproduire les caractéristiques du coût des éléments de second œuvre de ces bâtiments.

Par ailleurs, il est surprenant de constater que quel que soit la taille du bâtiment (surface et nombre de pièces) et la présence ou non d'étage ou de garage, le coût de construction surfacique est à peu près constant pour tous les modèles. Le calcul du rapport du coût des dommages par le coût de construction total du bâtiment, afin de déterminer le taux d'endommagent des habitations, n'explique donc pas mieux les dommages que le calcul du coût des dommages rapporté à la simple surface habitable (Figure 111, page 185).

Cependant, il faut rappeler que les prix unitaires choisis pour le chiffrage des modèles ne tiennent pas compte des différences de « luxe » ou de « standing » qui existent entre les habitations endommagées. En effet, les indemnisations d'assurance sont basées sur la valeur de remplacement à l'identique des éléments endommagés, et les prix des matériaux de second œuvre peuvent varier dans des proportions très importantes d'un logement à l'autre. La campagne de terrain n'a pas permis de visiter les habitations ou d'interroger les sinistrés, ce qui aurait permis de préciser les matériaux utilisés pour le second œuvre et leur valeur. Les dommages concernant principalement les éléments du second œuvre et du mobilier, les critères architecturaux et sur l'âge et la taille du bâti s'avèrent insuffisants pour réaliser une typologie des habitations permettant d'expliquer le coût des dommages. Il apparait qu'un ou plusieurs critères permettant d'évaluer la « richesse » des occupants des habitations pour définir le « standing » de celles-ci, et donc le potentiel de dommages en cas d'inondation, seraient nécessaires pour compléter cette information.

3.4. Indicateurs du standing des habitations

3.4.1. Le type d'occupation des habitations (résidences principales ou secondaires)

Le type d'occupation des habitations, en tant que résidence principale ou secondaire, a été identifié à l'échelle régionale comme un paramètre susceptible d'expliquer le coût des dommages (Figure 90, page 151). Cette information, disponible dans les rapports d'expertise consultés pour les sinistres de Xynthia, pourrait être un indicateur du « standing » des biens sinistrés (Figure 123 et Figure 124).

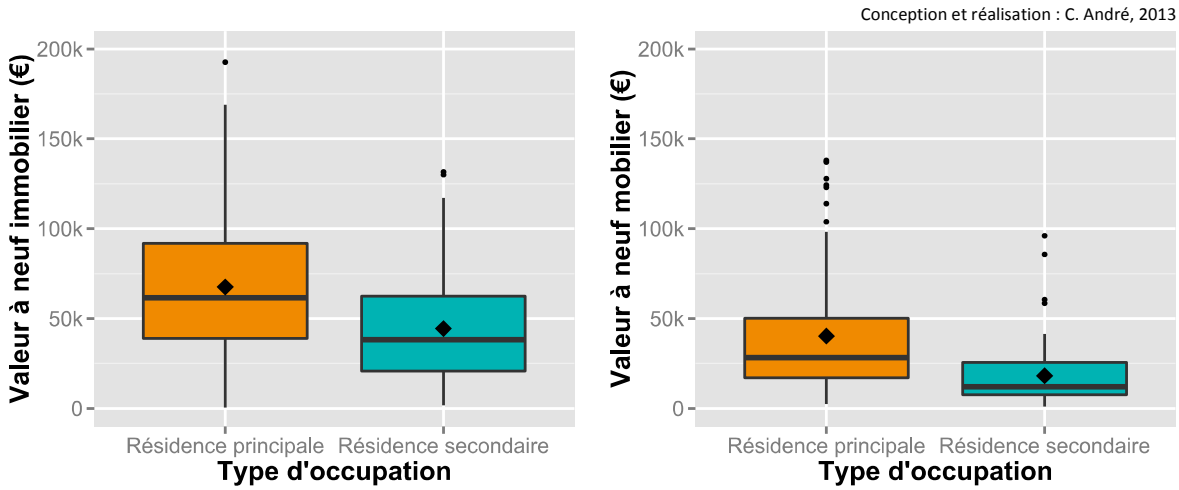


Figure 123 : Graphiques du coût des dommages immobiliers et mobiliers en fonction du type d'occupation pour Xynthia.

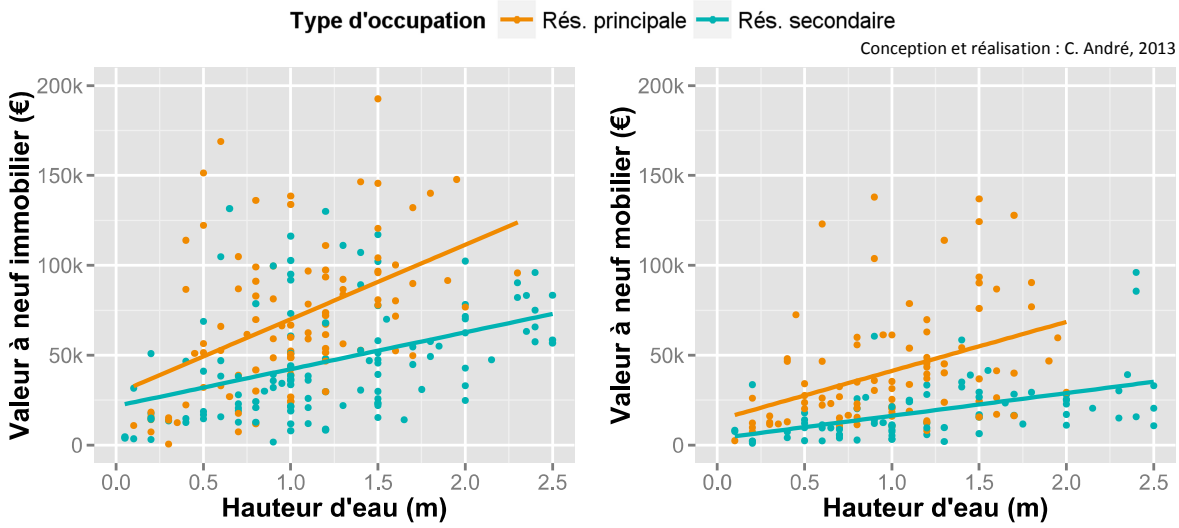


Figure 124 : Graphiques du coût des dommages immobiliers et mobiliers en fonction de la hauteur d'eau et du type d'occupation pour Xynthia.

D'après les graphiques, les dommages des résidences principales sont beaucoup plus élevés que ceux des résidences secondaires, ce paramètre semble donc avoir un impact important sur le coût des dommages, aussi bien au bâtiment qu'au mobilier.

Le type d'occupation contribue également à expliquer les différences entre indemnisations moyennes calculées à la commune (Figure 92, page 154). En effet, comme vu précédemment, les communes dont le taux de résidences secondaires est le plus élevé (la Faute, l'Aiguillon et la Tranche-sur-Mer, la Flotte, la Couarde-sur-Mer, Châtelaillon-Plage et Fouras) ont des coûts de dommages beaucoup plus faibles que les communes majoritairement constituées de résidences principales, qui sont dans l'échantillon considéré les communes de Charron, d'Aytré et d'Yves. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que les résidences principales ont généralement une surface habitable plus importante que les résidences secondaires. Une autre explication est que les résidences principales, occupées à l'année, sont vraisemblablement composées de matériaux de second œuvre plus coûteux que les résidences secondaires (notamment au niveau de l'isolation, du chauffage, etc.). Pour le mobilier, il est également logique que les résidences principales contiennent une valeur de mobilier plus importante que les résidences secondaires.

Le critère du type d'occupation permet donc de séparer en deux groupes le jeu de données et d'évaluer avec plus de précision les dommages pour chaque classe d'habitations. Ce paramètre sera donc intégré à l'analyse multivariée lors de la réalisation d'un modèle de prédiction des dommages. Cependant, ce paramètre binaire ne peut expliquer la totalité des variations de standing existantes. Seul un indicateur de standing quantitatif peut permettre d'expliquer le coût des dommages sur l'ensemble du jeu de données.

3.4.2. Le revenu moyen communal des habitants

Le standing peut notamment être reflété par le revenu moyen des habitants des habitations sinistrés. Des données concernant ce paramètre sont recueillies par la Direction Générale des Finances Publiques (DGFiP) du Ministère de l'Économie et des Finances, pour chaque habitant via les déclarations nationales de revenus annuels. Pour des raisons de confidentialité, ces données ne sont diffusées qu'à l'unité communale. Le croisement entre le coût des dommages et le revenu moyen communal ne dégage pas de tendance reliant ces deux variables : la moyenne à la commune ne reflète pas les variations de revenu pouvant exister d'un logement à l'autre. Par ailleurs, une fois de plus, dans la mesure où les revenus des habitants ne sont recensés que sur leur lieu de résidence principale, la forte proportion de résidences secondaires dans certaines communes rend la moyenne communale des revenus non représentative de l'ensemble des logements.

De nouvelles données infra communales diffusées par l'INSEE, sur la base d'un carroyage national de 200 mètres de côté, ont été mises à disposition du public en 2013[51]. Elles contiennent des informations sur les caractéristiques des logements et sur les revenus des habitants, qui pourraient être intéressantes à exploiter dans le cadre de cette étude. À la suite de problèmes survenus dans la chaîne de production, ces données ont été temporairement retirées du site. À ce jour, ces données ne sont toujours pas disponibles. Quand elles le seront de nouveau, ces données pourront permettre une analyse plus fine des enjeux et du standing que celle réalisée à une résolution communale.

Afin de pouvoir exprimer les dommages de manière relative, par le biais d'un « taux d'endommagement », une évaluation de la valeur totale des biens a été réalisée pour les sinistres de Xynthia. La démarche proposée repose sur le chiffrage des coûts de construction de plusieurs modèles de bâtiments de différentes caractéristiques architecturales (taille, présence d'étage, etc.). Ce travail a montré qu'il était difficile de diminuer la dispersion des coûts des dommages par cette méthode, ces derniers concernant essentiellement les éléments de second œuvre, dont le prix initial est très variable d'une habitation à l'autre, et ne dépend pas nécessairement des caractéristiques architecturales des biens.

Il a donc été recherché des indicateurs de « richesse » ou de « standing » des habitations, pour expliquer les différences de coût des dommages. Dans ce contexte, le type d'occupation des habitations permet de diviser en deux catégories l'échantillon des sinistres, pour lesquelles les coûts sont en moyenne bien supérieurs pour les résidences principales que pour les résidences secondaires. Ce paramètre est donc une variable qui devra être intégrée aux modèles d'endommagement.

Par ailleurs, le revenu moyen des habitants par commune ne permet pas d'expliquer les variations de coût des dommages et n'est donc pas un bon indicateur du standing. Cela est dû au fait, d'une part, que la moyenne communale ne reflète pas les variations des revenus individuels qui existent au sein d'une même commune, et d'autre part, que la forte proportion de résidences secondaires dans les communes étudiées est un biais pour l'estimation du revenu moyen, seuls les revenus des résidents principaux étant pris en compte.

[51] http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=0&ref_id=donnees-carroyees.

Au final, on conclut que d'autres indicateurs sur le standing seraient nécessaires pour une explication plus poussée des coûts des dommages. Ces indicateurs devront qualifier individuellement les enjeux, l'analyse de données agrégées à la commune n'étant pas concluante. Une des solutions pourrait être la valeur immobilière assurée évaluée par les assureurs pour les biens de leurs portefeuilles, qui n'a pas été disponible pour cette étude.

4. Analyse par niveaux d'endommagement

Au vu de la grande variabilité des coûts des dommages et des limites des informations recueillies pour l'explication des indemnisations, une dernière approche a été mise en place, pour déterminer des « niveaux d'endommagement » qualitatifs des sinistres de Xynthia.

4.1. Réalisation d'une échelle de dommages spécifique à la submersion marine

La méthode s'inspire, là encore, de celle qui est pratiquée pour l'étude des dommages des séismes. Cette approche repose, en l'absence de données sur les indemnisations des dégâts, sur la description de niveaux de dommages qualitatifs observés sur le terrain par des experts en résistance des structures. Cette approche permet de caractériser l'intensité des dommages et de la relier à l'intensité de l'aléa et aux caractéristiques de vulnérabilité des bâtiments pour la construction d'un modèle d'endommagement. (Grünthal et al., 1998 ; Sedan et al. 2008).

En risque sismique, la classification des dommages en niveaux d'intensité est surtout basée sur le critère d'atteinte à la structure du bâtiment. En effet, les études du risque sismique se sont depuis toujours focalisées sur cet aspect des dommages, sachant que la plupart des décès sont liés aux effondrements de bâtiments. L'évaluation de l'intensité des évènements sismiques et des dommages dus aux séismes est donc classiquement réalisée en fonction de l'endommagement physique des bâtiments, et l'utilisation d'échelles qualitatives de dommages est très ancrée dans les démarches d'évaluation et de modélisation des dommages pour ce risque.

De telles échelles de dommages existent également pour le risque d'inondation ou de tsunami (cf. partie I, section 2.1.1), mais aucune n'a été développée spécifiquement pour le risque de submersion marine. Il a donc été donc entrepris de réaliser une échelle de dommages adaptée à cet aléa, en s'appuyant sur les observations des dommages causés par les tempêtes Johanna et Xynthia. L'échelle réalisée repose sur la description de niveaux de dommages sur les différentes parties du bâtiment et sur les différents corps d'états affectés par la submersion. Elle s'inspire des travaux de I. Kelman (2002) et de J. Schwarz et H.

Maiwald (2008) réalisés pour les inondations fluviales, si ce n'est qu'au vu de la rareté des dommages structuraux au bâti observés lors de nos deux cas d'étude, l'échelle est davantage centrée sur les dommages ne concernant pas la structure des habitations. Dans cette échelle de dommages, le bâtiment principal, les bâtiments annexes et les éléments extérieurs ont été séparés, d'après la typologie des sinistres présentée en Figure 78, page 136. En effet, ces éléments peuvent avoir été affectés par différents niveaux d'intensité, et certains paramètres spécifiques à l'aléa submersion, comme les chocs de vagues, ont plus d'impact sur les éléments extérieurs que sur le bâti lui-même (Tableau 13).

Conception et réalisation : C. André, 2013

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 structuraux 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 structuraux : 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 13 : Échelle de dommages mise en place pour les différentes parties des bâtiments affectés par la submersion marine.

4.2. Liens entre les niveaux de dommages, la hauteur d'eau et le coût des sinistres

L'étape suivante a consisté à attribuer un niveau de dommage à chacun des dossiers pour lesquels le rapport d'expertise a été consulté, sur la base des éléments affectés et des descriptions qualitatives des sinistres. Par la suite, il pourra être envisagé que cette classification des dommages fasse partie des éléments renseignés par les experts d'assurance lors de leurs visites de terrain, de manière à pouvoir mettre en place des statistiques sur des grands nombres de sinistres.

L'analyse des niveaux de dommages, représentés sur le graphique hauteur d'eau / coûts des dommages, montre qu'une relation existe bien entre ces trois paramètres (Figure 125).

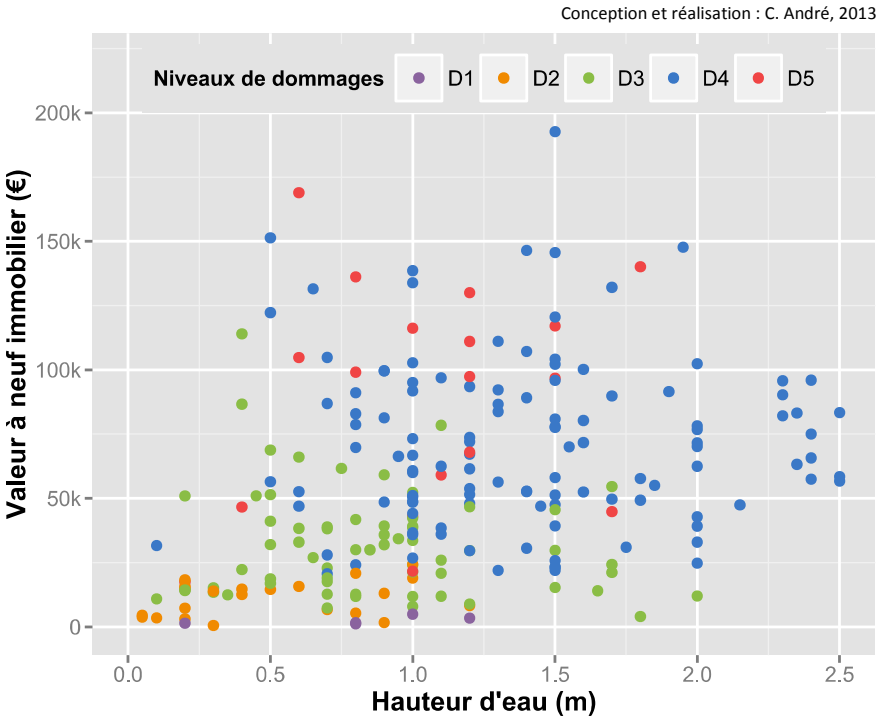


Figure 125 : Graphique du coût des dommages immobiliers en fonction de la hauteur d'eau et du niveau de dommages pour Xynthia.

Pour le confirmer, on analyse le nombre et la proportion de sinistres de chaque niveau en fonction de classes de hauteur d'eau de 50 cm (Figure 126).

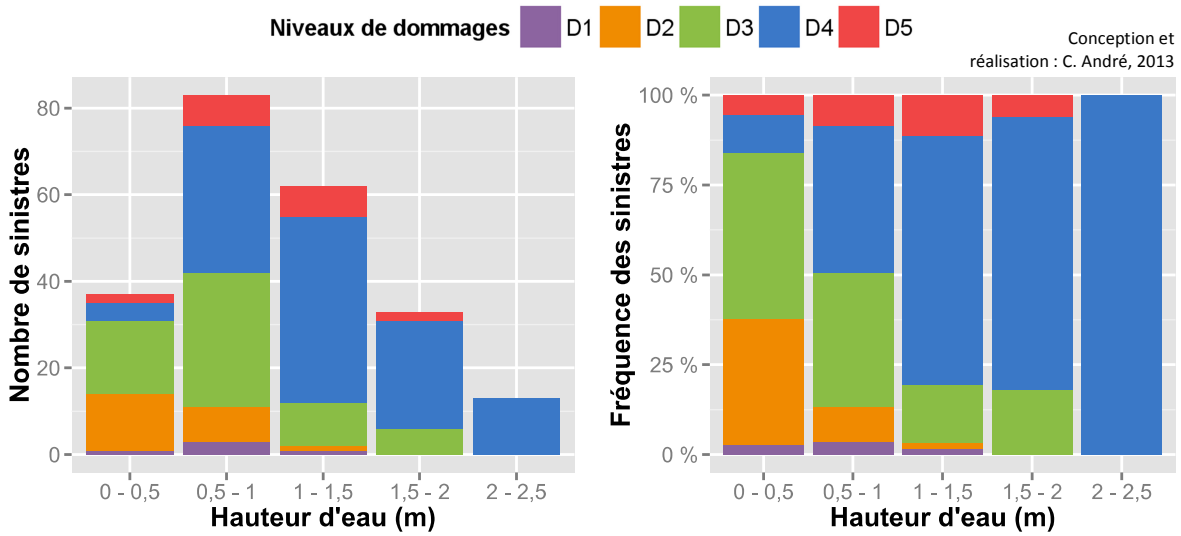


Figure 126 : Histogrammes des niveaux de dommages (nombre et fréquence des sinistres) en fonction de la hauteur d'eau pour Xynthia.

Les graphiques confirment que la proportion de dommages de niveau élevé (à partir des niveaux D3 et D4) augmente sensiblement avec la hauteur d'eau. Le niveau D5 est un cas particulier qui ne représente que les dossiers pour lesquels des dommages structuraux au

bâti ont été recensés. La proportion des sinistres de ce niveau n'augmente pas avec la hauteur d'eau : ce n'est donc pas ce paramètre qui explique ce type spécifique d'endommagement. Les dommages structuraux sont liés soit à des combinaisons de fortes hauteurs d'eau avec des courants ou des chocs de vagues et les phénomènes d'affouillement, soit à des caractéristiques spécifiques de vulnérabilité du bâti.

Par ailleurs, l'analyse de la distribution du coût des dommages en fonction des niveaux d'endommagement montre également clairement une relation entre ces deux variables (Figure 127).

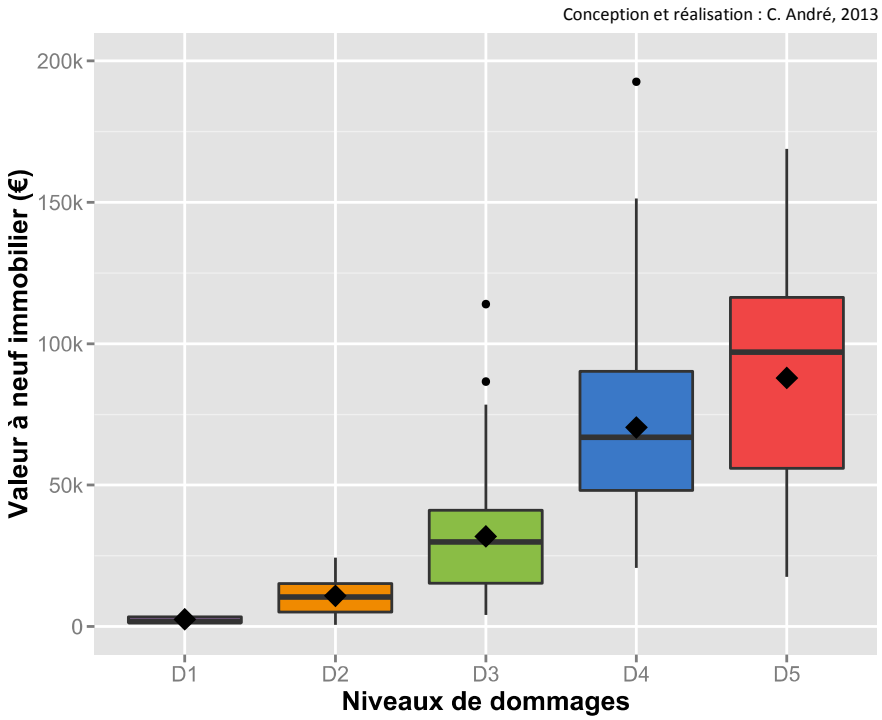


Figure 127 : Boites de dispersion du coût des dommages immobiliers en fonction du niveau de dommages.

En effet, les dossiers de classe D5, pour lesquels des dommages structuraux sont constatés, font bien partie des sinistres les plus coûteux. Grâce à l'utilisation de niveaux d'endommagement construits sur des critères qualitatifs, il est donc en théorie possible d'estimer, pour un bâtiment, en fonction de la hauteur d'eau, la probabilité de subir des dommages de niveau important, et de déterminer un ordre de grandeur du coût des dommages associés à ce niveau.

Cette approche permet donc de valider une relation entre l'aléa (hauteur d'eau), le niveau d'endommagement, et le coût des dommages engendrés, sur laquelle on peut se baser pour la réalisation d'un modèle d'endommagement. En effet, contrairement aux évaluations menées pour le risque sismique, il n'y a pas d'intérêt particulier à utiliser cette méthode pour évaluer le nombre de bâtiments détruits : ces cas étant quasiment inexistants, ce n'est

pas de cette manière qu'on évalue le risque pour les habitants lors des inondations. Cette approche constitue, en revanche, un complément à l'analyse « classique » du coût des dommages dus aux inondations par les fonctions d'endommagement, pour laquelle il est relativement difficile d'obtenir une relation précise au vu des nombreux paramètres expliquant les coûts.

Conclusion de la quatrième partie

L'analyse des données d'assurance à l'échelle locale a permis d'identifier un certain nombre de paramètres expliquant les coûts des dommages observés à une résolution individuelle des sinistres, c'est-à-dire utiles pour une modélisation des dommages à l'échelle micro.

Une partie des indicateurs testés provient des rapports d'expertise eux-mêmes, une autre de sources externes au jeu de données d'assurance. Les indicateurs concernant l'aléa submersion proviennent principalement de modèles hydrauliques, qui ont été mis en place spécifiquement pour les modélisations des dommages. Dans le cas d'évaluations *ex ante*, leur niveau de complexité sera défini par les objectifs de l'étude et le niveau de précision requis.

Les indicateurs concernant les enjeux proviennent soit de bases de données publiques, soit d'inspections de terrain, plus coûteuses à mettre en place. Il est à noter que sur le littoral, dans des régions touristiques comme la Vendée et la Charente-Maritime, où la population saisonnière est importante, et dans des communes ne possédant pas de découpage en îlots IRIS (communes de plus de 10 000 habitants), la forte proportion de résidences secondaires est un obstacle à l'utilisation de données détaillées de l'INSEE ou des impôts. En effet, les informations disponibles ne concernent alors que les résidents principaux, qui ne sont pas représentatifs de toute la population exposée à l'aléa.

Des démarches sont donc nécessaires pour que davantage d'informations sur la caractérisation des enjeux soient disponibles pour la modélisation des dommages, telles que des données INSEE infra communales, ou dans l'idéal, des données individuelles sur les caractéristiques et le standing des habitations, via par exemple les fichiers fonciers, à ce jour inaccessibles.

La pertinence des différents indicateurs, ou variables, étudiés d'abord à l'échelle régionale, puis à l'échelle locale, pour l'explication des dommages, est synthétisée dans le Tableau 14.

Conception et réalisation : C. André, 2013

Variables	Source *ex post*	Explication du coût des dommages au bâti	Disponibilité *ex ante* via
Caractérisant l'aléa			
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 pour Xynthia	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 pour Xynthia	Modélisation hydraulique
Caractérisant les enjeux			
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 pour Xynthia	Photo-interprétation SIG
Typologie de bâti (âge)	Terrain	Faible car sinistres aux pavillons modernes dominants pour Xynthia	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	Présumée forte si disponible individuellement	Fichiers fonciers

Tableau 14 : Liste et importance des variables testées caractérisant l'aléa et les enjeux dans l'explication du coût des dommages immobiliers des sinistres de Xynthia, et source des données.

Un certain nombre de ces variables, indiquées en couleur dans le tableau, est considéré comme expliquant une part suffisante de la dispersion des dommages : ce sont donc ces variables qui seront utilisées pour la construction de modèles d'endommagement multivariés dans la partie suivante de cette thèse.

Cette sélection se veut relativement large, dans la mesure où des critères qui ne semblent pas, à première vue, expliquer une grande proportion de la dispersion des coûts, peuvent toutefois se révéler significatifs dans un modèle multivarié, au vu de leur potentiel d'explication, en combinaison avec les autres variables.

Les indicateurs sélectionnés pour la réalisation des modèles doivent être des variables qui peuvent être collectées, ou produites, dans le cadre d'une évaluation *ex ante* des dommages. Leurs sources potentielles sont indiquées dans la quatrième colonne du Tableau 14.

Partie V. Modélisation des dommages : apports des données d'assurance à la prédiction du coût des dommages liés à la submersion marine

Introduction

Cette dernière partie de la thèse a pour objectif la mise en place de modèles de prédiction du coût des dommages spécifiques au risque de submersion marine *ex ante*, sur la base de l'analyse *ex post* des données d'assurance qui sont le socle de ce travail de thèse.

Ces modèles de prédiction des coûts des dommages sont effectivement utiles aux gestionnaires des risques en tant qu'outil d'aide à la décision pour la mise en place de politiques de prévention des submersions marines, ainsi qu'aux assureurs pour l'évaluation de l'exposition au risque de leurs portefeuilles (cf. partie I, section 2.2). Le terme « modèles » est donc utilisé dans cette partie pour désigner des outils permettant de prédire les coûts des dommages, et pas simplement d'en faire l'analyse *a posteriori*.

Jusqu'à présent, l'Analyse Coûts-Bénéfices (ACB) a peu été utilisée en France pour l'évaluation de l'impact des politiques publiques de gestion des risques d'inondation. De ce fait, les modèles de prédiction des dommages ont reçu bien moins d'attention que dans d'autres pays (États-Unis, Royaume-Uni, Allemagne, etc.). Cependant, la Directive européenne Inondation de 2007 recommande désormais l'utilisation d'ACB dans la conception de projets de prévention des risques sollicitant des fonds publics.

Dans le but de réaliser un guide méthodologique pour la réalisation des Analyses Coûts-Bénéfices dans le cadre des Programmes d'Action de Prévention des Inondations (PAPI), le Ministère de l'Environnent a constitué le groupe de travail « ACB inondations » qui a réalisé un premier document de recommandations en 2010 (CEPRI, 2010). Devant la demande croissante de données et d'outils pour la réalisation d'évaluations des dommages, une nouvelle version du guide, intégrant l'ACB dans la démarche plus globale d'Analyse Multicritères, et contenant de nouvelles fonctions d'endommagement pour différents types d'enjeux, dont les habitations, a été élaborée. Mise en consultation publique et testée en 2012 (MEDDE/CGDD, 2012), la version finale sera publiée en 2014. Une des demandes des porteurs de projets PAPI dans les zones littorales, formulée à la suite de la tempête Xynthia, est de pouvoir disposer de fonctions d'endommagement spécifiques à l'aléa submersion marine pour la réalisation des ACB, au vu des différences de coûts observées entre les inondations fluviales et celle de l'évènement Xynthia. Le nouveau guide méthodologique proposera donc, dans le cadre d'une annexe, des premières recommandations concrètes pour l'évaluation des dommages aux habitations liés aux submersions marines. Ces éléments, qui découlent en grande partie des données collectées et des analyses menées dans le cadre de cette thèse, sont le fruit de réflexions menées en collaboration avec le CEPRI (CEPRI, 2013a).

La mise en place de modèles empiriques de prédiction des dommages liés à la submersion marine est l'un des objectifs et la finalité de cette thèse. Cette démarche est permise par la collecte et l'analyse des données d'assurance, présentées dans les parties précédentes de cette thèse. Les données qui vont être utilisées ici sont les données de niveau 2, issues des rapports d'expertise, analysées à l'échelle locale, pour la tempête Xynthia (le faible nombre de sinistres pour Johanna ne permettant pas leur analyse statistique). C'est en effet à ce niveau de précision que les informations sur les différents paramètres explicatifs des coûts détaillés des dommages ont pu être évalués (Tableau 7, page 104).

Après avoir mis en évidence les différences significatives qui existent entre les dommages de submersions marines et d'inondations fluviales, nous proposons de tester la mise en place, pour cet échantillon de données, de modèles d'endommagement univariés (de type fonctions d'endommagement) et multivariés (utilisant les méthodes de régression multiple et des arbres de régression). Sur la base des méthodes de modélisations éprouvées dans la littérature sur le risque d'inondation fluviale, sont utilisées, d'une part, des méthodes économétriques, et de l'autre, des méthodes de classification. Les résultats obtenus permettent de discuter des apports des données d'assurance pour la réalisation de tels modèles, d'indiquer les limites à leur utilisation, et de proposer des pistes pour leur amélioration.

1. Intérêt de la mise en place de modèles prédictifs des dommages spécifiques à la submersion marine

À ce jour, il n'existe pas en France de modèles de prédiction (fonctions d'endommagement) du coût des dommages pour la submersion marine (cf. partie I, section 2.2). Les caractéristiques et les valeurs économiques des enjeux étant très fluctuantes entre différents pays, il est impossible d'utiliser en France des modèles d'évaluation économique des dommages réalisés à l'étranger, contrairement à des modèles d'évaluation physique des dommages, qui sont plus facilement transposables.

D'après les statistiques nationales (MEDDE/DGPR, 2012), le coût moyen d'un sinistre lors d'une inondation fluviale, tous types d'enjeux confondus, est estimé entre 4 000 € et 8 000 €, alors que ceux des évènements Johanna et Xynthia, liés à la submersion marine, sont respectivement de 13 300 € et de 27 700 € (Tableau 8, page 126). L'écart important entre ces coûts moyens explique pourquoi, dans les jours qui ont suivi la tempête Xynthia, les premières évaluations réalisées par les réassureurs (CCR) et les agences de modélisation (par ex. AIR, RMS, EQECAT, etc.) ont eu tendance à sous-estimer le coût de l'évènement Xynthia.

1.1. Des coûts des dommages de Xynthia plus forts que ceux obtenus par les modèles d'endommagement fluviaux existants

Afin de déterminer si les modèles existants, issus de la littérature sur les inondations fluviales, sont à même de prédire les dommages de submersions marines, tels que ceux observés lors de la tempête Xynthia, les coûts des données d'assurance collectées sont comparés à ceux prédits par trois fonctions d'endommagement issues des travaux de J.-P. Torterotot (1993), du FHRC (Penning-Rowsell et al., 2010) et du CEPRI (2013b) (Tableau 15).

Modèle	Torterotot	FHRC	CEPRI
Auteurs / référence	Torterotot, 1993	Penning-Rowsell et al., 2010	CEPRI, 2013b
Cadre / méthode de construction	Empirique (enquêtes) : inondations entre déc. 1982 et déc. 1987 sur 8 sites dans 5 départements français, fonctions continues	Jugement d'expert : modèles d'habitations anglais, fonctions discontinues	Jugement d'expert : modèles d'habitations représentatifs du territoire français, fonctions discontinues
Caractéristiques enjeux et aléa	Habitations avec ou sans sous-sol, crues lentes ou rapides (moyenne)	Maisons individuelles, tous âges et classes sociales, durée inf. ou sup. à 12 h (moyenne)	Maisons individuelles sans sous-sol, sans étage, durée inf. ou sup. à 48 h (moyenne)
Référentiel monétaire	FRF 1991	GBP 2010	EUR 2011
Intervalle coûts immobilier (€ 2010)	6 000 - 20 000 €	2 000 - 44 000 €	0 - 26 000 €

Tableau 15 : Présentation des trois fonctions d'endommagement fluviales sélectionnées pour la comparaison.

Pour mémoire (cf. partie I, section 2.2.3), ces fonctions d'endommagement sont conçues pour estimer les dommages directs d'inondations fluviales au bâti résidentiel. Chaque étude réunit un jeu de plusieurs fonctions déclinées en fonction du type des logements considérés (individuels, collectifs), leurs caractéristiques de vulnérabilité (présence d'étage, de sous-sol, taille, etc.), et parfois la catégorie socioprofessionnelle des habitants (Penning-Rowsell et al., 2010). Des variations relatives aux processus de l'aléa sont également proposées : crues lentes ou rapides, durée d'inondation, inférieure ou supérieure à un seuil de 12 ou 48 h ; ou liées à l'occurrence d'une alerte permettant ou non de mettre en sûreté une partie du mobilier (Torterotot, 1993).

Afin de comparer ces modèles aux données d'assurance recueillies, la typologie d'habitations la plus proche de celles présentes dans les zones touchées par Xynthia (habitations récentes de plain-pied sans sous-sol) est utilisée pour chaque modèle. Quand plusieurs fonctions d'endommagement correspondent à des typologies d'habitations et des caractéristiques de l'aléa proches de celles des sinistres de Xynthia, la moyenne des coûts donnés par les différentes fonctions pour ces catégories est utilisée.

Comme vu précédemment, les fonctions d'endommagement de la littérature sont élaborées de manière à évaluer les pertes économiques dues aux inondations : elles estiment donc le coût des dommages en valeur dépréciée ou « vétusté déduite » et hors taxes. En effet, estimer les pertes à partir de la valeur de remplacement à neuf inclurait le gain apporté par la rénovation des éléments endommagés et surestimerait donc le coût de l'évènement.

Quant à la TVA, elle ne constitue pas de pertes économiques en soi, mais un transfert d'argent des particuliers (et donc des assureurs qui les indemnisent) vers l'État (Penning-Rowsell et al., 2005 ; Messner et al., 2007, Merz et al., 2010).

La comparaison des données d'assurance recueillies avec ces modèles doit être réalisée sur le même référentiel. Seuls les coûts des dommages directs immobiliers sont intégrés à la comparaison avec les fonctions existantes. La valeur exacte de vétusté de tous les éléments endommagés n'étant pas connue pour chaque dossier de sinistre, le taux de vétusté moyen observé dans les rapports d'expertise, selon les éléments affectés, est utilisé pour le calcul de la dépréciation. Pour Xynthia, ce taux est d'environ 20 % pour les éléments de second œuvre (les quelques dommages à la structure des bâtiments sont considérés sans vétusté). Les coûts prédits par les fonctions d'endommagement sont également convertis en euros constants de 2010 sur la base de l'indice officiel d'évolution du coût de la construction de l'INSEE[52].

Sur le graphique hauteur d'eau / coût des dommages (Figure 128), sont superposés le nuage de points des sinistres de Xynthia, les moyennes de coûts pour les sinistres de Xynthia appartenant à une même gamme de hauteur d'eau (par classes de 50 cm) et les trois fonctions d'endommagement existantes.

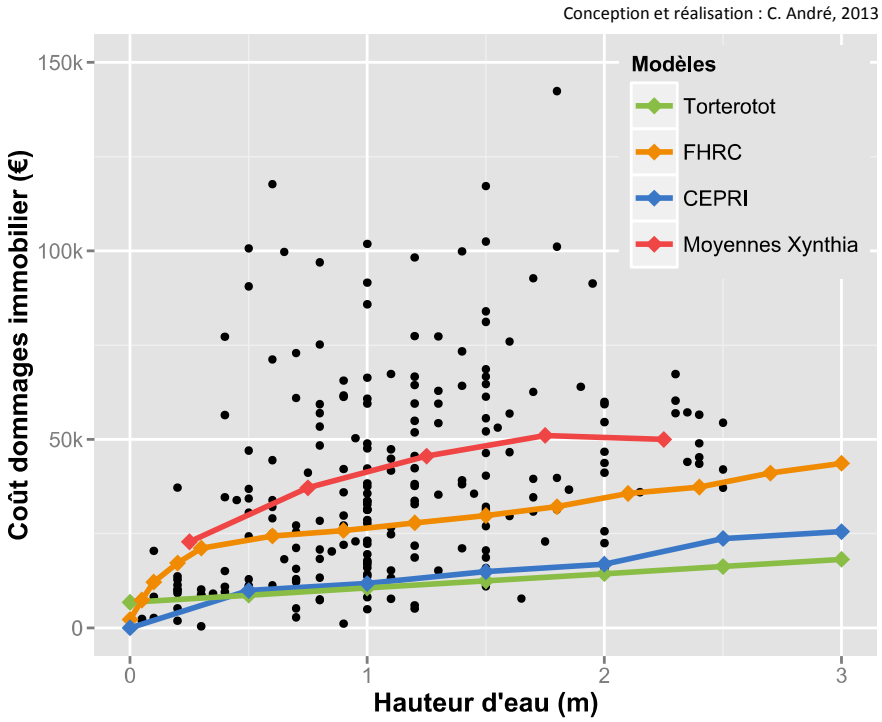


Figure 128 : Graphique des coûts prédits par les trois fonctions d'endommagement d'inondations fluviales comparées aux données de la tempête Xynthia.

[52] http://www.insee.fr/fr/themes/conjoncture/indice_icc.asp

Au-delà de la forte dispersion déjà évoquée du coût des dommages des données d'assurance, les moyennes des coûts des dommages de Xynthia sont globalement croissantes avec la hauteur d'eau, et sont supérieures aux coûts prédits par les trois fonctions d'endommagement adaptées au risque fluvial sélectionnées dans la littérature.

Pour confirmer que les écarts de coûts observés sont bien dus aux spécificités du risque de submersion marine, et non à l'incertitude qui accompagne autant les données d'assurances que la procédure de conversion et d'actualisation des coûts prédits par les fonctions d'endommagement, on réalise le même type de comparaison avec une base de données d'assurance de sinistres d'inondations fluviales collectées par le CEPRI (communication personnelle). Cette base, comme celle constituée pour Xynthia dans le cadre de cette thèse, est issue de la consultation de rapports d'expertise de sinistres concernant des évènements d'inondation fluviale dans les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon, entre juillet 2002 et juin 2010. La comparaison des coûts de Xynthia avec ceux d'inondations fluviales, pour des données de même nature, confirme des différences importantes observées entre les coûts de Xynthia (submersion marine) et ceux prédits par les modèles existants dans la littérature des inondations fluviales (Figure 129),

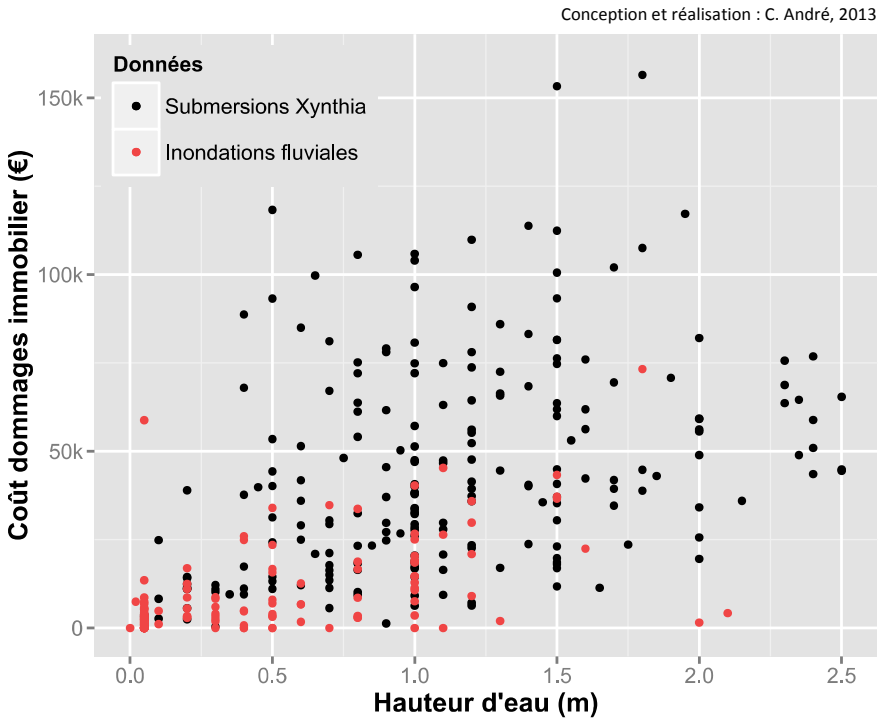


Figure 129 : Graphique des coûts de la tempête Xynthia comparés à des données d'assurance d'inondations fluviales (source : CEPRI).

1.2. Explication des écarts de coûts constatés

L'analyse détaillée du contenu des rapports d'expertise, menée dans la partie précédente de cette thèse, permet de formuler des hypothèses afin d'expliquer cet écart entre les coûts des sinistres de submersion marine et les sinistres en domaine fluvial. Les différences peuvent être dues à trois principaux facteurs :

- Les coûts très élevés des dommages au second œuvre des habitations, en particulier ceux concernant les cloisons, qui sont les plus importants (Figure 96, page 163), sont dus au choix des experts-dommages, de préconiser le remplacement de beaucoup d'éléments de second œuvre dans leur totalité. Ce choix peut être imputé à l'effet de l'eau salée, causant un endommagement plus important que l'eau douce, alors que la plupart des éléments de second œuvre n'auraient été remplacés que partiellement dans le cas d'une inondation fluviale.
- Une partie de la différence observée peut également être expliquée par les spécificités des enjeux en zone littorale, concernant leur vulnérabilité intrinsèque à la submersion (habitations majoritairement récentes de plain-pied), leur vétusté et leur « standing ».
- Enfin, l'ampleur du drame humain causé par la tempête Xynthia, et sa médiatisation, ont pu avoir une influence sur la gestion des sinistres par les assureurs, en comparaison avec le processus habituel d'indemnisation des dommages, quand les sinistres ne sont pas associés à une catastrophe « majeure » (Thourot, 2012).

La réalisation de fonctions d'endommagement spécifiques à la submersion marine nécessite donc de comprendre les écarts constatés entre les dommages de Xynthia et des inondations fluviales, pour discerner les caractéristiques imputables à tout évènement de submersion marine, et celles imputables spécifiquement à l'évènement Xynthia. Dans ce but, des entretiens ont été réalisés auprès des experts chez lesquels avait eu lieu une partie de la collecte de données des dossiers de sinistres[53]. Ces entretiens, alimentés par les analyses produites dans le cadre de la thèse, ont permis d'apporter des éléments de réponses aux pistes de réflexion énoncées.

1.2.1. Spécificités liées à l'aléa submersion marine

Les entretiens avec les experts confirment que pour la tempête Xynthia, le coût des dommages sur les bâtiments d'habitation est majoritairement lié à la simple submersion et rarement aux processus de chocs de vagues ou d'affouillements liés à la vitesse du courant lors de l'inondation (les cas où ces types de processus de dommages ont été constatés

[53] Cabinets d'expertise ELEX et Polyexpert de La Rochelle, entretiens réalisés en coopération avec le CEPRI.

existent, mais restent relativement rares et isolés). Ce constat n'est cependant pas valable pour les dommages constatés par les experts lors de la tempête Martin de 1999 : du fait d'un coefficient de marée plus faible (de 77), la tempête Martin avait causé une surcote moindre et donc des submersions moins étendues que Xynthia. Au contraire, le vent (plus de 200 km/h sur l'île d'Oléron) et les vagues avaient été beaucoup plus forts que lors de Xynthia, et de nombreuses maisons en front de mer avaient été directement affectées par les vagues, notamment à Châtelaillon-Plage et à Fouras : des dommages structuraux avaient été constatés sur des habitations en front de mer. Il faut donc retenir que les dommages structuraux ne sont pas à exclure en cas de submersion marine, même s'ils n'ont pas été observés dans le cas de Xynthia.

Pour Xynthia, le paramètre qui explique l'importance du coût des dommages, au regard des dommages générés par une inondation fluviale, est essentiellement le caractère salin de l'inondation : l'impact de l'eau salée sur les cloisons en plaques de plâtre (type Placoplatre) et notamment sur leurs rails métalliques, ont conduit le plus souvent au remplacement de la totalité de ces éléments, même pour de faibles hauteurs d'eau. En effet, le dommage a été jugé comme important dès que le niveau d'eau a dépassé les plinthes, permettant à l'eau de pénétrer dans les cloisons par les prises électriques, le séchage et l'assèchement ne pouvant dans ce cas empêcher la corrosion. Cette stratégie de remplacement des cloisons entraine de fait le remplacement de l'isolation, des réseaux électriques et des embellissements muraux, et explique en grande partie les coûts élevés sur le second œuvre. En comparaison, les cloisons en carreaux de plâtre sans armatures (type Placomur) et les cloisons en briques, ont mieux résisté à l'inondation par l'eau de mer et n'ont pas été systématiquement remplacées. Les rapports d'expertise indiquent également que des dommages au niveau des joints des carrelages, même scellés, ont aussi été constatés, ce qui est inhabituel en inondation d'eau douce. Certains modèles de chapes de béton ont également été affectés par le sel, ainsi que les canalisations métalliques et les systèmes de chauffage au sol qu'elles contenaient. Des dommages, également imputés au sel, ont été observés sur les menuiseries extérieures (paradoxalement, davantage sur les menuiseries PVC, qui contiennent des éléments métalliques, que sur les menuiseries en bois). Certaines menuiseries ont en outre été enfoncées au niveau des huisseries du fait d'un différentiel de pression dans les cas d'une montée très rapide de l'eau (ce phénomène est également observable dans le cas de crues fluviales torrentielles).

En inondation fluviale, la durée de submersion joue un rôle important sur les dommages, car c'est elle qui définit si certains éléments touchés devront être remplacés, la corrosion et l'apparition de moisissures étant liées à la durée du contact avec l'eau. Pour la submersion marine, il semble que le remplacement ayant systématiquement eu lieu à cause du sel, la

durée de stagnation de l'eau a eu beaucoup moins d'impact sur la variabilité des coûts d'un bien à un autre. L'eau salée est donc bien le paramètre clé de l'aléa qui explique les dommages des évènements de submersion marine, en particulier celle liée à la tempête Xynthia.

1.2.2. Spécificités liées aux enjeux littoraux

Trois points sont abordés lors des entretiens avec les experts concernant les spécificités des enjeux littoraux : la vulnérabilité de ces derniers à la submersion, leur taux de vétusté et leur valeur totale liée au « standing ». Comme nous l'avons montré par l'analyse de terrain des quartiers sinistrés (cf. partie IV, section 3.3), les habitations les plus exposées à la submersion en Vendée et en Charente-Maritime étaient des habitations récentes, datant pour la plupart de la 2nde moitié du XXe siècle. Or, c'est dans les maisons de cette époque que l'on trouve le plus de matériaux particulièrement vulnérables à la submersion, comme les cloisons en plaques de plâtre et les menuiseries en PVC. Les maisons plus anciennes, d'une part, se trouvent plus rarement en zone inondable, et d'autre part, possèdent des matériaux plus résistants, comme le bois et les cloisons en briques. La présence de grandes baies vitrées et de vérandas, principalement dans les logements récents, est aussi un facteur aggravant le coût des dommages.

De plus, les habitations récentes ont bénéficié de techniques de construction plus modernes qui rendent globalement les réparations plus coûteuses, mais c'est surtout au niveau de la vétusté que se joue la différence de coûts. Le taux de vétusté moyen du second œuvre est évalué à 20 % pour les sinistres de Xynthia, ce qui est relativement faible par rapport à celui observé pour les inondations fluviales, proche de 50 % (CEPRI, 2013b). En revanche, la proportion élevée de résidences secondaires joue plutôt dans le sens inverse : ces dernières ont tendance à être moins équipées que les résidences principales, notamment au niveau du chauffage (le plus souvent électrique pour les résidences secondaires, central ou par le sol pour les résidences principales), et du mobilier. Enfin, certaines habitations ont des coûts de construction et de réparation plus élevés, par exemple sur les îles de Ré et d'Oléron, simplement du fait de questions d'accessibilité qui rendent les travaux plus coûteux.

Seule la forte proportion de résidences secondaires est généralisable à toutes les régions littorales. En effet, l'utilisation de matériaux vulnérables et la faible vétusté des enjeux est davantage spécifique à la région étudiée qu'un cas généralisable à tous les enjeux exposés à la submersion marine. Par ailleurs, le standing des habitations, davantage lié la dispersion des coûts des données d'assurance, et observable également sur des données d'inondation

fluviale (Figure 129), n'est pas non plus ce qui explique les coûts particulièrement élevés des sinistres de submersion marine par rapport à ceux des inondations fluviales.

1.2.3. Spécificités liées au contexte médiatique de Xynthia

Dans le contexte médiatique particulier de Xynthia, dû à l'ampleur de l'évènement et aux pertes humaines, la gestion des expertises et des indemnisations des sinistres par les assureurs a pu être affectée de plusieurs façons (Thourot, 2012) :

L'organisation des experts et des assureurs suite à la crise de Xynthia a été différente de celle d'autres évènements moins importants, du fait du nombre très élevé de sinistres à expertiser et indemniser dans des délais très courts. En effet, il a été jugé que les assureurs s'étaient fortement mobilisés pour traiter et régler le plus rapidement possible l'afflux exceptionnel de dossiers (Cour des comptes, 2012). De leur côté, les cabinets d'expertise ont pendant plusieurs mois fait intervenir des experts venus de toute la France sur les sinistres de Xynthia. Cette gestion de la crise a pu entrainer un biais dans les méthodes d'évaluations et dans l'indemnisation des dommages. En particulier, dans les zones de solidarité, les experts et les assureurs ont mis en place un modèle commun de rapport d'expertise (contenant systématiquement des plans et des chiffrages détaillés des dommages, ce qui n'est pas toujours le cas) et un barème de prix unitaires, afin de rendre le plus cohérentes possibles les différentes expertises sur ces sites. D'après les experts, le barème a été mis en place sur la base des prix régionaux habituels et a eu pour résultat d'homogénéiser les expertises. Les détails du modèle de rapport d'expertise ont, quant à eux, permis de rendre celles-ci plus claires et plus complètes, afin d'éviter les litiges, les habitations en question étant vouées à être rachetées par l'État. Ces deux procédures spécifiques n'ont donc *a priori* pas entrainé de surestimation des coûts des dommages, une attention particulière ayant été portée à la régularité de ces dossiers.

D'autre part, la médiatisation importante de l'évènement et le désarroi des sinistrés, dont certains avaient perdu des proches, a pu entrainer des indemnisations plus larges que la normale. Cependant, les experts indiquent que les sinistrés ont la plupart du temps accepté sans discussion leurs évaluations. Par ailleurs, les évènements catastrophiques entrainent parfois une tension sur les prix du marché de la construction, la demande devenant instantanément très supérieure à l'offre. Là encore, d'après les experts consultés, ce phénomène n'a joué que dans une proportion mineure, les travaux de réparation ayant été encadrés par les chiffrages des cabinets d'expertise.

La multitude des sinistres et la médiatisation de l'évènement peuvent enfin avoir influencé les assureurs du fait des objectifs de délais courts dans le traitement des dossiers, à être plus « larges » dans l'évaluation des indemnisations. De cette manière, les assureurs évitent les litiges avec leurs clients et les contre-expertises, coûteuses en argent et en temps. Le nombre de dossiers litigieux a effectivement été très faible pour Xynthia ; les experts reconnaissent qu'en accord avec les assureurs, ils ont parfois préféré pratiquer le remplacement systématique de certains éléments dont la corrosion était suspectée, afin de ne pas prendre le « risque » de ne pas remplacer ces éléments et de devoir constater ultérieurement ces dommages, qui apparaissent sur le long terme. C'est donc en quelque sorte un principe de « précaution » qui a été pris par les experts et les assureurs.

La comparaison des données des sinistres de la tempête Xynthia avec des modèles d'endommagement existants dans la littérature des inondations fluviales montre des écarts de coûts importants.

Une partie de ces différences de coûts est liée aux circonstances de tout événement catastrophique et particulièrement médiatisé, comme l'impact probable de la stratégie des assureurs et des experts en conditions d'urgence au niveau du traitement des sinistres. L'autre partie des écarts, la plus importante, est liée aux dommages spécifiques induits par l'eau salée, sur des enjeux particulièrement vulnérables, qui a nécessité le remplacement systématique de la plupart des éléments du second œuvre, contrairement à ce qui est pratiqué pour les inondations fluviales, où cette mesure dépend davantage de la durée de l'inondation. Ces différences justifient la préconisation d'un modèle d'endommagement spécifique à la submersion marine.

Il est donc proposé de mettre en place des modèles de prédiction des dommages sur les habitations *ex ante*, liés spécifiquement à la submersion marine, sur la base des données d'assurance collectées. Les données utilisées sont les dossiers de sinistres de maisons individuelles inondées par les submersions marines lors de la tempête Xynthia, les données recueillies pour la tempête Johanna étant peu nombreuses et moins bien renseignées.

Les fonctions d'endommagement fournissent un cadre théorique pour la construction de tels modèles empiriques (basés sur des observations de dommages *ex post*). J.-P. Torterotot (1993) utilise notamment la régression linéaire simple pour la réalisation des fonctions d'endommagement. Au contraire, les modèles basés sur le « jugement d'expert » (par ex. Penning-Rowsell et al., 2010 ; CEPRI, 2013b) fournissent des fonctions pour lesquelles la relation entre la hauteur d'eau et le coût des dommages est non linéaire (Figure 128, page 217). De tels types de relations seront donc recherchés dans les modèles expérimentés.

Cependant, si le modèle univarié de la fonction d'endommagement est le modèle le plus couramment utilisé en évaluation des dommages liés aux inondations, l'analyse menée dans la partie précédente de cette thèse montre que de nombreux facteurs sont à considérer pour prédire les coûts des dommages : ce type de modèle ne peut donc expliquer qu'une partie limitée des coûts.

De fait, de plus en plus de modèles multivariés se développent afin d'évaluer conjointement l'influence sur les dommages de la hauteur d'eau et d'autres paramètres de l'aléa et des enjeux (cf. partie I, section 2.2.5). Ils sont basés sur des méthodes de régression multiple (Zhai et al., 2005 ; Prettenthaler et al., 2010 ; Kim et al., 2013) ou sur la construction d'arbres de régression (Merz et al., 2013), et seront également explorés dans la section suivante.

2. Modèles univariés : vers des fonctions d'endommagement spécifiques à la submersion marine

Pour les modèles présentés, le seul paramètre de l'aléa utilisé pour expliquer le coût des dommages est la hauteur d'eau. Il faut considérer que les fonctions d'endommagement construites à l'aide de l'échantillon de données d'assurance collectées dans cette thèse sont adaptées à l'évaluation de dommages ayant lieu dans des conditions d'aléa similaires à Xynthia (vitesse de courant peu élevée) et pour des enjeux du type de ceux présents en Vendée et en Charente-Maritime, c'est-à-dire des maisons individuelles relativement récentes, la plupart de plain-pied, sans étage ni sous-sol.

Comme pour l'analyse des coûts menée en partie IV, sont utilisés, pour la réalisation des fonctions d'endommagement, les coûts qui sont les plus simples à expliquer, c'est-à-dire les coûts des dommages immobiliers aux bâtiments principaux uniquement. En effet, les coûts mobiliers apportent une dispersion supplémentaire aux données ; ils sont d'ailleurs séparés des coûts immobiliers dans la plupart des modèles existants dans la littérature. Pour évaluer le coût total des dommages aux habitations, il faut donc soit mettre en place une fonction séparée spécifique aux coûts mobiliers, soit considérer que les coûts mobiliers sont proportionnels aux coûts immobiliers. Dans le cas présent, le rapport entre les coûts mobiliers et immobiliers a été évalué à 50 % (Figure 94, page 162).

La même question se pose avec l'évaluation des dommages aux bâtiments annexes et aux éléments extérieurs aux bâtiments, dont les coûts sont beaucoup plus variables que ceux affectant les bâtiments principaux, et donc difficiles à intégrer à cette étape de modélisation. Dans le cas de l'échantillon de dossiers de Xynthia, ces éléments représentaient en général

une part inférieure à 10 % du coût des dommages immobiliers (Figure 96, page 163). Au contraire, dans le cas de Johanna, de nombreux dossiers ne comprenaient que ce type de dommages, qui représente au final une part importante du coût de l'évènement. Prédire une valeur des dommages proportionnelle à la valeur des dommages immobiliers, pour ces éléments, est donc plus délicat que pour le mobilier, ces derniers dépendant grandement des caractéristiques de l'aléa et de la configuration des sites touchés. Davantage de données détaillées (données de niveau 2) sur ces éléments seraient nécessaires afin de pouvoir donner des préconisations précises pour ce type de dommages.

2.1. Méthode de régression simple

2.1.1. Formulation du modèle

Pour mémoire, un modèle de régression simple établit une relation entre une variable quantitative continue Y « à expliquer » ou dépendante, et une variable explicative X. Pour une séquence de n observations statistiques provenant d'un échantillon (y_i, x_i) où i = 1, …, n, le modèle s'écrit :

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + u_i$$

Avec :
- y_i les valeurs mesurées de la variable Y (ici, le coût des dommages),
- x_i les valeurs de la variable X (ici, la hauteur d'eau),
- β_0, et β_1 les paramètres ou coefficients inconnus à ajuster,
- u_i l'erreur du modèle[54].

Les termes d'erreur u_i du modèle sont les valeurs d'une variable aléatoire U représentant l'ensemble des variables pouvant expliquer les valeurs de la variable Y, et qui ne sont pas intégrées dans le modèle. Ils résument les informations manquantes qui permettraient d'expliquer totalement les valeurs de Y à l'aide de la variable X. Les termes d'erreur sont supposés être indépendants de X et de Y et distribués selon une loi normale $N(0, \sigma_u^2)$ (Besse, 2000 ; Rakotomalala, 2013). L'estimation des paramètres β_0, et β_1 est obtenue par minimisation des carrés des u_i à partir des observations de l'échantillon des variables Y et X (méthode des moindres carrés).

À chaque valeur de X correspond une valeur estimée (ou prédite) de Y par le modèle :

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_i$$

[54] Plus communément, on emploie également l'expression y = ax + b dans le cas de la régression simple, où a désigne la pente et b la constante du modèle.

Les résidus du modèle étant calculés par :

$$e_i = \hat{u}_i = y_i - \hat{y}_i$$

Le coefficient de détermination R^2 du modèle, est calculé par :

$$R^2 = \frac{\sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}$$

Compris entre 0 et 1, le R^2 mesure le rapport entre la variabilité des observations expliquée par le modèle et la variabilité totale de la variable Y, autrement dit la part de la variation des observations de la variable Y expliquée par le modèle, et donc la qualité de son ajustement (Besse, 2000 ; Rakotomalala, 2013).

Dans un modèle de régression, on évalue la significativité de la relation entre Y et X, ainsi que celle des coefficients ajustés à l'aide des tests de Fisher et de Student, afin de vérifier que le modèle mis en place apporte une réelle explication des observations.

Le premier cas illustré est celui de la régression linéaire simple du coût des dommages par la hauteur d'eau (Figure 130 et Tableau 16).

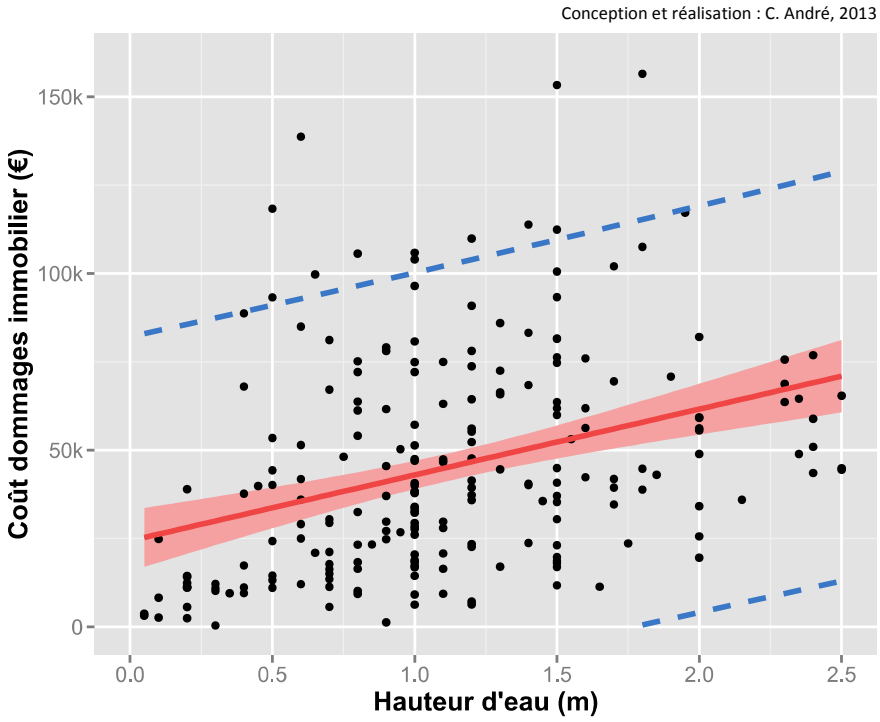


Figure 130 : Modèle de régression simple du coût des dommages représenté sur le nuage de points des données de sinistres[55].

[55] Sur toutes les figures de cette section, le modèle est représenté par la droite rouge, et son intervalle de confiance (à 95 %) est représenté par la zone rouge pâle. L'intervalle de confiance des prédictions (à 95 %) est représenté par les tirets bleus.

Conception et réalisation : C. André, 2013

Modèle	R^2	Écart type σ résiduel	F de Fisher	Valeur p
	0.1187	28 940	28.54	2.357e-07 ***
Paramètres	Coefficient β	Écart type σ	t de Student	Valeur p
Constante (β_0)	24 385	4 376	5.573	7.58e-08 ***
Hauteur (β_1)	18 620	3 485	5.343	2.36e-07 ***

Tableau 16 : Résultats du modèle de régression simple du coût des dommages par la hauteur d'eau.

Avec une valeur p très faible[56], le test de Fisher indique que le modèle est globalement significatif, c'est-à-dire que la relation entre les variables X et Y est significativement non nulle. Cependant, le R^2 du modèle, de 11 %, est très peu élevé. Le pouvoir explicatif du modèle est donc limité, ce qui explique pourquoi l'écart type résiduel du modèle est si élevé.

La variable hauteur d'eau est malgré tout significative au risque de 1 % (test de Student), elle participe donc bien à expliquer le coût des dommages. Pour ce modèle de régression linéaire simple, le coefficient β_1 indique qu'une augmentation de la hauteur d'eau de 1 m induit une augmentation du coût des dommages de près de 19 000 € (à noter que le modèle n'est pas utilisable pour prédire le coût de sinistres pour lesquels la hauteur d'eau est nulle dans le bâtiment).

L'intervalle de confiance des prédictions, représenté par les tirets bleus sur la Figure 130, indique la zone dans laquelle l'estimation par le modèle du coût d'un sinistre tiré au hasard dans l'échantillon a 95 % de chances de se trouver. C'est donc une indication de l'étendue des erreurs auxquelles il faut s'attendre si on utilise ce modèle pour prédire les coûts de dommages (à condition que l'échantillon de construction soit représentatif de la population sur laquelle est utilisé le modèle). L'intervalle est très éloigné de la droite, toujours à cause de la dispersion importante des observations pour l'évènement de submersion lié à Xynthia, qui n'est expliquée par le modèle que dans une faible proportion.

2.1.2. Transformations de variables

Les relations entre le coût des dommages et la hauteur d'eau ne sont pas nécessairement linéaires : les études qui ont déjà réalisé des fonctions d'endommagement empiriques sur la base de régressions, ont montré que dans la plupart des cas, des transformations de la variable dépendante Y ou de la variable explicative X permettaient d'améliorer les capacités de prédiction des modèles. Ces transformations de variables, basées sur la connaissance de

[56] La valeur p exprime la probabilité que l'on a de se tromper en affirmant que la corrélation en question est significative. Avec une valeur p inférieure à 0,1, le modèle est significatif au risque de 10 % (*). Avec une valeur p inférieure à 0.05 ou 0.01, le modèle est significatif, respectivement au risque de 5 % (**) et de 1 % (***).

l'endommagement des inondations, permettent donc de régler en partie les questions de non-linéarité des relations et d'améliorer les modèles de prédiction (Merz et al., 2010).

Les transformations les plus couramment effectuées dans la littérature sur les inondations sont de deux types :

Le calcul de la racine carrée de la hauteur d'eau est souvent utilisé pour remplacer la variable hauteur d'eau dans les fonctions d'endommagement (par ex. Büchele et al., 2006 ; Prettenthaler et al., 2010 ; Merz et al., 2010). Ce choix est justifié par le fait que la progression du coût des dommages est importante pour les hauteurs d'eau faibles, et moindre pour les hauteurs d'eau plus fortes, la plupart des éléments pouvant être endommagés dès de faibles hauteurs (cloisons, embellissements muraux). Cette forme de modèle est valable dans les situations où l'eau n'atteint pas les plafonds et les étages supérieurs des habitations, phénomène qui entraine des dommages supplémentaires pour les très fortes hauteurs d'eau. Dans le jeu de données d'assurance des tempêtes Johanna et Xynthia, les hauteurs d'eau ne dépassant pas 2,5 m, aucun cas de dommages aux étages des habitations n'a été observé.

Le modèle de régression basé sur la racine carrée de la hauteur d'eau a pour formule $y_i = \beta_0 + \beta_1\sqrt{x_i} + u_i$. Ses résultats sont présentés dans le Tableau 17.

Conception et réalisation : C. André, 2013

Modèle	R^2	Écart type σ résiduel	F de Fisher	Valeur p
	0.1371	28 640	33.69	2.333e-08 ***
Paramètres	Coefficient β	Écart type σ	t de Student	Valeur p
Constante (β_0)	5 126	7 182	0.714	0.476
√Hauteur (β_1)	39 396	6 787	5.804	2.33e-08 ***

Tableau 17 : Résultats du modèle de régression simple du coût des dommages par la racine de la hauteur d'eau.

Avec un R^2 de 13 %, soit une amélioration relativement négligeable par rapport au modèle linéaire, ce deuxième modèle ne permet pas de réduire l'intervalle de confiance des prédictions (écart type résiduel du modèle de 28 600 €).

De nombreux auteurs utilisent également les transformations logarithmiques dans le but de compenser la non-linéarité de la relation entre les variables dépendante et explicative (par ex. Merz et al., 2004 ; Zhai et al., 2005 ; Nascimento et al., 2006 ; Prettenthaler et al., 2010 ; Kim et al., 2013). L'analyse des données d'assurance recueillies pour Johanna et Xynthia a montré que le coût des dommages ne suit effectivement pas une distribution normale, mais une distribution très asymétrique de type log-normale (cf. partie III, section 1.3) : beaucoup

de dossiers ont des coûts faibles alors que quelques rares dossiers ont des coûts très élevés (et ce même au sein des sinistres concernant des maisons individuelles uniquement). Il est donc choisi de réaliser une transformation de la variable coût en son logarithme ; le modèle ainsi obtenu est dit modèle « semi-log » (la hauteur d'eau n'est pas transformée). Ce modèle de régression a pour formule $ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i + u_i$. Ses résultats sont présentés dans le Tableau 18.

Conception et réalisation : C. André, 2013

Modèle	R^2	Écart type σ résiduel	F de Fisher	Valeur p
	0.199	0.798	52.66	7.386e-12 ***
Paramètres	Coefficient β	Écart type σ	t de Student	Valeur p
Constante (β_0)	9.6429	0.1207	79.926	< 2e-16 ***
Hauteur (β_1)	0.6973	0.0961	7.256	7.39e-12 ***

Tableau 18 : Résultats du modèle de régression semi-log par la hauteur d'eau.

Le R^2 du modèle semi-log, de 19 %, est meilleur que ceux des deux précédents modèles. Il permet donc de mieux expliquer les variations de coûts de l'échantillon en fonction de la hauteur d'eau. On estime les dommages prédits par le modèle semi-log à l'aide de la formule $\hat{y}_i = exp(9.6429 + 0.6973 x_i)$. Le modèle est représenté sur la Figure 131.

Conception et réalisation : C. André, 2013

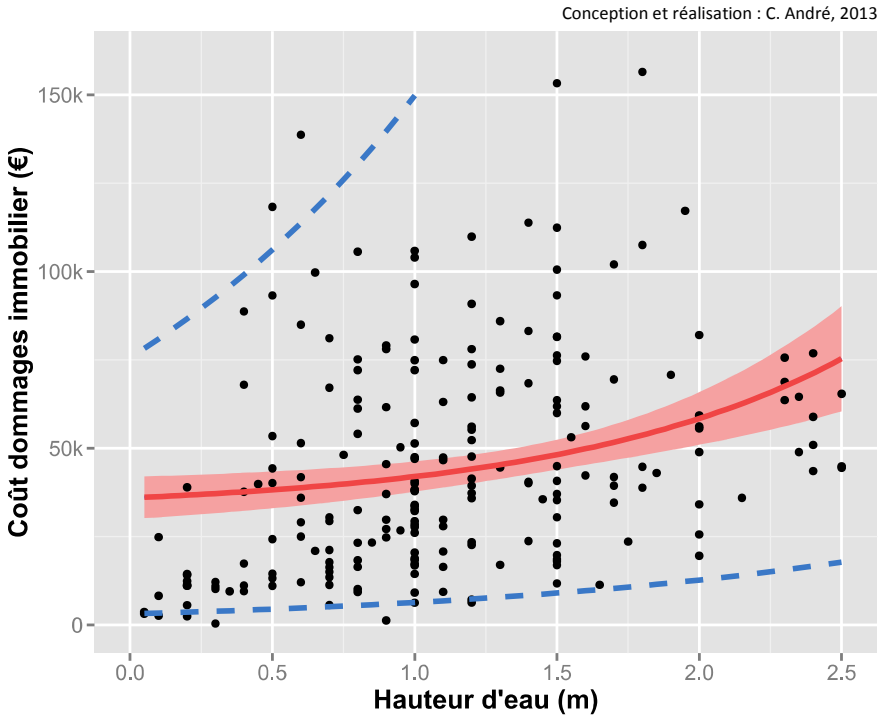


Figure 131 : Modèle de régression semi-log représenté sur le nuage de points des données de sinistres.

Cependant, les intervalles de confiance de la prédiction (tirets bleus) sont plus étendus que pour les deux précédents modèles, en particulier pour les hauteurs d'eau élevées. La prédiction de coûts des dommages à l'aide de ce modèle est donc toujours entachée d'une très forte incertitude.

Le dernier modèle de régression simple réalisé consiste à expliquer, à la place du coût des dommages, le taux d'endommagement des biens par la hauteur d'eau. Cette approche, très souvent pratiquée dans l'évaluation des dommages à l'aide de fonctions d'endommagement, dites relatives (cf. partie I, section 2.2.3), permet de s'affranchir des variations de la valeur totale des biens (Messner et al., 2007 ; Merz et al., 2010). Pour ce modèle, le taux d'endommagement est défini par le rapport du coût des dommages sur le coût de construction de l'habitation, lui-même estimé par le produit de la surface habitable du rez-de-chaussée du bien avec le coût de construction au m² moyen (issu de l'Enquête sur le Prix des Terrains à Bâtir, cf. partie III, section 3.2). Les résultats de ce modèle sont présentés par le Tableau 19.

Conception et réalisation : C. André, 2013

Modèle	R^2	Écart type σ résiduel	F de Fisher	Valeur p
	0.1952	0.1917	51.41	1.231e-11 ***
Paramètres	Coefficient β	Écart type σ	t de Student	Valeur p
Constante (β_0)	0.1798	0.0290	6.204	2.84e-09 ***
Hauteur (β_1)	0.1655	0.0231	7.170	1.23e-11 ***

Tableau 19 : Résultats du modèle de régression du taux d'endommagement par la hauteur d'eau.

Avec un taux d'endommagement moyen de 37 %, le modèle basé sur le taux d'endommagement du rez-de-chaussée des bâtiments a un R^2 de 19 %, comparable à celui du modèle semi-log. Cependant, les intervalles de confiance des prédictions de ce modèle sont moins importants (Figure 132).

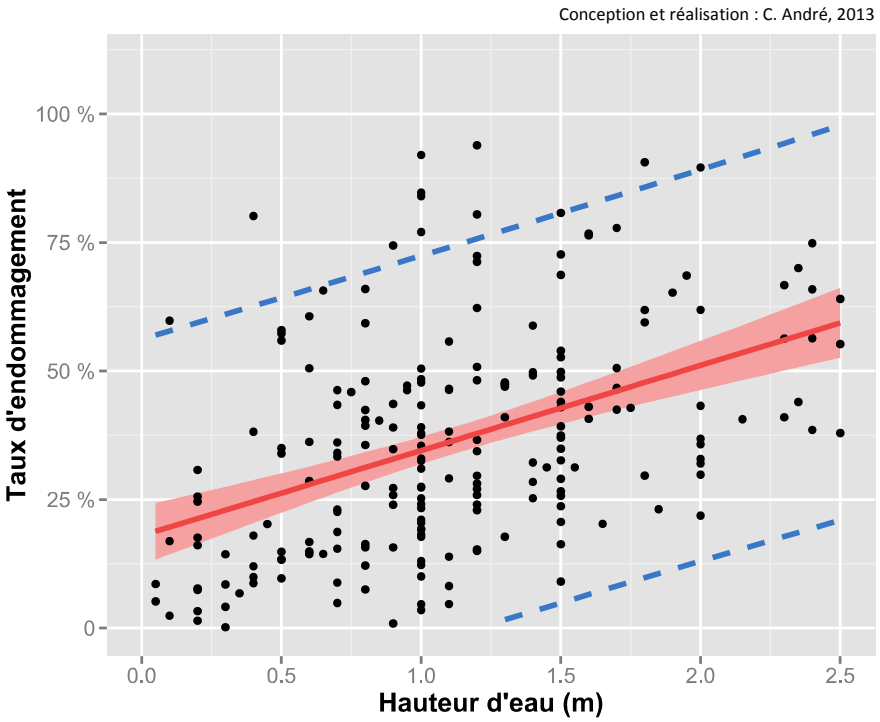


Figure 132 : Modèle de régression du taux d'endommagement représenté sur le nuage de points des données de sinistres.

La variable taux d'endommagement permet donc d'améliorer l'estimation des dommages, par le biais d'une fonction d'endommagement relative, en comparaison avec une fonction d'endommagement permettant de prédire directement le coût absolu des dommages aux habitations. Ce type de fonctions a l'avantage d'être plus facilement transposable d'un site à un autre et adaptable dans le temps, dans le sens où il ne dépend pas de la valeur des biens exposés à l'aléa, qui est très variable. Cependant, dans le cas présent, la surface habitable du rez-de-chaussée ayant été utilisée pour évaluer la valeur exposée à la submersion des bâtiments, il s'agit d'un modèle de taux d'endommagement du rez-de-chaussée des bâtiments uniquement. De plus, l'utilisation d'un coût de construction au m² constant, induit que les dommages ne sont en réalité rapportés qu'à la surface habitable de l'habitation, ce qui est insuffisant pour expliquer toutes les différences de coût des biens (cf. partie IV, section 3.3.3).

L'utilisation de la méthode de régression simple pour la réalisation de modèles de prédiction des dommages montre donc que malgré les différentes transformations de variables réalisées, les coefficients de détermination R^2 des modèles restent faibles.

2.2. Modèle d'estimation des coûts par classes de hauteur d'eau

Au vu de ces résultats, et de l'incertitude mentionnée sur les valeurs de hauteur d'eau, qui participe dans une certaine mesure à la dispersion des données, il est proposé une autre forme très simple de modèle, dont l'estimation des dommages est basée sur la moyenne des coûts par classes de hauteur d'eau. On laisse ici de côté l'approche de modélisation économétrique pour aborder une méthode assimilable à l'analyse de données (méthode de classification selon des seuils de hauteur d'eau choisis).

En effet, les fonctions d'endommagement existantes dans la littérature ne sont pas toutes des fonctions continues découlant d'un modèle de régression. En particulier, les fonctions réalisées sur la base de jugement d'expert, sont le plus souvent construites sous la forme d'une estimation d'un coût des dommages sur des modèles types de bâtiments, pour différents seuils de hauteur d'eau. C'est notamment le cas des fonctions d'endommagement du *Multi-Coloured Manual* (Penning-Rowsell et al., 2010) et du CEPRI (CEPRI, 2013b), mais aussi de fonctions réalisées à partir de données empiriques (Dutta et al., 2003 ; Büchele et al., 2006).

À partir des données d'assurance recueillies, un modèle de cette forme (discontinue) est réalisé en utilisant comme valeurs, pour l'estimation des dommages, les moyennes du coût des dommages pour des classes de hauteur d'eau de 25 à 50 cm (Tableau 20).

Conception et réalisation : C. André, 2013

Classes de hauteur d'eau	Nombre d'observations	Coût estimé par le modèle
0 - 0,25 m	14	11 736 €
0,25 - 0,5 m	21	34 680 €
0,5 - 0,75 m	22	40 779 €
0,75 - 1 m	55	42 275 €
1 - 1,25 m	26	45 322 €
1,25 - 1,5 m	35	57 535 €
1,5 - 2 m	28	58 256 €
2 - 2,5 m	13	57 120 €
Total	214	45 237 €

Tableau 20 : Valeurs des coûts estimées et limites des classes pour le modèle d'estimation des coûts par classes de hauteur d'eau.

La Figure 133 représente les valeurs estimées (moyenne des données) et des boites de dispersion des coûts pour chaque classe de hauteur d'eau.

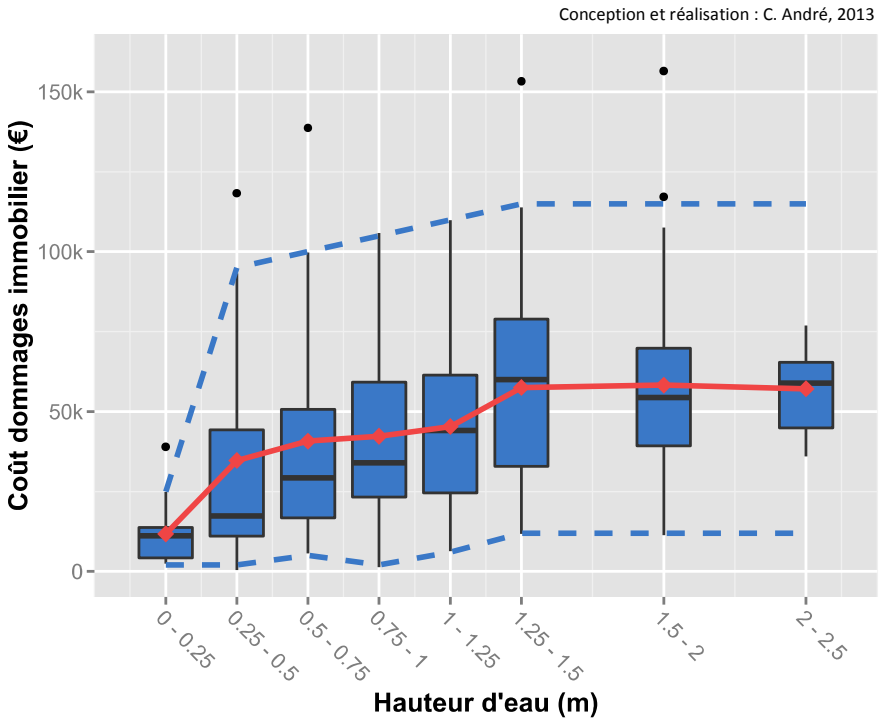


Figure 133 : Modèle d'estimation des coûts par classes de hauteur d'eau[57].

Au contraire d'un modèle de régression, ce type de modèle ne possède pas de coefficient de détermination R^2. D'après la formule donnée en section 2.1.1, on évalue la qualité des estimations du modèle, par similitude aux modèles de régression, en calculant le rapport de la variabilité des observations expliquée par le modèle sur la variabilité totale des observations : le coefficient obtenu est de 14 %. Bien que la hauteur d'eau et que les estimations de ce modèle soient discontinues (elles prennent un nombre fini de valeurs), le taux d'ajustement obtenu est du même ordre de grandeur que ceux obtenus par régression. Ce taux d'ajustement, ainsi que les intervalles de prédiction, témoignent toujours d'une grande incertitude pour l'estimation de dommages potentiels.

L'avantage de ce type de modèle réside surtout dans sa simplicité d'utilisation (estimation d'un coût de dommages unique pour tous les biens affectés par une même classe de hauteur d'eau). De plus, le modèle, non linéaire, fait ressortir des seuils « physiques » de hauteur d'eau pour lesquels le coût augmente de manière importante : le premier se situe entre 25 et 50 cm et correspond au seuil de hauteur d'eau à partir duquel est réalisé le remplacement systématique des cloisons. Le second seuil, situé à 1,5 m, peut correspondre au seuil à partir duquel ont été remplacées les menuiseries des fenêtres, non affectées pour les hauteurs d'eau plus faibles. Au-delà de 1,5 m, les dommages les plus importants sont atteints et le coût n'augmente plus en fonction de la hauteur d'eau.

[57] Le modèle est représenté par les points rouges et l'intervalle de confiance des prédictions (à 95 %) est représenté par tirets bleus. Attention : pour la dernière classe de hauteurs d'eau (2 à 2,5 m) le faible nombre d'observations rend la moyenne et les intervalles de prédiction très imprécis.

L'exploration des pistes offertes par différents modèles de type fonctions d'endommagement, issus de la littérature des inondations fluviales, fait ressortir les limites attendues des capacités de prédiction des modèles univariés mis en place, au vu de leurs faibles coefficients de détermination R^2 (de l'ordre de 15 % à 20 %) et de leurs intervalles de confiance des prédictions très étendus, malgré les différentes transformations de variables et solutions non linéaires testées sur les données d'assurance.

Le modèle d'estimation des coûts par classes de hauteur d'eau (Tableau 20 et Figure 133), de forme proche des fonctions d'endommagement de la littérature développées sur la base de jugement d'expert, est retenu comme le meilleur modèle pour l'estimation des valeurs absolues de coût des dommages au bâti, du fait de sa capacité à établir une relation non linéaire entre la hauteur d'eau et le coût des dommages.

Plus performant, le modèle de régression simple du taux d'endommagement (du rez-de-chaussée), de formule : $Taux = 0.18 + 0.17 * Hauteur$ (Tableau 19, page 230), est le type de modèle simple préconisé pour l'évaluation des dommages, à condition de disposer de données sur la valeur totale (exposée) des biens considérés, pour être en mesure d'évaluer le coût *ex ante* d'un scénario de submersion marine.

3. Modèles multivariés : prise en compte de la plurifactorialité des coûts des dommages liés à la submersion marine

Le manque de précision des prédictions des modèles univariés, auquel on pouvait bien sûr s'attendre au vu des analyses menées dans la partie précédente de cette thèse, vient du fait que la variable explicative utilisée, la hauteur d'eau, est loin de suffire à expliquer l'ensemble des variations du coût des dommages, qui dépend de nombreux autres paramètres (cf. partie IV). Nous nous orientons donc vers la mise en place de modèles multivariés, utilisant non plus la seule hauteur d'eau mais plusieurs variables explicatives pour prédire le coût des dommages.

Toujours d'après la littérature, les modèles multivariés, utilisés de plus en plus couramment pour l'évaluation des dommages des inondations, sont de deux grands types : les modèles de régression multiple et les arbres de régression.

3.1. Méthode de régression multiple

Présentée brièvement dans la première partie de cette thèse, la méthode de régression multiple est couramment utilisée pour prédire le prix d'un bien immobilier en fonction de plusieurs variables de différents types, aussi bien quantitatives que qualitatives, et représentant aussi bien des caractéristiques intrinsèques des biens que des caractéristiques de leur environnement. Partant de ce constat, cette méthode peut donc être appropriée pour répondre à la problématique de l'évaluation des coûts des dommages, en intégrant à la fois des variables quantitatives et qualitatives concernant les caractéristiques des enjeux et de l'aléa au sein d'un même outil de modélisation.

Dans le cadre de la méthode des prix hédoniques, l'objectif principal de la mise en place d'un modèle statistique est la description et l'explication des rapports entre une variable dépendante (par ex. le prix de biens immobiliers) et une ou plusieurs caractéristiques environnementales que l'on cherche à évaluer, et pour lesquelles il n'existe pas de valeur de marché. Au contraire, ici, en évaluation des dommages, l'objectif poursuivi est la mise en place d'un outil de prédiction du coût des dommages par la meilleure combinaison possible de variables explicatives.

Des travaux de conception de modèles d'endommagement multivariés, basés notamment sur des régressions multiples, ont déjà été réalisés en application au risque inondation (cf. partie I, section 2.2.5). On peut par exemple citer les travaux d'une équipe de chercheurs japonais, qui a produit un modèle d'endommagement reposant sur des données d'enquête de la population sinistrée par les inondations de la région de Tokai en 2000 (Zhai et al., 2005), les travaux de F. Prettenthaler et al. (2010) qui analysent les dommages subis par les bâtiments résidentiels après l'inondation en 2006 du village de Dürnkrut en Autriche, ou encore ceux de J. M. Kim et al. (2013), qui réalisent un modèle de régression multiple, basé sur des données d'assurance de l'ouragan Ike de 2008 sur les bâtiments commerciaux au Texas. Nous nous appuyons donc sur ces modèles récents pour proposer un modèle de régression multiple pour l'estimation des dommages à partir de l'échantillon des données d'assurance de la tempête Xynthia.

3.1.1. Formulation du modèle

La régression multiple est la généralisation multivariée de la régression simple. Elle consiste à expliquer les valeurs d'une variable dépendante quantitative continue Y par non plus une seule, mais p variables explicatives X_j où j = 1, …,p., qui peuvent être soit quantitatives soit qualitatives (les variables qualitatives doivent être binaires, ou recodées en variables

binaires pour chacune de leurs modalités). Pour une séquence d'observations statistiques provenant d'un échantillon de taille n :

$$(y_i, x_{i,1}, \dots, x_{n,1}, x_{i,2}, \dots, x_{n,2}, \dots, x_{i,p}, \dots, x_{n,p}) \text{ où i = 1, …, n.}$$

Le modèle s'écrit :

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \cdots + \beta_p x_{i,p} + u_i$$

Avec :

- y_i les valeurs mesurées de la variable Y (ici, le coût des dommages),
- $x_{i,j}$ les valeurs des variables X_j,
- β_0, ..., β_p, les paramètres ou coefficients inconnus à ajuster,
- u_i l'erreur du modèle.

De la même manière qu'en régression simple, les termes d'erreur sont supposés être indépendants des variables X et Y et distribués selon une loi normale $N(0, \sigma_u^2)$ (Besse, 2000 ; Rakotomalala, 2013). L'estimation des paramètres β_0, …, β_p est obtenue par la méthode des moindres carrés.

Les valeurs estimées (ou prédites) de Y par le modèle ont pour expression :

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \cdots + \beta_p x_{i,p}$$

Deux principaux diagnostics sont à effectuer pour vérifier la validité du modèle de régression multiple obtenu. Le premier concerne la colinéarité des variables explicatives. En effet, si les variables explicatives sont trop corrélées entre elles, elles risquent d'expliquer les mêmes variations de la variable dépendante et de fausser le modèle. Un certain nombre de variables explicatives non significatives sont ainsi écartées du modèle, lors de la phase de construction de celui-ci, si elles montrent une forte colinéarité entre elles. Il convient néanmoins de vérifier que les variables explicatives conservées dans le modèle ne sont pas colinéaires, ce qui est réalisé par le calcul des facteurs d'inflation de la variance (*Variance Inflation Factors* ou VIF) (Besse, 2000 ; Rakotomalala, 2013).

De plus, les résidus e_i (différence, pour chaque individu, entre les observations de Y et les valeurs prédites par le modèle) doivent être analysés, afin de vérifier que leur distribution est normale (ils doivent être centrés et répartis uniformément autour de zéro), sans quoi le modèle est biaisé. Il faut aussi vérifier que la dispersion des résidus est constante en fonction des valeurs de la variable dépendante Y et des variables explicatives X_j. Dans le cas contraire, on se trouve en présence d'hétéroscédasticité (Figure 134), qui nuit à la qualité des prédictions du modèle.

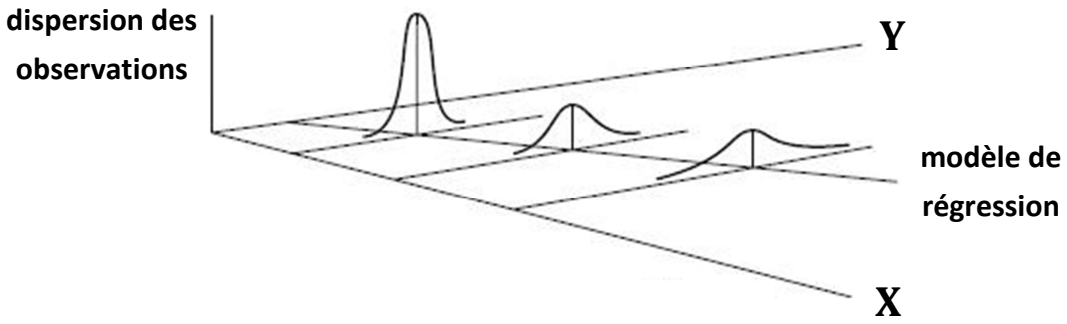


Figure 134 : Illustration du phénomène d'hétéroscédasticité (source : Wikipédia).

Ces diagnostics peuvent être réalisés à l'aide de tests statistiques ou de l'analyse des graphiques des résidus. Dans le cas de non-normalité des résidus ou d'hétéroscédasticité, une transformation de la variable dépendante ou des variables explicatives peut, dans des conditions favorables, résoudre le problème (Besse, 2000 ; Rakotomalala, 2013).

3.1.2. Méthodologie de modélisation

Il existe plusieurs méthodes de sélection des variables explicatives pour l'optimisation du modèle de régression, basées sur différents critères d'évaluation de l'ajustement. Dans le cas présent, nous choisissons une procédure de « sélection arrière » des variables (ou *backward selection*), en démarrant du modèle contenant toutes les variables explicatives candidates et en éliminant une à une les variables statistiquement non significatives. Le meilleur modèle composé à partir des variables restantes est sélectionné sur la maximisation du coefficient de détermination R^2. Ce critère étant croissant en fonction du nombre de variables explicatives sélectionnées, on utilise plutôt le R^2 ajusté, qui introduit une pénalisation liée à la complexité du modèle, c'est-à-dire le nombre de variables explicatives. À pouvoir explicatif équivalent, on préfèrera le modèle le plus simple, comportant le moins de variables. Le R^2 ajusté permet de comparer des modèles de plusieurs niveaux, ainsi que des modèles de régression multiple à des modèles de régression simple (Besse, 2000 ; Rakotomalala, 2013).

Un des problèmes qui peuvent être rencontrés pour l'élaboration d'un modèle de régression multiple est le nombre important de valeurs non renseignées dans la base de données. En effet, ce problème est plus pénalisant qu'en régression simple, car si une information est manquante pour une seule des variables explicatives, les observations de toutes les autres variables ne peuvent être utilisées pour ajuster le modèle pour ce bien endommagé. Une solution à ce problème consiste à remplacer les valeurs non renseignées par la moyenne des valeurs observées de la variable explicative en question, de manière à pouvoir utiliser toutes

les observations dans le calcul. Dans le cas présent, le nombre des valeurs manquantes pour certaines variables est trop important et cette solution ne permet plus à la variable d'expliquer une proportion significative de la variation de coût. La solution que nous avons privilégiée consiste à remplacer, si possible, la variable insuffisamment renseignée par une autre information de même nature et plus complète. C'est par exemple le cas pour les paramètres hauteur d'eau et surface habitables, pour lesquelles plusieurs sources de données sont disponibles (cf. partie IV).

3.1.3. Présentation des variables explicatives candidates

Pour les modèles de régression multiple, la variable dépendante (ou « à expliquer ») reste le coût des dommages immobiliers. Au vu des conclusions de l'analyse des données menée dans la partie IV, les variables explicatives candidates sélectionnées sont résumées dans le Tableau 21.

Variables	Type	Source
Caractérisant l'aléa		
Hauteur	Continue	Dossiers d'assurance
Durée	Continue	Terrain
Caractérisant les enjeux		
Surface RDC	Continue	BD PARCELLAIRE®
Nb Pièces RDC	Continue	Dossiers d'assurance
Étage (1=oui)	Binaire	Dossiers d'assurance
Sous-sol (1=oui)	Binaire	Dossiers d'assurance
Age (1=récent)	Binaire	Terrain
Occupation (1=secondaire)	Binaire	Dossiers d'assurance

Tableau 21 : Présentation des variables explicatives candidates pour le modèle de régression multiple.

Les caractéristiques de l'aléa intégrées comme variables candidates au modèle multivarié sont la hauteur d'eau et la durée de submersion. Bien que la durée n'ait pas révélé de lien direct avec le coût des dommages lors de l'analyse des données (cf. partie IV, section 2.2.1), il se peut toutefois qu'elle ait eu un effet marginal sur l'endommagement (par exemple sur les dommages aux carrelages et aux dalles béton). On décide donc de l'intégrer au modèle afin de déterminer si elle a une influence sur le coût des dommages, une fois considéré l'impact des autres paramètres. La source des données de hauteur d'eau choisie est la hauteur issue des rapports d'expertise. En effet, la modélisation numérique de l'aléa n'a pu être réalisée que pour le site des Bouchôleurs, et au vu de la moindre précision des hauteurs obtenues par interpolation des mesures de terrain, c'est la hauteur d'eau issue des dossiers qui reste la plus fiable. Les autres paramètres de l'aléa (vitesse du courant, vitesse de montée de l'eau et chocs de vagues) ont été jugés trop faibles lors de Xynthia pour avoir une influence sur les dommages. Ces paramètres n'étant disponibles que pour le site des Bouchôleurs, ils ne sont pas intégrés au modèle.

Au titre d'informations synthétiques sur l'exposition à l'aléa, l'altitude et la distance au trait de côte, variables analysées à l'échelle régionale (cf. partie III), sont parfois utilisées comme variables explicatives dans les modèles multivariés (par ex. Kim et al., 2013). Dans le cas présent, au vu de l'échelle locale d'analyse, et puisque des informations détaillées concernant l'aléa sont disponibles, dont la hauteur d'eau, nous jugeons que l'altitude et la distance au trait de côte ne constituent pas des variables candidates pertinentes pour le modèle mis en place. Suite aux tests réalisés en régression simple, la racine carrée de la hauteur d'eau est également utilisée comme variable explicative candidate. Les modèles sont testés avec la variable originale et avec la racine de la variable afin de garder le modèle avec le R^2 le plus fort.

Les caractéristiques des enjeux intégrées au modèle sont plus nombreuses : on considère la surface et le nombre de pièces du rez-de-chaussée, la présence d'étage et de sous-sol, l'âge de l'habitation et le type d'occupation, qui sont toutes des variables qui se sont montrées plus ou moins corrélées au coût des dommages lors de l'analyse des données (cf. partie IV, section 3).

Du fait du nombre important de valeurs manquantes de la variable surface habitable dans les rapports d'expertise, la superficie des habitations, évaluée à partir de la BD PARCELLAIRE®, disponible pour tous les sinistres, est privilégiée. Les autres variables sont issues des rapports d'expertise, excepté l'âge des habitations : cette variable binaire est déduite des types de bâti identifiés lors des inspections de terrain (les bâtiments sont classés dans une catégorie « récente » - post 1945 et « ancienne » - pré 1945). Cette variable est donc également liée aux matériaux de construction utilisés dans les habitations. Les variables concernant le montant mobilier assuré et le revenu moyen communal, au vu de leurs limites dans l'explication des coûts des dommages, mentionnées lors de l'analyse, ne sont pas intégrées au modèle.

Pour que le modèle mis en place puisse être utilisé pour une prédiction du coût de dommages *ex ante*, il faut veiller à ce que les variables explicatives intégrées aux modèles concernent des informations qu'il est possible de collecter sur tout site d'étude. Les hauteurs d'eau obtenues par modélisation numérique hydraulique sur le site des Bouchôleurs montrent une bonne corrélation avec les hauteurs issues des rapports d'expertise : il est donc possible d'utiliser cette source d'information comme donnée d'entrée pour la variable hauteur dans le modèle. Il faut néanmoins s'assurer que les hauteurs obtenues par modélisation ne soient pas systématiquement surestimées ou sous-estimées par le modèle hydraulique, et que la surélévation moyenne des habitations

n'empêche pas la substitution de hauteurs mesurées à l'intérieur des bâtiments à des hauteurs évaluées à l'extérieur, par rapport au terrain naturel utilisé pour la réalisation des MNT. Dans le cas contraire, des coefficients seront à appliquer pour utiliser la hauteur d'eau issue d'un modèle hydraulique dans le modèle d'évaluation des dommages (cf. partie VI, section 2.3.1).

Pour l'évaluation des surfaces des habitations, ce sont les données de la BD PARCELLAIRE® qui ont été utilisées pour la calibration du modèle, c'est donc l'emprise au sol des bâtiments qu'il faudra utiliser pour prédire les dommages (et pas des données concernant la surface habitable). Pour les autres informations concernant les enjeux (nombre de pièces, présence d'étage ou de sous-sol, âge et type d'occupation), soit des données individuelles seront disponibles via des enquêtes locales, ou les fichiers fonciers, accessibles aux collectivités territoriales, soit les données de l'INSEE à l'échelle communale (ou à celle des îlots IRIS) seront utilisées pour reconstituer les caractéristiques de habitations du site étudié.

Afin de faire une synthèse des relations entre les variables explicatives et la variable dépendante, explorées dans la partie IV, ainsi que pour l'analyse de la colinéarité entre variables explicatives, on réalise une matrice de corrélation des différentes variables candidates (Tableau 22).

	Hauteur	Durée	Surface RDC	Nb Pièces RDC	Étage	Sous-sol	Age	Occupation	Coût
Coût	34	12	37	58	-16		34	-31	100
Occupation	17		-38	-31			-33	100	
Age		25	29	35	-17		100		
Sous-sol	-12	-13				100			
Étage	-26	-26		-26	100				
Nb Pièces RDC	15		39	100					
Surface RDC			100						
Durée	43	100							
Hauteur	100								

Tableau 22 : Matrice de corrélation des variables candidates pour le modèle de régression multiple (coefficients de corrélation de Pearson en %). Les cases sont grisées pour les corrélations non significatives (au seuil de 5 %).

L'analyse de la matrice de corrélation confirme que les variables les plus corrélées au coût des dommages sont la hauteur d'eau, la surface et le nombre de pièces du rez-de-chaussée, ainsi que l'âge (types de modèles de bâti) et le mode d'occupation de l'habitation. D'un autre côté, les variables durée d'inondation, ainsi que la présence d'étage ou de sous-sol, sont faiblement corrélées au coût des dommages.

L'analyse de la potentielle colinéarité entre les variables explicatives montre que la durée et la hauteur de submersion sont relativement corrélées (43 %), ainsi que la surface et le nombre de pièces du rez-de-chaussée (39 %). Par ailleurs, le mode d'occupation en résidence secondaire est corrélé avec des habitations de petite taille (corrélation de -38 % et de -31 % avec la surface et le nombre de pièces) et avec les habitations les plus anciennes (corrélation de -33 % avec l'âge des bâtiments). L'ensemble des coefficients de corrélation étant inférieurs à 50 %, il ne devrait *a priori* pas y avoir de problème de colinéarité entre les variables explicatives dans le modèle de régression multiple.

Par la procédure de « sélection arrière » expliquée précédemment, sont éliminées les variables candidates qui ne participent pas significativement à l'explication du coût des dommages au sein du modèle. Sur le critère du coefficient de détermination R^2, le meilleur modèle obtenu avec les variables significatives est celui retenant les cinq variables explicatives suivantes (Tableau 23).

Conception et réalisation : C. André, 2013

Modèle	R^2 ajusté	Écart type σ résiduel	F de Fisher	Valeur p	
	0.4861	22 960	29.76	< 2.2e-16 ***	
Paramètres	Coefficient β	Écart type σ	t de Student	Valeur p	VIF
Constante	-41 313	10 337	-3.996	0.000101 ***	-
√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 23 : Résultats du modèle de régression multiple du coût des dommages.

Avec une valeur p très faible, le test de Fisher indique que le modèle est globalement significatif. Le R^2 ajusté du modèle est de 48 %, ce qui est très supérieur aux modèles de régression simple réalisés dans la section précédente. Le modèle de régression multiple explique près de la moitié de la variabilité totale des observations de coût des dommages, il a donc un pouvoir explicatif bien plus élevé que les modèles simples.

Les variables durée d'inondation, présence d'étage, et âge du bâtiment ne sont pas significatives, elles n'ont pas été conservées dans le modèle final. La part de variabilité des coûts qu'elles expliquent est donc déjà prise en compte dans le modèle, par exemple par les variables hauteur d'eau ou celles concernant la taille de l'habitation.

Plutôt que la variable hauteur d'eau elle-même, racine carrée de la hauteur d'eau est retenue pour le modèle, cette dernière permettant d'obtenir un meilleur coefficient de détermination R^2 final. Pour les variables retenues, l'ensemble des facteurs d'inflation de la variance (VIF) restent inférieurs à 1,3, ce qui est en dessous du seuil critique et indique que les variables conservées ne posent pas de problème de colinéarité (Besse, 2000 ; Rakotomalala, 2013).

Les coefficients β s'interprètent individuellement, « toutes choses égales par ailleurs » : par exemple, toutes les autres variables restant égales, une augmentation de surface de 1 m^2 provoque une augmentation du coût des dommages d'environ 120 €, alors qu'une augmentation d'une pièce principale provoque une augmentation du coût des dommages de près de 11 000 € (Tableau 23). Même si la surface et le nombre de pièces de l'habitation sont liés, leur significativité au sein du modèle indique qu'ils apportent une information différente à l'évaluation du coût des dommages. En effet, tandis que la surface au sol renseigne directement l'étendue des revêtements de sol, le nombre de pièces est davantage lié à la surface des cloisons de l'habitation, corps d'état représentant la part la plus importante des dommages lors d'une submersion. Le modèle multivarié permet d'affirmer que les deux informations sont complémentaires et utiles pour la prédiction du coût des dommages. De la même manière, la présence d'un sous-sol aggrave en moyenne le coût des dommages de près de 19 000 €, alors que le fait que l'habitation soit une résidence secondaire réduit en moyenne le coût des dommages d'environ 13 000 €.

Cependant, malgré un R^2 bien plus élevé que les modèles simples, le modèle de régression multiple possède un intervalle de prédiction toujours aussi élevé. Les écarts entre les observations et les prédictions du modèle, triées par ordre croissant de coût, sont toujours importants (Figure 135).

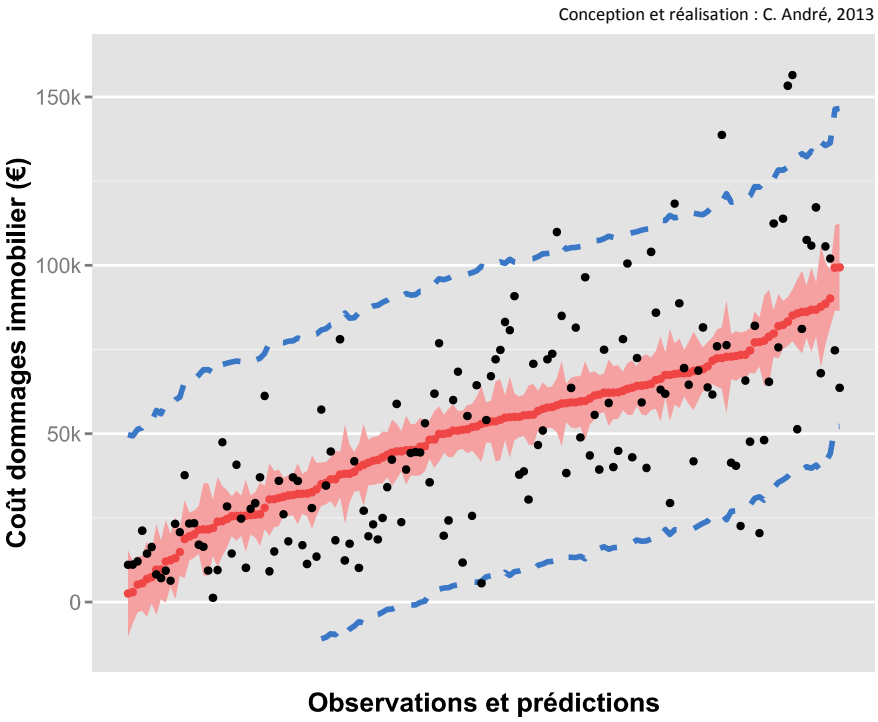


Figure 135 : Résultats du modèle de régression multiple du coût des dommages représenté avec les données de sinistres. L'axe des abscisses indique l'ordre les prédictions du modèle, triées par ordre croissant coût des dommages estimé[58].

Pour les diagnostics de normalité et d'homoscédasticité des résidus, nécessaires à la validation du modèle, on réalise les graphiques des résidus : le diagramme quantile-quantile et le graphique des résidus en fonction des valeurs estimées par le modèle (Figure 136).

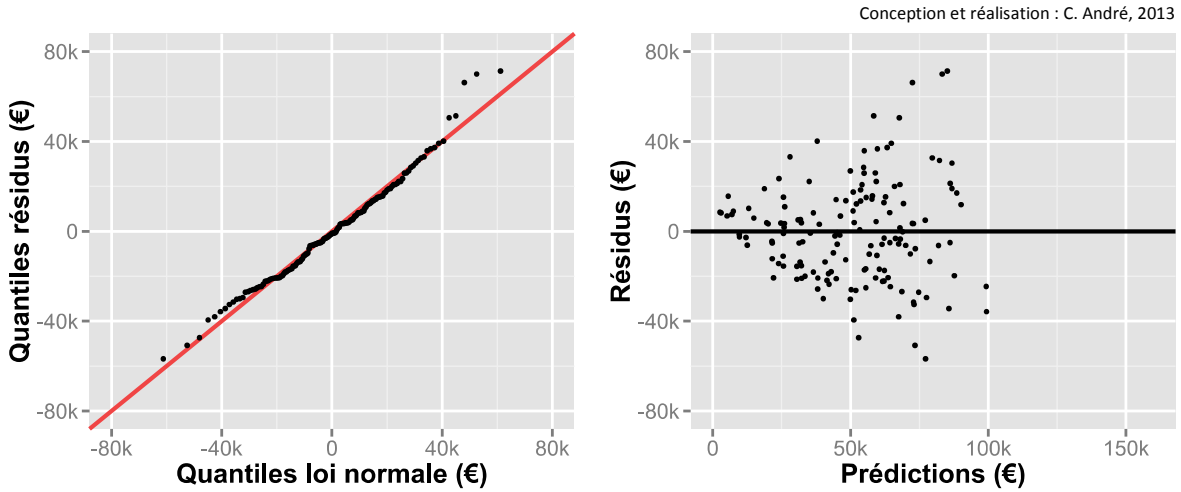


Figure 136 : Graphiques des résidus du modèle de régression multiple du coût des dommages : diagramme quantile-quantile et graphique des résidus en fonction des valeurs estimées par le modèle.

[58] Comme sur les graphiques des régressions simples, les observations sont représentées par les points noirs et les estimations du modèle par les points rouges. L'intervalle de confiance du modèle (à 95 %) est représenté par la zone rouge pâle, celui des prédictions (à 95 %) est représenté par les tirets bleus.

Au vu du diagramme quantile-quantile, les résidus du modèle sont bien normalement distribués. Le graphique des résidus en fonction des valeurs estimées par le modèle montre que ces derniers sont répartis de manière homogène autour de zéro. Cependant, la disposition caractéristique des résidus en forme d'éventail, montre qu'ils augmentent fortement pour les coûts de dommages élevés. Les plus fortes valeurs de dommages sont donc moins bien prédites par les variables explicatives du modèle. Les résidus ne sont pas indépendants des observations, on est donc dans un cas d'hétéroscédasticité.

3.1.4. Hétéroscédasticité et transformations de la variable dépendante

Pour tenter de régler le problème d'hétéroscédasticité constaté sur ce premier modèle multivarié, on réalise deux nouveaux modèles pour lesquels on transforme la variable coût des dommages. De la même manière qu'en régression simple, on teste un modèle semi-logarithmique et un modèle ayant pour variable dépendante le taux d'endommagement.

En reproduisant la procédure de « sélection arrière » des variables explicatives, ce sont les mêmes cinq variables explicatives, qui sont conservées pour les meilleurs modèles obtenus avec ces nouvelles variables dépendantes (Tableau 24 et Tableau 25).

Conception et réalisation : C. André, 2013

Modèle	R^2 ajusté	Écart type σ résiduel	F de Fisher	Valeur p	
	0.5021	0.5583	31.66	< 2.2e-16 ***	
Paramètres	Coefficient β	Écart type σ	t de Student	Valeur p	VIF
Constante	8.1366	0.2513	32.375	< 2e-16 ***	-
√Hauteur	1.1310	0.1771	6.385	2.12e-09 ***	1.1476
Surface RDC	0.0023	0.0008	2.777	0.00620 **	1.2898
Nb Pièces RDC	0.2747	0.0472	5.814	3.66e-08 ***	1.3080
Sous-sol	0.4637	0.1455	3.187	0.00176 **	1.0265
Occupation	-0.3231	0.1029	-3.139	0.00205 **	1.2873

Tableau 24 : Résultats du modèle de régression multiple semi-log.

Le modèle de régression multiple semi-log, avec un R^2 ajusté de 50 % est le modèle qui explique le mieux la variabilité des observations. Cependant, ses intervalles de prédiction, comme en régression simple (Figure 131), s'agrandissent pour les coûts élevés (Figure 137).

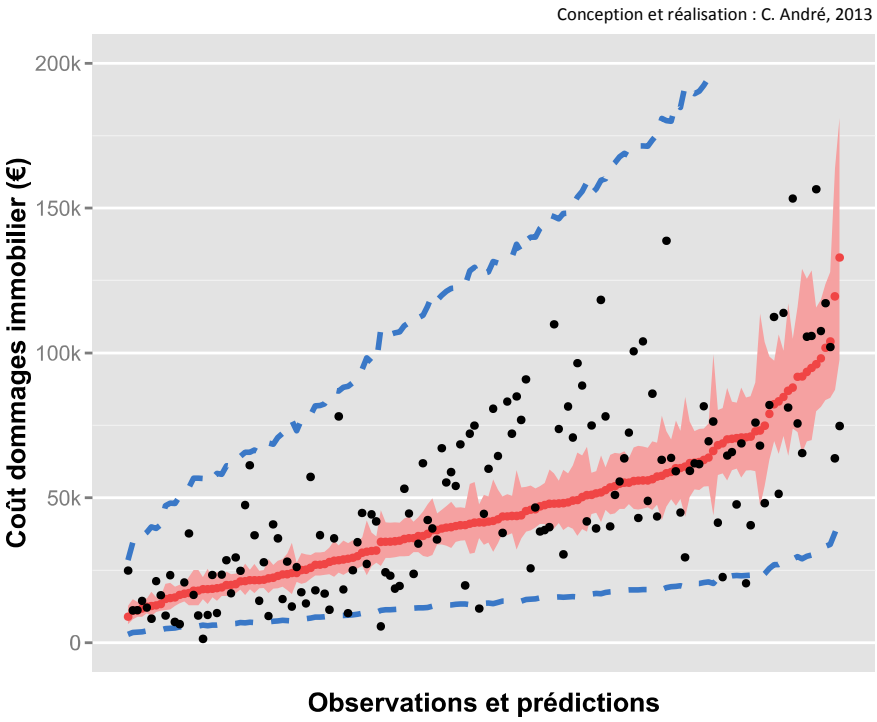


Figure 137 : Résultats du modèle de régression multiple semi-log représenté avec les données de sinistres. L'axe des abscisses indique l'ordre les prédictions du modèle, triées par ordre croissant coût des dommages estimé.

Le diagramme quantile-quantile des résidus et le graphique des résidus en fonction des valeurs estimées par le modèle indiquent que les résidus sont normalement distribués, mais ne sont toujours pas indépendants des observations (Figure 138).

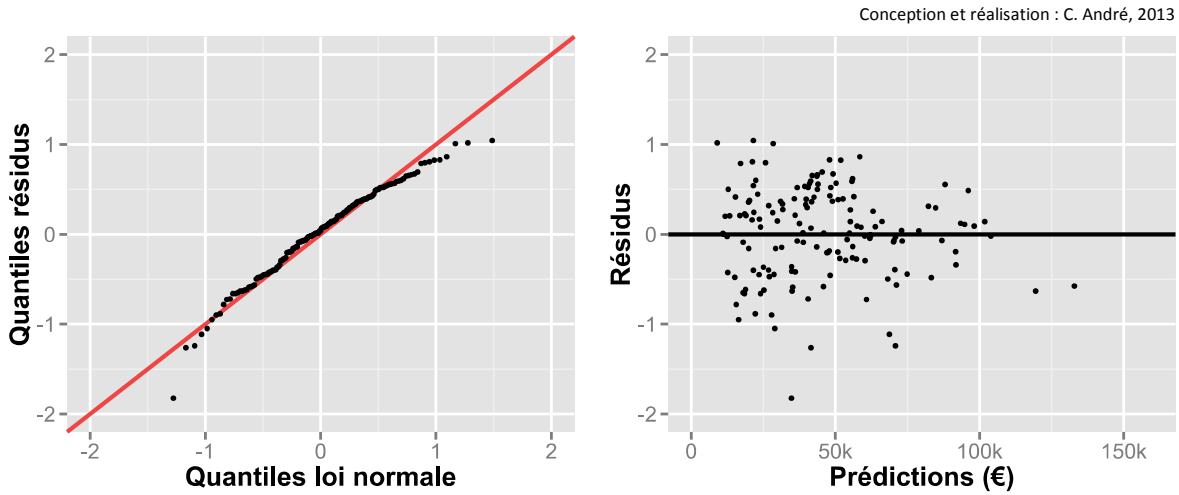


Figure 138 : Graphiques des résidus du modèle de régression multiple semi-log : diagramme quantile-quantile et graphique des résidus en fonction des valeurs estimées par le modèle.

Conception et réalisation : C. André, 2013

Modèle	R^2 ajusté	Écart type σ résiduel	F de Fisher	Valeur p	
	0.4400	0.1728	18.36	3.906e-14 ***	
Paramètres	Coefficient β	Écart type σ	t de Student	Valeur p	VIF
Constante	0.0549	0.0778	0.706	0.48132	-
√Hauteur	0.2862	0.0548	5.218	6.05e-07 ***	1.1476
Surface RDC	-0.0013	0.0003	-5.097	1.05e-06 ***	1.2898
Nb Pièces RDC	0.0742	0.0146	5.075	1.15e-06 ***	1.3080
Sous-sol	0.1184	0.0450	2.629	0.00948 **	1.0265
Occupation	-0.1043	0.0319	-3.274	0.00132 **	1.2873

Tableau 25 : Résultats du modèle de régression multiple du taux d'endommagement.

Le modèle de régression multiple du taux d'endommagement a un R^2 ajusté de 44 %, un peu plus faible que les deux précédents. Cependant, c'est ce modèle qui possède l'écart type résiduel et les intervalles de prédiction les plus faibles (Figure 139).

Conception et réalisation : C. André, 2013

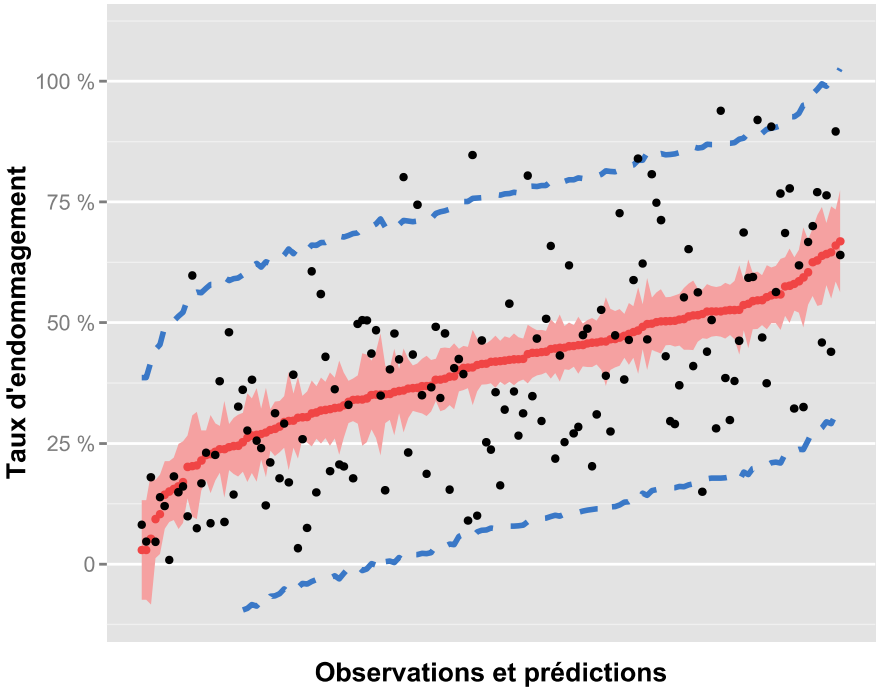


Figure 139 : Résultats du modèle de régression multiple du taux d'endommagement représenté avec les données de sinistres. L'axe des abscisses indique l'ordre les prédictions du modèle, triées par ordre croissant coût des dommages estimé.

Pour ce modèle, l'augmentation d'un mètre de la racine carrée de la hauteur d'eau, provoque une augmentation du taux d'endommagement de 28 % (attention, comme pour le modèle de régression simple, le taux d'endommagement évoqué ici est celui de la surface exposée à la submersion, c'est-à-dire le rez-de-chaussée des habitations). Les variables surface habitable et nombre de pièces sont toujours significatives pour ce modèle, mais ont un impact moins important sur le taux d'endommagement que sur le coût absolu des dommages. Le modèle prédit qu'en moyenne, toutes les autres variables étant constantes,

une habitation possédant une pièce de plus, donc davantage de cloisons, aura un taux d'endommagement plus fort de 7 %. Au contraire, une habitation ayant une surface plus importante de 10 m² aura un taux d'endommagement diminué de 1 % : cela signifie donc que les habitations de petite surface ont un taux d'endommagement légèrement plus important que les grandes. Cela confirme que les deux variables n'expliquent pas les mêmes types de dommages (revêtements de sol et cloisons).

Pour le modèle de régression multiple basé sur le taux d'endommagement, les graphiques des résidus montrent que ces derniers semblent ne pas être liés à l'évolution de la variable dépendante : ils sont bien distribués selon une loi normale et le nuage de points des résidus ne montre pas de tendance particulière des résidus en fonction des valeurs de taux d'endommagement prédites. C'est donc cette transformation qui permet de résoudre le problème de l'hétéroscédasticité (Figure 140).

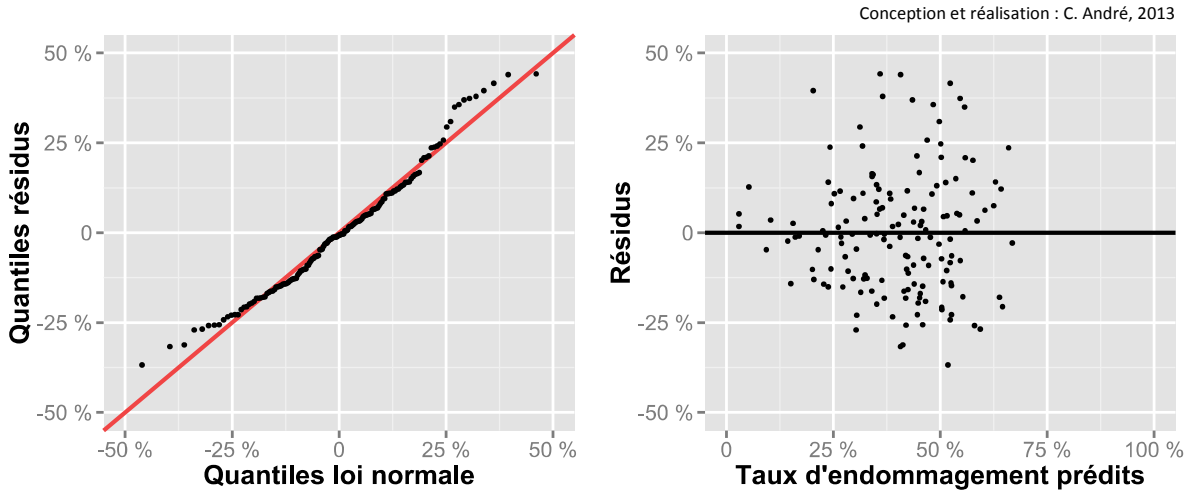


Figure 140 : Graphiques des résidus du modèle de régression multiple du taux d'endommagement : diagramme quantile-quantile et graphique des résidus en fonction des valeurs estimées par le modèle.

3.2. Les arbres de régression

Par analogie au modèle univarié d'estimation des coûts par classes de hauteur d'eau, et au vu des articles récents sur l'évaluation des dommages pour le risque inondation, il est proposé, en tant qu'alternative à la méthode économétrique de régression multiple, de mettre en place un modèle de prédiction du coût des dommages basé sur une méthode de classification multivariée : les arbres de décision.

Une des méthodes les plus utilisées, pour la mise en place d'arbres de décision pour la prédiction d'une variable dépendante à partir d'un jeu de données comportant plusieurs variables explicatives, est l'algorithme de construction d'arbres de classification et de régression CART (*Classification And Regression Trees*). D'après cette méthode, les arbres de

classification sont utilisés pour la prédiction d'une variable qualitative, tandis que les arbres de régression sont mis en place pour la prédiction d'une variable quantitative continue, comme c'est le cas pour la variable « coût des dommages » (Breiman et al., 1984).

3.2.1. Présentation de la méthode CART

Les deux types d'arbres reposent néanmoins sur une méthode de classification : ils divisent la variable dépendante en plusieurs sous-ensembles en cherchant à maximiser la pureté (ou l'homogénéité) de ces derniers. À chaque segmentation, l'algorithme identifie, entre toutes les valeurs possibles de toutes les variables explicatives, le seuil qui sépare le jeu de données en deux sous-ensembles, de façon à minimiser un critère d'erreur. Pour les arbres de classification, l'erreur est définie par le taux de classification erronée de la variable dépendante qualitative, alors que pour les arbres de régression, le critère est la minimisation de la variance des observations de la variable dépendante quantitative dans chacun des deux sous-ensembles constitués. La répétition de ce processus de segmentation binaire produit un arbre de décision, qui se lit depuis un « nœud racine » (*root node*) contenant toutes les observations, divisées en deux « branches » à chaque nœud intermédiaire (*split node*), jusqu'à atteindre les nœuds terminaux de l'arbre (*terminal nodes*), également appelés « feuilles », définis quand les observations remplissent un critère d'arrêt. Chaque feuille de l'arbre représente une prédiction de la variable dépendante, qui est définie pour les arbres de régression par la moyenne des valeurs de toutes les observations classées dans ce nœud terminal (Breiman et al., 1984 ; Merz et al., 2013).

Contrairement aux méthodes de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), couramment utilisées en classification, qui fonctionnent par agrégations successives à partir des observations du jeu de données, les nœuds les plus significatifs d'un arbre de régression ou de classification sont les nœuds les plus élevés de la hiérarchie, qui sont ceux sur lesquels repose généralement l'interprétation de la classification (Roux, 1985).

Utilisés pour différentes applications de prédiction statistique, notamment en médecine (Lemon et al., 2003) ou, comme la méthode de régression multiple, en évaluation immobilière (Yu et Wu, 2006), les arbres de classification et de régression ont plusieurs avantages :

- Le modèle produit est relativement intuitif et facile d'utilisation : il suffit pour réaliser la prédiction d'une observation, de la classer dans le bon nœud terminal en fonction des valeurs des différentes variables explicatives utilisées, en partant du nœud racine.

- Ce type de modèle permet une meilleure restitution de relations non linéaires entre la variable dépendante et les variables explicatives, et de relations valables pour seulement une partie des observations, certaines variables explicatives pouvant n'avoir une influence que sur les valeurs faibles ou élevées de la variable dépendante. Les arbres de régression sont donc plus à même que la régression linéaire de modéliser correctement les relations entre variables à partir de jeux de données comportant des valeurs extrêmes et/ou de nombreuses valeurs non renseignées (une seule variable explicative est utilisée à chaque segmentation). Ils gèrent également mieux les questions de colinéarité et d'hétéroscédasticité de la régression linéaire (Yu et Wu, 2006).

De par leur capacité à sélectionner automatiquement les variables discriminantes d'un jeu de données, les arbres de régression constituent une technique exploratoire intéressante. De plus, du fait de leur capacité à identifier des seuils dans les valeurs des variables explicatives, ils sont une bonne alternative aux modèles de régression linéaire (Merz et al., 2013).

3.2.2. Étapes de construction d'un arbre de régression

Dans un premier temps, l'arbre de régression donnant la prédiction la plus précise est réalisé à partir de l'échantillon de données, dit échantillon « d'apprentissage », jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt fixé soit atteint. Cette étape peut aboutir à la construction d'un arbre très complexe : le modèle théorique possédant la meilleure prédiction est celui pour lequel chaque observation correspond à une feuille de l'arbre. Cependant, ce type d'arbre très complexe ne prédira avec précision que les valeurs du jeu de données à partir duquel il a été construit, et pas celles d'un nouvel échantillon ; le modèle qui semble le plus performant (nombre de nœuds le plus élevé et erreur de prédiction la plus faible) n'est donc pas, en pratique, le meilleur modèle. Ce phénomène est appelé le problème de sur-ajustement (*overfitting*) des arbres de régression.

Il faut donc établir, à partir de l'arbre complexe généré lors de la première étape, un principe pour le simplifier de manière à ce qu'il explique les variations significatives de la variable dépendante sans sur-ajustement à l'échantillon d'apprentissage. Cette étape d' « élagage » (*pruning*) de l'arbre est réalisée en analysant la performance (qualité de la prédiction) et la complexité (nombre de nœuds intermédiaires et de feuilles) de tous les arbres qu'il est possible d'obtenir en simplifiant le premier arbre complexe obtenu. Le modèle ayant le meilleur rapport performance / complexité est choisi comme le meilleur modèle (Breiman et al., 1984). Ce processus est similaire, dans le concept, à celui réalisé lors de la sélection des

variables par la procédure de « sélection arrière » mise en place en régression multiple (Merz et al., 2013).

3.2.3. Construction d'un arbre de régression à partir des données de Xynthia

Afin de tester la méthode sur l'échantillon de données détaillées des dommages de Xynthia, il est donc réalisé un arbre de régression en utilisant comme variable dépendante le coût des dommages immobiliers. Les variables explicatives candidates pour le modèle sont les mêmes que celles proposées en régression multiple (Tableau 21, page 238). À chaque nœud intermédiaire, l'algorithme CART divise le jeu de données en deux sous-ensembles en utilisant la variable explicative et le seuil de valeur de cette variable qui permettent d'obtenir la variance du coût des dommages la plus faible dans les deux sous-ensembles créés. On définit arbitrairement l'arrêt de la division des données quand un nœud atteint moins de 20 observations. L'arbre de régression obtenu est représenté sur la Figure 141.

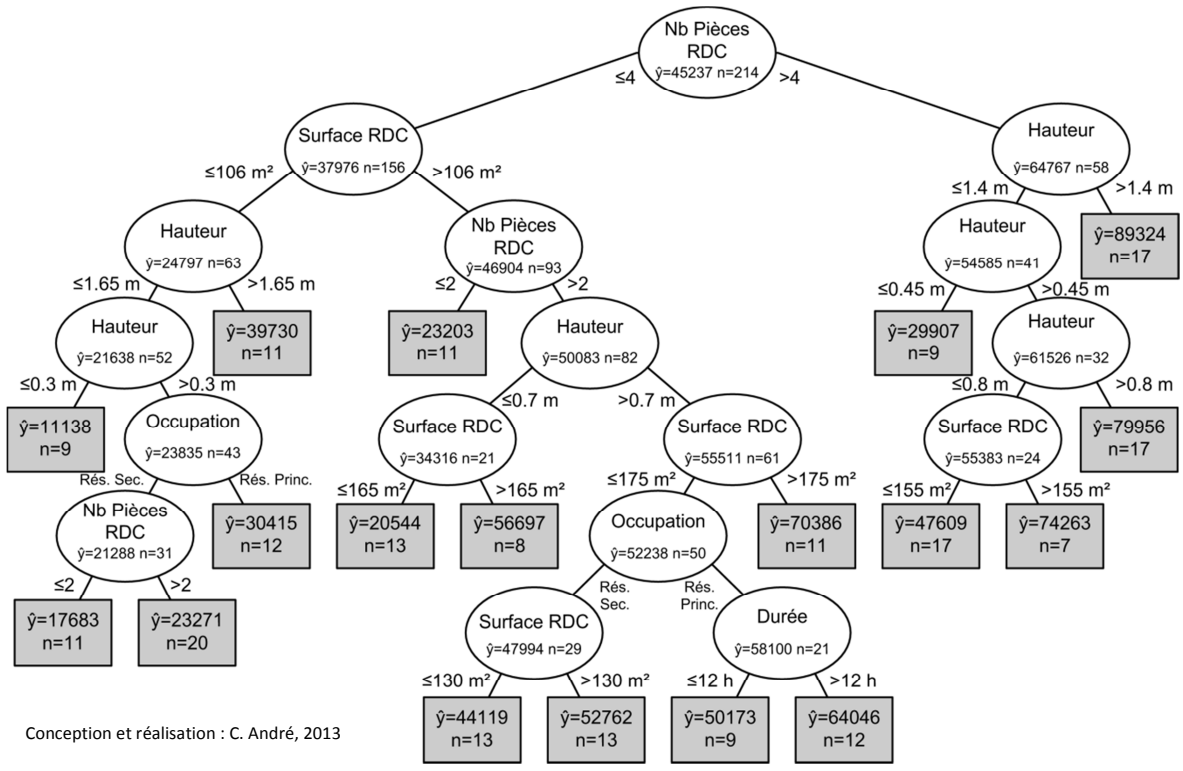


Figure 141 : Arbre de régression initial. Les nœuds intermédiaires sont indiqués par les ellipses et les nœuds terminaux par les rectangles, la valeur prédite (moyenne) du coût des dommages est indiquée pour chaque nœud ainsi que le nombre d'observations.

Par ordre d'importance, les variables utilisées par l'arbre de régression ainsi construit (parfois pour plusieurs nœuds intermédiaires) sont le nombre de pièces du rez-de-chaussée, la surface du rez-de-chaussée, la hauteur d'eau, le type d'occupation et la durée de submersion.

Cependant, cet arbre complexe est probablement sur-ajusté à l'échantillon de données d'apprentissage. Afin de le vérifier, on évalue l'erreur de prédiction du modèle (écarts entre les valeurs de coût observées et les valeurs estimées par le modèle), de deux façons différentes : premièrement, l'erreur calculée sur l'échantillon total est obtenue en utilisant l'ensemble de l'échantillon d'apprentissage. Deuxièmement, une seconde estimation de l'erreur est obtenue par la sélection aléatoire par l'algorithme CART de sous-échantillons (dits de validation) de l'échantillon d'apprentissage, sur lesquels il calcule également l'erreur de prédiction. Ce processus de validation « interne » du modèle permet de résoudre en partie du problème de sur-ajustement. L'évolution des deux erreurs de prédiction calculées pour tous les arbres intermédiaires issus de la simplification de l'arbre de régression complexe obtenu à la première phase, est représentée en fonction du nombre de nœuds intermédiaires de ces arbres sur la Figure 142.

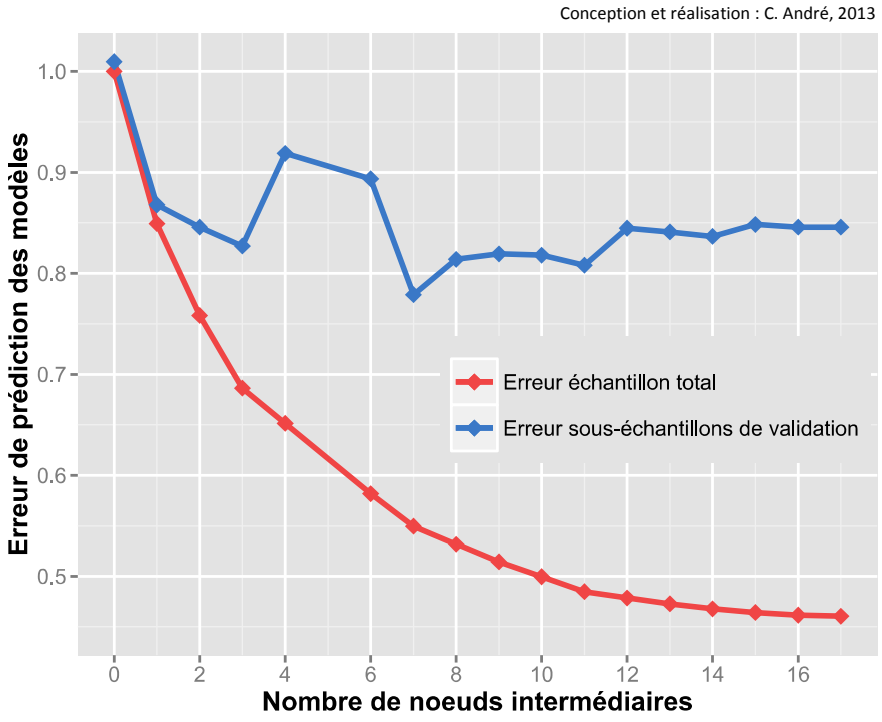


Figure 142 : Graphique de l'erreur de prédiction représentée en fonction du nombre de nœuds intermédiaires des modèles simplifiés.

La Figure 142 montre que l'erreur évaluée à partir de l'échantillon d'apprentissage total est décroissante en fonction du nombre de nœuds intermédiaires de l'arbre. En effet, de manière évidente, plus l'arbre a un nombre de nœuds important, plus on divise les observations en petits groupes, dont les valeurs sont alors proches de la prédiction du modèle, c'est-à-dire la moyenne des observations pour chaque nœud terminal. En revanche, l'erreur évaluée en fonction des sous-échantillons de validation a tendance à tendre vers une valeur plus élevée, ce qui signifie qu'à partir d'un certain point, la segmentation des

données n'apporte plus aucune amélioration de la prédiction, sur des sous-échantillons légèrement différents de l'échantillon d'apprentissage. Dans le cas présent, l'arbre qui offre l'erreur de prédiction réelle la plus faible est l'arbre comportant sept nœuds intermédiaires. Au-delà de ce point, les nœuds supplémentaires augmentent la complexité de l'arbre sans augmenter réellement son pouvoir de prédiction. C'est donc l'arbre de régression à sept nœuds intermédiaires (et huit feuilles) qui est conservé comme modèle de prédiction du coût des dommages (Figure 143).

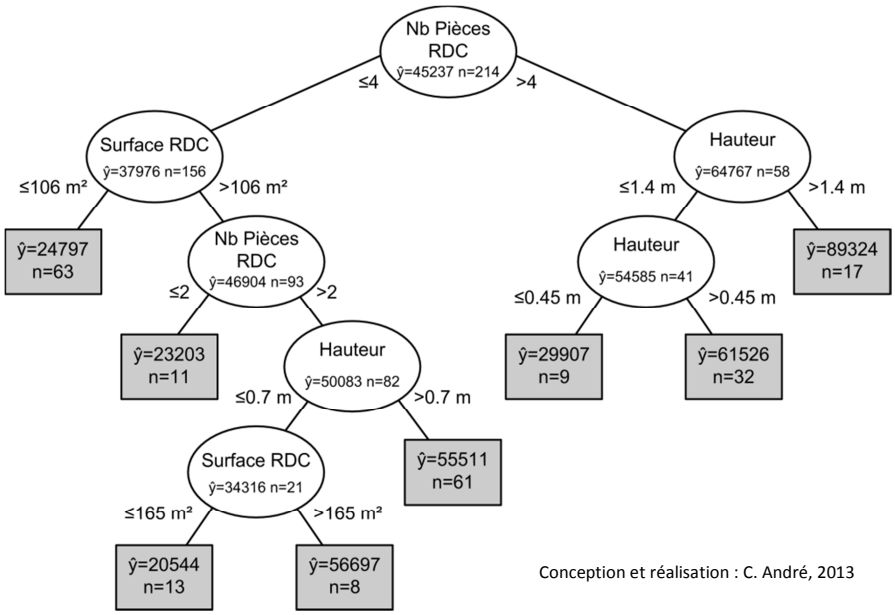


Figure 143 : Arbre final élagué à 7 nœuds intermédiaires et 8 nœuds terminaux.

Les trois variables explicatives conservées pour ce modèle sont le nombre de pièces du rez-de-chaussée, la surface du rez-de-chaussée et la hauteur d'eau. Pour les habitations les plus petites, qui ont au maximum quatre pièces principales au rez-de-chaussée, la hauteur d'eau est moins déterminante pour l'explication du coût des dommages que pour les habitations plus grandes, de plus de quatre pièces, pour lesquelles on trouve les coûts de dommages les plus élevés, si les seuils de hauteur d'eau de 45 cm et d'1,5 m sont dépassés.

De même que pour la méthode de classification univariée basée sur la hauteur d'eau uniquement, la qualité des estimations du modèle final est évaluée d'après la formule donnée en section 2.1.1, en calculant le rapport de la variabilité des observations expliquée par le modèle sur la variabilité totale des observations. Le coefficient obtenu, de 44 % est proche des coefficients obtenus par les méthodes de régression multiple.

3.2.4. Limites du modèle d'arbre de régression mis en place

Ce type de modèle a néanmoins des faiblesses importantes, notamment du fait de la faible taille du jeu de données d'apprentissage utilisé pour sa construction, qui est responsable dans ce cas d'une potentielle instabilité et d'une grande sensibilité aux valeurs extrêmes du modèle obtenu (Breiman, 1996). Pour une évaluation rigoureuse de la capacité de prédiction des arbres de régression, il est recommandé de réaliser une phase de validation externe des prédictions, à l'aide d'un « échantillon de validation » issu de la même population que l'échantillon d'apprentissage, mais non utilisé pour la construction du modèle. Cette procédure permet d'évaluer plus précisément le problème de sur-ajustement de l'arbre. Au vu des données disponibles, cette phase n'a pas pu être réalisée dans le cas présent.

Deux autres approches sont recommandées pour la réalisation d'arbres de régression plus stables et bénéficiant d'une analyse de sensibilité plus poussée :

- La procédure de « *bagging* » (pour « *bootstrap aggregating* ») consiste à utiliser, de la même manière que pour la phase de validation interne de l'arbre, plusieurs sous-échantillons de l'échantillon d'apprentissage, qui sont cette fois utilisés pour la construction d'autant d'arbres de régression (Breiman, 1996). L'analyse de cet ensemble d'arbres construits permet de repérer plus rigoureusement les variables explicatives et les seuils de segmentation statistiquement significatifs. L'arbre final est obtenu en agrégeant les paramètres de tous les arbres ainsi construits (Merz et al., 2013).
- Une autre procédure, basée sur la même approche, et appelée « *random forests* », consiste à tirer aléatoirement, en plus des sous-échantillons, les variables explicatives candidates pour la construction d'une multitude d'arbres à partir du même jeu de données (Breiman, 2001). Par cette méthode, on s'assure que les variables explicatives retenues ont réellement un rôle important dans la prédiction de la variable dépendante.

La construction d'un modèle de prédiction du coût des dommages grâce à la méthode des arbres de régression a été mise en place, à titre de comparaison avec les méthodes de classification univariée et de régression multiple. Sans améliorer la qualité des prédictions estimée par le coefficient de détermination R^2, l'arbre de régression se présente comme une alternative intéressante aux modèles linéaires, puisqu'il parvient à expliquer les variations de coûts des dommages de notre jeu de données avec seulement trois variables explicatives, et qu'il met en évidence des relations non linéaires entre la variable dépendante et les variables explicatives, telles que des seuils de hauteur d'eau identifiés comme importants lors de l'analyse des données. Cependant, les procédures de validation du modèle les plus

poussées n'ont pu être testées dans le cadre de cette thèse. Ce sont donc des pistes à explorer pour la réalisation de modèles de prédiction opérationnels basés sur des arbres de régression, à partir de jeux de données sur des dommages plus importants que celui utilisé pour le présent travail.

La mise en place de modèles multivariés pour la prédiction du coût des dommages des submersions marines, même si ces derniers sont nécessairement plus complexes à mettre en œuvre et demandent une collecte de données plus importante, montre un réel gain de précision des estimations, en comparaison avec les modèles univariés.

Les modèles de régression multiple ont un coefficient de détermination R^2 de l'ordre de 50 %, acceptable pour ce type de données, étant donné que les coûts des dommages dépendent de très nombreux paramètres qui ne peuvent pas tous être pris en compte dans le cadre d'un tel exercice. Ces modèles retiennent, parmi les variables candidates, cinq variables explicatives : la hauteur d'eau, la surface, et le nombre de pièces exposées (du rez-de-chaussée), la présence de sous-sol et le type d'occupation des habitations.

Le modèle d'estimation de la valeur absolue des dommages (Tableau 23, page 241) a pour formule :

$$Coût = -41\,313 + 35\,705 * \sqrt{Hauteur} + 123 * \text{Surface RDC} + 11\,009 * \text{Nb Pièces RDC} + 18\,685 * \text{Sous sol} - 12\,962 * \text{Occupation}$$

Il offre une restitution correcte des coûts observés lors de la tempête Xynthia, mais est biaisé par un problème d'hétéroscédasticité. Avec les mêmes limites que le modèle de régression simple du taux d'endommagement concernant la connaissance *a priori* de la valeur totale des biens exposés (et l'évaluation limitée au taux d'endommagement du RDC), le modèle de régression multiple du taux d'endommagement est le modèle qui offre le meilleur ajustement (Tableau 25, page 246). Sa formule est :

$$Taux = 0.05 + 0.29 * \sqrt{Hauteur} - 0.001 * \text{Surface RDC} + 0.07 * \text{Nb Pièces RDC} + 0.12 * \text{Sous sol} - 0.10 * \text{Occupation}$$

Par ailleurs, le modèle d'arbre de régression mis en place se montre être une alternative possible aux modèles de régression linéaire multivariés, même si cette méthode, peu utilisée jusqu'à présent pour la prédiction de coût des dommages, devra faire l'objet de validations à partir de jeux de données plus importants que celui disponible pour cette thèse.

4. Bilan et discussion des résultats obtenus

4.1. Comparaison des différents modèles explorés

Dans les sections précédentes, différents modèles de prédiction du coût des dommages au bâti liés aux submersions marines ont été mis en place à partir des données empiriques collectées suite à la tempête Xynthia.

Les premiers modèles univariés suivent la forme des fonctions d'endommagement, utilisant principalement la hauteur d'eau pour la prédiction des dommages, tandis que les seconds, multivariés, sont basés sur davantage de variables explicatives, concernant des indicateurs de vulnérabilité intrinsèque et de la valeur totale des enjeux d'habitation. Deux familles de méthodes statistiques ont été utilisées : les méthodes économétriques de régression, donnant des fonctions continues, et des méthodes de classification des données, qui aboutissent à des modèles de prédiction de coûts discontinus.

Les coefficients de détermination R^2 des modèles sont relativement faibles, de l'ordre de 15 % à 20 % pour les modèles univariés et de 50 % pour les modèles multivariés. En plus du critère R^2, on peut comparer les différents modèles réalisés grâce à des graphiques représentant les coûts estimés par les différents modèles en fonction des observations originales de coût des dommages de l'échantillon de données d'assurance (Figure 144 et Figure 145).

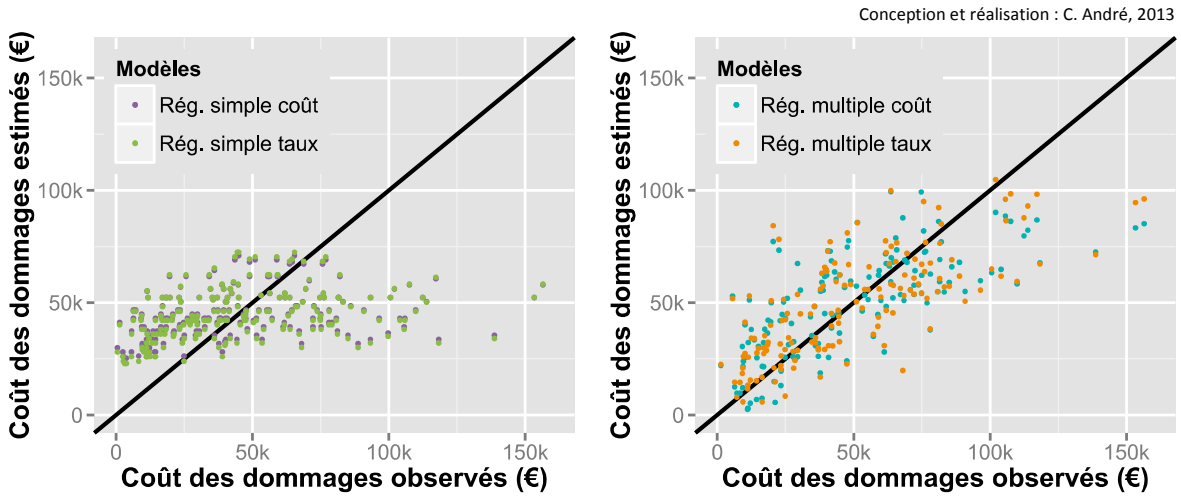


Figure 144 : Graphiques des coûts des dommages estimés par deux des modèles de régression simple et deux des modèles de régression multiple mis en place, en fonction des coûts observés dans les données Xynthia.

La Figure 144 indique que l'ensemble des modèles a tendance à surestimer les valeurs faibles de coût des dommages observés, et à sous-estimer les valeurs les plus fortes. Dans les deux cas, ce sont les coûts les plus extrêmes, résultant de cas relativement particuliers,

qui sont les plus difficiles à expliquer et à modéliser. Cependant, l'apport des modèles de régression multivariés est nettement visible : en comparaison avec les modèles de régression simple, le nuage de points estimés par ces modèles est bien mieux aligné le long de la diagonale qui représente l'ajustement théorique parfait entre les valeurs de coût estimées par les modèles et les valeurs de coût observées du jeu de données. Les modèles de régression multiple parviennent donc à expliquer davantage la variabilité des observations, du fait de l'utilisation d'autres variables explicatives que la seule hauteur d'eau.

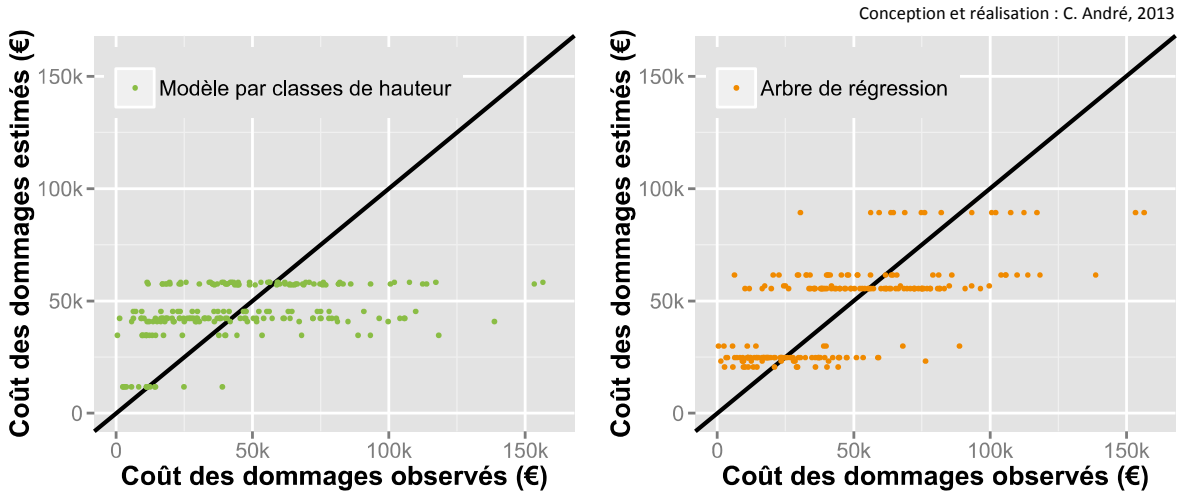


Figure 145 : Graphiques des coûts des dommages estimés par le modèle d'estimation des coûts par classes de hauteur d'eau et par le modèle d'arbre de régression, en fonction des coûts observés dans les données Xynthia.

La Figure 145 représente le même type de graphique, pour les modèles de prédiction des coûts par les méthodes de classification. La discontinuité des prédictions de ces modèles est mise en évidence par les alignements horizontaux des nuages de points. Là encore, la dispersion est grande autour de la diagonale, mais elle est toujours moindre pour le modèle multivarié d'arbre de régression, que pour le modèle univarié.

Cette famille de modèles a avant tout l'avantage d'être relativement intuitive et simple à utiliser. Des modèles opérationnels, construits grâce à cette méthode, pourront donc être appréciés des gestionnaires des risques et des bureaux d'études qui réalisent des évaluations de dommages sur un territoire restreint, par exemple pour la mise en œuvre d'une Analyse Coûts-Bénéfices. D'autre part, l'approche économétrique, peut-être plus difficile d'accès, sera davantage utilisée par les assureurs, pour tous les tests statistiques qu'elle permet d'inclure à la modélisation, ainsi que pour la facilité de réalisation d'analyses de sensibilité et d'approches probabilistes qu'elle permet. Dans les deux cas, les modèles multivariés, même s'ils sont encore aujourd'hui plus rares dans la littérature sur l'évaluation des dommages, semblent apporter une réelle amélioration des prédictions, leur utilisation accrue est donc recommandée.

4.2. Comparaison des résultats obtenus avec ceux de modèles multivariés de la littérature

Comme indiqué précédemment, plusieurs travaux récents ont abordé la réalisation de modèles d'endommagement multivariés pour l'évaluation des dommages liés au risque inondation, notamment sur la base de régressions multiples. Nous proposons ici de comparer leurs résultats avec ceux obtenus à partir de notre jeu de données d'assurance.

Le modèle développé par G. Zhai et al. (2005), repose sur plus de 3 000 réponses à une enquête de sinistrés après les inondations de la région de Tokai au Japon en 2000. En dehors de la hauteur d'eau, seule caractéristique de l'aléa intégrée au modèle, les variables retenues pour exprimer la vulnérabilité des enjeux sont le temps de résidence et le revenu des habitants, ainsi que leur statut de propriétaire ou locataire. Ces trois paramètres concernent les habitants plutôt que les caractéristiques architecturales des bâtiments eux-mêmes. Ils sont reliés à ce que nous avons appelé les caractéristiques de « standing » des habitations. Des paramètres intégrés concernant la perception du risque des habitants, ainsi que leur expérience des inondations, n'ont pas été retenus comme statistiquement significatifs par le modèle japonais. Avec un R^2 de l'ordre de 30 %, ce modèle n'explique pas davantage le coût des inondations que ceux mis en place dans le cadre de cette thèse.

D'autre part, une équipe de chercheurs autrichiens ayant analysé les dommages d'une inondation du village de Dürnkrut en 2006 (Prettenthaler et al., 2010), obtient un modèle plus proche de celui mis en place dans le présent travail. À l'aide d'un échantillon de 233 cas de dommages à des habitations, dont les coûts ont été évalués par des experts sur le terrain, le modèle construit prend en compte la hauteur d'eau, la surface des bâtiments, et la présence de pollution de l'eau par du fuel, qui aggrave de manière significative les dommages pour ce cas d'étude. Le modèle, séparant les sous-sols et les bâtiments annexes des bâtiments principaux, utilise des transformations logarithmiques et diverses combinaisons des variables, lui permettant d'atteindre un R^2 de l'ordre de 70 %, jugé comme très bon.

Dans un article très récent, J. M. Kim et al. (2013), mettent en place un modèle de prédiction du coût des dommages des ouragans aux États-Unis, à l'aide d'un jeu de données d'indemnisations d'assurance concernant les dommages de l'ouragan Ike de 2008, sur 500 bâtiments commerciaux au Texas. Dans cette étude, menée à une échelle régionale, les dommages liés au vent et à la submersion marine sont indifférenciés. Les variables explicatives liées à l'aléa retenues par le modèle ne comprennent pas la hauteur d'eau (inconnue), mais la vitesse du vent et la situation par rapport à la trajectoire de l'ouragan.

Les caractéristiques des enjeux comprennent la valeur assurée, la surface et l'âge des bâtiments. Afin de tenter d'expliquer les différents types de sinistres observés (vent et submersion), des caractéristiques liées à l'exposition des biens sont intégrées : la situation en zone inondable et la distance à la côte. Le R^2 du meilleur modèle obtenu, impliquant une transformation logarithmique des coûts, est de l'ordre de 40 %.

Enfin, à partir d'un jeu de données de 1 100 enquêtes téléphoniques auprès d'habitants ayant subi les inondations de l'Elbe et du Danube de 2002, 2005 et 2006 en Allemagne, B. Merz et al. (2013) décrivent la mise en place d'arbres de régression pour la prédiction des dommages des inondations. Le taux d'endommagement des habitations est modélisé en fonction de 28 variables candidates qualitatives et quantitatives, en rapport avec les paramètres de l'aléa (hauteur, durée, vitesse et période de retour de l'inondation), des paramètres de vulnérabilité des bâtiments (typologie, surface habitable et valeur totale), des paramètres liés à l'expérience des habitants, les mesures de précautions mises en place, et liés à l'efficacité de l'alerte, ainsi que des paramètres sur le statut socio-économique des habitants (âge, statut de propriétaire ou locataire, revenus et catégorie socioprofessionnelle). Les variables retenues par le modèle comme les plus significativement importantes sont la hauteur d'eau, la surface des bâtiments, le revenu des habitants et la période de retour de l'évènement (R^2 de 65 %). Cette dernière variable, comme l'indiquaient déjà F. Elmer et al. (2010), est liée non seulement à la perception et à l'expérience qu'ont les habitants des inondations, mais également au paramètre « ampleur de l'évènement » mentionné en section 1.2.3, qu'il peut être nécessaire d'inclure aux modèles, afin d'être en mesure d'expliquer aussi bien les dommages d'évènements d'impact global modéré, comme la tempête Johanna, et ceux d'évènements plus catastrophiques comme la tempête Xynthia.

Les quatre modèles présentés ici sont donc très différents en termes de données utilisées, d'échelles de travail, et de type de variables explicatives candidates utilisées, ce qui fait que leurs résultats sont très éloignés. En effet, si les variables explicatives utilisées dans de tels modèles doivent avant tout dépendre de l'expertise et de l'expérience des évaluateurs sur les facteurs influençant réellement les dommages, dans la pratique, les variables sélectionnées dépendent également en partie des informations disponibles au moment de la réalisation du modèle. De plus, en fonction du contexte et de l'échelle d'application prévus pour le modèle construit, les variables retenues doivent être des informations qui peuvent être collectées ou modélisées *a priori* pour que celui-ci puisse être utilisé pour une prédiction des dommages.

Au vu de toutes ces contraintes, on comprend que, comme c'est le cas pour les fonctions d'endommagement univariées, et d'autant plus pour les modèles multivariés, la prédiction

des dommages peut prendre de nombreuses formes et s'intéresser à de nombreux paramètres explicatifs des dommages. L'important est donc, en fonction des objectifs de l'étude, de l'échelle de travail, et des caractéristiques des sites étudiés, de choisir le type de modèle d'endommagement le plus adapté, et surtout d'interpréter ses résultats en étant conscient des incertitudes importantes inhérentes aux travaux de modélisation.

4.3. Incertitudes liées à la modélisation des dommages

Comme nous l'avons démontré, aucun modèle d'évaluation des dommages liés aux inondations n'explique parfaitement les dommages observés lors de ces catastrophes naturelles. Ce point est confirmé par tous les auteurs ayant travaillé sur l'analyse de données empiriques sur les coûts des dommages, en particulier à partir de données d'assurance (Black et Evans, 1999 ; Merz et al., 2004 ; Domenichini, 2008 ; Spekkers et al., 2013).

Tous les modèles de prédiction des dommages, utilisés pour évaluer un risque *ex ante*, sont donc entachés d'incertitude. Ces incertitudes sont présentes à tous les niveaux de l'évaluation, que ce soit au sein du module « aléa » ou du module « dommages » qui contient l'évaluation économique (cf. partie I, section 2.2). La notion d'incertitude est donc primordiale dans l'utilisation de modèles de prédiction des dommages, bien qu'elle soit très peu souvent appréhendée, en particulier dans le cadre des évaluations réalisées par les gestionnaires des risques pour l'évaluation de politiques publiques de prévention des risques (Merz et Thieken, 2009 ; Merz et al., 2010 ; Eleutério, 2012).

Les modèles d'assurance pallient ce problème d'incertitude par l'utilisation de fonctions d'endommagement, non pas déterministes, mais probabilistes. Au lieu de prédire une valeur de coût des dommages pour un scénario, ces fonctions estiment une distribution de valeurs, avec un montant des dommages le plus probable, et les intervalles de confiance de ce montant (Grossi et Kunreuther, 2005 ; Voronkoff, 2010 ; Zolfaghari, 2010). Associés à une évaluation probabiliste de l'aléa, ces modèles permettent de quantifier l'incertitude réelle qui repose sur les évaluations de dommages (Figure 146).

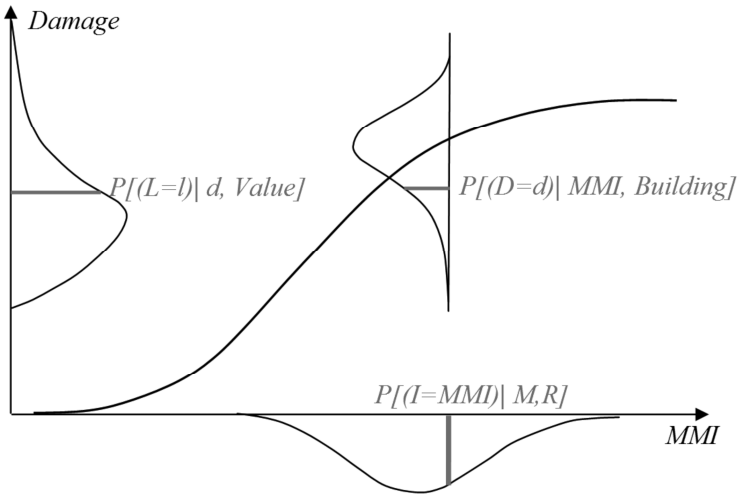


Figure 146 : Schéma d'un modèle d'endommagement probabiliste incluant en abscisse une probabilité de distribution de l'aléa, une fonction d'endommagement probabiliste, et en ordonnée, le résultat de l'évaluation des dommages sous la forme d'une distribution des coûts. D'après Zolfaghari, 2010.

Cependant, cette technique d'analyse, beaucoup plus lourde, n'est pas aussi accessible que l'utilisation classique de modèles déterministes. Ces modèles nécessitent également pour leur construction des jeux de données très importants, que seuls les réassureurs possèdent à ce jour (par ex. Moncoulon et al., 2013).

Dans le cadre d'une Analyse Coûts-Bénéfices, l'étape finale d'analyse de sensibilité permet d'intégrer l'incertitude des modules « aléa » et « dommages » des modèles, ainsi que des données intégrées, afin d'observer leur influence sur le résultat final. Cette étape étant très peu effectuée en pratique, on ne peut que recommander sa réalisation, à condition que l'information sur l'incertitude des modèles d'endommagement eux-mêmes soit correctement évaluée (Erdlenbruch et al., 2008 ; Grelot et al., 2008 ; Eleutério et al., 2008 ; Eleutério, 2012). En effet, les modèles disponibles en France à ce jour sont peu documentés sur l'aspect des incertitudes, ce qui entraine de nombreuses limites à leur utilisation pour des évaluations de dommages dotées d'analyses de sensibilité.

4.4. Limites liées à l'utilisation des modèles d'endommagement

Au vu de tous les éléments acquis grâce aux analyses menées, il faut donc être conscient que les incertitudes liées à l'utilisation des modèles de prédiction des dommages sont nombreuses, et les résultats donnés par ces outils peuvent être relativement éloignés de la réalité. Toutefois, sur un grand nombre de valeurs modélisées, les modèles donnent une bonne estimation des coûts totaux, les surestimations et sous-estimations de cas atypiques se compensant (à condition que les modèles ne contiennent pas de biais d'évaluation). Cette question de biais est primordiale puisque les modèles, en particulier empiriques, sont construits à partir d'échantillons de données restreints en taille, alors qu'ils sont utilisés pour

des évaluations de grands nombres de dommages, parfois dans des contextes bien différents de celui à partir duquel le modèle a été construit.

Quand on cherche à évaluer *ex post*, pour un évènement donné, et pour un site donné, la totalité des dommages subis, à partir d'un échantillon de ces derniers, il s'agit d'extrapolation. L'extrapolation est réalisable dès que les données de l'échantillon sont représentatives de la population à laquelle on veut appliquer l'évaluation. Par ailleurs, les modèles d'endommagement sont mis en place afin d'être en mesure de prédire des dommages sur d'autres sites que ceux pour lesquels ils ont été construits, et pour des scénarios d'évènements potentiels futurs, soit *ex ante*. Dans ce cas, on parle de transfert de valeurs, dans l'espace et dans le temps. Toute la question est de déterminer à quel point les modèles d'endommagement sont réellement transférables (Rozan et Stenger, 2000 ; Rozan, 2004).

En pratique, les transferts de modèles d'endommagement dans le temps sont relativement fréquents. Par exemple, une fonction d'endommagement absolue doit être régulièrement mise à jour à cause des évolutions de coûts des enjeux. Cette actualisation, ou « recalibration » des modèles, peut se faire à partir d'indices existants de l'inflation concernant le type d'enjeu considéré. Pour les habitations, on utilisera les indices des coûts de construction de l'INSEE (cf. section 1.1) ou de la Fédération Française du Bâtiment (FFB[59]). En plus de la variation temporelle des coûts des enjeux eux-mêmes, il faudrait en toute rigueur prendre en compte, pour des évaluations prospectives des dommages, toutes les variations concernant les évolutions des caractéristiques de l'aléa et des enjeux attendues dans le futur. Si de plus en plus, pour les risques côtiers, on intègre aux modules d'évaluation de l'aléa le paramètre « changement climatique », on raisonne le plus souvent à « enjeux constants » dans le module « dommages », alors que les paramètres d'évolution démographique et socio-économique ont un impact très fort sur les évaluations de dommages (Pielke et al., 2000 ; Pielke et Sarewitz, 2005).

Les transferts de modèles d'endommagement dans l'espace sont plus délicats que les transferts dans le temps, du fait que le modèle réalisé intègre les caractéristiques de l'aléa et socio-économiques du territoire sur lequel il a été construit : type d'exposition et de processus de l'aléa, caractéristiques de vulnérabilité physique des enjeux (architecture, matériaux de construction, etc.) et caractéristiques de la vulnérabilité systémique du

[59] http://www.ffbatiment.fr/federation-francaise-du-batiment/le-batiment-et-vous/en_chiffres/indices-index/Chiffres_Index_FFB_Construction.html. Indice calculé à partir du prix de revient d'un immeuble de type courant à Paris, sans prendre en compte la valeur des terrains. L'objet initial de cet indice est l'indexation des polices d'assurance.

territoire (perception du risque, politiques de gestion et de prévention, etc.). En économie de l'environnement, des méthodes existent pour transférer, notamment, des modèles de prix hédoniques d'un site à un autre. Les valeurs de biens non marchands sont ainsi transférées soit par leur moyenne, soit à l'aide de « fonctions de bénéfice » (Rozan et Stenger, 2000 ; Rozan, 2004 ; Genty, 2005).

Dans la pratique, les fonctions d'endommagement sont souvent réutilisées sur d'autres sites, et appliquées à d'autres évènements, en faisant l'hypothèse que les conditions d'endommagement sont identiques, du fait du manque de données et de moyens pour recalibrer les modèles pour chaque nouvelle étude. En ce sens, les modèles utilisant pour variable le taux d'endommagement sont plus facilement transférables, puisqu'ils expriment les dommages de manière relative, indépendamment de la valeur absolue des biens sur un site donné et à un moment donné (Dutta et al., 2003 ; Merz et al., 2010 ; Eleutério, 2012). Ils sont par contre moins faciles à déployer puisqu'ils nécessitent une évaluation de la valeur individuelle des enjeux, à laquelle on applique les taux d'endommagement déterminés par le modèle. Cette collecte de données supplémentaire demande parfois un effort important et est elle-même une source d'incertitude (Kleist et al., 2006 ; Messner et al., 2007).

La seule façon de tester la capacité réelle des modèles à prédire les coûts des dommages, est de réaliser, grâce à ces derniers, des évaluations de dommages *ex post* sur des évènements dont les données n'ont pas servi à leur calibration. Cette méthode devrait pouvoir se développer, conjointement à la systématisation des retours d'expérience, et avec l'accessibilité à davantage de données économiques sur les catastrophes naturelles dans le futur.

Dans le présent travail, nous avons mis en place des modèles d'endommagement univariés et multivariés, sur la base de méthodes issues des modèles existants dans la littérature sur l'évaluation des dommages des inondations fluviales. Les modèles multivariés s'avèrent expliquer nettement mieux la variabilité des coûts des dommages observés que les modèles univariés, de type fonction d'endommagement. Cependant, ils sont tous entachés de fortes incertitudes, de nombreux paramètres explicatifs n'ayant pu être pris en compte dans l'analyse (par ex. valeur totale des biens, indicateurs de standing, etc.).

Les modèles ont été mis en place à l'aide de données d'assurance concernant des dommages sur des maisons individuelles submergées lors de la tempête Xynthia dans 8 communes de Vendée et de Charente-Maritime. Au-delà des limites liées aux variables disponibles, ces modèles ne sont donc pas valables pour prédire les dommages de tout évènement de submersion marine. Les conditions de la tempête Xynthia se caractérisent par peu d'impact des chocs de vagues en façade (au contraire de la tempête Martin de 1999), des maisons récentes particulièrement vulnérables (de plain-pied, avec de faibles taux de vétusté), des territoires possédant une faible culture du risque (absence de PPRL, d'alerte à l'évacuation, et de mesures individuelles de la réduction de la vulnérabilité), et des conditions médiatiques particulières (nombre de décès, zones de solidarité, multitude des sinistres). Tous ces paramètres peuvent jouer sur les coûts des dommages engendrés, c'est en partie la raison pour laquelle on n'obtient pas les mêmes coûts pour les tempêtes Johanna et Xynthia, à hauteur d'eau équivalente dans les habitations inondées.

La mise en place de modèles de prédiction des dommages basés sur des données empiriques nécessite donc l'accès à des données de nombreux évènements, et dans différentes régions, afin d'être indépendants de caractéristiques locales spécifiques qui empêchent leur transférabilité dans l'espace et dans le temps.

Conclusion de la cinquième partie

L'étude réalisée, cherchant à mettre en place des modèles de prédiction des dommages liés spécifiquement à la submersion marine, rend évident le fait qu'il est impossible d'expliquer totalement les dommages observés lors d'évènements passés, tant les variables nécessaires seraient nombreuses. En effet, on ne peut maitriser toutes les caractéristiques de l'aléa, des enjeux (valeurs assurées, standing) et de la vulnérabilité systémique des territoires. Les conditions de l'évaluation des dommages par les experts, et de la collecte des données menée dans le cadre de cette thèse, sont elles-mêmes porteuses d'incertitudes. Lors de la mise en place de modèles de prédiction des dommages, on doit donc préférer la simplicité et tenter d'introduire le moins de biais possible, tout en étant conscients des limites des outils produits.

S'ils ont permis de tirer de nombreuses conclusions sur les dommages observés lors de la tempête Xynthia, les différents modèles de prédiction présentés dans cette cinquième partie de la thèse ne sont pas opérationnels, du fait des limitations déjà mentionnées de nombre et de variété des données utilisées pour leur construction. Nous avons donc privilégié ici la description et la comparaison de plusieurs approches différentes, afin qu'elles puissent être approfondies lors de futurs travaux. En revanche, au vu des éléments apportés par les données d'assurance collectées dans le cadre de cette thèse, et des conclusions des entretiens réalisés avec les experts dommages, un travail en collaboration avec le CEPRI, dans le cadre du groupe de travail « ACB inondations » du Ministère de l'Environnement, a permis de formuler des recommandations concrètes, et la prescription de fonctions d'endommagement spécifiques aux submersions marines pour les habitations, sur la base des fonctions d'endommagement déjà développées pour les inondations fluviales par le CEPRI. Le nouveau guide méthodologique du Ministère de l'Environnement pour la réalisation d'Analyses Coûts-Bénéfices et d'Analyses Multicritères dans le cadre des PAPI, qui paraitra en 2014, proposera donc ces recommandations au sein d'une annexe « littoral » (CEPRI, 2013a).

Pour la poursuite des travaux de modélisation par les approches statistiques explorées dans le cadre de cette thèse, nous retenons quatre principaux avantages des modèles empiriques, réalisés à partir de données réelles sur les dommages recueillies *ex post*, par rapport aux modèles synthétiques construits sur la base de jugement d'expert :

Les modèles empiriques sont les seuls à offrir la possibilité de réaliser des modèles d'endommagement multivariés, dont la capacité de prédiction des dommages est supérieure aux modèles univariés. En effet, les modèles basés sur le jugement d'expert doivent, pour

prendre en compte différentes caractéristiques des enjeux ou de l'aléa, être en mesure de construire *a priori* une fonction d'endommagement différente pour chacune des classes d'enjeux (typologie) et chacun des facteurs de l'aléa pris en compte (durée de submersion, vitesse du courant, etc.), ce qui limite le nombre de variables explicatives qui peuvent être considérées.

Ces modèles empiriques sont également les seuls à pouvoir évaluer de manière quantitative l'incertitude liée à leurs évaluations (autrement que par des tests de calibration sur des évènements réels *ex post*). Cela permet souvent de se rendre compte, au vu des coefficients d'ajustement, du faible taux de variabilité des coûts des dommages réellement expliqué par les modèles construits, et des limites inhérentes à leur utilisation pour la prédiction de dommages *ex ante*.

Les modèles d'endommagement empiriques multivariés, en plus de prédire les coûts des dommages, permettent également de mieux comprendre les relations entre les coûts observés et leurs différentes variables explicatives. Ainsi, les modèles d'endommagement empiriques peuvent guider les choix de mesures de réduction de la vulnérabilité réduisant efficacement les dommages, comme la prescription de certains matériaux pour les éléments de second œuvre, et évaluer les bénéfices (dommages évités) liés à ces mesures sur les bâtiments individuels.

Enfin, une fois leur méthode de construction mise en place et les variables explicatives sélectionnées, il est possible de maintenir à jour les modèles d'endommagement empiriques et d'améliorer continuellement leurs prédictions, grâce à de nouvelles collectes de données sur des évènements plus récents. Avec un accès plus systématique aux données d'assurance, qui se sont montrées apporter de nombreux éléments à l'analyse des dommages, et avec la standardisation de ces données, des modèles d'endommagements multivariés beaucoup plus précis que les actuelles fonctions d'endommagement devraient pouvoir être réalisés.

Conclusion générale

Ce travail de thèse s'est donné pour objectif une analyse des dommages des submersions marines de deux tempêtes récentes à partir de données d'assurance, dans le but d'améliorer la connaissance des dommages, sur les aspects des mécanismes d'endommagement et des coûts induits, afin de contribuer à la mise au point de modèles de prédiction des pertes économiques liées à ce risque.

1. Synthèse des résultats des différentes étapes de la démarche suivie

À ce jour, le manque de données détaillées sur les dommages, disponibles *ex post*, est en général le principal frein à l'évaluation économique *ex ante* des dommages des catastrophes naturelles. Les données d'assurance qui ont été analysées dans ce travail sont de deux types : à un premier niveau, sont utilisés les listings peu détaillés des sinistres des assureurs, indiquant seulement les sommes indemnisées, les types d'enjeux affectés, et leur localisation. À un second niveau, ont été analysés des rapports d'expertise des sinistres, contenant le détail des dommages et de leurs coûts, ainsi qu'une description des paramètres de l'aléa et les particularités des enjeux d'habitation affectés.

En appliquant une méthode exploratoire, d'une échelle régionale à une échelle locale, l'analyse, basée principalement sur ces données inédites, a permis d'améliorer la connaissance des types de dommages, des processus d'endommagement et des coûts des dommages aux habitations, notamment grâce au croisement des données d'assurance avec des investigations de terrain, des données de modélisation hydraulique et des données statistiques sur les caractéristiques des enjeux. On démontre que les coûts des dommages

sont liés non seulement aux paramètres physiques de l'aléa, mais également et surtout aux caractéristiques de vulnérabilité intrinsèque et à la valeur des enjeux exposés.

L'analyse des données à l'échelle régionale illustre ainsi, pour la tempête Johanna, une relation nette entre les types de sinistres, les différents processus de l'aléa (submersion et chocs de vagues), sur différentes morphologies de côtes, et le coût des dommages. Une part non négligeable des coûts de cet événement est liée aux murs de clôture et de soutènement, ainsi qu'aux bâtiments annexes localisés en front de mer, éléments qui gagneraient à être inclus aux modèles de prédiction des dommages, et dont l'implantation et la reconstruction, après la survenance de dommages, devraient être davantage règlementées.

Pour Xynthia, contrairement aux impressions véhiculées par les médias, de dommages très spectaculaires liés aux chocs de vagues en front de mer, l'essentiel des coûts est porté par des habitations inondées par des hauteurs d'eau importantes (atteignant 2,5 m à la Faute-sur-Mer) pour lesquelles les dommages ne concernent pas la structure du bâtiment, mais uniquement le second œuvre. Les coûts élevés de l'évènement, en comparaison avec les coûts d'inondations fluviales, sont induits par l'effet de l'eau salée, sur des habitations dont la majeure partie, de plain-pied, sont très récentes, et ont été construites avec des matériaux particulièrement vulnérables à la submersion marine.

À partir des paramètres jugés pertinents pour l'explication des coûts des dommages, plusieurs types de modèles de prédiction des coûts ont été mis en place, sur la base de méthodes statistiques univariées et multivariées. Si les modèles multivariés montrent de meilleurs résultats que les modèles univariés de type fonction d'endommagement, l'incertitude des prédictions de coûts reste élevée pour tous ces modèles basés sur les données d'assurance. Ces éléments permettent de mettre en relief l'incertitude inhérente à l'utilisation des fonctions d'endommagement existantes (y compris les fonctions construites sur la base de jugement d'expert), qui est à ce jour rarement quantifiée dans les évaluations économiques des dommages.

2. Intérêts et limites des données d'assurance pour l'évaluation des dommages

Il faut rappeler que cette étude a été limitée à l'analyse des dommages liés à la submersion marine (de nombreuses conclusions pouvant cependant être généralisées aux inondations au sens large), sur les enjeux d'habitation, qui ne représentent qu'une partie des enjeux exposés au risque. De plus, les données d'assurance ne fournissent d'indications de valeur que pour les dommages assurés, c'est-à-dire principalement les dommages directs tangibles. Des développements de méthodes scientifiques pour l'évaluation des dommages indirects et

intangibles (notamment liés à l'environnement, à la sécurité et à la santé des personnes affectées, ou au patrimoine), qui sont un sujet de recherche à part entière, ne peuvent donc se baser sur les données d'assurance.

Les conclusions de cette thèse démontrent néanmoins l'intérêt des données d'assurance pour l'analyse des dommages *ex post* et la construction de modèles empiriques de prédiction des coûts d'évènements naturels *ex ante*. En effet, les données d'indemnisation et d'expertise d'assurance permettent la compréhension de l'impact de nombreux paramètres sur le coût des dommages.

3. Recommandations pour l'utilisation et la disponibilité des données d'assurance

Les données d'indicateurs de la sinistralité, diffusées récemment par l'Observatoire National des Risques Naturels (ONRN - MEDDE, CCR et MRN, 2013) sont un premier pas vers un accès à des données synthétiques pour l'évaluation économique des dommages, mais leur résolution spatiale communale ne permet pas leur utilisation pour la réalisation de modèles de prédiction des dommages tels que les fonctions d'endommagement, qui nécessitent une analyse des dommages sur les enjeux individuels.

C'est à partir des données des rapports d'expertise (de niveau 2) qu'est possible l'analyse détaillée de plusieurs paramètres explicatifs des dommages, et la construction de modèles de prédiction des coûts. Cependant, la calibration de modèles empiriques de prédiction des dommages ne peut être réalisée à partir de données ne concernant que quelques sites locaux, affectés par seulement deux évènements, comme cela a été le cas dans cette thèse. C'est donc à l'aide de données nombreuses, sur plusieurs évènements d'ampleurs variées, et ayant affecté des régions différentes, qu'il serait possible de mettre en place des modèles empiriques de prédiction des coûts, représentatifs à une échelle nationale.

La qualité de tels modèles empiriques dépend essentiellement de la quantité et de la qualité des données utilisées pour leur construction. Cette étude démontre que les données d'assurance sont une source d'information très utile à l'évaluation des dommages, mais que, celles-ci n'ayant pas été conçues pour ce type d'utilisation, elles pourraient être grandement améliorées dans cet objectif. Deux conditions sont à remplir pour que les données d'expertise d'assurance soient utilisables dans les meilleures dispositions possibles : d'une part, leur contenu doit être étoffé et standardisé, pour éviter les imprécisions et les informations non renseignées de nombreux paramètres. D'autre part, les données d'expertise doivent être archivées et mises à disposition sous un autre format que les

rapports papier, dont le stockage et la saisie sont une limite majeure à la compilation des nombreuses données nécessaires et à la réactualisation des modèles dans le temps.

Cela nous amène donc à formuler un certain nombre de recommandations sur le contenu « idéal » d'une base de données d'expertise des dommages des sinistres de catastrophes naturelles de type inondation sur l'enjeu habitation :

3.1. La description des dommages

Détailler la valeur de remplacement à neuf et la vétusté

Les montants indemnisés étant très dépendants des spécificités des contrats d'assurance (franchises, éléments garantis ou non, plafonds d'indemnisation, etc.), l'analyse du coût des dommages ne doit pas se baser sur les indemnisations, mais sur la valeur de remplacement des éléments endommagés calculée par les experts. Afin de pouvoir évaluer la perte économique liée aux différents éléments d'un bâtiment, il est nécessaire de connaitre systématiquement le coût de remplacement à neuf et le taux de vétusté des différentes parties du bien endommagé : gros œuvre, second œuvre, différents corps d'état, mobilier, etc.

Considérer les éléments annexes et les dommages indirects

Du fait qu'ils peuvent représenter une part importante des coûts, comme cela a été le cas pour la tempête Johanna, les dommages aux parties annexes des bâtiments gagneraient à être plus détaillés. Ainsi, le détail des coûts sur les éléments affectés (sous-sols, garages accolés ou indépendants, studios aménagés, murs, clôtures, terrain, etc.), grâce à la typologie des sinistres mise en place dans cette thèse (Figure 78, page 136), permettrait de connaitre exactement leur part dans les coûts des dommages aux habitations. Les informations sur ces parties annexes sont systématiquement manquantes quand elles ne sont pas garanties au contrat d'assurance. Dans ce cas, l'indication de la présence de dommages sur ces éléments, même s'ils ne sont pas chiffrés, devrait être mentionnée dans les rapports. Par ailleurs, l'indemnisation de dommages indirects (frais de relogement temporaire, pertes de non-perception de loyers, etc.) a parfois lieu ; cette information devrait également être renseignée de façon standardisée.

Renseigner une échelle d'intensité des dommages

La description de niveaux d'intensité des dommages, d'après une échelle de dommages telle que celle mise en place dans cette thèse (Tableau 13, page 206), est simple à réaliser et offre

la possibilité d'analyser l'endommagement autrement que par les coûts, qui sont parfois liés à des conditions très spécifiques (cette recommandation concerne les experts d'assurance, et de manière générale, toutes les missions de terrain de retour d'expérience sur les dommages).

3.2. L'aléa et les processus d'endommagement

Indiquer précisément la hauteur d'eau dans les habitations

L'information la plus importante pour tous les modèles d'évaluation des dommages des inondations (au sens large) est la hauteur d'eau. Or, cette variable n'est pas toujours renseignée dans les rapports d'expertise, et souffre souvent d'imprécisions. En particulier, la référence de la mesure devrait être indiquée dans les rapports : la hauteur d'eau est-elle indiquée dans le bâtiment ou à l'extérieur de celui-ci ? Par rapport au plancher du rez-de-chaussée ou au sous-sol ? En effet, dans certains cas, le niveau de l'intérieur de l'habitation peut être différent de celui du terrain naturel, ce qui rend les hauteurs d'eau issues de modélisations hydrauliques incomparables aux mesures faites dans les habitations. Dans l'idéal, la hauteur devrait être indiquée dans chaque partie surélevée ou semi-enterrée du bâtiment, ainsi que la différence de ce niveau avec le terrain à l'extérieur. Afin d'évaluer la fiabilité de l'information, un indicateur de la précision des valeurs de hauteur d'eau devrait être mentionné : mesure précise ou approximative, témoignage des habitants, etc.

Spécifier la nature de l'aléa

Nous avons démontré qu'en dehors de la hauteur d'eau, les autres paramètres de l'aléa ont, dans certaines circonstances, un impact sur les dommages : cette information mériterait donc d'être indiquée de manière standardisée dans les rapports d'expertise. Par exemple, pour la submersion marine, il serait judicieux de préciser si elle a lieu par débordement, franchissement de digue par des vagues, ou rupture de digue, si l'inondation est lente ou rapide, etc. Mais surtout, il faudrait que soit précisé quel lien ont eu ces conditions de l'aléa avec les dommages (quels paramètres sont liés au choix de remplacement des éléments endommagés) et sur quelles parties du bâtiment ces conditions ont été déterminantes, par exemple : durée de submersion impactante pour le bâtiment principal, chocs de vagues pour les éléments extérieurs, etc.

3.3. La vulnérabilité et la valeur des enjeux

Détailler la vulnérabilité intrinsèque des enjeux

Lors de l'analyse des dommages de Johanna et de Xynthia, les éléments les plus critiques pour l'analyse des dommages, et les plus inégalement renseignés dans les rapports d'expertise, se sont montrés être les caractéristiques des habitations affectées. Pour comprendre et expliquer les dommages, il faut connaitre un certain nombre de caractéristiques architecturales du bien affecté, notamment la présence d'étage et/ou de sous-sol pour chacun des bâtiments principaux et annexes. L'âge du bâtiment (ou une typologie du type de la Figure 118, page 194), ainsi que les matériaux de construction, sont utiles à la compréhension des dommages, en particulier pour les éléments de second œuvre, qui représentent la part la plus importante des dommages immobiliers.

Estimer la valeur totale des habitations

L'élément le plus important pour expliquer et modéliser le coût des dommages est la connaissance de la valeur totale des biens immobiliers et mobiliers, afin de pouvoir exprimer les dommages en taux d'endommagement plutôt qu'en valeurs absolues. Quand la « valeur assurée » calculée par les assureurs n'est pas disponible pour l'immobilier, on peut estimer la valeur totale à partir d'indicateurs sur la taille et le standing des habitations. Au sein des rapports d'expertise, devraient donc être systématiquement renseignés la surface habitable et le nombre de pièces principales, pour chaque étage de l'habitation, de manière à définir une « surface exposée » à la submersion marine. À propos du standing, le statut de l'assuré (résidence principale, secondaire, locataire) est une première information utile, qu'il faudra compléter avec des données externes aux données d'expertise.

3.4. La localisation des sinistres

Localiser précisément les sinistres pour les croiser avec des données externes

Tous les points évoqués sont des éléments critiques pour l'explication des dommages : ils gagneraient à être renseignés précisément et de façon systématique, pour pouvoir réaliser des modèles d'évaluation des dommages plus performants. Parce que nombre de ces informations sont à ce jour non renseignées dans les données d'expertise, et parce qu'elles ne seront probablement pas toutes accessibles, cette thèse a également montré l'intérêt de croiser les données d'assurance avec des données externes provenant de modèles hydrauliques de l'aléa, de bases de données institutionnelles sur les enjeux (INSEE, IGN) et de levés et d'enquêtes de terrain.

Pour croiser ces données externes aux données d'assurance, les sinistres doivent pouvoir être géolocalisés (étape qui est également une phase importante pour la modélisation de l'exposition des portefeuilles d'assurance aux risques). La standardisation du renseignement de l'adresse postale du sinistre est nécessaire pour améliorer les résultats de la phase de géocodage des données. D'un autre côté, l'utilisation des références cadastrales pour le géocodage a montré des résultats bien meilleurs que les adresses postales, et est donc à recommander, cette information étant facilement accessible[60]. La localisation des sinistres, ainsi que toutes les informations recueillies, doivent être renseignées dans le respect de la confidentialité qui lie les assureurs à leurs clients ; le présent travail a montré que l'anonymisation des données est tout à fait possible et que les informations sur les dommages pouvaient être utilisées sans créer de problèmes de confidentialité.

3.5. Le format d'archivage et de diffusion des données

Au-delà de la question du contenu des rapports d'expertise évoqué jusqu'à présent, le point le plus important pour l'utilisation des données d'expertise est la question de leur format. En effet, c'est seulement grâce à l'analyse de grands volumes de dossiers qu'il sera possible de mettre en place des modèles d'évaluation des dommages pertinents pour tout évènement sur le territoire français.

Via le système DARVA, les informations des rapports sont transmises aux assureurs numériquement, mais au format « pdf ». C'est au contraire, sous la forme d'un formulaire lié à une base de données numérique, que devraient être saisies par les experts de terrain les données des rapports d'expertise, via un modèle de rapport standard commun à tous les assureurs et tous les cabinets d'expertise. Le formulaire utilisé pour la collecte des données d'expertise dans le cadre de cette thèse est donné Figure 52, page 98. Il constitue un exemple de formulaire standardisé contenant l'essentiel des informations utiles à la modélisation des coûts qu'il est possible de collecter lors d'une expertise des dommages, et pourrait donc servir de point de départ pour cette réflexion. Quelle que soit la solution trouvée, elle ne sera rendue possible que par une discussion entre tous les acteurs du secteur de l'assurance : les assureurs, les réassureurs et les experts dommages. Ces derniers travaillant dans un environnement concurrentiel, les limites à la mise en place d'un tel outil commun à tous ces acteurs sont aujourd'hui plus d'ordre « stratégique » et « politique » que d'ordre technique.

[60] Par exemple via le portail http://www.cadastre.gouv.fr, ou via les actes de propriété des assurés. Une autre méthode peut aussi consister à relever les coordonnées GPS des sinistres sur le terrain.

À ce jour, la mise en place d'un rapport standard commun peut encore paraitre quelque peu ambitieuse et utopique à court terme, mais la création de l'ONRN est déjà un important pas en avant dans cette direction. Il ne manque plus qu'une volonté de tous les acteurs d'investir dans un système qui permettra, à terme, la mise en place des mesures de prévention des risques les plus pertinentes, et une réduction de la vulnérabilité et des dommages liés aux risques naturels en France. Le partage de ces données est probablement, aujourd'hui, un des moyens les plus efficaces pour la profession de l'assurance de s'impliquer auprès de l'État et des citoyens pour la prévention des risques. Ce travail de thèse est également un premier pas vers davantage de mutualisation des efforts et des connaissances entre le monde de l'assurance et celui de la recherche scientifique.

4. Perspectives de recherche sur l'évaluation économique des dommages

Dans tous les cas, les limites soulevées à propos de l'efficacité des modèles de prédiction du coût des dommages ne reposent pas que sur des informations qui peuvent provenir des données d'assurance : la compréhension des liens entre la valeur totale des enjeux exposés et leur « standing » devra être davantage étudiée, puisque c'est un facteur déterminant pour l'explication des coûts des dommages. Comme indiqué dans le présent travail, le revenu des habitants est un indicateur potentiellement intéressant pour cette recherche, il devrait donc être rendu disponible par un accès à des données institutionnelles comme les « fichiers fonciers » (bases MAJIC II et FILOCOM). Les études récentes incluent dans les modèles de prédiction de plus en plus de caractéristiques socio-économiques sur les habitants exposés, telles que la catégorie socioprofessionnelle. Ce sont donc des perspectives à envisager pour améliorer la capacité de prédiction des coûts des modèles d'endommagement.

Une autre catégorie de paramètres pouvant expliquer les dommages, qu'il n'a pas été possible d'analyser en détail dans le cadre de cette thèse, concerne la culture du risque et l'efficacité des mesures de prévention des territoires affectés.

En effet, l'évènement Xynthia amène à un certain nombre de constats inquiétants vis-à-vis des zones littorales, parmi lesquels l'absence de PPRL dans les communes inondées, la question en suspens de la gestion et de l'entretien des ouvrages de protection littoraux, et l'absence d'un système d'alerte des populations adapté, alors même que la surcote liée à la tempête était tout à fait prévisible. Les dommages si élevés de Xynthia sont notamment dus à la vulnérabilité particulière d'habitations récentes de plain-pied sur les littoraux de Vendée et de Charente-Maritime, dont beaucoup étaient des résidences secondaires. Cette implantation massive de biens en zone inondable, construits sans aucune précaution vis-à-vis de l'aléa submersion, est-elle due à une réelle méconnaissance du risque par les

habitants, à la complexité grandissante pour les élus locaux de concilier la prévention des risques et le développement économique de leurs communes, ou à la déresponsabilisation des habitants liée au principe de solidarité nationale du système CatNat ? La prise de conscience entrainée par Xynthia et le nombre d'actions réalisées par l'État depuis 2010 devraient aider à résoudre une partie de ces problèmes, bien que l'on puisse douter de la capacité de notre société à retenir des leçons du passé en matière de risques naturels, au vu du rapide oubli des conséquences de la tempête Martin de 1999, ayant provoqué des submersions dans la région seulement 10 ans avant Xynthia.

Les éléments tels que la perception du risque et le comportement des habitants, les mesures individuelles de réduction de la vulnérabilité, l'efficacité des systèmes d'alerte, ainsi que des politiques d'aménagement du territoire telles que les Plans de Prévention des Risques, sont donc des paramètres clés qui doivent être davantage étudiés et pris en compte dans la recherche sur les risques naturels. Si ces paramètres sont de plus en plus étudiés dans le cadre de projets d'analyse pluridisciplinaire de la vulnérabilité systémique (par exemple pour les risques côtiers, ANR MISEEVA et COCORISCO), leur influence précise sur le coût des dommages reste encore à quantifier.

En particulier, de nombreuses mesures individuelles de réduction de la vulnérabilité intrinsèque des bâtiments (mitigation) peuvent être mises en place, telles que la non utilisation de certains matériaux vulnérables en zone submersible, comme les cloisons de type Placoplatre à armatures métalliques, ou les chapes de béton non résistantes aux effets de l'eau salée. Ces mesures peuvent être une alternative ou un complément possible aux méthodes de protection classique de l'existant par des digues, très couteuses, et qui ne sont jamais infaillibles. Avec la systématisation des retours d'expérience, et notamment grâce aux données d'assurance, la meilleure connaissance de la sensibilité des matériaux à la submersion permettra de préconiser des mesures de mitigation de plus en plus efficaces face au risque d'inondation au sens large, et en particulier de submersion marine.

De plus, les différents outils statistiques de modélisation multivariée des dommages explorés dans cette thèse permettent, par le biais des Analyses Coûts-Bénéfices, l'évaluation des dommages évités, et donc des gains apportés par ces mesures de mitigation, de la même manière que ceux liés à la construction d'ouvrages de protection. La généralisation de l'ACB et de l'Analyse Multicritères pour évaluer les politiques de prévention, et surtout leur utilisation dès la phase de conception des projets, en tant que réels outils d'aide à la décision, devra à l'avenir permettre une réflexion entre les différentes stratégies de prévention possibles, et la préconisation des mesures les plus adaptées et les plus efficaces dans chaque situation particulière d'exposition au risque de submersion marine.

Bibliographie

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, 27p, http://infoterre.brgm.fr/rapports/RC-60466-FR.pdf.

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, 25p, http://infoterre.brgm.fr/rapports/RC-61707-FR.pdf.

Adger, W.N., 2006. Vulnerability, Global Environmental Change, 16, 3, 268-281, http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.

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.

Anziani, A., 2010. Rapport d´information fait au nom de la mission commune d'information sur les conséquences de la tempête Xynthia, Sénat, session ordinaire de 2009-2010, n° 647, rapport et auditions, 227p et 247p.

APFM, 2007. Conducting flood loss assessments - a tool for integrated flood management, Flood management tools series, 30p, http://www.apfm.info/ifm_tools.htm.

AQC, 2009. L'évolution des parts de marché des produits et matériaux de la construction, Paris.

AUP, 2009. Zone de Protection du Patrimoine Architectural, Urbain et Paysager de La Rochelle, pièce réglementaire du Plan Local d'Urbanisme, annexe : livret pédagogique, 46p.

Barroca, B., 2006. Risque et vulnérabilités territoriales, les inondations en milieu urbain, Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est - Marne-La-Vallée, 340p, http://www.bruno-barroca.fr/spip/spip.php?article15.

Barroca, B., Bernardara, P., Mouchel, J. M. et Hubert, G., 2006. Indicators for identification of urban flooding vulnerability, Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, 553-561, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-6-553-2006.

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.ocemod.2011.11.001

Besse, P., 2000. Pratique de la modélisation statistique, Publications du Laboratoire de Statistique et Probabilités, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 93p.

Bessemoulin, P., 2002. Les tempêtes en France, Annales des Mines, Réalités industrielles, 9-14, http://www.annales.org/ri/2002/temp-08-02.html.

Birkmann, J., 2006. Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: conceptual frameworks and definitions, 7-54, in : Measuring Vulnerability to Natural Hazards: towards disaster resilient societies, United Nations University Press, Tokyo, New York, Paris, 400p.

Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreño, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Kienberger, S., Keiler, M., Alexander, D., Zeil, P. et Welle T., 2013. Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework, Natural Hazards, 67, 2, 193-211, http://dx.doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5.

Black, A. et Evans, S., 1999. Flood damage in the UK: new insights for the insurance industry - a report presenting the Dundee Flood Loss Tables, Université de Dundee, département de géographie, 84p.

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. et Wisner, B., 1994. At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disasters, Routledge, New York, 284p.

Bommer, J., Spence, R., Erdik, M., Tabuchi, S., Aydinoglu, N., Booth, E., del Re, D. et Peterken, O., 2002. Development of an earthquake loss model for Turkish catastrophe insurance, Journal of Seismology, 6, 3, 431-446, http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1020095711419.

Braun, A. et Déqué, M., 2011. Diagnostics de changement climatique sur la France, résultats du projet SCAMPEI : Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes, http://www.cnrm.meteo.fr/scampei/index.php.

Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A. et Stone, C. J., 1984. Classification and Regression Trees, Chapman and Hall/CRC, Londres, 368p.

Breiman, L., 1996. Bagging predictors, Machine Learning, 24, 2, 123-140, http://dx.doi.org/10.1007/BF00058655.

Breiman, L., 2001. Random forests, Machine Learning, 45, 1, 5-32, http://dx.doi.org/10.1023/A:1010933404324.

Büchele, B., Kreibich, H., Kron, A., Thieken, A., Ihringer, J., Oberle, P., Merz, B. et Nestmann F., 2006. Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks, Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, 485-503, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-6-485-2006.

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., Costa, S., Caspar, R., Ardhuin, F., Magne, R. et Goasguen, G., 2010. Aspects météo-marins de la tempête du 10 mars 2008 en Atlantique et en Manche, Norois, 215, 11-31, http://dx.doi.org/10.4000/norois.3242.

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 morpho-sédimentaires, Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, 348p, http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00596426.

CAUE 17, 2001. Guide architectural et paysager du Pays Rochefortais, 41p, http://www.caue17.fr/images/pdf/ROCHEFORTAIS_100.pdf.

CAUE 17, 2003. Guide d'architecture locale de l'île de Ré.

CAUE 17, 2005. Bien restaurer nos maisons saintongeaises, 39p, http://www.caue17.fr/images/pdf/charte%20VDS_200.pdf.

CAUE 85, 2009. L'architecture balnéaire en Vendée, 123p, http://issuu.com/caue85/docs/architecture_balneaire.

CEPRI, 2010. Analyse coût bénéfice - annexes techniques au cahier des charges PAPI, 78p, http://www.cepri.net/publications-et-documents.html.

CEPRI, 2011. L'ACB (analyse coût/bénéfice) : une aide à la décision au service de la gestion des inondations - guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et de leurs partenaires, 42p, http://www.cepri.net/publications-et-documents.html.

CEPRI, 2013a. Évaluation des dommages aux logements liés aux submersions marines, adaptation des courbes de dommages au contexte littoral, 28p, à paraitre, http://www.cepri.net/publications-et-documents.html.

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

CETMEF, 2011. Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux - France Métropolitaine, 170p, http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/vulnerabilite-du-territoire-a406.html.

CETMEF, 2012. Étape de cartographie des surfaces inondables et des risques dans le cadre de la directive « Inondations », rapport de la mission inondations par submersions marines et tsunamis, 32p, http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/etape-de-cartographie-des-surfaces-a1006.html.

Chauveau, E., Chadenas, C., Comentale, B., Pottier, P., Blanloeil, A., Feuillet, T., Mercier, D., Pourinet, L., Rollo, N., Tillier, I. et Trouillet, B., 2011. Xynthia : leçons d'une catastrophe, Cybergeo, 538, http://dx.doi.org/10.4000/cybergeo.23763.

Chávez-López, G. et Zolfaghari, M. R., 2010. Natural catastrophe loss modeling: the value of knowing how little you know, 14th European conference on earthquake engineering, 30 août-3 septembre 2010, Ohrid, République de Macédoine, 8p.

Chemitte, J., 2008. Adoption des technologies de l'information géographique et gestion des connaissances dans les organisations, application à l'industrie de l'assurance pour la gestion des risques naturels, Thèse de doctorat de l'École des Mines de Paris, 267p, http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00004998.

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.

Commissariat Général du Plan, 2005. Révision du taux d'actualisation des investissements publics, Rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue, 112p.

Cour des comptes, 2012. Les enseignements des inondations de 2010 sur le littoral atlantique (Xynthia) et dans le Var, Rapport public thématique, 305p, http://www.ccomptes.fr/Publications/Publications/Les-enseignements-des-inondations-de-2010-sur-le-littoral-atlantique-Xynthia-et-dans-le-Var.

Cutter, S. L., 1996. Vulnerability to environmental hazards, Progress in Human Geography, 20, 4, 529-539, http://dx.doi.org/10.1177/030913259602000407.

Cutter, S. L., Emrich, C. T., Mitchell, J. T., Boruff, B. J., Gall, M., Schmidtlein, M. C., Burton, C. G. et Melton, G., 2006. The long road home: race, class, and recovery from hurricane Katrina, Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 48, 2, 8-20, http://dx.doi.org/10.3200/ENVT.48.2.8-20.

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.

Dassanayake, D., Burzel, A. et Oumeraci, H., 2012. Evaluation of Cultural Losses, XtremRisK project, Progress reports SP4, https://www.tu-braunschweig.de/lwi/hyku/xtremrisk/results.

Dauphiné, A., 2001. Risques et catastrophes : observer, spatialiser, comprendre, gérer, Armand Colin, Paris, 288p.

DDTM 29, 2010. Cartographie des submersions et des dégâts côtiers de la tempête de mars 2008 dans le Finistère.

Deboudt, P., 2010a. Vers la mise en œuvre d'une action collective pour gérer les risques naturels littoraux en France métropolitaine, Cybergeo , 491, http://dx.doi.org/10.4000/cybergeo.22964.

Deboudt,P., 2010b. Towards coastal risk management in France, Ocean & Coastal Management, 53, 366-378, http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.04.013.

Des Rosiers, F., 2001. La modélisation statistique en analyse et évaluation immobilières : guide méthodologique, Gestion urbaine et immobilière, Université Laval, 79p.

Desaigues, B. et Lesgards, V., 1992. L'évaluation contingente des actifs naturels, Revue d'Économie Politique, 102, 1, 99-102.

Desaigues, B. et Point, P., 1993. Économie du patrimoine naturel - la valorisation des bénéfices d'environnement, Economica, Paris, 317p.

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, 78p, http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/le-retour-d-experience-de-la-a1792.html.

Domenichini, J., 2008. Calcul de la sinistralité relative à des aléas « naturels » et anthropiques rares : Systèmes d'Information Géographique (SIG), retour d'expérience et méthodes prospectives pour l'évaluation de sinistres inondation et terrorisme en réassurance, Thèse de doctorat de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 528p.

Dominey-Howes, D. et Papathoma, M., 2007. Validating a tsunami vulnerability assessment model (the PTVA model) using field data from the 2004 Indian Ocean tsunami, Natural Hazards, 40, 1, 113-136, http://dx.doi.org/10.1007/s11069-006-0007-9.

Douglas, J. 2007. Physical vulnerability modelling in natural hazard risk assessment, Natural Hazards and Earth System Sciences, 7, 283-288, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-7-283-2007.

Douvinet, J., 2006. Intérêts et limites des données « CatNat » pour un inventaire des inondations - l'exemple des « crues rapides » liées à de violents orages (bassin parisien, Nord de la France), Norois, 201, 4, 17-30, http://dx.doi.org/10.4000/norois.1733.

Douvinet, J., 2008. Les bassins versants sensibles aux « crues rapides » dans le Bassin Parisien - analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes, Thèse de doctorat de l'Université de Caen Basse-Normandie, 381p, http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00344612.

Douvinet, J., 2010. Le traitement des inondations en catastrophe naturelle : un système à adapter, Risques, Les cahiers de l'assurance, 83, 4, http://www.ffsa.fr/webffsa/risques.nsf/html/Risques_83_0021.htm.

Douvinet, J. et Vinet, F., 2012a. La carte des arrêtés « CatNat » pour les inondations: analyse spatio-temporelle, M@ppemonde, 107, 3, http://mappemonde.mgm.fr/num35/articles/art12301.html.

Douvinet, J. et Vinet, F., 2012b. La carte des arrêtés « CatNat » pour les inondations: limites et améliorations possibles, M@ppemonde, 107, 3, http://mappemonde.mgm.fr/num35/articles/art12302.html.

Dreveton, C., 2002. L'évolution du nombre de tempêtes en France sur la période 1950-1999, La Météorologie, 37, 46-56, http://dx.doi.org/10.4267/2042/36221.

Dutta, D., Herath, S. et Musiake, K., 2003. A mathematical model for flood loss estimation, Journal of Hydrology, 277, 1-2, 24-49, http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00084-2.

Eleutério, J., Payraudeau, S. et Rozan, A., 2008. Sensibilité de l'évaluation des dommages associés aux inondations en fonction de la caractérisation de la vulnérabilité des bâtiments, Ingénieries EAT, 55-56, 29-44, http://www.set-revue.fr/sensibilite-de-levaluation-des-dommages-associes-aux-inondations-en-fonction-de-la-caracterisation-d.

Eleutério, J., 2012. Analyse du risque inondation : l'impact d'incertitudes dans les modélisations de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux sur les estimations de dommages, Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg, 243p, http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00821011.

Elmer, F., Thieken, A. H., Pech, I. et Kreibich, H., 2010. Influence of flood frequency on residential building losses, Natural Hazards and Earth System Sciences, 10, 2145-2159, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-10-2145-2010.

Erdlenbruch, K., Gilbert, E., Grelot, F. et Lescoulier, C., 2008. Une analyse coût-bénéfice spatialisée de la protection contre les inondations - application de la méthode des dommages évités à la basse vallée de l'Orb, Ingénieries EAT, 53, 3-20, http://www.set-revue.fr/une-analyse-cout-benefice-spatialisee-de-la-protection-contre-des-inondations-application-de-la-meth.

Facts & Figures, 2011. Baromètre 2011 de l'assurance dommages - analyse stratégique du marché et mise en perspective, v1.00 au 27 mai 2011, réalisé sur les comptes arrêtés fin 2009, 28p.

Farmer, R., 1977. Today's risks: thinking the unthinkable, Nature, 267, 92-93, http://dx.doi.org/10.1038/267092a0.

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

FEMA, 2006. Hurricane Katrina in the Gulf Coast: mitigation assessment team report, building performance observations, recommendations and technical guidance, FEMA report 549, http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=1857.

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.

Fritsch, B., 2007. Tramway et prix des logements à Nantes, L'Espace Géographique, 36, 2, 97-113, http://www.cairn.info/revue-espace-geographique-2007-2-page-97.htm.

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., Prame, B., Attanayake, N., De Silva, U., Desprats, J.-F., Fernando, S., Fontaine, M., Idier, D., Lenôtre, N., Pedreros, R. et Siriwardana, C. H. E. R., 2007. Geographic information system for coastal hazards - application to a pilot site in Sri-Lanka, rapport BRGM/RP-55553-FR, 122p, http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-55553-FR.pdf.

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. et Paris. F., 2012. Évaluation de la submersion marine maximale à l'échelle régionale, rapport BRGM/RP-62259-FR, 97p, http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62259-FR.pdf.

Garnier, E. et Surville, F., 2010. La tempête Xynthia face à l'histoire - submersions et tsunamis sur les littoraux français du Moyen Age à nos jours, Le Croît vif, Saintes, 176p.

Genovese, E. et Przyluski, V., 2013. Storm surge disaster risk management: the Xynthia case study in France, Journal of Risk Research, 16, 7, 825-841, http://dx.doi.org/10.1080/13669877.2012.737826.

Genty, A., 2005. Du concept à la fiabilité de la méthode du transfert en économie de l'environnement : un état de l'art, Cahiers d'économie et sociologie rurales, 77, 6-34.

Géos-AEL, 2008. Étude bibliographique pour l'élaboration d'un schéma de prévention des risques littoraux sur la presqu'île de Gâvres, pour le compte de la Direction Départementale de l'Équipement du Morbihan, 121p.

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.

Géos-AEL, 2011. Atlas des risques littoraux sur le département du Morbihan - phase 1 : recensement et conséquences des tempêtes et coups de vent majeurs, 476p.

Gérin, S., 2011. Une démarche évaluative des Plans de Prévention des Risques dans le contexte de l'assurance des catastrophes naturelles : Contribution au changement de l'action publique de prévention, Thèse de doctorat de l'Université Paris 7 Denis Diderot, 296p, http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00582692.

Gérin, S. et Nussbaum, R., 2012. Gouvernance et gestion des risques naturels - financement des dommages - transfert et partage du risque, formation interne BRGM, initiation aux sciences humaines et sociales dans l'évaluation des risques naturels.

Gewalt, M., Klaus, J., Peerbolte, E. B., Pflügner, W., Schmidtke, R. F. et Verhage L., 1996. EUROflood - technical annex 8, economic assessment of flood hazards, Regional scale analysis-decision support system (RSA-DSS), Munich.

Gilbert, C., 2009. La vulnérabilité, une notion vulnérable ?, 23-40, in : Becerra, S. et Peltier, A., 2009. Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés, l'Harmattan, Paris, 575p.

Gissing, A. et Blong, R., 2004. Accounting for variability in commercial flood damage estimation, Australian Geographer, 35, 2, 209-222, http://dx.doi.org/10.1080/0004918042000249511.

Gleyze, J.-F., 2005. La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques, Thèse de doctorat de l'Université Paris 7 Denis Diderot, 539p, http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00138991.

Gleyze, J.-F. et Reghezza, M., 2007. La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement, Géocarrefour, 82/1-2, http://geocarrefour.revues.org/1411.

Grelot, F., 2004. Gestion collective des inondations, peut-on tenir compte de l'avis de la population dans la phase d'évaluation économique a priori ? Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris, 391p, http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00420388.

Grelot, F., Bailly, J.-S., Blanc, C., Erdlenbruch, K., Meriaux, P., Saint Geours, N. et Tourment, R., 2008. Sensibilité d'une analyse coût-bénéfice - enseignements pour l'évaluation des projets d'atténuation des inondations, Ingénieries EAT, numéro spécial, 95-108.

Grinsted, A., Moore, J. C. et Jevrejeva, S., 2010. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD, Climate Dynamics, 34, 461-472, http://dx.doi.org/10.1007/s00382-008-0507-2.

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.

Guilcher, A., 1954. Morphologie littorale et sous-marine, P.U.F., collection Orbis, Paris, 216p.

Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R. J. et Corfee-Morlot, J., 2013. Future flood losses in major coastal cities, Nature Climate Change, 3, 802-806, http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1979.

Hay-Lepêtre, C., 2005. Dynamiques spatiale et temporelle de l'aléa inondation : de l'analyse des phénomènes à l'évaluation des pratiques d'aménagement - l'exemple de la Seine-Maritime, Thèse de doctorat de l'Université de Rouen, 530p.

Hélias, A., Laurens, D., Mazière, B. et Chauvière, J.-Y., 2007. L'utilisation du fonds de prévention des risques naturels majeurs, rapport du Conseil Général des Ponts et Chaussées et de l'Inspection Générale de l'Environnement, 49p.

Hellequin, A.-P., Flanquart, H., Meur-Férec, C. et Rulleau, B., 2013. Perceptions du risque de submersion marine par la population du littoral languedocien : contribution à l'analyse de la vulnérabilité côtière, Natures Sciences Sociétés, accepté, à paraitre.

Hénaff, A., 2012. L'approvisionnement sédimentaire dans les systèmes littoraux tempérés : sources, évolution et gestion, Habilitation à diriger des recherches, Université de Bretagne Occidentale, 2 volumes, 201p et 445p.

Hénaff, A., Meur-Férec, C. et Lageat, Y., 2013. Changement climatique et dynamique géomorphologique des côtes bretonnes - leçons pour une gestion responsable de l'imbrication des échelles spatio-temporelles, Cybergeo, 654, http://dx.doi.org/10.4000/cybergeo.26058.

Heneka, P. et Ruck, B., 2008. A damage model for the assessment of storm damage to buildings, Engineering Structures, 30, 12, 3603-3609, http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.06.005.

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.

Hug, C., Krzystek, P. et Fuchs, W., 2004. Advanced lidar data processing with lastools, XXth ISPRS Congress, 12-23 juillet 2004, Istanbul, Turquie.

Idier, D., Romieu, E., Pedreros, R. et Oliveros, C., 2010. A simple method to analyse non-cohesive sediment mobility in coastal environment, Continental Shelf Research, 30, 365-377, http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2009.12.006.

IPCC, 2007. Climate change 2007: synthesis report, contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Genève, Suisse, 104p.

Janssen, M. A., Schoon, M. L., Ke, W. et Börner, K., 2006. Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change, Global Environmental Change, 16, 3, 240-252, http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.001.

Jonkman, S. N., 2007. Loss of life estimation in flood risk assessment, theory and applications, Thèse de doctorat de l'Université de Delft, Pays-Bas, 354p, http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:bc4fb945-55ef-4079-a606-ac4fa8009426.

Jonkman, S.N., Bočkarjova, M., Kok, M. et Bernardini, P., 2008. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands, Ecological Economics, 66, 1, 77-90, http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.12.022.

Jousseaume, V. et Mercier, D., 2009. Évaluer la vulnérabilité architecturale de l'habitat en zone inondable : l'exemple du Val nantais, 199-214, in : Becerra, S. et Peltier, A., 2009. Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés, l'Harmattan, Paris, 575p.

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.

Kelman, I. et Spence, R., 2004. An overview of flood actions on buildings, Engineering Geology, 73, 297-309, http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.010.

Kim, J. M., Woods, P. K., Park, Y. J. et Son, K., 2013. Predicting the Texas windstorm insurance association claim payout of commercial buildings from hurricane Ike, Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 1, 3813-3855, 2013, http://dx.doi.org/10.5194/nhessd-1-3813-2013.

Kleist, L., Thieken, A. H., Köhler, P., Müller, M., Seifert, I., Borst, D. et Werner, U., 2006. Estimation of the regional stock of residential buildings as a basis for a comparative risk assessment in Germany, Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, 541-552, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-6-541-2006.

Kolen, B., Slomp, R., Van Balen, W., Terpstra, T., Bottema, M. et Nieuwenhuis, S., 2010. Learning from French experiences with storm Xynthia: damages after a flood, rapport HKV lijn in water et Rijkswaterstaat, Waterdienst, Pays-Bas, 73p, http://www.rijksoverheid.nl/documenten-en-publicaties/rapporten/2010/09/01/learning-from-french-experiences-with-storm-xynthia-damages-after-a-flood.html.

Kreibich, H., Piroth, K., Seifert, I., Maiwald, H., Kunert, U., Schwarz, J., Merz, B. et Thieken, A. H., 2009. Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling?, Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 1679-1692, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-9-1679-2009.

Kreibich, H., Seifert, I., Merz, B. et Thieken, A. H., 2010. Development of FLEMOcs - a new model for the estimation of flood losses in the commercial sector, Hydrological Sciences Journal, 55, 8, 1302-1314, http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2010.529815.

Krien, Y., Garcin, M., Pedreros, R. et Le Cozannet, G., 2010. Méthodes pour l'évaluation à l'échelle nationale de l'emprise maximale actuelle de l'aléa submersion marine, rapport BRGM/RP-58101-FR, 79p, http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-58101-FR.pdf.

Lagomarsino, S. et Giovinazzi, S., 2006. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings, Bulletin of Earthquake Engineering, 4, 4, 415-443, http://dx.doi.org/10.1007/s10518-006-9024-z.

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 Berre, I., David, L., Hénaff, A., Meur-Férec, C., Cuq, V. et Lageat, Y., 2012. Atlas des risques d'érosion-submersion, contribution à l'étude de la vulnérabilité côtière des communes de Gâvres et Guissény, Rapport final ADAPTALITT (Capacités d'adaptation des sociétés littorales aux phénomènes d'érosion-submersion des côtes en prise avec les changements climatiques), LETG-Brest Géomer, UBO, 54p.

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

Lemon, S. C., Roy, J., Clark, M. A., Friedmann, P. D. et Rakowski, W., 2003. Classification and regression tree analysis in public health: methodological review and comparison with logistic regression, Annals of Behavioral Medicine, 26, 3, 172-181, http://dx.doi.org/10.1207/S15324796ABM2603_02.

Leone, F., 2007. Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes « naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisque, Habilitation à diriger des recherches, Université Montpellier 3 Paul Valéry, 245p, http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00276636.

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.

Magne, R., Ardhuin, F. et Roland, A., 2010. Prévisions et rejeux des états de mer du globe à la plage, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 14, 2, 149-162, http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2010.9693209.

Marche, F., 2005. Theoretical and numerical study of shallow water models, Applications to nearshore hydrodynamics, Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux 1, 279p, www.epoc.u-bordeaux.fr/indiv/bonneton/Divers/THESE_Marche.pdf.

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/fld.1311.

Marulanda, M. C., Carreño, M. L., Cardona, O. D., Ordaz, M. G. et Barbat, A. H., 2013. Probabilistic earthquake risk assessment using CAPRA: application to the city of Barcelona, Spain, Natural Hazards, 69, 1, 59-84, http://dx.doi.org/10.1007/s11069-013-0685-z.

MATE et METL, 1997a. Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), guide général, La Documentation française, Paris, 76p, http://catalogue.prim.net.

MATE et METL, 1997b. Plans de prévention des risques littoraux (PPRL), guide méthodologique, La Documentation française, Paris, 54p, http://catalogue.prim.net.

MBCPFPRE, 2011. Rapport sur la gestion du fonds de prévention des risques naturels majeurs, annexe au projet de loi de finances pour 2012, 55p.

Mebarki, A., Valencia, N., Salagnac, J.-L. et Barroca, B., 2012. Flood hazards and masonry constructions: a probabilistic framework for damage, risk and resilience at urban scale, Natural Hazards and Earth System Sciences, 12, 1799-1809, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-12-1799-2012.

MEDAD, 2006a. Financement par le fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM), brochure, 8p, http://catalogue.prim.net.

MEDAD, 2006b. Financement par le fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM), dossier de présentation, 58p, http://catalogue.prim.net.

MEDAD/D4E, 2007. Synthèse des évaluations socio-économiques des instruments de prévention des risques d'inondation, 117p, http://catalogue.prim.net.

MEDD/D4E, 2005. Guide de bonnes pratiques pour la mise en œuvre de la méthode des prix hédoniques, 35p.

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, 2004. Les risques majeurs, guide général, 64p, http://catalogue.prim.net.

MEDDE/DGPR, 2006. Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), cahier de recommandations sur le contenu des PPR, 36p, http://catalogue.prim.net.

MEDDE/DGPR, 2008. Programme Information, participation du public, concertation et association dans les plans de prévention des risques, glossaire des risques naturels, 11p, http://catalogue.prim.net.

MEDDE/CGDD/SOeS, 2011. Références - environnement littoral et marin, 164p.

MEDDE/DGPR, 2011, La démarche française de prévention des risques majeurs, 83p, http://catalogue.prim.net.

MEDDE/CGDD, 2012. Analyse multicritères : application aux mesures de prévention des inondations - guide méthodologique, document de travail n° 6.B, 168p, http://catalogue.prim.net.

MEDDE/DGPR, 2012. Mieux savoir pour mieux agir - principaux enseignements de la première évaluation des risques d'inondation sur le territoire français - EPRI 2011, 68p, http://catalogue.prim.net.

MEDDE/DGPR, 2013. Guide méthodologique : Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL), 169p, http://catalogue.prim.net.

MEDDE, CCR et MRN, 2013. Observatoire National des Risques Naturels (ONRN), recueil des indicateurs, deuxième version (novembre 2013), 78p, http://www.onrn.fr/site/binaries/content/assets/documents/onrn/13-11-27-onrn---recueil-indicateurs.pdf.

MEDDTL, 2011. Plan Submersions Rapides (PSR) : submersions marines, crues soudaines et ruptures de digues, 79p, http://catalogue.prim.net.

MEDDTL/CGDD/SEEIDD, 2011. Taux d'actualisation et politiques environnementales : un point sur le débat, Études & documents, 42, 14p.

MEDDTL/DGPR, 2011. Programmes d'Action de Prévention des Inondations (PAPI), de la stratégie aux programmes d'action, cahier des charges, 27p, http://catalogue.prim.net.

MEEDDAT/CGDD/SEEIDD, 2009. Assurance des risques naturels en France : sous quelles conditions les assureurs peuvent-ils inciter à la prévention des catastrophes naturelles ? Études & documents, 1, 129p, http://catalogue.prim.net.

MEEDDM/CGDD/SEEIDD, 2010. Le régime d'assurance des catastrophes naturelles en France métropolitaine entre 1995 et 2006, Études & documents, 22, 60p, http://catalogue.prim.net.

MEF, 2012. Rapport sur la gestion du fonds de prévention des risques naturels majeurs, annexe au projet de loi de finances pour 2013, 60p.

Menoni, S., Molinari, D., Parker, D., Ballio, F. et Tapsell, S., 2012. Assessing multifaceted vulnerability and resilience in order to design risk-mitigation strategies, Natural Hazards, 64, 3, 2057-2082, http://dx.doi.org/10.1007/s11069-012-0134-4.

Merz, B., Kreibich, H., Thieken, A. et Schmidtke, R., 2004. Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings, Natural Hazards and Earth System Sciences, 4, 153-163, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-4-153-2004.

Merz, B. et Thieken, A. H., 2009. Flood risk curves and uncertainty bounds, Natural Hazards, 51, 3, 437-458, http://dx.doi.org/10.1007/s11069-009-9452-6.

Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R. et Thieken, 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.

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.

Messner, F., Penning-Rowsell, E., Green, C., Meyer, V., Tunstall, S. et Van der Veen, A., 2007. Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods, FLOODsite Project Deliverable D9.1, 178p, http://www.floodsite.net/html/publications3.asp?taskID=9.

Metzger, P. et D'Ercole, R., 2009. Enjeux territoriaux et vulnérabilité, une approche opérationnelle, 391-402, in : Becerra, S. et Peltier, A., 2009. Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés, l'Harmattan, Paris, 575p.

Metzger, P. et D'Ercole, R., 2011. Les risques en milieu urbain : éléments de réflexion, EchoGéo, 18, http://dx.doi.org/10.4000/echogeo.12640.

Meur-Férec, C. et Morel, V., 2004. L'érosion sur la frange côtière : un exemple de gestion des risques, Natures Sciences Sociétés, 12, 263-273, http://dx.doi.org/10.1051/nss:2004038.

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.

Meur-Férec, C., Deboudt, P. et Morel, V., 2008. Coastal risks in France: an integrated method for evaluating vulnerability, Journal of Coastal Research, 24, 2A, 178-189, http://dx.doi.org/10.2112/05-0609.1.

Meur-Férec, C., Flanquart, H., Hellequin, A.-P. et Rulleau, B., 2010. Risk perception, a key component of systemic vulnerability of the coastal zones to erosion-submersion, a case study on the French Mediterranean coast, Littoral 2010 - adapting to global change at the coast: leadership, innovation, and investment, 21-23 septembre 2010, Londres, 10003, 8p, http://dx.doi.org/10.1051/litt/201110003.

Meur-Férec, C. et Rabuteau, Y., 2013. Plonevez-les-Flots : un territoire fictif pour souligner les dilemmes des élus locaux face à la gestion des risques côtiers, l'Espace Géographique, accepté, à paraitre.

Meyer, V., Becker, B., Markantonis, V. et Schwarze, R., 2012. Costs of natural hazards - a synthesis, CONHAZ project deliverable D9.1, 63p, http://conhaz.org/outcomes-1.

Middelmann-Fernandes, M. H., 2010. Flood damage estimation beyond stage-damage functions: an Australian example, Journal of Flood Risk Management, 3, 1, 88-96, http://dx.doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01058.x.

Moncoulon, D., Labat, D., Ardon, J., Onfroy, T., Leblois, E., Poulard, C., Aji, S., Rémy, A. et Quantin A., 2013. Analysis of the French insurance market exposure to floods: a stochastic model combining river overflow and surface runoff, Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 1, 3217-3261, http://dx.doi.org/10.5194/nhessd-1-3217-2013.

MRN, 2012. Assises Nationales des Risques Naturels - 19-20 janvier 2012, Bordeaux, atelier économie et risques, dossier du participant, 30p, http://www.mrn.asso.fr/content/assises-nationales-des-risques-naturels-19-20-janvier-2012.

Munich Re, 2010. Natural catastrophes in differently developed economies, poster, Geo Risks Research, NatCatSERVICE, http://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/georisks/natcatservice/default.aspx.

Munier, B., Hautin, N., Muzet, S. et Placer, V., 1997. Rapport sur les méthodes coûts-bénéfices de la prévention des risques naturels, École Normale Supérieure de Cachan, Département d'économie et gestion, pour le compte du Ministère de l'Environnement, 294p.

Nadal, C., 2007. Expected flood damage to buildings in riverine and coastal zones, Thèse de doctorat de l'Université du Porto Rico, Mayagüez, 410p.

Nadal, N., Zapata, R., Pagán, I., López, R. et Agudelo, J., 2010. Building Damage due to Riverine and Coastal Floods, Journal of Water Resources Planning and Management, 136, 3, 327-336, http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000036.

Nascimento, N., Baptista, M., Silva, A., Léa Machado, M., Costa de Lima, J., Gonçalves, M., Silva, A., Dias, R. et Machado, E., 2006. Flood-damage curves: methodological development for the Brazilian context, Water Practice & Technology, Urban Drainage 10, selected proceedings of the 10th International Congress on Urban Drainage, 21-26 août 2005, Copenhague, Danemark, http://www.iwaponline.com/wpt/001/wpt0010022.htm.

Nicolae Lerma, A., 2012. Approche analytique et étude prospective de l'aléa de submersion, de la donnée observée à la modélisation, à Carthagène des indes, Colombie. Thèse de doctorat de l'Université Paris 1 Panthéon - Sorbonne, 450p.

NOAA, 2003. A guide to F-scale damage assessment, National Weather Service, Silver Spring, Maryland, 94p, http://www.wdtb.noaa.gov/courses/ef-scale.

Nussbaum, R. et Chemitte, J., 2006. La réduction de la vulnérabilité de l'existant face aux menaces naturelles. Nécessaires synergies entre systèmes d'indemnisations et stratégies de mitigation, 133-140, in : Leone, F. et Vinet, F., 2006. Vulnérabilité des sociétés et territoires face aux menaces naturelles, collection Géorisques, 1, http://www.univ-montp3.fr/gcrn/index.php?option=com_content&task=view&id=84&Itemid=88.

Parker, D. J., Green, C. H. et Thompson, P. M., 1987. Urban flood protection benefits: A project appraisal guide (The Red Manual), Gower Technical Press, Saxon House, Aldershot, 284p.

Parker, D., Tapsell, S. et McCarthy, Simon., 2007. Enhancing the human benefits of flood warnings, Natural Hazards, 43, 3, 397-414, http://dx.doi.org/10.1007/s11069-007-9137-y.

Paskoff, R., 1998, Les littoraux - impacts des aménagements sur leur évolution, Armand Colin, Paris, 260p.

Pedreros, R., Bruneau, N., Bonneton, P. et Dumas, F., 2007. Simulation of nearshore dynamics by coupling of the models SWAN and MARS, WOO2007 and GLOBWAVE workshop: Waves and Operational Oceanography, 19 Septembre 2007, Brest.

Pedreros, 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, 43p, http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-58261-FR.pdf.

Pedreros, R., Vinchon, C., Delvallée, E., Lecacheux, S., Balouin, Y., Garcin, M., Krien, Y., Le Cozannet, G., Poisson, B., Thiebot, J., Marche, F. et Bonneton, P.,2011. Using a multi models approach to assess coastal exposure to marine inundation within a global change context, Poster, EGU General Assembly, 3-8 avril 2011, Vienne, http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2011/poster_programme/7610.

Peiris, L. M. N., 2006. Vulnerability functions for tsunami loss estimation, 1st european conference on earthquake engineering and seismology (a joint event of the 13th ECEE and the 30th general assembly of the ESC), 3-8 septembre 2006, Genève, Suisse, 1121.

Penning-Rowsell, E. et 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.

Peretti-Watel, P., 2000. Sociologie du risque, Armand Colin, Paris, 286p.

Pielke, R. A., Klein, R. et Sarewitz, D., 2000. Turning the big knob: an evaluation of the use of energy policy to modulate future climate impacts, Energy & Environment, 11, 3, 255-275, http://dx.doi.org/10.1260/0958305001500121.

Pielke, R. A. et Sarewitz, D., 2005. Bringing society back into the climate debate, Population and Environment, 26, 3, 255-268, http://dx.doi.org/10.1007/s11111-005-1877-6.

Pigeon, P., 2002. Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels, Annales de Géographie, 111, 627-628, 452-470, http://dx.doi.org/10.3406/geo.2002.21624.

Pigeon, P., 2005. Géographie critique des risques, Economica, Anthropos, Paris, 217p.

Pigeon, P., 2010. Catastrophes dites naturelles, risques et développement durable : utilisations géographiques de la courbe de Farmer, VertigO, 10, 1, http://dx.doi.org/10.4000/vertigo.9491.

Pigeon, P., 2012. Apports de la résilience à la géographie des risques : l'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée, France), VertigO, 12, 1, http://dx.doi.org/10.4000/vertigo.12031.

Pineau-Guillou, L., Lathuilière, C., Magne, R., Louazel, S., Corman, D. et Perhérin, C., 2010. Caractérisation des niveaux marins extrêmes et modélisation des surcotes pendant la tempête Xynthia, Actes des XIèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, 22-25 juin 2010, Les sables d'Olonne, http://dx.doi.org/10.5150/jngcgc.2010.073-P.

Pirazzoli, P.-A., 1993. Les littoraux. Nathan, collection Géographie d'aujourd'hui, Paris, 191p.

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.

Pitié, C., Bellec, P., Maillot, H., Nadeau, J. et Puech, P., 2011. Expertise des zones de solidarité Xynthia en Charente-Maritime, rapport principal, 66p.

Planton, S., 2002. Le changement climatique et la probabilité des tempêtes sur l'Atlantique Nord, Annales des Mines, Réalités industrielles, 15-19, http://www.annales.org/ri/2002/temp-08-02.html.

Planton, S., Déqué, M., Chauvin, F. et Terray, L., 2008. Expected impacts of climate change on extreme climate events, Comptes Rendus Geoscience, 340, 9-10, 564-574, http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2008.07.009.

Prettenthaler, F., Amrusch, P. et Habsburg-Lothringen C., 2010. Estimation of an absolute flood damage curve based on an Austrian case study under a dam breach scenario, Natural Hazards and Earth System Sciences, 10, 881-894, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-10-881-2010.

Przıluski, V. et Hallegatte, S., 2012. Gestion des risques naturels - leçons de la tempête Xynthia, Éditons Quae, Matière à débattre & décider, Versailles, 264p.

Rahmstorf, S., 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise, Science, 315, 368-70, http://dx.doi.org/10.1126/science.1135456.

Rakotomalala, R., 2013. Économétrie - la régression linéaire simple et multiple, Université Lyon 2 Lumière, 171p.

Reese, S., Cousins, W. J., Power, W. L., Palmer, N. G., Tejakusuma, I. G. et Nugrahadi, S., 2007. Tsunami vulnerability of buildings and people in South Java - field observations after the July 2006 Java tsunami, Natural Hazards and Earth System Sciences, 7, 573-589, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-7-573-2007.

Reghezza, M., 2006. Réflexions sur la vulnérabilité métropolitaine : le cas de la métropole francilienne face au risque de crue centennale, Thèse de doctorat de l'Université Paris 10 Nanterre, http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00123255.

RMS, 2003. 1953 U.K. floods, 50-year retrospective, 11p, http://www.rms.com/resources/publications/natural-catastrophes.

RMS, 2008. A guide to catastrophe modelling, The Review - Worldwide Reinsurance, Informa UK Ltd., 23p, http://www.rms.com/resources/publications/additional.

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.

Rosen, S., 1974. Hedonic prices and implicit markets: product differentiation in pure competition, Journal of Political Economy, 82, 1, 34-55.

Rossetto, T. et Elnashai, A., 2003. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data, Engineering Structures, 25, 1241-1263, http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00060-9.

Roux, M., 1985. Algorithmes de classification, Masson, Paris, 151p.

Rozan, A. et Stenger, A., 2000, Intérêts et limites de la méthode du transfert de bénéfices, Économie et Statistique, 336, 6, 69-78, http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/estat_0336-1454_2000_num_336_1_7512.

Rozan, A., 2004, Benefit Transfer: a comparison of WTP for air quality between France and Germany, Environmental and Resource Economics, 29, 3, 295-306, http://dx.doi.org/10.1007/s10640-004-5266-x.

Salagnac, J.-L., 2006. Vulnérabilité des bâtiments a l'inondation : qualification du comportement des matériaux, rapport CSTB, 24p, 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. et Mirgon, C., 2003. Application ARMAGEDOM - notice utilisateur, rapport BRGM/RP-52759-FR, 82p, http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-52759-FR.pdf.

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, 456p, http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-55415-FR.pdf.

Sedan, O., Negulescu, C., Terrier, M., Roulle, A., Winter, T. et Bertil, D., 2013. Armagedom - a tool for seismic risk assessment illustrated with applications, Journal of Earthquake Engineering, 17, 2, 253-281, http://dx.doi.org/10.1080/13632469.2012.726604.

Serrand, M., Vinchon, C., Garcin, M., Lecacheux, S., Pedreros, R., Herivaux, C., Maton, L., Grisel, M., Meur-Férec, C., Rey-Valette, H. et Rulleau, B., 2013. MISEEVA : Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de la zone côtière Languedoc-Roussillon face à la submersion marine, élaboration d'indicateurs de vulnérabilité socio-économiques et environnementaux, rapport final, rapport BRGM/RP-60980-FR, 160p, http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60980-FR.pdf.

SHOM et CETMEF, 2012. Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique), 160p, http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/statistiques-des-niveaux-marins-a414.html.

SILYC, 2011. Document du Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) des communes d'Yves et de Châtelaillon-Plage.

Smith, D. I., 1994. Flood damage estimation - a review of urban stage-damage curves and loss functions, Water SA, 20, 3, 231-238.

Smith, K. et Ward, R., 1998. Floods: physical processes and human impacts, John Wiley & Sons, Chichester, 382p.

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.

Spekkers, M. H., Ten Veldhuis, J. A. E., Kok, M. et Clemens, F. H. L. R., 2011. Analysis of pluvial flood damage based on data from insurance companies in the Netherlands, International symposium urban flood risk management, UFRIM, 21-23 septembre 2011, Graz, Autriche.

Stewart, M. G., 2003. Cyclone damage and temporal changes to building vulnerability and economic risks for residential construction, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91, 5, 671-691, http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00462-2.

Suanez, S. et Cariolet, J.-M., 2010. L'action des tempêtes sur l'érosion des dunes : les enseignements de la tempête du 10 mars 2008, Norois, 215, 77-99, http://dx.doi.org/10.4000/norois.3212.

Swiss Re, 2009. Sigma : catastrophes naturelles et techniques en 2008, 46p, http://www.swissre.com/sigma.

Thériault, M., Des Rosiers, F. et Dubé, J., 2007. Testing the temporal stability of accessibility values in residential hedonic prices, Scienze Regionali, 6, 3, 5-46, http://www.francoangeli.it/riviste/Scheda_Rivista.aspx?IDArticolo=31573&Tipo=ArticoloPDF.

Thieken, A. H., Olschewski, A., Kreibich, H., Kobsch, S. et Merz, B., 2008. Development and evaluation of FLEMOps - a new Flood Loss Estimation MOdel for the private sector, 315-324, in : Proverbs, D., Brebbia, C. A. et Penning-Rowsell, E., 2008. Flood recovery, innovation and response, Wessex Institute Of Technology Press, Southampton, http://dx.doi.org/10.2495/friar080301.

Thourot, P., 2012. Dans la tempête médiatique, Risques, Les cahiers de l'assurance, 91, 2, http://www.ffsa.fr/webffsa/risques.nsf/html/Risques_91_0008.htm.

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.

Treich N., 2005. L'analyse coûts bénéfices de la prévention des risques, Document LERNA-INRA, Université de Toulouse, 52p.

TU Delft, 2013. SWAN scientific and technical documentation, SWAN cycle III version 40.91A, 124p, http://www.swan.tudelft.nl.

Tyagunov, S., Grünthal, G., Wahlström, R., Stempniewski, L. et Zschau, J., 2006. Seismic risk mapping for Germany, Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, 573-586, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-6-573-2006.

USACE, 1988. National economic development procedures manual - urban flood damage, Water Resources Support Center, Institute for Water Resources, rapport IWR 88-R-2, 290p.

Valencia, N., Gardi, A., Gauraz, A., Leone, F. et Guillande R., 2011. New tsunami damage functions developed in the framework of SCHEMA project: application to European-Mediterranean coasts, Natural Hazards and Earth System Sciences, 11, 2835-2846, http://dx.doi.org/10.5194/nhess-11-2835-2011.

Veyret, Y., 2003. Les risques, Sedes, Paris, 255p.

Vinchon, C., Baron-Yelles, N., Berthelier, E., Hérivaux, C., Lecacheux, S., Meur-Férec, C., Pedreros, R., Rey-Valette, H. et Rulleau, B., 2010. MISEEVA: set up of a transdisciplinary approach to assess vulnerability of the coastal zone to marine inundation at regional and local scale, within a global change context, Littoral 2010 - adapting to global change at the coast: leadership, innovation, and investment, 21-23 septembre 2010, Londres, 11003, 10p, http://dx.doi.org/10.1051/litt/201111003.

Vinchon, C., André, C., Le Roy, S., Monfort, D., Bouzit, M. et Pedreros, R., 2014. Projet JOHANNA : Analyse des processus de dommages liés aux submersions marines et aux effets des vagues lors des tempêtes Johanna (2008) et Xynthia (2010), rapport final du projet, rapport BRGM/RP-62997-FR, 51p, http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62997-FR.pdf.

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. Benefits of a trans-disciplinary approach to assess vulnerability of a territory to marine inundation, in a global change context, application to the coastal zone of Languedoc Roussillon (Southern France), Ocean & Coastal Management, soumis.

Vinet, F., 2007. Approche institutionnelle et contraintes locales de la gestion du risque, recherches sur le risque inondation en Languedoc-Roussillon, Habilitation à diriger des recherches, Université Montpellier 3 Paul-Valéry, 270p, http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00288137.

Vinet, F., 2010. Le risque inondation : diagnostic et gestion, Lavoisier, Éditions Tec&Doc, Collection sciences du risques et du danger, Cachan, 318p.

Vinet, F., Boissier, L. et Defossez, S., 2011. La mortalité comme expression de la vulnérabilité humaine face aux catastrophes naturelles : deux inondations récentes en France (Xynthia, Var, 2010), VertigO, 11, 2, http://dx.doi.org/10.4000/vertigo.11074.

Vinet, F., Lumbroso, D., Defossez, S. et Boissier, L., 2012a. A comparative analysis of the loss of life during two recent floods in France: the sea surge caused by the storm Xynthia and the flash flood in Var, Natural Hazards, 61, 3, 1179-1201, http://dx.doi.org/10.1007/s11069-011-9975-5.

Vinet, F., Defossez, S., Rey, T. et Boissier, L., 2012b. Le processus de production du risque « submersion marine » en zone littorale : l'exemple des territoires « Xynthia », Norois, 222, 11-26, http://dx.doi.org/10.4000/norois.3834.

Voronkoff, M., 2010. La modélisation des dommages et pertes financières consécutives aux inondations, Colloque SHF : risques inondation en Île-de-France, 24-25 mars 2010, Paris.

Voronkoff, M., 2011. La modélisation des dommages et pertes financières consécutives aux inondations, La Houille Blanche, 2, 82-86, http://dx.doi.org/10.1051/lhb/2011024.

Walliman, N.S.R., Ogden, R., Baiche, B., Tagg, A. et Escarameia, M., 2012. A tool to predict the costs of reinstatement of individual buildings after flooding, 529-535, in : Klijn, F. et Schweckendiek, T., 2012. Comprehensive flood risk management: research for policy and practice, CRC Press, Taylor & Francis, Londres, 460p.

White, G. F., 1945. Human adjustments to floods, Department of Geography, University of Chicago, Research Paper 29, 225p.

White, G. F., 1964. Choice of adjustments to floods, Department of Geography, University of Chicago, Research Paper 93, 150p.

Yu, D. et Wu, C., 2006. Incorporating remote sensing information in modeling house values: a regression tree approach, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 72, 2, 129-138, https://eserv.asprs.org/PERS/2006journal/feb/2006_feb_129-138.pdf.

Zhai, G., Fukuzono, T. et Ikeda, S., 2005. Modeling flood damage: case of Tokai flood 2000, Journal of the American Water Resources Association, 41, 1, 77-92, http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03719.x.

Zihri, G., 2004. Risques liés aux ouvrages souterrains : constitution d'une échelle de dommages, Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine - École des Mines de Nancy, 226p.

Zolfaghari, M. R., 2010. Application of catastrophe loss modelling to promote property insurance in developing countries, Disasters, 34, 2, 524-541, http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-7717.2009.01141.x.

Liste des figures

Figure 1 : Schéma des principales étapes de la thèse. 6

Figure 2 : Schéma de l'aléa, des enjeux et du risque (source : http://www.prim.net)..... 9

Figure 3 : Schéma des différents niveaux d'étendue du concept de vulnérabilité, d'après Birkmann, 2006..... 10

Figure 4 : Schéma des différentes approches de la vulnérabilité, d'après Reghezza, 2006. 11

Figure 5 : Typologie de l'habitat et vulnérabilité au risque d'inondation, d'après Jousseaume et Mercier, 2009..... 12

Figure 6 : Schéma de la vulnérabilité systémique pour les risques côtiers, d'après Meur Férec, 2006. 13

Figure 7 : Diagrammes radar des indicateurs de vulnérabilité de plusieurs sites exposés aux risques côtiers, d'après Meur-Férec, 2006. 14

Figure 8 : Courbe de R. Farmer (1977) représentant la relation entre l'intensité et la fréquence des dommages, d'après Pigeon, 2010. Le point A représente la catastrophe naturelle ou la réalisation d'un risque majeur..... 18

Figure 9 : Schéma de l'évaluation des dommages *ex post* et *ex ante*, modifié d'après Hubert et Ledoux, 1999..... 19

Figure 10 : Échelle de dommages aux bâtiments pour les séismes, d'après Grünthal, 1998. 21

Figure 11 : Échelle de dommages aux bâtiments pour le vent, d'après Fujita, 1971 et NOAA, 2003..... 21

Figure 12 : Échelle de dommages aux bâtiments pour les inondations, d'après Kelman, 2002..... 22

Figure 13 : Échelle de dommages aux bâtiments pour les inondations, d'après Schwarz et Maiwald, 2008..... 22

Figure 14 : Échelle de dommages aux bâtiments pour les tsunamis, d'après Garcin et al., 2007 ; 2008. 22

Figure 15 : Échelle de dommages aux bâtiments pour les tsunamis, d'après Leone et al., 2011..... 23

Figure 16 : Échelle de dommages aux bâtiments pour le vent et la submersion marine (ouragans), d'après Friedland, 2009. 23

Figure 17 : Exemple de courbes de fragilité d'une classe de bâtiments donnée face au risque sismique indiquant la probabilité d'atteindre les niveaux d'une échelle de dommages de quatre degrés : léger, modéré, important et total en fonction du paramètre accélération spectrale, d'après FEMA, 2003..... 24

Figure 18 : Table de conversion entre les niveaux de dommages de l'échelle EMS-98 et le taux d'endommagement des bâtiments, à affecter aux valeurs économiques des bâtiments pour l'évaluation des pertes économiques d'un séisme, d'après Tyagunov et al., 2006. 25

Figure 19 : Schéma d'un modèle d'évaluation des dommages dus aux séismes dans le secteur de l'assurance, d'après Zolfaghari, 2010. 27

Figure 20 : Courbe de probabilités de pertes (*EP curve*), d'après Grossi et Kunreuther, 2005. 28

Figure 21 : Schéma de du principe de l'Analyse Coûts-Bénéfices représenté sur la courbe fréquence-dommages, modifié d'après MRN, 2012. 30

Figure 22 : Exemples de fonctions d'endommagement tirées de la littérature allemande pour le risque inondation, exprimant les dommages en valeurs relatives en fonction de la hauteur d'eau (Merz et al., 2010)..... 32

Figure 23 : Schéma des différentes échelles d'évaluation des dommages, en lien avec la taille de la zone d'étude, les unités évaluées et la précision attendue, d'après Messner et al., 2007..... 33

Figure 24 : Graphiques des seuils séparant les trois niveaux de dommages en fonction du paramètre intensité de l'inondation, proposés par Clausen, 1989 et Pistrika et Jonkman, 2010, d'après Dassanayake et al., 2012. 36

Figure 25 : Évaluation qualitative de l'influence des paramètres hauteur d'eau, vitesse du courant, intensité de l'inondation, force du courant et énergie hydraulique sur les dommages sur différents types d'enjeux, d'après Kreibich et al., 2009..... 37

Figure 26 : Schéma des modalités de financement du régime CatNat..... 43

Figure 27 : Graphique du coût des évènements naturels en France, indemnisés par les régimes CatNat et TGN entre 1982 et 2010 (Gérin et Nussbaum, 2012), le terme « subsidence » est utilisé ici pour désigner les dommages dus au phénomène de mouvement des sols dus à la sécheresse. 44

Figure 28 : Schéma du fonctionnement du régime en cas de catastrophe naturelle..... 46

Figure 29 : Schéma des différents forçages de la submersion marine, d'après Nicolae Lerma, 2012. Les termes « niveau moyen » et « niveau statique » s'entendent ici au moment du pic de la tempête, et désignent le niveau maximal atteint sans prendre en compte l'agitation des vagues, en opposition au « niveau instantané ». 51

Figure 30 : Schéma des différents modes de submersion marine, d'après Cariolet, 2011. 52

Figure 31 : Illustration des phénomènes de franchissement d'ouvrage (gauche - à Gâvres dans le Morbihan lors de la tempête Johanna, photo © DDTM 56) et de rupture de digue (droite - sur l'île de Ré en Charente-Maritime après le passage de Xynthia, photo © AFP - Xavier Leoty). 53

Figure 32 : Illustration des phénomènes de rupture de cordon dunaire (gauche - lagune de la Belle-Henriette à la Faute-sur-Mer en Vendée, photo © BRGM) et d'arasement de cordon dunaire provoqué par débordement (droite - Réserve Naturelle du marais d'Yves en Charente-Maritime, photo © LPO) après le passage de Xynthia. 53

Figure 33 : Carte topographique de la Bretagne, avec la localisation des différents départements et de la commune de Gâvres (MNT BD ALTI® IGN). 56

Figure 34 : Carte topographique des côtes de Vendée et de Charente-Maritime (Pertuis Charentais), avec la localisation des sites étudiés à l'échelle locale (MNT BD ALTI® IGN). 58

Figure 35 : Carte de localisation de la commune de Gâvres (fond SCAN 25® et MNT BD ALTI® IGN). 59

Figure 36 : Photo aérienne de Gâvres au début des années 1950 (source : Géos-AEL, 2008). 60

Figure 37 : Carte de l'évolution du bâti à Gâvres, d'après Le Berre et al., 2012. 61

Figure 38 : Photos des digues de la grande plage (gauche) et de l'anse de Goërem (droite) (photos © C. André et BRGM). . 62

Figure 39 : Carte des zones de passage (flèches bleues) et de stagnation de l'eau (surface rouge) de la submersion lors de la tempête Johanna à Gâvres (source : Mairie de Gâvres). 63

Figure 40 : Photos de la submersion de la rue du parc des sports (A et B), des dommages sur la digue de protection de la grande plage (C) et de dommages à des terrasses de particuliers en front de mer dans l'anse de Goërem (D) (photos © Géos-AEL et DHI, 2008). 64

Figure 41 : Carte règlementaire du zonage du PPRL de Gâvres. 65

Figure 42 : Carte de localisation du site des Bouchôleurs (fond SCAN 25® et MNT BD ALTI® IGN). 66

Figure 43 : Photos des digues du vieux port (gauche) et de la zone conchylicole (droite) (photos © C. André et BRGM). 67

Figure 44 : Photos illustrant les dommages observés aux Bouchôleurs (photos haut © BRGM et bas © Reuters - Régis Duvignau). 69

Figure 45 : Carte des communes reconnues en état de catastrophe naturelle après la tempête Johanna (source : base de données Gaspar). 76

Figure 46 : Carte des communes reconnues en état de catastrophe naturelle après la tempête Xynthia (source : base de données Gaspar). 77

Figure 47 : Formulaire de demande communale de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. 79

Figure 48 : Extrait de l'atlas des submersions et des dégâts côtiers de Johanna dans le Finistère, d'après DDTM 29, 2010... 87

Figure 49 : Carte de la zone de Gâvres inondée lors de Johanna, d'après Cariolet, 2010 et 2011. 87

Figure 50 : Extraits des cartographies du REX Xynthia à Angoulins et Aytré en Charente-Maritime et à la Faute et l'Aiguillon-sur-Mer en Vendée, d'après Sogreah, 2011 et Devaux et al., 2012. 88

Figure 51 : Carte du résultat de l'interpolation des hauteurs d'eau mesurées dans le cadre du REX Xynthia à Charron en Charente-Maritime (données REX Xynthia Sogreah, 2011 ; MNT LIDAR DREAL Poitou-Charentes ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN). 89

Figure 52 : Formulaire de saisie des données des rapports d'expertise d'assurance pour la constitution de la base de données de niveau 2 (réalisé sous Microsoft Access®). 98

Figure 53 : Cartes des forçages (niveau d'eau et hauteur des vagues) pour Johanna extraits du site PRÉVIMER. 107

Figure 54 : Cartes des forçages (niveau d'eau et hauteur des vagues) pour Xynthia issus de travaux de modélisation du BRGM (Pedreros et al., 2010). 107

Figure 55 : Cartes des indicateurs des forçages produits pour la tempête Johanna (source : PRÉVIMER). 108

Figure 56 : Cartes des indicateurs des forçages produits pour la tempête Xynthia (source : modélisation BRGM). 109

Figure 57 : Schéma du procédé de chainage pour la modélisation à l'échelle locale. 110

Figure 58 : Extraits du MNT, de la photo aérienne et du MNE réalisé intégrant les bâtiments et les murs de clôture à Gâvres (données LIDAR DDTM 56 ; orthophoto BD ORTHO® IGN). 113

Figure 59 : Illustrations de la surélévation du parapet (gauche) et de l'installation de portillons (droite) sur le vieux port des Bouchôleurs après Xynthia (photos © C. André et BRGM). 114

Figure 60 : Illustrations de l'état du parapet sur la digue de la grande plage de Gâvres avant la tempête Johanna (gauche), le lendemain de la tempête (centre) et après la construction de l'enrochement (droite) (photos © Géos-AEL et DHI, 2008 et C. André). 114

Figure 61 : Représentation en 3 dimensions du MNE utilisé pour la modélisation de la submersion avec SurfWB sur le site de Gâvres (données LIDAR DDTM 56). 115

Figure 62 : Représentation en 3 dimensions du MNE utilisé pour la modélisation de la submersion avec SurfWB sur le site des Bouchôleurs (données LIDAR DREAL Poitou-Charentes). 115

Figure 63 : Carte de résultat de la modélisation des hauteurs d'eau maximales à Gâvres lors de Johanna (modélisation BRGM ; adresses des habitations inondées et zone de stagnation de la submersion fournies par la Mairie de Gâvres ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN). 116

Figure 64 : Carte de résultat de la modélisation des vitesses maximales du courant à Gâvres lors de Johanna, et localisation des extractions de séries temporelles (modélisation BRGM ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN). 117

Figure 65 : Exemples de séries temporelles de la hauteur d'eau et de la vitesse du courant extraites des modélisations de la submersion à Gâvres lors de Johanna. 118

Figure 66 : Carte de résultat de la modélisation des hauteurs d'eau maximales aux Bouchôleurs lors de Xynthia (modélisation BRGM ; mesures de terrain du REX Xynthia issues de Sogreah, 2011 ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN). 119

Figure 67 : Carte de résultat de la modélisation des vitesses maximales du courant aux Bouchôleurs lors de Xynthia (modélisation BRGM ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN). 120

Figure 68 : Carte de résultat de la modélisation des vitesses maximales de montée de l'eau aux Bouchôleurs lors de Xynthia, et localisation des séries temporelles (modélisation BRGM ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN). 120

Figure 69 : Exemples de séries temporelles de la hauteur d'eau et de la vitesse du courant et de montée de l'eau, extraites des modélisations de la submersion aux Bouchôleurs lors de Xynthia. 121

Figure 70 : Illustration de la procédure d'affectation des paramètres de l'aléa simulés aux dossiers sinistres à l'aide d'une « zone tampon » autour des bâtiments (modélisation BRGM ; contours bâtiments BD TOPO® IGN). 123

Figure 71 : Carte de la répartition des sinistres et du trajet des deux tempêtes. 128

Figure 72 : Carte de la répartition des sinistres sur les communes de la Faute et de l'Aiguillon-sur-Mer. 129

Figure 73 : Histogrammes de la distribution des indemnisations par évènement, tous types d'enjeux confondus. 130

Figure 74 : Histogrammes de la distribution des indemnisations par évènement pour les dossiers MRH. 131

Figure 75 : Histogramme et *Q-Q plot* de la variable Y' (axes logarithmiques) pour la tempête Johanna. La courbe noire représente la fonction de densité de probabilité, et la ligne en pointillés, la moyenne de la variable Y'. 132

Figure 76 : Histogramme et *Q-Q plot* de la variable Y' (axes logarithmiques) pour la tempête Xynthia. La courbe noire représente la fonction de densité de probabilité, et la ligne en pointillés, la moyenne de la variable Y'. 132

Figure 77 : Boites de dispersion de la distribution des indemnisations en fonction de l'assureur pour les deux tempêtes (axe logarithmique). 133

Figure 78 : Typologie des sinistres d'habitation liés à la submersion marine (photos © C. André et BRGM). 136

Figure 79 : Carte des indicateurs de l'aléa et de la répartition des sinistres de la tempête Johanna en Bretagne. 137

Figure 80 : Graphiques des sinistres de Johanna représentés en fonction de leur distance au trait de côte et de l'altitude. Les couleurs indiquent les différents processus de l'aléa et le département de survenance. 138

Figure 81 : Photos de dommages à des murs en front de mer, caractéristiques de la tempête Johanna, à Locquirec (gauche) et Larmor-Plage (droite) (photos © Le Télégramme et François Trinel). 139

Figure 82 : Carte des indicateurs de l'aléa, des zones submergées (Sogreah, 2011 ; Devaux et al., 2012) et de la répartition des sinistres de la tempête Xynthia en Vendée et en Charente-Maritime. 142

Figure 83 : Graphique des sinistres de Xynthia représentés en fonction de leur distance au trait de côte et de l'altitude (données LIDAR DREAL Poitou-Charentes). 143

Figure 84 : Carte de la densité des logements (données INSEE recensement 2009) en lien avec la répartition des sinistres de Xynthia. 144

Figure 85 : Carte de la densité de la population (données INSEE carroyées 2010) en lien avec la répartition des sinistres de Xynthia. 145

Figure 86 : Carte du taux des résidences secondaires (données INSEE recensement 2009) en lien avec la répartition des sinistres de Xynthia. 146

Figure 87 : Graphique des indemnisations des listings exprimées en fonction du type de logement (axe logarithmique). .. 149

Figure 88 : Graphique des indemnisations des listings exprimées en fonction du nombre de pièces principales des logements sinistrés (axe logarithmique). 150

Figure 89 : Graphique des indemnisations des listings exprimées en fonction de classes de surface habitable des logements sinistrés (axe logarithmique). 150

Figure 90 : Graphique des indemnisations des listings exprimées en fonction du type d'occupation des logements sinistrés (axe logarithmique)..... 151

Figure 91 : Carte de l'intensité des dommages (taux de logements affectés) dans les communes affectées par Xynthia (à partir de l'échantillon de données de niveau 1 des trois assureurs et des données INSEE du recensement 2009). . 153

Figure 92 : Graphique du total et de la distribution des indemnisations pour les communes les plus touchées par Xynthia (à partir de l'échantillon de données de niveau 1 des trois assureurs). 154

Figure 93 : Graphique des indemnisations moyennes des 18 communes les plus affectées par Xynthia, en fonction de l'altitude moyenne des sinistres (données LIDAR DREAL Poitou-Charentes) et du nombre moyen de pièces principales des maisons (données INSEE recensement 2009). 155

Figure 94 : Graphique de la relation entre les coûts mobiliers et immobiliers (en termes de valeur de remplacement à neuf) pour les dossiers MRH des deux évènements Johanna et Xynthia. 162

Figure 95 : Répartition des coûts des dommages par corps d'état pour Johanna, pour les catégories de sinistres au bâtiment principal et aux éléments extérieurs. 163

Figure 96 : Répartition des coûts des dommages par corps d'état pour Xynthia, pour les catégories de sinistres au bâtiment principal. 163

Figure 97 : Graphiques du coût des dommages immobiliers et mobiliers en fonction de la hauteur d'eau issue des rapports d'expertise pour Johanna et Xynthia. 165

Figure 98 : Boites de dispersion du coût des dommages immobiliers en fonction des types processus de l'aléa pour Xynthia. 167

Figure 99 : Graphique du coût des dommages immobiliers en fonction de la hauteur d'eau et de la durée de submersion pour Xynthia. 169

Figure 100 : Graphique de la relation entre la hauteur d'eau issue du REX Xynthia et celle issue des rapports d'expertise. 170

Figure 101 : Graphique du coût des dommages immobiliers en fonction de la hauteur d'eau issue du REX Xynthia. 171

Figure 102 : Carte du résultat de la modélisation hydraulique des hauteurs d'eau maximales à Gâvres lors de Johanna avec la localisation des sinistres d'assurance (modélisation BRGM ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN)..... 173

Figure 103 : Carte du résultat de la modélisation hydraulique des hauteurs d'eau maximales aux Bouchôleurs lors de Xynthia avec la localisation des sinistres d'assurance (modélisation BRGM ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN). .. 174

Figure 104 : Graphique de la relation entre la hauteur d'eau issue de la modélisation hydraulique et celle issue des rapports d'expertise des sinistres des Bouchôleurs. 174

Figure 105 : Graphique du coût des dommages immobiliers en fonction de la hauteur d'eau issue de la modélisation hydraulique aux Bouchôleurs. 175

Figure 106 : Graphiques du coût des dommages immobiliers en fonction de la vitesse du courant et de la vitesse de montée de l'eau issues de la modélisation hydraulique aux Bouchôleurs. 177

Figure 107 : Carte du paramètre « intensité de l'inondation » maximal, calculé à partir de la modélisation hydraulique aux Bouchôleurs lors de Xynthia (modélisation BRGM ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN). 177

Figure 108 : Seuils des niveaux de dommages proposés par Pistrika et Jonkman (2010) en fonction du paramètre intensité de l'inondation, représentés avec la localisation des sinistres des Bouchôleurs lors de Xynthia sur le graphique hauteur d'eau / vitesse du courant..... 178

Figure 109 : Graphiques du coût des dommages immobiliers et mobiliers en fonction du montant mobilier assuré pour Xynthia. 183

Figure 110 : Graphiques du coût des dommages immobiliers en fonction de la surface habitable et du nombre de pièces principales du rez-de-chaussée pour Xynthia. 184

Figure 111 : Graphiques du coût des dommages immobiliers par mètre carré et par pièce en fonction du RDC en fonction de la hauteur d'eau pour Xynthia. 185

Figure 112 : Boites de dispersion du coût des dommages immobiliers en fonction de la présence d'étage et de sous-sol pour Xynthia. 186

Figure 113 : Illustration de l'emprise des bâtiments d'après la BD TOPO® et la BD PARCELLAIRE® de l'IGN à Fouras, avec des sinistres d'assurance localisés à la référence cadastrale (fond orthophoto BD ORTHO® IGN). 188

Figure 114 : Illustration des différences de superficie entre la SHOB et la SHAB. 189

Figure 115 : Graphique de la relation entre la SHOB issue des polygones de la BD PARCELLAIRE® et la SHAB du RDC issue des rapports d'expertise des sinistres pour Xynthia. 189

Figure 116 : Carte du découpage des quartiers de morphologie urbaine sur la commune de Châtelaillon-Plage (orthophoto BD ORTHO® IGN 2010). 192

Figure 117 : Carte du découpage des quartiers de morphologie urbaine sur la commune de Châtelaillon-Plage (orthophoto ancienne IGN 1957). 192

Figure 118 : Typologie du bâti en Charente-Maritime (photos © C. André et BRGM). 194

Figure 119 : Graphique du coût des dommages immobiliers en fonction de la hauteur d'eau et du type de quartier pour les sinistres de Xynthia. 196

Figure 120 : Graphique du coût des dommages immobiliers en fonction de la hauteur d'eau et du type de bâti pour les sinistres de Xynthia. 197

Figure 121 : Illustration de quatre des modèles d'habitations mis en place : une maison de vacances, une maison sur garage, un pavillon moderne et une villa moderne (Daci, 2012). 199

Figure 122 : Exemple de plan détaillé pour un modèle de pavillon récent de plain-pied avec garage (Daci, 2012). 199

Figure 123 : Graphiques du coût des dommages immobiliers et mobiliers en fonction du type d'occupation pour Xynthia. 202

Figure 124 : Graphiques du coût des dommages immobiliers et mobiliers en fonction de la hauteur d'eau et du type d'occupation pour Xynthia. 202

Figure 125 : Graphique du coût des dommages immobiliers en fonction de la hauteur d'eau et du niveau de dommages pour Xynthia. 207

Figure 126 : Histogrammes des niveaux de dommages (nombre et fréquence des sinistres) en fonction de la hauteur d'eau pour Xynthia. 207

Figure 127 : Boites de dispersion du coût des dommages immobiliers en fonction du niveau de dommages. 208

Figure 128 : Graphique des coûts prédits par les trois fonctions d'endommagement d'inondations fluviales comparées aux données de la tempête Xynthia. 217

Figure 129 : Graphique des coûts de la tempête Xynthia comparés à des données d'assurance d'inondations fluviales (source : CEPRI). 218

Figure 130 : Modèle de régression simple du coût des dommages représenté sur le nuage de points des données de sinistres. 226

Figure 131 : Modèle de régression semi-log représenté sur le nuage de points des données de sinistres. 229

Figure 132 : Modèle de régression du taux d'endommagement représenté sur le nuage de points des données de sinistres. 231

Figure 133 : Modèle d'estimation des coûts par classes de hauteur d'eau. 233

Figure 134 : Illustration du phénomène d'hétéroscédasticité (source : Wikipédia). 237

Figure 135 : Résultats du modèle de régression multiple du coût des dommages représenté avec les données de sinistres. L'axe des abscisses indique l'ordre les prédictions du modèle, triées par ordre croissant coût des dommages estimé. 243

Figure 136 : Graphiques des résidus du modèle de régression multiple du coût des dommages : diagramme quantile-quantile et graphique des résidus en fonction des valeurs estimées par le modèle. 243

Figure 137 : Résultats du modèle de régression multiple semi-log représenté avec les données de sinistres. L'axe des abscisses indique l'ordre les prédictions du modèle, triées par ordre croissant coût des dommages estimé. 245

Figure 138 : Graphiques des résidus du modèle de régression multiple semi-log : diagramme quantile-quantile et graphique des résidus en fonction des valeurs estimées par le modèle. 245

Figure 139 : Résultats du modèle de régression multiple du taux d'endommagement représenté avec les données de sinistres. L'axe des abscisses indique l'ordre les prédictions du modèle, triées par ordre croissant coût des dommages estimé. 246

Figure 140 : Graphiques des résidus du modèle de régression multiple du taux d'endommagement : diagramme quantile-quantile et graphique des résidus en fonction des valeurs estimées par le modèle. 247

Figure 141 : Arbre de régression initial. Les nœuds intermédiaires sont indiqués par les ellipses et les nœuds terminaux par les rectangles, la valeur prédite (moyenne) du coût des dommages est indiquée pour chaque nœud ainsi que le nombre d'observations. 250

Figure 142 : Graphique de l'erreur de prédiction représentée en fonction du nombre de nœuds intermédiaires des modèles simplifiés. 251

Figure 143 : Arbre final élagué à 7 nœuds intermédiaires et 8 nœuds terminaux. 252

Figure 144 : Graphiques des coûts des dommages estimés par deux des modèles de régression simple et deux des modèles de régression multiple mis en place, en fonction des coûts observés dans les données Xynthia. 255

Figure 145 : Graphiques des coûts des dommages estimés par le modèle d'estimation des coûts par classes de hauteur d'eau et par le modèle d'arbre de régression, en fonction des coûts observés dans les données Xynthia. 256

Figure 146 : Schéma d'un modèle d'endommagement probabiliste incluant en abscisse une probabilité de distribution de l'aléa, une fonction d'endommagement probabiliste, et en ordonnée, le résultat de l'évaluation des dommages sous la forme d'une distribution des coûts. D'après Zolfaghari, 2010. 260

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des dommages directs et indirects et tangibles et intangibles. 17

Tableau 2 : Inventaire des processus d'endommagement liés aux inondations, d'après Kelman, 2002 et Kelman et Spence, 2004. 35

Tableau 3 : Sélection de rapports pour la tempête Johanna. 81

Tableau 4 : Sélection de rapports pour la tempête Xynthia. 82

Tableau 5 : Rapports pour l'évaluation économique des dommages de Xynthia. 83

Tableau 6 : Résultat de la collecte de données d'assurance pour les deux niveaux de données. 101

Tableau 7 : Description des différents termes utilisés dans le cadre de cette thèse pour décrire le « coût des dommages ». 104

Tableau 8 : Nombre de sinistres des listings et indemnisations moyennes par type d'enjeu et par évènement. 126

Tableau 9 : Nombre de sinistres MRH des listings et indemnisations moyennes par département et par évènement. 129

Tableau 10 : Indemnisations en fonction du type de sinistre pour Johanna. 139

Tableau 11 : Coûts moyens des dommages immobiliers et mobiliers par type de sinistre MRH et par évènement. 161

Tableau 12 : Résultat du chiffrage des coûts de construction des sept modèles d'habitation. 200

Tableau 13 : Échelle de dommages mise en place pour les différentes parties des bâtiments affectés par la submersion marine. 206

Tableau 14 : Liste et importance des variables testées caractérisant l'aléa et les enjeux dans l'explication du coût des dommages immobiliers des sinistres de Xynthia, et source des données. 210

Tableau 15 : Présentation des trois fonctions d'endommagement fluviales sélectionnées pour la comparaison. 216

Tableau 16 : Résultats du modèle de régression simple du coût des dommages par la hauteur d'eau. 227

Tableau 17 : Résultats du modèle de régression simple du coût des dommages par la racine de la hauteur d'eau. 228

Tableau 18 : Résultats du modèle de régression semi-log par la hauteur d'eau. 229

Tableau 19 : Résultats du modèle de régression du taux d'endommagement par la hauteur d'eau. 230

Tableau 20 : Valeurs des coûts estimées et limites des classes pour le modèle d'estimation des coûts par classes de hauteur d'eau. 232

Tableau 21 : Présentation des variables explicatives candidates pour le modèle de régression multiple. 238

Tableau 22 : Matrice de corrélation des variables candidates pour le modèle de régression multiple (coefficients de corrélation de Pearson en %). Les cases sont grisées pour les corrélations non significatives (au seuil de 5 %). 240

Tableau 23 : Résultats du modèle de régression multiple du coût des dommages. 241

Tableau 24 : Résultats du modèle de régression multiple semi-log. 244

Tableau 25 : Résultats du modèle de régression multiple du taux d'endommagement. 246

Annexe

Article publié : 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.

Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 2003–2012, 2013
www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/13/2003/2013/
doi:10.5194/nhess-13-2003-2013
© Author(s) 2013. CC Attribution 3.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Open Access

Contribution of insurance data to cost assessment of coastal flood damage to residential buildings: insights gained from Johanna (2008) and Xynthia (2010) storm events

C. André[1,2], D. Monfort[2], M. Bouzit[2], and C. Vinchon[2]

[1]LETG-Brest Géomer, UMR6554 CNRS, University of Western Brittany, European Institute for Marine Sciences, Place Nicolas Copernic, 29280 Plouzané, France
[2]BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France

Correspondence to: C. André (camille.andre@univ-brest.fr, camilleg.andre@gmail.com)

Received: 5 January 2013 – Published in Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.: 28 March 2013
Revised: 23 June 2013 – Accepted: 2 July 2013 – Published: 8 August 2013

Abstract. There are a number of methodological issues involved in assessing damage caused by natural hazards. The first is the lack of data, due to the rarity of events and the widely different circumstances in which they occur. Thus, historical data, albeit scarce, should not be neglected when seeking to build ex-ante risk management models. This article analyses the input of insurance data for two recent severe coastal storm events, to examine what causal relationships may exist between hazard characteristics and the level of damage incurred by residential buildings. To do so, data was collected at two levels: from lists of about 4000 damage records, 358 loss adjustment reports were consulted, constituting a detailed damage database. The results show that for flooded residential buildings, over 75 % of reconstruction costs are associated with interior elements, with damage to structural components remaining very localised and negligible. Further analysis revealed a high scatter between costs and water depth, suggesting that uncertainty remains high in drawing up damage functions with insurance data alone. Due to the paper format of the loss adjustment reports, and the lack of harmonisation between their contents, the collection stage called for a considerable amount of work. For future events, establishing a standardised process for archiving damage information could significantly contribute to the production of such empirical damage functions. Nevertheless, complementary sources of data on hazards and asset vulnerability parameters will definitely still be necessary for damage modelling; multivariate approaches, crossing insurance data with external material, should also be investigated more deeply.

1 Introduction

All over the world, floods represent major threats for people living in river or coastal flood plains (Torterotot, 1993). In the area of natural hazard management policies, and especially in flood risk management, damage assessments in terms of economic losses are gaining importance, in risk and vulnerability management, so as to be able to carry out cost-benefit analyses in support of the decision-making process on flood mitigation measures, as well as in financial appraisals and risk prediction required by the insurance and reinsurance sector (Merz et al., 2010). While many studies have been prepared on river flooding damage assessment, coastal flooding events had heretofore received less attention, although the impacts of some of these have been devastating (Lequeux and Ciavola, 2012), for example, the "Big Flood" of the Netherlands in 1953 killed 1836 people (Gerritsen, 2005). Hurricanes that affected the US coasts received more documentation than European winter storms, such as Hurricane Katrina, which struck the Gulf of Mexico and in particular the New Orleans city in 2005, with a death toll of over 1700 (FEMA, 2006; Pistrika and Jonkman, 2010). However, the context of northwest Atlantic hurricanes strongly vary to that of the winter storms of Europe, both on hazard and on coastal assets characteristics (wood vs. masonry structures, use of pile foundations, etc.).

There are several approaches to economic damage assessment, according to the different purposes they are intended to serve. Globally, these can be differentiated into ex-ante assessments and ex-post assessments. Ex-ante assessments, i.e. prior to the event, aim to evaluate potential

economic losses for scenarios having probable hazard characteristics. Ex-post assessments are carried out in the aftermath of the disaster for emergency management or the coordination of early recovery issues, or later, for feedback on experience concerning damage processes and costs (APFM, 2007). Ex-ante assessment models are generally calibrated with damage data from ex-post assessments. However, most economic analysis guidelines mainly address ex-ante assessments, since ex-post assessments are not as well developed.

Furthermore, types of damage are typically differentiated into direct and indirect damages, which may be tangible or intangible (e.g. Parker et al., 1987; Messner et al., 2007; Meyer et al., 2012). Direct damage is induced directly by the physical processes of the hazard (e.g. structural damage to buildings), while indirect ones are induced by the impact of the direct damages (e.g. costs occurring at a longer period of time or a larger spatial scale to the disaster itself). The difference between tangible and intangible damages is that the first can be valuated monetarily (all marketable goods and services), whereas the second have no market values, e.g. loss of life, damage to ecosystems.

The assets exposed to damage are usually classified into types that share common parameters of sensitivity and/or resistance with respect to the involved hazard parameters and characteristics. For data collection purposes, tangible assets are most often subdivided according to economic sectors (e.g. private, industrial, commercial, public) and subsequently into more detailed subclasses (Merz et al., 2010).

For ex-ante damage assessment purposes, a standard approach calls on damage functions, also referred to as stage-damage curves or fragility curves (Messner et al., 2007). These functions define the causal relationship between the intensity of hazard parameters and a level of damage or loss for each class of assets. They can be expressed in terms of absolute values of estimated costs, or in relative damage, i.e. percent of loss of the asset's initial value, provided this value is known. Depending on the precision needed for the assessment and the spatial scale of the analysis, damage functions can be based on land-use category areas (meso- and macro-scale) or on individual objects (micro-scale) (Merz et al., 2010). Likewise, damage curves can focus on one or more hazard parameters. For flood damage modelling, the most common hazard parameter used is water depth, but some studies have investigated other parameters, such as flood duration, flow velocity, and non-physical (i.e. chemical or biological) parameters (e.g. Torterotot, 1993; Kelman and Spence; 2004; Kreibich et al., 2009; Pistrika and Jonkman, 2010).

There are two main approaches in developing damage functions: synthetic methods and empirical ones. While synthetic approaches rely on expert judgement (e.g. the Multi-Coloured Manual method from Penning-Rowsell et al., 2005), empirical approaches use damage data derived from ex-post assessments of actual past events (e.g. the FLEMO damage model from Thieken et al., 2008). Both approaches for developing damage functions present advantages and disadvantages. While the first method appears more theoretical, the second calls for a substantial effort in collecting ex-post damage information, and such datasets are scarce. Public data, such as the French "Gaspar" (for "Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques naturels et technologiques", which stands for "French database for the management of administrative procedures related to natural and technological risks") database from the Ministry of Environment[1] (Deboudt, 2010), are in most instances not detailed enough, being too aggregated, and conducting post-flood surveys of the affected population is both time- and money-consuming.

Another source of information on damage is the data gathered by insurance companies for damage compensation purposes. However, insurers' data are mostly not accessible due to confidentiality issues; this explains why few studies have developed damage functions from insurance data (e.g. Merz et al., 2004).

In this study, we used ex-post damage datasets from three French insurance companies for storms Johanna (2008) and Xynthia (2010). This paper's objective is to conduct an initial investigation aimed at appraising the construction of an ex-ante coastal flooding damage model based on empirical direct damage functions, which today are absent from the natural hazard literature. Insurance data, by definition, addresses only tangible and mainly direct damages, as intangible and most of the indirect damages are not insured. For this reason, the scope of this study is limited to direct tangible damages, and in particular to residential building damages, which is the type of asset that was the most affected by the Johanna and Xynthia coastal floods.

Since very few studies could use such data, we sought to demonstrate the benefits and limits of using them to explain which kinds of data may be available within the insurance sector, under what form the information is stored, how it can be used for the purposes of processing damage functions, and how collecting and archiving data by insurers could be integrated in a framework liable to improve damage function processing.

The next section briefly presents the case studies, the dataset available and our method of data collection. Section 3 presents the damage assessment results obtained from a macro- (regional or national summary) to a micro-scale (object-based). Building empirical damage functions from these results, with all the associated uncertainties, is discussed in Sect. 4. Section 5 concludes on how to enhance data collection, and the need to complete insurance data with other data sources, especially on involved hazard parameters and on the vulnerability of assets.

[1] http://macommune.prim.net/gaspar (last access: December 2012).

2 Data and methods

2.1 Study area and storms presentation

Most of the time, coastal flooding is induced by a conjunction of several parameters (Pedreros et al., 2010): (i) the storm depression causes an elevation of the sea surface by inverse barometer effect, (ii) the storm winds generate a modification of the surface currents that causes local water level elevations (wind setup), (iii) the waves generated by the storm, when reaching the coast, beak and also carry water shoreward (wave setup) and can produce local overtopping of dikes (wave runup).

The Johanna storm struck the French Brittany region and southern Great Britain on 10 March 2008 over a 48 h period, with winds between 130 and 150 km h^{-1} along the coast, an atmospheric depression of 975 hPa over Brittany and particularly high waves measuring up to 13 m offshore, which caused a coastal storm surge phenomena (Cariolet et al., 2010). Moreover, the storm occurred in conjunction with high spring tides (of a coefficient of 106 at Brest, compared to a maximum of 120 for the highest theoretically possible tide).

The Xynthia storm affected the Spanish and French Atlantic coastal regions on 28 February 2010, with winds up to 160 km h^{-1} and a maximum depression of 970 hPa, resulting in an extremely intense storm surge measured up to 1.5 m at La Rochelle, in conjunction with a tide coefficient of 102 (Bertin et al., 2012).

This led to very high water levels and waves along the coast responsible for coastline erosion and local coastal flooding of several urban areas. Damage was caused by the contact of saltwater with buildings, remaining stagnant for many days in certain areas, or with significant velocities or mechanical shocks from waves in the most exposed places (Pedreros et al., 2010). Due to a high human exposure in low-lying urbanised areas, the Xynthia storm surge led to hugely stronger impacts and killed 41 people in flooded areas (Vinet et al., 2012; Genovese and Przyluski, 2013).

In France, damage from natural disasters (e.g. river and coastal floods, earthquakes, landslides, droughts) are indemnified under the "CatNat" scheme (for "Catastrophes Naturelles"), but which exclude damage caused by storm winds, as well as those due to hail, frost, and snow, considered to be insurable under the conventional system and not included in this regime (Deboudt, 2010). The overall loss due to the Xynthia storm is evaluated at approximately 2.5 billion €, 1.5 billion € of which, in direct costs, was supported by insurance and reinsurance companies (FFSA and GEMA, 2011). The present work focused on insured damages (mostly direct damages), that were induced by coastal flooding processes, i.e. under the "CatNat" scheme, and especially on personal lines property damages, i.e. residential building damages, which represents 745 million € and 450 million €, respectively.

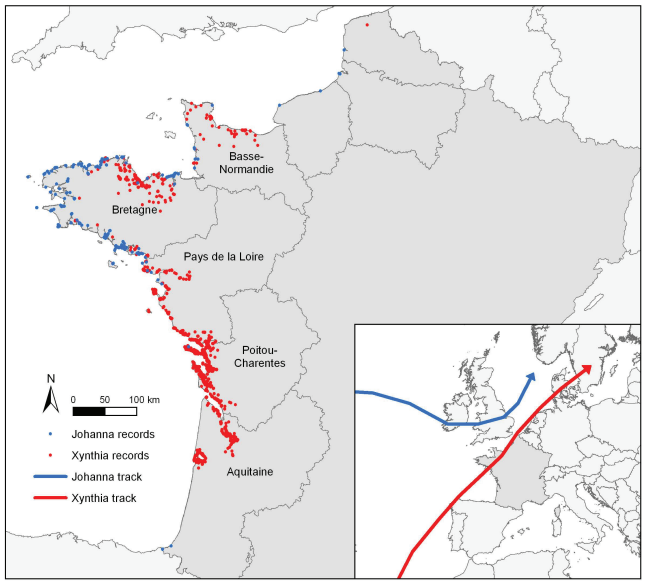


Fig. 1. Map of flood-damage records in the first-level database for the three insurance companies that took part in the study. The resulting dataset is believed to represent around 25 % of the overall insurance market in France.

2.2 Dataset presentation

Three significant insurance companies operating on the French market provided access to their compensation datasets, so as to enable an analysis of the damage caused by both events to be performed. The insurers' lists of damage records for both storms contain some basic information on damage: (i) the record references: ID code, localisation of the file in the main office or a local agency; (ii) the damage location: town, zip code, and in most instances the address, or at least the street, where the damage occurred; (iii) the type of insurance policy: type of asset affected, e.g. housing, small or medium-sized enterprise, shop, crops, vehicle, boat; and (iv) the total amount of indemnities paid by the insurer.

These data contain no information on damage processes or on asset characteristics. This key information can only be found in the detailed loss adjustment reports made by experts mandated by insurers after the disaster, which are the source of damage indemnity evaluations.

Those loss adjustment reports, based on an on-site visit by a certified expert, contain useful detailed information for damage analysis, which are, for residential building records: (i) the damage circumstances: when and how the flood occurred and how the building was affected (e.g. structural issues), which provides information about physical processes that caused the damage, such as simple flooding, currents, waves shocks, scouring and undermining, together with the intensity of these processes (mostly water depth and sometimes flood duration); (ii) the terms of the insurance contract, especially the size of the house (e.g. number of storeys and

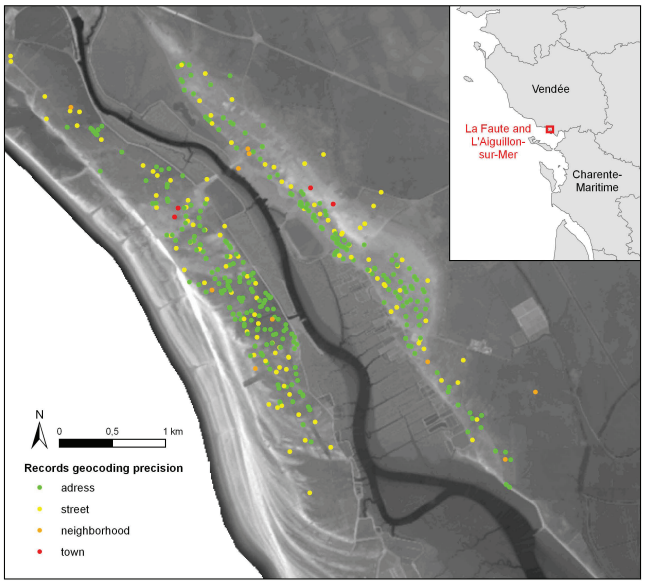


Fig. 2. Map showing the density of damage records for the towns of La Faute-sur-Mer and L'Aiguillon-sur-Mer in the French Vendée Department for the three insurance companies that took part in the study. The resulting dataset is believed to represent around 25 % of the overall insurance market in France. The colour scale indicates the geocoding precision.

main rooms, presence of basement), which provide some elements on the vulnerability of the asset and on its overall value; (iii) a detailed description of damage costs, divided into reconstruction works and damage to building contents (inventory); and (iv) attached documents to the file, sometimes available (e.g. cost estimates and invoices, pictures before and after the damage, testimonies from the insured customer) and all the documents exchanged between the insurer and the customer, which can help understand any particular issues in the damage assessment and indemnification.

2.3 Data collection method

The general information from insurers' lists of damage records is what will be termed in this work the "first level of information" of the damage database created. In all, 297 records were available for the Johanna storm, as compared to 4575 for the Xynthia storm. The personal lines property records, i.e. residential building records, is the type of assets that have been the most affected by the two storms (175 and 3956 records, respectively), and so the type for which it is the most relevant to produce a statistical study. Regarding this type of asset, the datasets of the three insurers concerned are believed to represent around 25 % of the overall insured property market in France, on the basis of the FFSA and GEMA report (2011), regarding the Xynthia storm damages.

Amongst these records of residential building damages (mainly detached houses), a sampling of the most interesting ones to investigate was taken from these "first-level" lists, regarding the damage location (town) and the amount of indemnities (records that have a minimum of 10 000 € damage). So to focus on this selection, the loss adjustment reports were analysed. This detailed information is what will be termed the "second level of information": it allowed a more exhaustive database on damage to be compiled, consisting of 358 records (81 of which for Johanna storm and 277 for Xynthia storm).

Loss adjustment reports were most often available in paper format for the three insurance companies that took part in the study. Regarding confidentiality constraints, the collection process took place within the insurance offices, and no copy was made of the original data.

Data compilation was performed using database software, with a suitable data entry form to optimise efficiency. Information was structured into four main blocks: (i) a record references block; (ii) a block containing damage description and indemnification, with a distinction made between the building itself and its contents; (iii) a block containing building specifications (number of storeys, main rooms, surface area, presence of basement, construction materials, etc.), in order to evaluate vulnerability criteria and the asset's overall value; and (iv) a block providing information on hazard parameters, in order to link the type of damage observed to the associated physical processes (i.e. water depth, duration and speed, waves shocks and scour).

It should be pointed out that the precision and completeness of loss adjustment reports are variable and heterogeneous. The description of damage circumstances and hazard information may depend on the experts involved, but also on the customer cooperation, the importance of the damages, etc. For greater precision concerning the damage assessment, information on holders' insurance contracts is also required so as to understand the amount of indemnification. These elements include the value of the deductible, and the mode of compensation of the "outdated state" of the building and contents (i.e. indemnification of "as new" replacement costs or depreciated values above a given threshold). In addition, some specific cases are considered, such as those of unconformity of the customer's declaration (re: surface area, number of main rooms, etc.), in which only a fraction of the damage is compensated, or cases where the accessory structures to the main building are included or not in the contract coverage (e.g. outdoor damage such as that to enclosing walls or fences and gardens).

In order to visualise the impact area of the events and to conduct a spatial analysis, the datasets of both levels were georeferenced in GIS software using the addresses of the

Table 1. Number of records, mean indemnities ($\bar{X}$) and standard error of the mean (SEM) per lines of business for Johanna and Xynthia storms, for the three insurance companies that took part in the study. The resulting dataset is believed to represent around 25 % of the overall insurance market in France.

	Johanna No. Records	$\bar{X}$ (€)	SEM (€)	Xynthia No. Records	$\bar{X}$ (€)	SEM (€)
Personal lines property	175	7128	1510	3956	26 622	768
Commercial lines	56	43 537	1636	350	47 178	9948
Agricultural sector	12	4637	1820	139	27 452	466
Motor vehicles	19	4674	862	120	7834	529
Yachting	35	3044	540	10	4139	2439
Total	297	13 254	3303	4575	27 677	1024

damages and a geocoding tool[2] based on Google Maps API ® and TeleAtlas data ®.

3 Results

3.1 First level of information

The geographic distribution of damage records for the two events is shown in Fig. 1, localising the events at the regional scale. Figure 2 depicts the distribution of damage records corresponding to the Xynthia storm for the municipalities of La Faute-sur-Mer and L'Aiguillon-sur-Mer (Vendée Department). When the precise addresses were not available, the damage records were plotted at the street level, the neighbourhood, or by default only at the town level.

From the first level of information, the damage record lists contain all the records from the three insurance companies that allowed statistics to be computed about the comprehensive impact of the two storms. Table 1 shows the number of flood-related records and the mean cost of damage according to economic sectors for each event. About personal lines property damages, the mean per-record cost was about 7100 € for the Johanna storm, and it amounted to about 26 600 € per record for the Xynthia storm. This value seems realistic in the light of the value of 23 700 € for the overall insurance market from the FFSA and GEMA report (2011). The difference in unit costs between the two events can be explained by the difference in hazard intensity, and by the difference in the asset's exposure between the two impacted regions. For example, Table 1 shows that commercial sector mean costs are close to each other for the two storms, whereas agricultural sector damages are almost six times higher for Xynthia compared to Johanna ones. This can be explained by the greater flood duration of Xynthia, but also by the fact that farmlands are larger in the Vendean region than in Brittany. The statistics also show the important variation of the costs, which complicates interpretation at this scale. For the personal lines property damages, the most important media coverage of Xynthia event could also explain a part of the differences between the two storms; Thourot (2012) says that after events that caused deaths, which are largely broadcasted, the loss adjustment conditions and controls are frequently softened.

Figure 3 shows the distribution of the costs for each coastal town where cumulated indemnities reached 1 million €. As outlined above, the two towns that experienced the highest total costs are La Faute-sur-Mer and L'Aiguillon-sur-Mer, but they do not have the highest mean indemnities. The affected towns display a wide range of mean and median costs, which may be linked to local hazard parameters and intensity, but also to varying characteristics and vulnerability degrees of the concerned assets. For instance, towns can have different proportions of primary/secondary residences, and inhabitants can have different levels of incomes. As an example, the mean family wage was about 19 800 € for the town of L'Aiguillon-sur-Mer in 2010[3], which has a relatively low mean indemnity. On the contrary, the towns of Les Portes-en-Ré and Loix, which have relatively high mean indemnities, also have a higher mean family wage of about 28 200 € and 26 600 €, respectively.

3.2 Second level of information

For the second level of information, the detailed database compiled contains a smaller number of damage records, but it did allow the damages processes and costs to be analysed in greater detail and a damage typology to be developed. Damages are classified according to three principal types: (i) damages to main buildings, with a difference made for records regarding main rooms and records for garages or basements damages only; (ii) damages to accessory buildings, such as outhouses, garden sheds, mobile homes or bungalows; and (iii) damages to outdoor elements, such as plot fences and gates, retaining walls, terraces and swimming pools. This typology can be used to separate costs into homogeneous

[2] http://www.batchgeocodeur.mapjmz.com (last access: December 2012).

[3] French Ministry of Taxes, http://www.impots.gouv.fr (last access: December 2012).

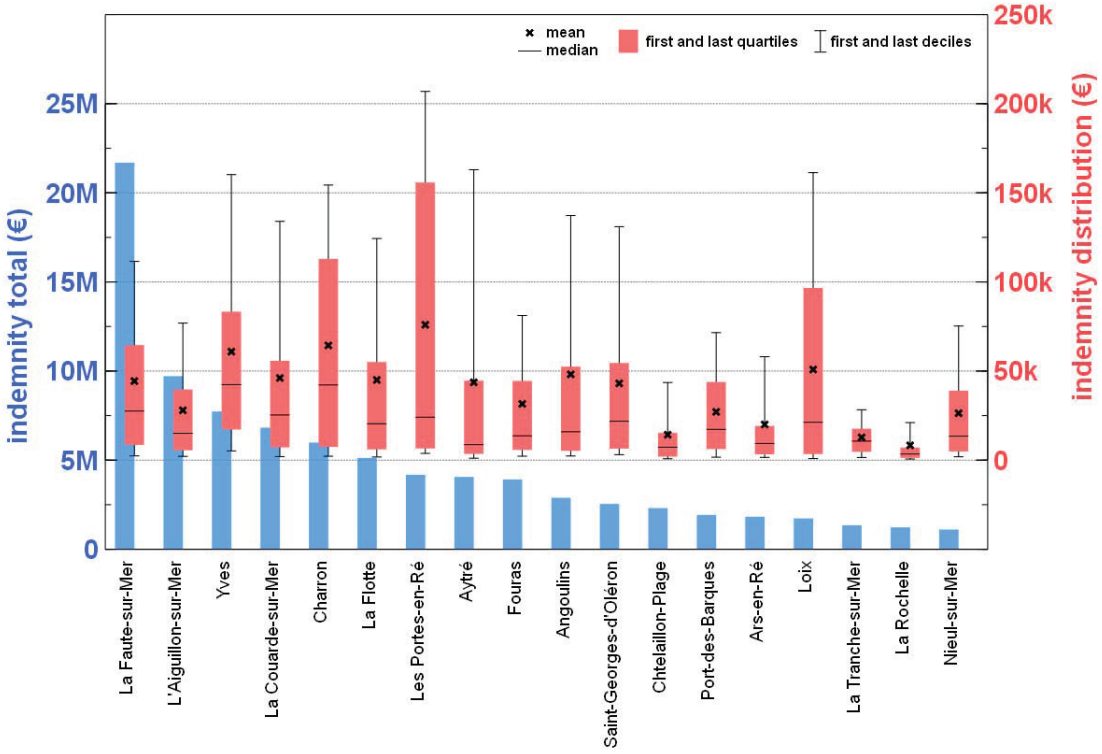


Fig. 3. Total sum of indemnities (in blue) and indemnity distribution (in red) for residential building damages, in towns having a total indemnity of at least 1 million €, for the three insurance companies that took part in the study. The resulting dataset is believed to represent around 25 % of the overall insurance market in France.

classes that can be compared. It should be pointed out that for both events, a large majority of personal lines property damage occurred on single-family homes, collective buildings being very scarce in the flooded areas. Moreover, this damage typology was linked to the different damage processes at the building scale. Cases where the main building was affected principally involved basic flooding processes, accompanied by a significant velocity in some areas, or conversely, with water stagnating for many days, especially in the buildings with basements. Scouring of building foundations sometimes occurred but remains rare. Damage to elements outside the buildings (i.e. retaining walls and plot fences) occurred particularly on properties located on the sea-front, and mostly involved high currents and wave shocks causing ground erosion and scouring.

The damage cost distribution was analysed according to the different types of construction works affected by the flood, as shown in Fig. 4. For records of the Xynthia event for which the indemnity is under the mean value of 26 600 €, building reconstruction costs are divided between interior elements (i.e. plasterworks, woodworks, electrical and plumbing systems, decorations) for 56 % and accessory buildings and outdoor elements for 36 %. These damages are mainly associated with records where the main building is not affected, or inundated by low water depths. On the contrary, for records for which the indemnity is above the mean value of 26 600 €, more than 75 % of the costs are related to interior elements. These damages are associated with records where the main building is completely flooded and so the accessory buildings and outdoor elements represent a smaller part of the costs. In both cases, structural components (i.e. building foundations, masonry, roof structures) only account for some 1 or 2 % of the overall costs. On the other hand, the replacement cost of building inventory amounts to an average of 40 to 50 % of the value of the building reconstruction costs. These results confirm that current buildings are vulnerable to floods mainly because their interior elements are not water-repellent and not well adapted to floods. French construction guides that propose some solutions to build in flood plains are quite recent (METL and MEDDE, 2012) and largely not yet applied.

From this level of detail, the production of empirical damage functions was investigated for the different assets affected. Figure 5 shows a scatter plot of the amount of indemnities related to the maximum water depth, for the "main buildings" typology class of damage. It depicts the high degree of scatter displayed by the costs, which can be explained by three main findings.

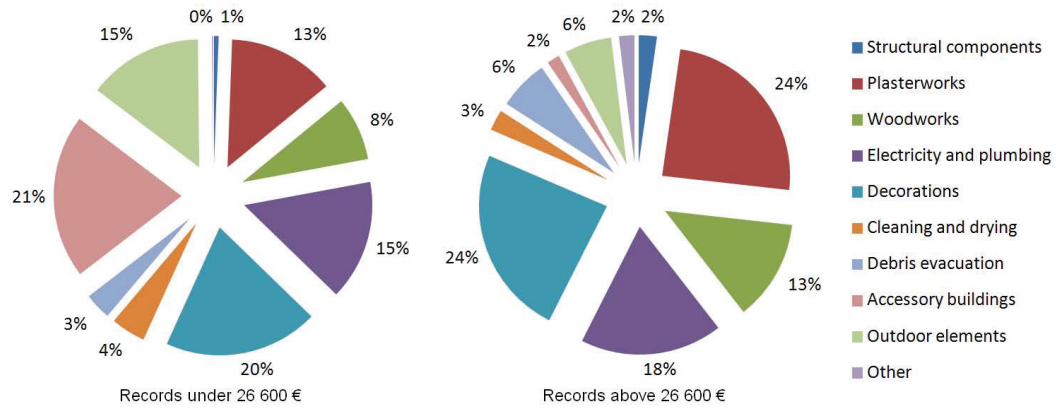


Fig. 4. Pie charts of Xynthia damage costs percentages on residential buildings, broken down according to construction elements. Records split into two groups on both sides of the mean value of 26 600 € for housing costs.

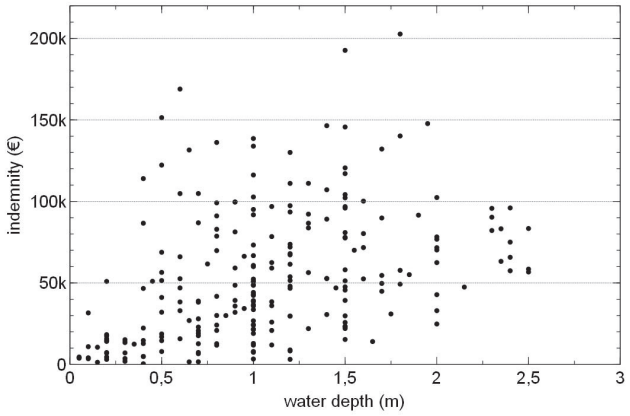


Fig. 5. Scatter plot of the Johanna and Xynthia storms records in the second-level database showing the causal relationship between indemnity for the main building and water depth.

Firstly, there is uncertainty on the water-depth measurements, and more generally on the damage circumstances indicated in loss adjustment reports. An expert's priority is to define losses and quantify the damage so it can be repaired; a precise report of the actual water depth and other hazard parameters is thus not of prime importance. Moreover, an expert must often rely on the testimony of customers when watermarks are no longer visible, or leave the information missing in the report. It should be noted that water depth is sometimes rounded off to the nearest 50 cm increments. Furthermore, when water depth is mentioned, the measurement reference (i.e. the ground floor of the building, or the ground outside the building) and the place in the house where the measurement was made (e.g. main rooms or basement) are often missing. These are all reasons why information on water depth is heterogeneous and lacking in precision so that the records are not always comparable with each other.

Secondly, the variability between different insurance contract terms according to items guaranteed also contributes a factor of uncertainty. Different contracts do not provide the same level of guarantees, particularly on the indemnity of the "as new" replacement cost or of the depreciated value of damaged items, when an "outdated state" threshold is reached that is evaluated by the loss adjuster. Moreover, in some contracts, some parts of the house are not covered unless the customer chooses an additional option, e.g. certain types of building inventory and outdoor elements. These points must be taken into account, bearing in mind there is currently no standard in the insurance sector in this respect. This leads to a reflection on using "as new" replacement costs or depreciated values for cost assessment purposes: the first amounts to the real compensation in most cases, while the second represents the real value of damage. Furthermore, using "as new" replacement costs is less dependent on the variability of insurance contract terms because they are based only on the expert's judgement, but it sometimes involves an improvement of some elements, between the times before and after the flood, thereby yielding an overestimation of damage.

Finally, there is significant variability in the types and characteristics of exposed buildings that defines their vulnerability and could explain disparities in damages costs, e.g. number of storeys, presence of a basement, elevation of the ground floor, and the sensitivity of the construction materials. The second type of asset parameters that could explain the replacement costs is obviously the size of the house and how its interior is fitted out; these characterise the initial construction cost of the house and hence the potential replacement cost in case of flood.

4 Discussion

The study conducted underlines the input of insurance data for the Johanna and Xynthia storms, in the area of cost assessments from ex-post damage analysis. It was performed from a macro to a micro level. At the macro-scale, the first-level data available, consisting of about 4000 damage records, allowed an overall synthesis to be made of coastal flood impacts on insured assets in terms of geographic distribution and total costs (for different economic sectors of affected assets). This database is essential for sampling insurance records. However, it does not describe damage circumstances, nor hazard characteristics, and does not, in itself, allow a direct link to be established between costs and damage types. At a micro-scale, the second-level detailed information on types and costs of damage based on loss adjustment reports allowed a typology of damages and damage processes to be defined, and the costs to be divided between distinct construction works. Preliminary results show, for instance, that for events such as Johanna and Xynthia storms, the larger part of the direct costs in residential buildings are associated with interior elements, while damage to structural components is very localised and negligible.

To draw up damage functions, cost estimations were intersected with water depth for each record where the information was available. Compared with other approaches for building damage functions, such as expert judgement or field surveys (Merz et al., 2010), uncertainty remains as to developing a causal relationship between costs and hazard parameters of the flood with our insurance dataset: (i) uncertainty on water depth measurements, which are made either by loss adjusters or sometimes by the customers themselves; (ii) variability on cost assessment processes due to the different types of insurance contracts and to the lack of standardisation of methods; and (iii) the architectural characteristics of the affected building (e.g. number of floors, presence of a basement, construction method, resistance of the materials), inducing a specific vulnerability, and the size and the total initial construction cost or value of the house.

The key information cited above is very heterogeneous from one record to the next, often missing in loss adjustment reports or lacking in precision indications. These observations present, at this stage of the study, an obstacle to developing damage functions from insurance damage data alone. It demonstrates that, at this point, insurance datasets are not sufficient in themselves, and need to be reinforced by other data sources. In addition, the hazard assessment would benefit from aftermath field observations to characterise precisely the physical processes and intensity of the coastal flood. This fieldwork would also improve the characterisation and classification of the assets exposed to flooding.

To move on from an ex-post approach to an ex-ante approach for assessing potential future damage, numerical models will also be needed to provide the physical parameters (i.e. water depth, speed, hydrodynamic energy) with a high spatial resolution and precision for an object-based analysis at a micro-scale. To evaluate the vulnerability and initial value of assets, some data, in addition to that provided by insurance, can also be sought in institutional databases (e.g. national institutes of geography and statistics, land register services, taxes services); however, when available, they are often too aggregated.

Furthermore, empirical damage functions from ex-post damage assessments raise questions on spatial transferability and temporal durability: are they transferable to other regions or countries with different hazards and asset characteristics? And with the fast pace of evolution in the market of construction costs, how long might they be able to be used without being updated?

5 Conclusions

In this study, a detailed database (second level) of 358 cases of flooded houses had been collected. A method for data collection had been presented, which required significant interpretation work, due to the lack of harmonisation between different loss adjustment report contents. The need for precision in empirical direct damage data, and of having access to a greater number of records available in detail for statistical analysis over time and with respect to events, highlights the need for recommendations to the insurance profession about standardising data collection in the loss adjustment process (on damage surrounding circumstances, i.e. precise water depth measurements, and on typology and characteristics of exposed buildings, i.e. initial value). This should lead to improved archiving and sharing of damage records, in order to access numerical comprehensive information on a statistical level for future natural disasters, no longer needing to carry on such an analysis based on individual paper reports.

This study made it possible to obtain feedback from experience on damage caused by two coastal storms using insurance datasets, a process that should be widespread after such events, in the interests of improving flood management policies. The scarcity of ex-post flood damage data needed for building damage models is very often cited by the scientific community (Merz et al., 2010). Working with datasets from the insurance sector is a partial solution to this lack of damage information. For future events, a standardised database of insurance records could significantly contribute to the production of empirical damage functions. This objective could be achieved by consolidating partnerships between natural risks research and the insurance and reinsurance sectors, as well as the loss adjustment profession, an important source of damage data acquisition.

Procuring object-based damage functions at the micro-scale is an ongoing research undertaking: a number of causes of uncertainty have been mentioned which, at this stage, limit the precision of a damage prediction model, point that had also been underlined by Spekkers et al. (2011) in an

analysis of insurance datasets about pluvial flood damage. The preliminary results are nevertheless interesting, and current analyses, still in their early stages, allow the main types of building damage to be identified, in relation to their locations and mean indemnities. In all events, complementary sources of data on hazards and asset vulnerability parameters, including field data, will definitely still be necessary for damage modelling. Further analyses will consider crossing insurance data with external material, such as more precise simulated hazard parameters, housing characteristics, socio-economic statistical data, etc. As recently demonstrated by Merz et al. (2013), multivariate approaches can significantly improve the costs assessment model, compared to the damage function classical approach. These approaches should also be more deeply investigated.

Acknowledgements. The present work is part of the JOHANNA research project and the associated Ph.D., which are funded by the MAIF Foundation for Risk Prevention Research and the BRGM. The authors wish to acknowledge the steering committee for its involvement in framing the research, and express special thanks to the insurance companies AXA, MAAF and MAIF and the adjusting firms ELEX and Polyexpert for making us welcome and allowing us access to their data. We thank Steven Aminot for the work he conducted under his Master's degree internship. We thank the editor and two anonymous referees for their comments on an earlier version of this paper.

Edited by: R. Schwarze
Reviewed by: two anonymous referees

References

APFM (Associated Programme on Flood Management): Conducting flood loss assessments – A tool for integrated flood management, Technical document no. 7, Flood management tools series, 30 pp., available at: http://www.apfm.info/?page_id=787 (last access: December 2012), 2007.

Bertin, X., Bruneau, N., Breilh, J.-F., Fortunato, A. B., and Karpytchev, M.: Importance of wave age and resonance in storm surges: The case Xynthia, Bay of Biscay, Ocean Model., 42 16–30, doi:10.1016/j.ocemod.2011.11.001, 2012.

Cariolet, J.-M., Costa, S., Caspar, R., Ardhuin, F., Magne, R., and Goasguen, G.: Atmospheric and marine aspects of the 10th of March 2008 storm in Atlantic and in the Channel, Norois, 215, 11–31, doi:10.4000/norois.3242, 2010 (in French).

Deboudt, P.: Towards coastal risk management in France, Ocean Coast. Manage., 53, 366–378, doi:10.1016/j.ocecoaman.2010.04.013, 2010.

FEMA (Federal Emergency Management Agency): Hurricane Katrina in the Gulf Coast: Mitigation Assessment Team Report, Building Performance Observations, Recommendations, and Technical Guidance, FEMA 549, available at: http://www.fema.gov/resource-document-library (last access: December 2012), 2006.

FFSA (Fédération Française des Sociétés d'Assurance) and GEMA (Groupement des Entreprises Mutuelles d'Assurance): La tempête Xynthia du 28 février 2010 – Bilan chiffré au 31 décembre 2010, 19 pp., available at: http://www.ffsa.fr/sites/upload/docs/application/pdf/2011-06/bilanxynthia28022011.pdf (last access: December 2012), 2011 (in French).

Genovese, E. and Przyluski, V.: Storm Surge Disaster Risk Management: the Xynthia Case Study in France, J. Risk Res., 16, 7, 825–841, doi:10.1080/13669877.2012.737826, 2013.

Gerritsen, H.: What happened in 1953? The Big Flood in the Netherlands in retrospect, Philos. T. R. Soc. A., 363, 1271–1291, doi:10.1098/rsta.2005.1568, 2005.

Kelman, I. and Spence, R.: An overview of flood actions on buildings, Eng. Geol., 73, 297–309, doi:10.1016/j.enggeo.2004.01.010, 2004.

Kreibich, H., Piroth, K., Seifert, I., Maiwald, H., Kunert, U., Schwarz, J., Merz, B., and Thieken, A. H.: Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling?, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 1679–1692, doi:10.5194/nhess-9-1679-2009, 2009.

Lequeux, Q. and Ciavola, P.: Methods for Estimating the Costs of Coastal Hazards, CONHAZ Project Deliverable D7.1, 67 pp., available at: http://conhaz.org/outcomes-1 (last access: December 2012), 2012.

Merz, B., Kreibich, H., Thieken, A., and Schmidtke, R.: Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 4, 153–163, doi:10.5194/nhess-4-153-2004, 2004.

Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., and Thieken, A.: Review article "Assessment of economic flood damage", Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 1697–1724, doi:10.5194/nhess-10-1697-2010, 2010.

Merz, B., Kreibich, H., and Lall, U.: Multi-variate flood damage assessment: a tree-based data-mining approach, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 53–64, doi:10.5194/nhess-13-53-2013, 2013.

Messner, F., Penning-Rowsell, E., Green, C., Meyer, V., Tunstall, S., and Van der Veen, A.: Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods, FLOODsite Project Deliverable D9.1, 178 pp., available at: http://www.floodsite.net/html/publications3.asp?taskID=9 (last access: December 2012), 2007.

METL (Ministère de l'Egalité des Territoires et du Logement) and MEDDE (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, et de l'Energie): Référentiel de travaux de prevention du risque inondation dans l'habitat existant, report, 91 pp., available at: http://www.developpement-durable.gouv.fr/Referentiel-de-travaux-de.html (last access: December 2012), 2012 (in French).

Meyer, V., Becker, B., Markantonis, V., and Schwarze, R.: Costs of Natural Hazards - A Synthesis, CONHAZ Project Deliverable D9.1, 63 pp., available at: http://conhaz.org/outcomes-1 (last access: December 2012), 2012.

Parker, D. J., Green, C. H., and Thompson, P. M.: Urban flood protection benefits: A project appraisal guide (The Red Manual), Gower Technical Press, Aldershot, 284 pp., 1987.

Pedreros, R., Garcin, M., Krien, Y., Monfort, D., Mugica, J., and François, B.: Tempête Xynthia : compte-rendu de mission préliminaire, rapport BRGM/RP-58261-FR, 43 pp., available at: http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-58261-FR.pdf (last access: December 2012), 2010 (in French).

Penning-Rowsell, E., Johnson, C., Tunstall, S., Tapsell, S., Morris, J., Chatterton, J., and Green, C.: The Benefits of Flood and Coastal Risk Management: A Manual of Assessment Techniques, Middlesex Univ. Press, UK, 238 pp., 2005.

Pistrika, A. K. and Jonkman, S. N.: Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after hurricane Katrina, Nat. Hazards, 54, 2, 413–434, doi:10.1007/s11069-009-9476-y, 2010.

Spekkers, M. H., Ten Veldhuis, J. A. E., Kok, M., and Clemens, F. H. L. R.: Analysis of pluvial flood damage based on data from insurance companies in the Netherlands, Proceedings International Symposium Urban Flood Risk Management, UFRIM, September 21–23, Graz, Austria, 2011.

Thieken, A. H., Olschewski, A., Kreibich, H., Kobsch, S., and Merz, B.: Development and evaluation of FLEMOps – a new Flood Loss Estimation MOdel for the private sector, in: Flood Recovery, Innovation and Response edited by: Proverbs, D., Brebbia, C. A., and Penning-Rowsell, E., WIT Press, 315–324, doi:10.2495/friar080301, 2008.

Thourot, P.: Dans la tempête médiatique, Risques, Les cahiers de l'assurance, 91, available at: http://www.ffsa.fr/webffsa/risques.nsf/html/Risques_91_0008.htm (last access: December 2012), 2012 (in French).

Torterotot, J.-P.: Cost of damage due to river flooding: assessment and uncertainty analysis, Ph.D. thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 284 pp., available at: http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00421862 (last access: December 2012), 1993 (in French).

Vinet, F., Defossez, S., Rey, T., and Boissier, L.: The production process of flooding risk in coastal area: the example of "Xynthia" areas, Norois, 222, 11–26, doi:10.4000/norois.3834, 2012 (in French).

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)

Cette thèse de doctorat porte sur l'analyse des dommages et sur l'évaluation des coûts induits sur les habitations par les submersions marines. L'étude se base sur les données d'assurance de deux évènements récents ayant touché la France et causé des submersions sur les côtes bretonnes et atlantiques : les tempêtes Johanna (mars 2008) et Xynthia (février 2010).

Dans un premier temps, l'analyse des données d'expertise et d'indemnisation d'assurance, en lien avec celle des paramètres de l'aléa et des enjeux exposés, a eu pour but la meilleure compréhension des différents types de dommages, et l'explication des coûts observés. En parallèle, un travail de modélisation de l'aléa a été réalisé à une échelle régionale, afin de déterminer des indicateurs des forçages météo-marins, et à une échelle locale, afin de préciser les processus d'endommagement sur les sites étudiés pour les deux tempêtes. La caractérisation de la vulnérabilité et de la valeur des enjeux (coûts de construction) a été menée à l'aide de différents paramètres issus de bases de données nationales (INSEE et IGN) et de campagnes de terrain.

Dans un second temps, les informations recueillies ont permis la construction de modèles empiriques de prédiction du coût des dommages aux habitations spécifiques à l'aléa submersion marine, outils aujourd'hui inexistants en France. Les différents types de modèles testés sont basés sur des approches statistiques univariées (fonctions d'endommagement) et multivariées. L'apport des données d'assurance à la réalisation de tels modèles est discuté, et des recommandations ainsi que des perspectives de recherche sont évoquées, afin de rendre ces modèles opérationnels et d'augmenter leur capacité de prédiction des coûts d'évènements catastrophiques futurs.

Mots-clés : risques côtiers, submersion marine, tempêtes, dommages, données d'assurance, évaluation économique, fonctions d'endommagement, modélisation multivariée, Johanna, Xynthia.

Analysis of coastal flooding damage and assessment of induced costs on residential buildings, based on insurance data - insights gained from Johanna (2008) and Xynthia (2010) storm events

This PhD work aims at analysing damage and evaluating costs related to coastal flooding on residential buildings. The study is based on insurance data from two recent storm events, which caused coastal flooding in the Brittany and Atlantic regions in France: the storms Johanna (March 2008) and Xynthia (February 2010).

At first, the analysis of insurance indemnities and loss adjustment data, in connection with hazard parameters, and exposed assets characteristics, allowed a better understanding of the different types of damage and costs observed. At the same time, hazard models were carried out at a regional level, in order to identify meteorological forcing indicators, and at a local level, in order to link damages to the associated physical flooding processes on the studied sites. The characterization of the asset's vulnerability and values (construction costs) was conducted using different parameters from national databases (INSEE and IGN) and field survey.

In a second step, empirical cost-assessment models were built on the basis of the data analysed, using univariate (damage functions) and multivariate statistical approaches. This study is the first attempt in France to elaborate models for the prediction of damage costs linked to coastal flooding on housing. The contribution of insurance data to the implementation of such models is discussed, and recommendations and research perspectives are expressed, in order to make the models operational and to increase their capacity to predict future catastrophic events costs.

Keywords: coastal risks, coastal flooding, winter storms, damages, insurance data, cost assessment, damage functions, multivariate modelling, Johanna, Xynthia.