
PROGRAMME D' ACTIONS ET DE PREVENTIONS DES INONDATIONS – PAPI COMPLET DU BASSIN VERSANT DU LAY AVAL

Rapport de phase 1 : diagnostic et adaptation de la stratégie locale

Janvier 2014



PROGRAMME D' ACTIONS DE PREVENTION DES INONDATIONS - PAPI COMPLET DU BASSIN VERSANT DU LAY AVAL

PHASE 1 – DIAGNOSTIC ET ADAPTATION DE LA STRATEGIE LOCALE

PREAMBULE.....	6
1. CONTEXTE GENERAL.....	8
1.1 Périmètre du PAPI	8
1.2 Evènements historiques	10
1.2.1 Crues du Lay	10
1.2.2 Submersion marine	14
1.3 Fonctionnement hydraulique du Lay aval	16
2. ETAT DES LIEUX	19
2.1 Recueil et analyse des données existantes	19
2.1.1 Analyse des études existantes	19
2.1.2 Données sur les ouvrages existants	19
2.1.3 Données topographiques	20
2.1.4 Référence altimétrique maritime	20
2.1.5 Données de forçage du modèle maritime	22
2.1.6 Données de calage	23
2.1.7 Données pluviométriques et hydrométriques	23
2.1.8 Reconnaissances de terrain	24
2.2 Analyse des ouvrages existants	25
2.2.1 Diagnostics des digues fluviales	25
2.2.2 Diagnostics des principaux ouvrages hydrauliques fluviaux et maritimes	26
2.2.3 Synthèse des diagnostics de digues maritimes	27

2.2.4	Erosion du trait de côte	28
3.	CARACTERISATION DE L'ALEA INONDATION	34
3.1	Détermination des scénarios étudiés	34
3.2	Analyse hydrologique	36
3.2.1	Présentation des bassins versants	36
3.2.2	Construction des hydrogrammes de crue	39
3.2.3	Calage du modèle hydrologique	43
3.2.4	Résultats pour les crues historiques et fréquentielles	44
3.3	Construction et calage des modèles hydrauliques	47
3.3.1	Modèle maritime	47
3.3.2	Modèle fluvial	58
3.4	Scénario 1 – Premiers débordements	69
3.4.1	Premiers débordements maritimes impactant un enjeu	69
3.4.2	Premiers débordements fluviaux impactant un enjeu	74
3.5	Scénario 2 – Evènement d'occurrence centennale	81
3.5.1	Evènement maritime	81
3.5.2	Evènement fluvial	82
3.6	Scénario 3 – Evènement exceptionnel	87
3.6.1	Evènement exceptionnel maritime	87
3.6.2	Evènement exceptionnel fluvial	90
4.	RECENSEMENT DES ENJEUX EXPOSES, HIERARCHISATION DES RISQUES INONDATIONS	94
4.1	Création de la base de données des enjeux	94
4.2	Secteur pris en compte	94
4.3	Analyse surfacique de l'occupation du sol	94
4.3.1	Nomenclature	95
4.3.2	Méthodologie	97
4.4	Enjeux ponctuels	97
4.5	Enjeux linéaires	97
4.6	Hierarchisation des risques	98
4.6.1	Alea débordement de cours d'eau	98
4.6.2	Alea submersion marine	101
4.6.3	Monétarisation des enjeux, estimation des dommages	105
5.	DEFINITION D'OBJECTIFS, ELABORATION DE LA STRATEGIE LOCALE.....	109
5.1	Sensibiliser et informer les populations	109

5.2 Surveillance, prévision	113
5.3 Alerte et gestion de crise	115
5.4 Réglementer (prise en compte du risque dans l'urbanisme)	118
5.5 Réduire la vulnérabilité	118
5.6 Ralentir les écoulements	120
5.6.1 Aménagement de la zone des méandres ou reconnexion des boucles du Lay	121
5.6.2 Rôle du déversoir de Lairoux et arches de ancienne RD 2949	122
5.7 Gestion des ouvrages de protection hydraulique	124
ANNEXES	125
ANNEXE 1 – BIBLIOGRAPHIE	126
ANNEXE 2 – TABLES DES ILLUSTRATIONS	139
ANNEXE 3 - REFERENCES MARITIMES.....	142
ANNEXE 4 – ESTIMATION DES DOMMAGES.....	166
ANNEXE 5 – ANALYSE FONCIERE DES BOUCLES DU LAY.....	173

PREAMBULE

La gestion des risques d'inondation, en France, a largement évolué au cours des dernières décennies. Les programmes d'actions de prévention contre les inondations (PAPI), lancés en 2002, avaient pour objet de promouvoir une gestion intégrée des risques d'inondation en vue de réduire leurs conséquences dommageables sur la santé humaine, les biens, les activités économiques et l'environnement.

Cet outil de contractualisation entre l'État et les collectivités, a permis de penser et de lancer des politiques globales, à l'échelle des bassins de risque concernés, et donc de gagner en efficacité technique comme en pertinence territoriale.

Le bilan des premiers PAPI a conduit le ministère du Développement durable en 2009, à choisir de rénover le dispositif et de permettre ainsi d'assurer la transition avec la mise en œuvre de la directive européenne 2007/60/CE du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (DI).

Le nouvel appel à projets PAPI permet le maintien de la dynamique instaurée en 2002. Il est élargi à l'ensemble des aléas inondation et constitue également un dispositif de transition devant préparer la mise en œuvre de la directive inondation (DI).

Afin d'élaborer une véritable politique de gestion de l'eau dans le Marais Poitevin, les partenaires institutionnels, services de l'Etat, Agence de l'Eau, Conseil Général, communes, organismes divers, acteurs du milieu associatif, se sont regroupés pour élaborer ensemble les PAPI de ce territoire.

Ils ont privilégié une organisation en trois PAPI afin de tenir compte des spécificités des différentes parties du Marais, du point de vue hydraulique comme du point de vue socio-économique.

BRL*Ingénierie* a été retenu par le « Syndicat Mixte du Marais Poitevin bassin du Lay » pour mener à bien le dossier PAPI complet sur le bassin du Lay aval (Avis du CMI du 13/12 ci-après).

L'étude se décompose en 4 phases qui sont :

- Phase 1 – Diagnostic et adaptation de la stratégie locale ;
- Phase 2 – Détermination des sites pour la pose de repères de crues ;
- Phase 3 – PAPI complet pour une labellisation : programme d'actions et gouvernance ;
- Phase 4 – Accompagnement par le prestataire du dossier pendant la phase d'instruction de la labellisation.

Le présent rapport concerne la phase 1 du dossier.



AVIS DE LA COMMISSION MIXTE INONDATION DU 13 DÉCEMBRE 2011

Nom du projet : PAPI d'intention du bassin versant du Lay aval

Maître d'ouvrage : Syndicat Mixte du Marais Poitevin Bassin du Lay

Vu le dossier présenté par le Syndicat Mixte du Marais Poitevin Bassin du Lay,

Vu l'avis émis par la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement des Pays de la Loire en date du 6 décembre 2011,

Vu l'avis émis par la commission inondation du bassin Loire-Bretagne du 1^{er} décembre 2011.

Considérant l'exposition du territoire du Lay aval aux risques d'inondation par submersion marine et par débordement du Lay,

Considérant la nécessité d'approfondir la connaissance du fonctionnement hydrologique du marais poitevin,

Considérant les dommages subis lors de la tempête Xynthia de février 2010,

Considérant la volonté du maître d'ouvrage de mener des réflexions approfondies dans un projet global de prévention des inondations « PAPI »,

Considérant le contexte local d'émergence de plusieurs démarches de type « PAPI » autour de la baie de l'Aiguillon et au cœur du marais poitevin,

La commission réunie le 13 décembre 2011, après avoir entendu le rapporteur de l'Etat, émet l'avis suivant :

AVIS FAVORABLE au PAPI d'intention, avec une DEMANDE EXPRESSE

- la coordination des démarches d'études engagées par les différents porteurs de projet sur le pourtour de la baie de l'Aiguillon, d'une part, et sur le marais poitevin d'autre part, doit être organisée, et les interventions ultérieures coordonnées.

Par ailleurs, la commission :

RECOMMANDE

- que des études complémentaires hydrosédimentaires soient programmées sur l'ensemble de la Baie de l'Aiguillon,



AVIS DE LA COMMISSION MIXTE INONDATION DU 13 DÉCEMBRE 2011

- que des exercices de simulation soient prévus dans le cadre du PAPI complet sur les territoires les plus exposés afin de tester l'efficacité des dispositifs de planification et d'alerte. Dans ce cadre, un bilan détaillé des PCS devra être présenté et le cas échéant une action d'accompagnement pourra être prévue en complément de celle menée par la maison des communes de Vendée.

Fait à Paris, le

Le secrétaire de la
Commission Mixte Inondation

Laurent MICHEL

Figure 1 : Avis de la CMI du 13 décembre 2011

1. CONTEXTE GENERAL

1.1 PERIMETRE DU PAPI

Le périmètre du PAPI complet correspond à une unité hydrographique cohérente, caractérisée par :

- ▶ **Un bassin versant et son marais, en aval**, découpé en quatre secteurs à la gestion hydraulique différentes :
 - L'amont de Morteveille : fonctionnement de type alluviale à inondations régulière,
 - De Morteveille aux écluses de Moricq : secteurs de marais mouillé aux inondations récurrentes et volontaires fonctionnant en espace d'expansion de crue afin de protéger l'aval,
 - De Moricq aux écluses du Braud : secteur de marais desséché où les crues du Lay sont écrêtées et les inondations exceptionnelles et subies,
 - L'aval des écluses du Braud : secteur maritime
- ▶ **Une unité littorale homogène**, de Longeville sur Mer à Triaize, correspondant à l'unité sédimentaire homogène « estuaire du Lay et anse de l'Aiguillon »,
- ▶ **Une déconnection hydraulique du reste du marais Poitevin** : bien que la partie aval s'intègre au marais Poitevin, il n'existe pas de lien hydrographique entre le marais de la Sèvre Niortaise et celui du Lay, la frontière étant les digues du canal de Luçon.

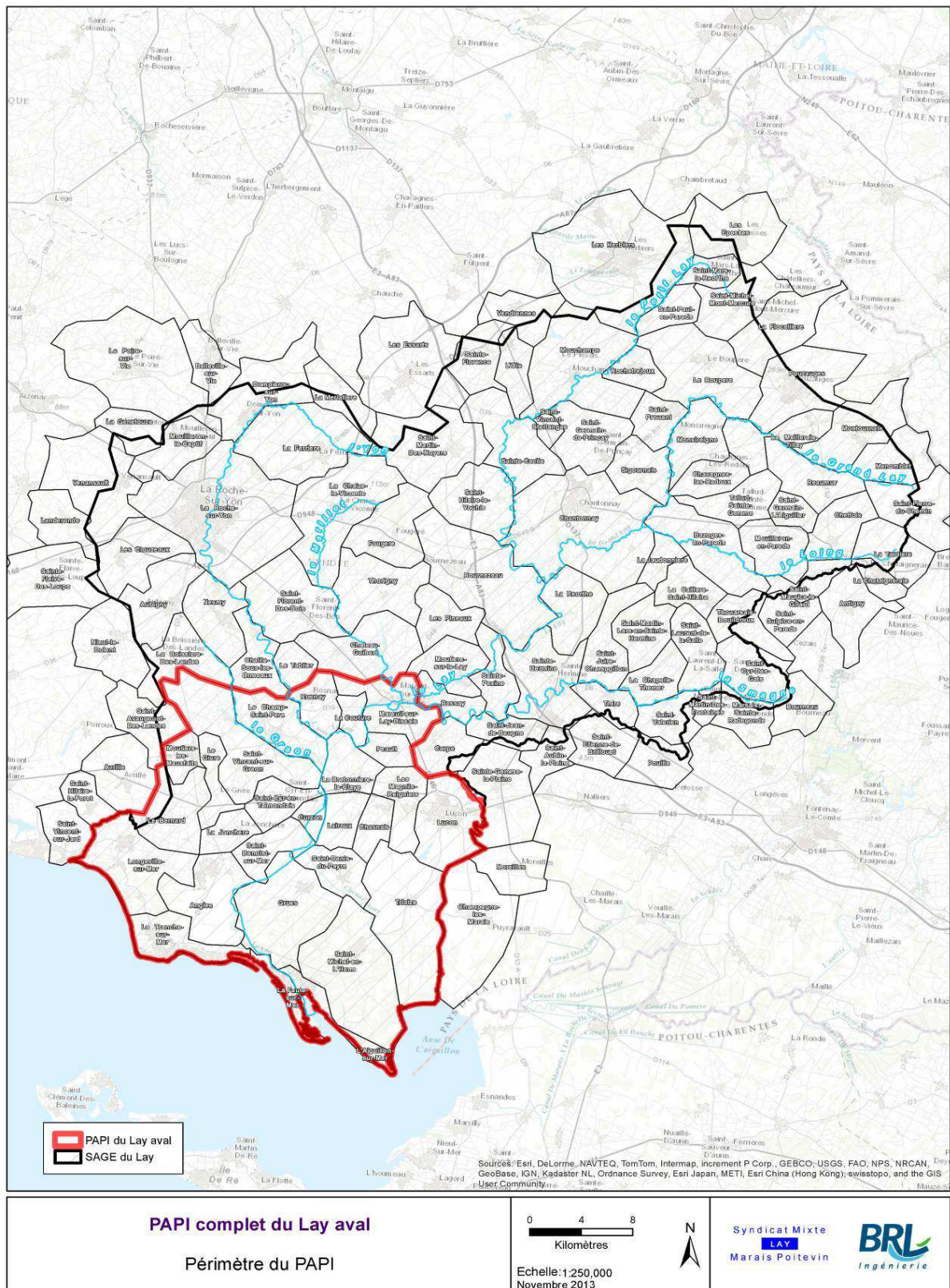


Figure 2 : Périmètre du PAPI

1.2 EVENEMENTS HISTORIQUES

1.2.1 Crues du Lay

La crue la plus importante connue sur le bassin versant a eu lieu en novembre 1960.

Elle est considérée comme étant d'une période de retour supérieure à 100 ans.

Son débit de pointe a été estimé à 700 m³/s au droit du secteur d'étude dans le cadre de l'analyse hydrologique pour la réalisation de l'« Atlas des Zones Inondables du Lay » (SCE, janvier 1999) repris dans le Plan de Prévention des Risques Inondation (PPRI) du Lay Amont approuvé le 18 février 2005. Toutefois, ce débit doit être considéré avec précaution, puisqu'il a été estimé à partir de calculs hydrauliques réalisés au droit des PHE¹ relevées. Cette estimation ne prend visiblement pas en compte le fonctionnement en casier du système hydraulique et représente peut être une surestimation de la réalité.

Il n'en reste pas moins que l'ampleur de l'évènement exceptionnel a entraîné d'importants dégâts sur le bassin versant.

L'enveloppe des zones inondées, représentée sur la carte ci-après, témoigne de l'importance du phénomène :

¹ Plus Hautes Eaux

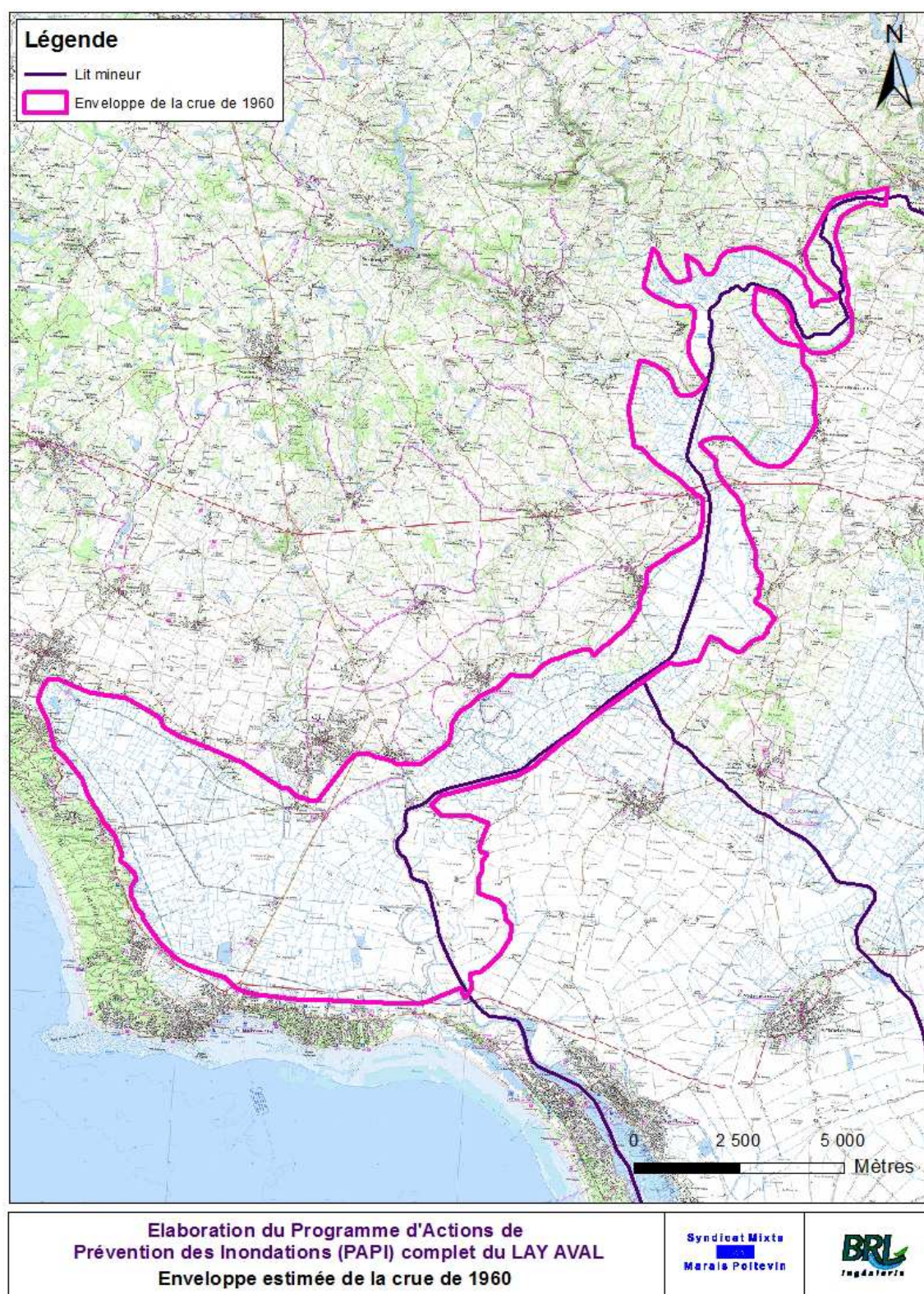


Figure 3 : Enveloppe estimée de la crue de 1960

Plus récemment, les événements les plus marquants ont été les crues de 1983 et 1999. Ces deux événements possèdent une période de retour similaire, entre 10 et 20 ans.

Toutefois, les zones ayant été impactées par des débordements du Lay sont sensiblement différentes. En effet, en 1983, les eaux, en sortant du lit mineur du Lay, se sont engouffrées par des arches sous l'ancienne voie ferrée et ont inondé le Marais de Moricq.

Ces arches ont par la suite été bouchées (1985) ce qui a permis de contenir la crue de 1999 dans le bief situé en amont de Moricq.

La carte ci-après présente l'enveloppe des zones impactées par ces deux événements.

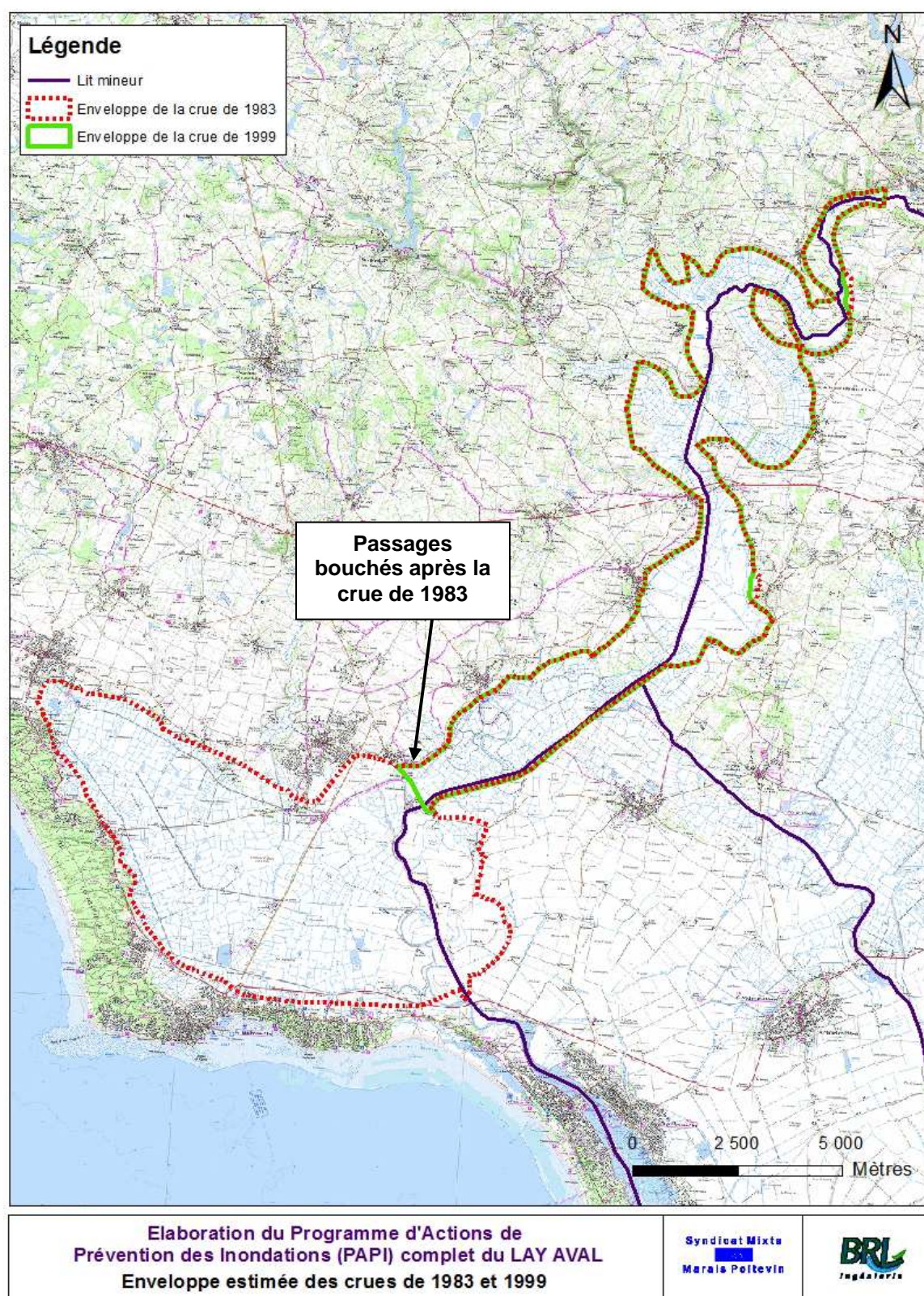


Figure 4 : Enveloppes estimée des crues de 1983 et de 1999

1.2.2 Submersion marine

La côte a historiquement été frappée à plusieurs reprises par des événements d'importances variables. Les dates les plus marquantes sont :

- ▶ Les 27 et 28 octobre 1882 lors d'une marée de fort coefficient (de l'ordre de 110),
- ▶ Le 21 mars 1928 lors d'une marée de coefficient 110 accompagnée de vents très violents venant du Sud-ouest,
- ▶ Le 14 mars 1937 lors d'une tempête avec un vent très violent et une marée d'équinoxe,
- ▶ Le 16 novembre 1940 lors d'une marée de coefficient 88,
- ▶ Le 27 décembre 1999 (tempête Martin) lors d'une marée de coefficient 77. Cette tempête n'a pas provoquée de submersions majeures sur le bassin du Lay mais elle est remarquée par la vitesse des vents relevée.

Mais l'évènement de loin le plus éprouvant qu'ait vécu le secteur d'étude a eu lieu dans la nuit du samedi 27 au dimanche 28 février 2010, durant la tempête Xynthia.

Si Xynthia n'a pas atteint l'intensité des tempêtes de décembre 1999, en termes de vitesses maximales instantanées de vent, son caractère singulier est dû à la **concomitance de l'état de tempête avec un fort coefficient de marée, à l'origine de phénomènes de submersion et d'érosion d'une rare intensité**, notamment sur les côtes vendéennes et de Charente-Maritime.

Le passage de la tempête a, en effet, coïncidé avec la pleine mer d'une marée de vives-eaux de coefficient 102 (pour un maximum de 120 pour les plus hautes marées) et des fortes houles comprises entre 6 et 7 m, provoquant une surcote de l'ordre de 1,50 m au marégraphe de La Rochelle – La Pallice.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques météo-océaniques de la tempête au port de référence de La Rochelle - La Pallice.

Pression atmosphérique (La Rochelle)	<p>977 hPa</p> <p>28 fév. 2010 (station météo de La Rochelle)</p> <p>977 hPa</p> <p>pression moyenne : 1 013 hPa</p> <p>Klaus : La Rochelle le 24 janv. 2009 965</p> <p>Lothar : Le Havre le 25 déc. 1999 961</p>
Vent maximum instantané enregistré	<p>158 km/h</p> <p>Direction d'incidence : secteur Sud-ouest</p> <p>28 fév. 2010 (St-Clément-des-Bains)</p> <p>direction sud-ouest jusqu'à 1h00 puis ouest</p> <p>158 km/h</p> <p>Lothar : Île de Groix, déc. 1999 162</p> <p>Klaus : Cap Ferret, Biscarosse, 24 janv. 2009 172</p>
Coefficient de marée (La Rochelle La Pallice)	<p>102</p> <p>28 fév. 2010 à 4h27 UT+1 (La Rochelle)</p> <p>102</p> <p>min. mortes eaux 20 40 60 80 100 120</p> <p>vives eaux moyennes : 95</p> <p>maxi vives eaux</p>
Surcote maximale observée à pleine mer (La Rochelle La Pallice)	1.53 m
Hauteur maximale observée à pleine mer (La Rochelle La Pallice)	8.01 m CM 4.51 m NGF
Niveau d'eau extrême de période de retour centennale estimé par le SHOM (La Rochelle La Pallice)	Entre 7.40 et 7.60 m CM Entre 3.90 et 4.10 m NGF

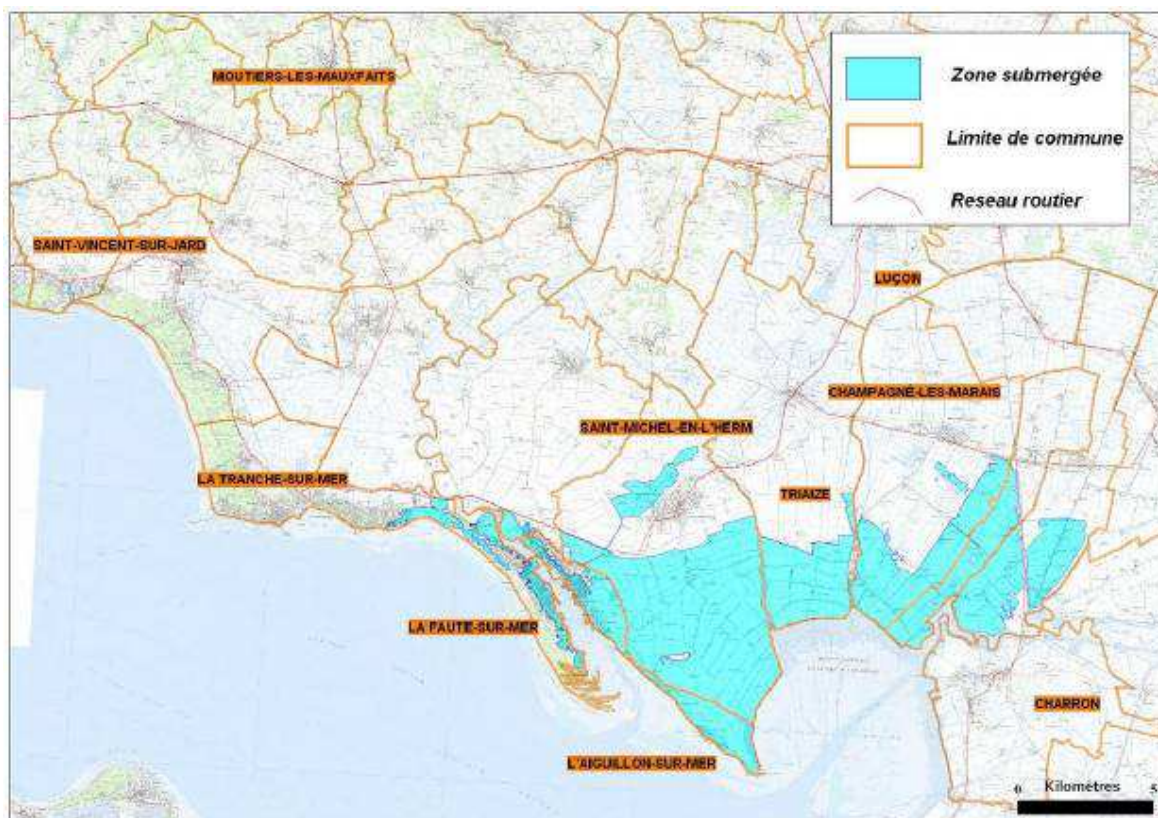
Source : BRLi, SHOM, « Xynthia, une tragédie prévisible »

Figure 5 : Caractéristiques météo-océaniques de la tempête Xynthia par rapport au port de référence de La Rochelle - La Pallice

Cet évènement a été caractérisé comme étant d'une période de retour d'environ 80 à 150 ans.

A noter que les éléments de marée et de vent pris indépendamment sont loin d'être exceptionnels.

La zone d'étude a largement été impactée, comme le montre la carte suivante :



Source : La tempête Xynthia du 28 février 2010 – Retour d'expérience en Loire Atlantique et en Vendée –version provisoire juillet 2010

Figure 6 : Zone inondée durant la tempête Xynthia (donnée issue du REX)

1.3 FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DU LAY AVAL

Le Lay aval est pourvu de plusieurs ouvrages dont les principaux sont les suivants :

- Barrage de Morteveille situé entre les affluents le Marillet et l'Yon
- Porte des Prés Jaillard à la jonction entre le Lay et le Chenal Vieux
- Barrage du Moricq situé en amont du marais de Moricq
- Barrage du Braud qui fait la séparation entre la partie fluviale et la partie maritime

Le Lay fonctionne hydrauliquement suivant deux modes :

- Le mode « hors crue »
- Le mode « en période de crue »

Hors période de crue, le bief situé entre le barrage de Morteveille et le barrage de Moricq est utilisé comme réserve d'eau en période d'étiage pour les besoins des marais. Ce fonctionnement, qui a fait l'objet d'un arrêté préfectoral, peut être utilisé sur une période allant du 1er juin au 1er octobre.

Cette réserve est utilisée pour alimenter les prises d'eau situées en rives droite et gauche. Elle sert notamment à alimenter le Chenal Vieux via la Porte des Prés Jaillard, qui lui-même alimente ensuite la rive gauche du Lay.

Le bief situé entre le barrage de Moricq et le barrage du Braud est utilisé afin de réaliser des chasses régulières et éviter ainsi un ensablement du système (réalisé pour des marées inférieures ou égales à 65).

Cette gestion signifie que le bief est en eau saumâtre et que la limite de salure des eaux est à l'ouvrage de Moricq.

Ces manœuvres de chasse se font en plusieurs temps :

- ▶ Premier temps : le barrage de Moricq est fermé, et le barrage du Braud est ouvert afin de laisser pénétrer les eaux par marée montante.
- ▶ Deuxième temps : le barrage du Braud est fermé afin de contenir les eaux.
- ▶ Troisième temps : le barrage du Braud est rapidement ouvert afin de générer des vitesses d'écoulements suffisantes pour mettre en mouvement les sédiments et les entraîner vers la baie.

En période de crue, tous les barrages sont ouverts et toutes les prises d'eau sont fermées, y compris la porte des Prés Jaillard, isolant ainsi le chenal vieux des crues du Lay.

La zone située en amont du barrage de Moricq est considérée alors comme une zone de stockage en période de crue, phénomène accentué par la fermeture des passages sous l'ancienne voie ferrée, suite à la crue de 1983.



Figure 7 : Principaux ouvrages hydrauliques

2. ETAT DES LIEUX

2.1 RECUEIL ET ANALYSE DES DONNEES EXISTANTES

De nombreuses études ont été réalisées sur le bassin du Lay. Face à l'importance des données existantes collectées auprès des différents organismes rencontrés, une base de donnée a été organisée par grande thématique.

Cette base de données est présentée en annexe 1.

2.1.1 Analyse des études existantes

L'ensemble des études existantes collectées ont été répertoriées et analysées.

Les principales études hydrologiques et hydrauliques sont :

- ▶ Atlas hydraulique du la basse vallée du Lay, 2008,
- ▶ Atlas des zones inondables des fleuves côtiers Vendéens. Lot 2, Le Lay aval. 2008,
- ▶ Atlas des zones inondables de l'Yon en Vendée, 2005,
- ▶ PPRi : rivières Petit Lay, Grand Lay, Lay (partie amont jusqu'à Péault), 2004,
- ▶ Opportunité et faisabilité d'un dispositif de prévision des crues sur le bassin du Lay, 2008.

D'autres documents ont également été particulièrement analysés et utilisés. C'est le cas :

- ▶ des diagnostics de digues exploités pour l'analyse des ouvrages existants (Cf. §2.2),
- ▶ « Tempête Xynthia, retour d'expérience en Loire Atlantique et en Vendée (REX) », notamment utilisé dans le cadre du calage du modèle maritime.

2.1.2 Données sur les ouvrages existants

La collecte de données sur les ouvrages existants revêt une importance particulière, car les caractéristiques géométriques et les modes de fonctionnement sont intégrés au modèle hydraulique afin de décrire au mieux le fonctionnement du système.

D'autre part, l'état de l'ouvrage est un paramètre important dans le cadre de la stratégie d'aménagement afin de définir les besoins en réhabilitation / rehaussement en fonction des risques.

De nombreux éléments ont été collectés et utilisés, notamment les diagnostics de digue déjà cités, et l'étude sur la continuité écologique des cours d'eau Lay et L'Yon.

2.1.3 Données topographiques

2.1.3.1 Données LIDAR

Les données LIDAR réalisées dans le cadre du projet Litto3D ont été collectées et utilisées. Il s'agit de la version 2010 sur l'ensemble de la zone d'étude, et d'une version actualisée (2012) du trait de côte.

2.1.3.2 Profils en long et en travers – Campagne topographique

Parmi les données collectées, on citera :

- ▶ Des données topographiques sur les digues existantes
- ▶ Des profils bathymétriques sur la partie amont du Lay
- ▶ Des données concernant les dimensions des ouvrages, avec pour certain des données altimétriques en mNGF

Après un premier bilan, il s'est avéré que les seules données topographiques existantes n'étaient pas suffisantes et qu'une campagne topographique était nécessaire. Ainsi, en concertation avec le Maître d'Ouvrage, les besoins complémentaires ont été définis, et de nouveaux levés topographiques ont été réalisés pour les besoins de la modélisation (profils bathymétriques et levés d'ouvrages hydrauliques).

2.1.4 Référence altimétrique maritime

Le port de référence le plus proche de la zone d'étude est le port de la Rochelle – La Pallice.

Les différentes données maritimes seront donc liées avec le port de La Rochelle - La Pallice comme référence.

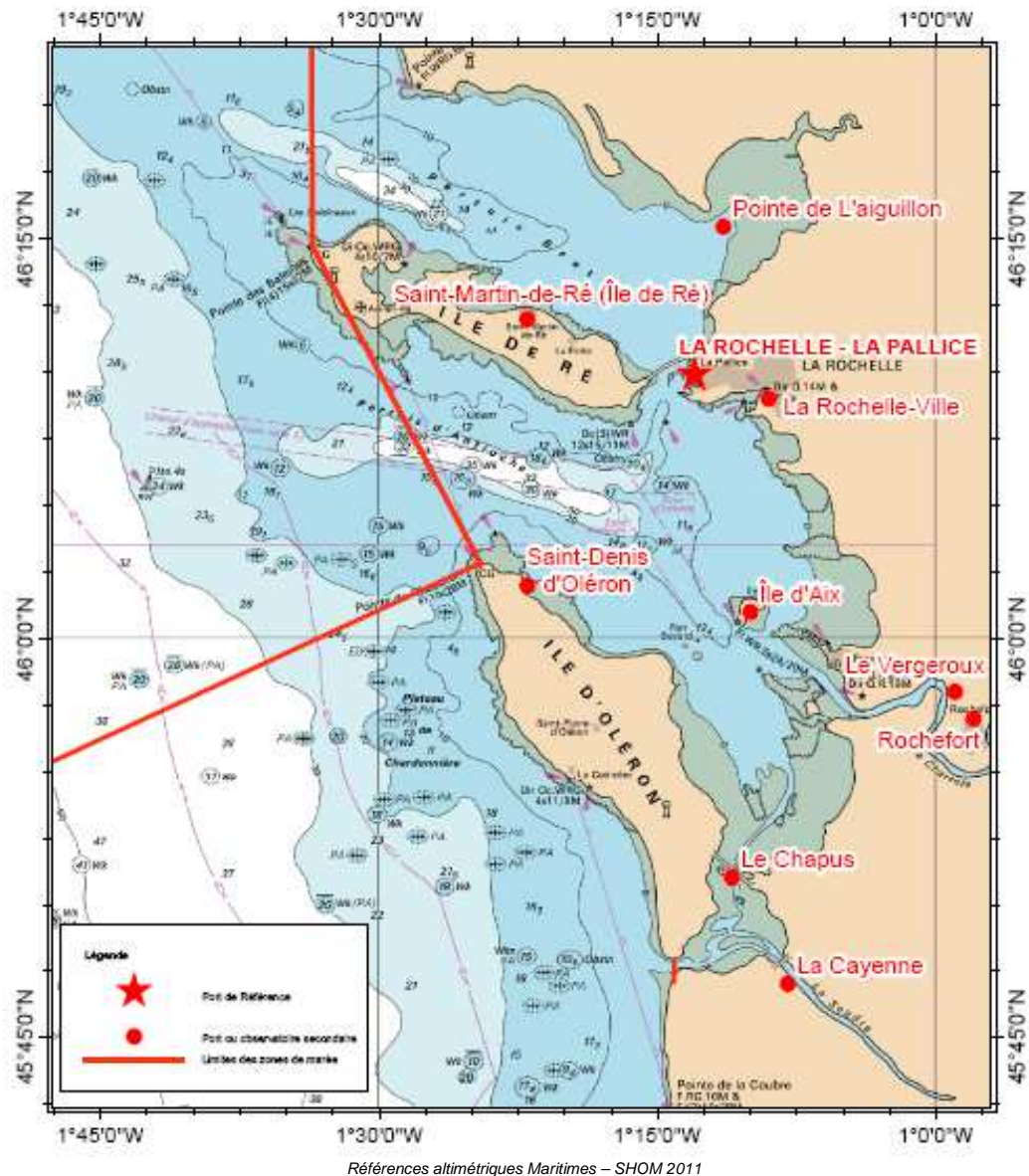


Figure 8 : Port de référence de la zone d'étude

Nom	Repère fondamental	Organisme	Date	ZH/RF	RF/Ref	ZH/Ref	RF/GRS80	Ref
La Rochelle - La Pallice	O.O.K3-126	IGN	1999	9.107	5.603	-3.504	52.60	IGN69
Pertuis Charentais	O.HO-42	IGN	1995	8.056	4.552	-3.504		IGN69
Saint-Martin-de-Ré (Île de Ré)								
Pointe de L'Aiguillon ²								
La Rochelle-Ville ²								
Saint-Denis d'Oléron	O.O.P3-66	IGN	1986	7.764	4.351	-3.413		IGN69
Île d'Aix	Douille dans le palier du port de l'île d'Aix	SHOM	1973	6.260	2.720	-3.540		IGN69
La Charente								
Le Vergeroux ²								
Rochefort ¹	O.O.K3-7F Bis	IGN	1995	7.583	4.043	-3.540		IGN69
Le Chapus	O.O.K3P3-21	IGN	1999	7.670	4.148	-3.522		IGN69
La Cayenne ²								

Références altimétriques Maritimes – SHOM 2011

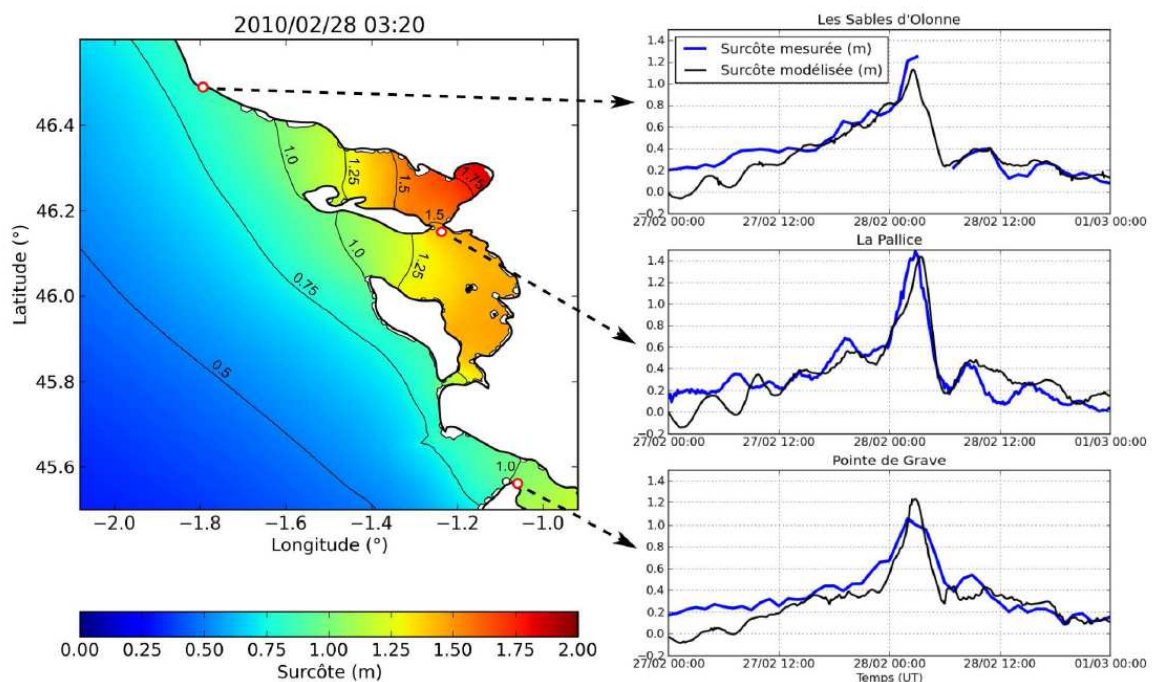
Figure 9 : Références altimétriques

2.1.5 Données de forçage du modèle maritime

Pour l'optimisation du modèle de submersion marine, nous utilisons des résultats du modèle de marée et de circulation océanique mis au point par l'Université de La Rochelle à l'échelle de l'Atlantique Nord et affiné au niveau des pertuis charentais. Ce modèle donne à l'échelle régionale les surcotes obtenues lors de la tempête Xynthia, **en reproduisant les effets combinés de la marée, des surcotes liées au vent et aux houles (wind setup et wave setup)** sur le secteur.

Seul ce modèle semble avoir été en mesure de reproduire la surcote observée au niveau de l'estuaire du Lay et de la baie de l'Aiguillon intégrant les effets combinés de la marée, du vent et de la houle.

Ci-dessous une illustration des surcotes calculées à l'échelle régionale, ainsi que les graphes comparant les surcotes mesurées et modélisées :



Importance de l'âge des vagues et de la résonance sur le plateau continental : le cas de la tempête Xynthia, février 2010

Figure 10 : Surcote dans les Pertuis Charentais

Ce modèle donne des résultats d'une très bonne précision au niveau de la zone d'étude (port de référence La Pallice).

Deux articles (dont l'un publié dans une revue scientifique de rang international) décrivant plus précisément ce modèle et ces résultats sont fournis en annexe 2 de ce rapport.

A noter que les résultats utilisés issus du modèle de l'Université de La Rochelle ne prennent pas en compte les débordements par-dessus les digues (prise en compte d'un mur fictif). Ceci peut avoir pour effet une surestimation des cotes en négligeant les volumes déversés sur les digues. Dans le cadre d'une modélisation avec des brèches et ruptures de digue, ce choix est plutôt sécuritaire, et parfaitement adapté pour les simulations de l'état aménagé de rehausse des digues.

2.1.6 Données de calage

2.1.6.1 Secteur fluvial

Les crues historiques de référence qui serviront à caler le modèle hydraulique sont les crues de 1983 et 1999. Leurs caractéristiques et leur utilisation pour le calage sont décrits dans les chapitres 3.2 Analyse hydrologique et 3.3.2 Modèle fluvial.

2.1.6.2 Secteur Maritime

L'élément historique retenu pour le calage du modèle est la tempête Xynthia. Le calage du modèle sur cet évènement récent et bien ancré dans les mémoires est facilité par de nombreuses données.

Le document « La tempête Xynthia du 28 février 2010 – Retour d'expérience en Loire Atlantique et en Vendée – septembre 2012 (REX) » réalise une synthèse de ces données et fournit l'essentiel des éléments de calage : zones inondées et surtout hauteurs de submersion.

Le calage sera réalisé sur les hauteurs de submersion, ces données sont factuelles et permettent une comparaison quantitative REX/modèle.

2.1.7 Données pluviométriques et hydrométriques

Pour les besoins des analyses et calculs hydrologiques, des données pluviométriques et hydrométriques ont été collectées, notamment pour reconstituer les crues historiques de 1983, 1999 et 2011, éléments de calage des modèles hydrologiques et hydrauliques (Extraction des données hydrométriques de la Banque Hydro et des données pluviométriques de la Climathèque Météo France) :

- ▶ Crue du 12 au 22 décembre 2011 ;
- ▶ Crue du 28 septembre au 2 octobre 1999 ;
- ▶ Crue du 5 au 15 avril 1983.

A noter que les éléments disponibles n'ont pas permis de reconstituer les hydrogrammes de la crue historique de 1960.

Les postes et stations utilisés sont les suivants :

POSTES PLUVIOGRAPHIQUES :

- ▶ 79320002 : Surin SAPC
- ▶ 85092004 : Fontenay
- ▶ 85182004 : Pouzauges SA

- ▶ 85191003 : La Roche sur Yon
- ▶ 85215002 : Saint Fulgent SAPC
- ▶ 85216001 : Sainte Gemme LA

Remarque : Pour l'évènement de 1983, nous n'avons pas pu collecter de données horaires (pas de données horaires disponibles sur la Climathèque Météofrance avant 1995). En revanche, nous disposons de pluies journalières pour cet évènement.

STATIONS HYDROMETRIQUES :





- ▶ N3308210 : La Doulaye jusqu'à Moutiers sur le Lay
- ▶ N3301610 : Le Lay depuis sa source jusqu'à Mareuil sur Lay
- ▶ N3304120 : Le Marillet jusqu'à Saint Florent des Bois
- ▶ N3403010 : L'Yon jusqu'à Dompierre
- ▶ N3423020 : L'Yon jusqu'à Moulin de Rambourg
- ▶ N3001610 : Le Grand Lay à Saint-Prouant
- ▶ N3024010 : Le Loing à Chantonay
- ▶ N3222010 : La Smagne à Sainte-Pexine

2.1.8 Reconnaissances de terrain

Des reconnaissances de terrain ont été réalisées du 24 au 28 septembre 2012 et avaient pour principaux objectifs :

- ▶ De visiter les principaux ouvrages influant les écoulements en période de crue ;
- ▶ D'apprécier au mieux le comportement du cours d'eau lors de fortes pluies ;
- ▶ Mieux comprendre les mécanismes de débordement ;
- ▶ Analyser la morphologie des axes d'écoulement (y compris par rapport aux besoins en levés topographiques) ;
- ▶ Identifier les nœuds hydrauliques pouvant influencer sur le fonctionnement.

Les photographies ci-après illustrent quelques sites et ouvrages.

	
<p><i>Vue depuis l'amont du barrage du Mortevieille</i></p>	<p><i>Pont du Port la Claye pouvant être à l'origine d'une restriction de débit</i></p>
	
<p><i>Digue rive gauche estuaire du Lay</i></p>	<p><i>Ecluses du Polder 1</i></p>

2.2 ANALYSE DES OUVRAGES EXISTANTS

Les ouvrages existants ont fait l'objet de diagnostics dans le cadre de diverses études, synthétisés dans un document spécifique « synthèse des diagnostic d'ouvrages ».

2.2.1 Diagnostics des digues fluviales

Les ouvrages de défense contre les inondations du Lay Aval, entre Port-la-Claye et le Barrage du Braud, ont été diagnostiqués par Arcadis au cours du printemps 2011.

Ces relevés ont été réalisés par voie terrestre et fluviale, et sont synthétisés sous forme de fiches descriptives.

A noter que l'intégralité du linéaire des ouvrages n'a pas pu être diagnostiquée, du fait de la végétation très dense sur certaines zones.

Le linéaire a été divisé en tronçons, pour lesquelles l'érosion ou l'altération a été évaluée de manière semi-quantitative (indice de 1 à 3).

Les différentes visites, réalisées dans le cadre de l'étude Arcadis, ont permis de relever un grand nombre de désordres, dont les origines sont essentiellement les suivantes :

- ▶ Le courant hydraulique :
 - les variations de débit et de vitesse d'écoulement des eaux lors d'épisodes de crues : ces modifications du régime hydraulique ont pour effet d'éroder les berges,
 - à proximité des barrages : des perturbations hydrauliques locales, avec des vitesses de courant turbulent importantes, sont générées,
- ▶ Le creusement des terrains constituant les digues par différents animaux fouisseurs (ragondins, lapins, renards,...). Ces terrassements ont pour effet non seulement de fragiliser les digues, mais également d'altérer de façon très significative la fonction d'étanchéité que doivent remplir les digues artificielles constituées de matériaux argileux.

L'érosion de base des talus provoque un raidissement de la pente, ce qui a pour conséquence de provoquer des glissements du talus, et ce d'autant plus quand les matériaux sont saturés.

Une dégradation du pied de digue par ruptures successives peut ainsi conduire à l'ouverture d'une brèche.

Certains secteurs sont pourvus de pieux en bois et de grillage permettant un soutènement des berges. Toutefois, le grillage situé en zone de « marnage » entraîne une corrosion rapide des grillages qui retiennent la blocaille. La diminution de l'épaisseur d'acier liée à la corrosion peut conduire à la rupture du grillage. Le dévers de soutènement observé localement peut provenir d'un défaut d'ancrage ou d'un fluage des terrains.

L'analyse menée par Arcadis permet de constater une grande hétérogénéité dans la dynamique érosive des ouvrages. Elle conclue à la nécessité de mener des travaux à très court terme sur les zones d'érosion importante des berges. C'est notamment le cas lorsque le pré-Lay (zone de risberme) est inexistant, l'érosion concernant alors directement le corps de digue.

Cas particulier de la digue des Tendres : cette digue, dont la configuration fait plutôt penser à une simple levée de terre qu'à une véritable digue, a été réalisée en urgence et présente une très faible largeur. Les matériaux sont issus du curage du fossé en pied de digue et n'ont probablement pas été compactés. Compte-tenu des matériaux de la digue et de sa configuration, on peut penser que lors de crues, et donc de sa mise en charge, son étanchéité ne sera pas suffisante. En l'état, l'efficacité de la digue peut être remise en cause.

Les analyses détaillées des digues ont été synthétisées dans le cadre de la présente étude en affectant à chaque tronçon un indice de 1 à 3, 1 correspondant à un bon état et 3 à un mauvais état de l'ouvrage. Cet indice intègre les observations faites par Arcadis, concernant les désordres linéaires relatifs à l'érosion, et les désordres ponctuels de nature géotechnique ou associés à la végétation.

2.2.2 Diagnostics des principaux ouvrages hydrauliques fluviaux et maritimes

Douze des principaux ouvrages du Lay aval ont été diagnostiqués par Arcadis en 2011. Les ouvrages sont les suivants :

1. Barrage du Braud

2. Barrage de Moricq
3. Ecluse de la Baraquine
4. Ecluse du clos Buet
5. Porte des Boutolles
6. Porte des Frais
7. Prise d'eau de la Fourchée
8. Porte des Faucherais
9. Prise d'eau du Polder 1
10. Ecluse de dénoisement du Polder 1
11. Ecluse du canal de la Raque
12. Ecluse de la digue des Wagons

Après un rappel des caractéristiques connues de l'ouvrage, des fiches de diagnostic présentent les principales constatations et désordres, leurs localisations sur les ouvrages et les causes possibles. De nombreuses photos permettent d'illustrer ces désordres.

On retrouve essentiellement des fissures et des éclats dans le béton, des corrosions pouvant être importantes, notamment sur les rideaux de palplanches, les mécanismes, ainsi que sur les armatures des poutres et tabliers en béton armés. Souvent des coulées de calcite témoignent de circulations d'eau dans les fissures, où les carbonates de béton sont solubilisés, avant d'être reprécipités en contact avec l'air. Parfois les ouvrages présentent des résurgences, des tassements et des défauts d'alignement.

Suite à une appréciation sur l'état des ouvrages, l'étude Arcadis propose des travaux de réfection ainsi qu'une estimation des coûts de mise en œuvre.

2.2.3 Synthèse des diagnostics de digues maritimes

Les digues maritimes du bassin du Lay ont été inspectées au cours du mois de décembre 2012 par DHI dans le cadre de l'élaboration des PPRL.

Les diagnostics réalisés se présentent sous forme de fiches ouvrages, rappelant l'emplacement de l'ouvrage, sa nature, sa fonction principale (protection, fixation de trait de côte,...), son orientation, la zone d'implantation vis-à-vis de la mer, ses principales dimensions et la vulnérabilité des enjeux protégés.

Les fiches fournissent un croquis du profil de l'ouvrage, ainsi qu'un relevé lidar marquant le niveau de référence. D'éventuelles dégradations historiques sont rappelées, et des informations semi-quantitatives sont apportées vis-à-vis de l'érosion : érosion régressive, de contact ou interne.

Enfin, une appréciation du rôle de l'ouvrage dans le PPRL est fournie au travers de l'état structurel général, des enjeux protégés, et du niveau de service de la digue. Quelques photos de l'ouvrage sont également présentées.

Un des principaux constat est lié à la hauteur de la crête, trop basse par rapport au niveau de référence. Ceci s'explique par l'augmentation récente de cette hauteur de référence suite à la tempête Xynthia, ainsi que par un tassement des ouvrages depuis leur construction, ou encore à un piétinement des crêtes.

Les ouvrages récemment rénovés présentent une hauteur de crête supérieure à la hauteur de référence, ce qui pourrait provoquer des contournements en cas de surcote.

La sollicitation de certains ouvrages par la houle engendre également des altérations accentuées. Des désordres d'ordre structurels sont ainsi relevés, comme des enrochements non ancrés, des affouillements en pied d'ouvrage ou des couronnements perméables.

Plusieurs ouvrages sont estimés comme pouvant faire l'objet d'une rupture par brèche localisée.

Les analyses détaillées des digues ont été synthétisées dans le cadre de la présente étude en affectant à chaque tronçon un indice qui correspond à l'état structurel donné par DHI (1 correspondant à bon, et 3 à mauvais).

L'état des ouvrages est présenté sur les cartes de synthèse du diagnostic de l'atlas cartographique joint.

2.2.4 Erosion du trait de côte

En 2008, le cabinet DHI - pour la DDE de Vendée - a décrit les phénomènes d'érosion sur le littoral². Cette étude, établie sur tout le littoral vendéen, a analysé son évolution par unité sédimentaire homogène.

Dans le présent dossier, l'unité sédimentaire du littoral correspond à l'estuaire du LAY et l'anse de l'Aiguillon (de La Tranche sur Mer à Triaize) ainsi qu'à une partie de l'unité sédimentaire comprise entre Les Sables d'Olonne et La Tranche sur Mer pour la commune de Longeville sur Mer.

2.2.4.1 Description morphologique

2.2.4.1.1 Unité sédimentaire des Sables d'Olonne à La Tranche sur Mer

Cette unité s'étend sur près de 30 kilomètres, et présente quatre faciès différents :

- les falaises de roches dures, entre les Sables-d'Olonne et la limite Sud de Bourgenay ;
- les falaises de roches tendres, depuis le Sud de Bourgenay jusqu'à Saint-Vincent-sur-Jard ;
- la flèche sableuse du Veillon, édifiée en travers de l'estuaire de la Payré ;
- le cordon littoral, de Saint-Vincent-sur-Jard à La Tranche-sur-Mer

² Etude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen – rapport de synthèse de la tranche ferme, DHI, février 2008

Seul le cordon littoral compris entre Saint Vincent sur Jard et La Tranche sur Mer sont inclus à la présente étude. Elle s'étend de l'Est de l'Anse de Saint-Vincent-sur-Jard, au débouché de la petite rivière du Goulet, jusqu'à la Tranche sur Mer. La forêt domaniale de Longeville s'est développé sur ce cordon.

Il s'agit d'une flèche sableuse, qui s'est développée en bordure du Marais Poitevin et qui a progressée vers le sud jusqu'au platier de la Pointe Grouin du Cou. Elle a ensuite évolué en cordon dunaire qui atteint aujourd'hui 12 kilomètres de long. Ce cordon présente une largeur pouvant atteindre 1800 mètres et des altitudes comprises entre 5 et 12 mètres.

2.2.4.1.2 Unité sédimentaire de La Tranche sur Mer à Triaize

La bordure occidentale du marais Poitevin est constituée par un rivage sableux qui prend appui sur les affleurements de calcaires jurassiques ainsi que par les rivages vaseux (estuaire du LAY et anse de l'Aiguillon).

De la Tranche sur Mer à la pointe de l'Aiguillon, la géomorphologie littorale est marquée par l'existence de deux importantes flèches qui se sont développées vers le sud est, en raison d'un transport de sables d'ouest en est sous l'action d'une dérive littorale dirigée vers le sud-est. Elles correspondent à deux flèches sableuses larges (Aiguillon : 700 m ; Arçay : 900m) et longues (Aiguillon : 13 km ; Arçay : 9 km). Elles sont situées dans un environnement hydrodynamique principalement dominé par les courants de marée mais où la houle atteint sa pénétration maximale dans le pertuis Breton.

L'évolution de ces flèches sableuses est très dynamique. Celles-ci représentent une alimentation par la dérive littorale orientée nord-ouest/sud-est et à moins d'aménagements dans la zone littorale en aval, la pointe d'Arçay continuera à progresser. Ainsi l'évolution de ce cordon littoral et l'évolution de l'estuaire du LAY maintiennent aujourd'hui un caractère particulièrement dynamique.

D'un point de vue sédimentologique, ce secteur se situe à la transition entre une zone de sédiments à dominance sableuse (Ouest de la Pointe d'Arçay) et une zone dominance vaseuse (Est de la pointe de l'Aiguillon).

D'un point de vue géomorphologie, c'est uniquement à partir du 18^{ème} siècle que la Pointe d'Arçay se développe sur la rive droite du LAY, en formant successivement des crochons avançant ainsi de plus de 3 km entre 1824 et 1977 avec une progression annuelle de l'ordre de 20 m.

Il est important toutefois de souligner que le taux d'accroissement de la pointe d'Arçay – mesuré en surface gagnée sur la mer – diminue depuis le 18^{ème} siècle, une diminution de 35 000 m²/an à 13 000 m²/an en deux siècles.

Malgré l'accumulation de sédiments dans la flèche sableuse, une partie des sables transite de la Pointe d'Arçay vers la Pointe de l'Aiguillon. Le déplacement de ces sables s'effectue le long du rivage et subissent un affinement de la granulométrie. On observe donc un ensablement du chenal du LAY et une distribution différentielle des sables en fonction de la taille.

Ainsi le chenal du LAY joue un rôle de piège à sédiment, seuls les sables les plus fins atteignent le littoral aiguillonnais.

En plus, le colmatage de la Baie de l'Aiguillon, ainsi que la sédimentation vaseuse importante sur les rives abritées du LAY ont pour conséquences directes de diminuer la durée de capacité d'évacuation du jusant par rapport à celle du flot. Seuls les sables ayant une granulométrie inférieure à 0.2 mm pourront être mobilisés par les courants de marée.

Il est important de souligner que des dragages sont régulièrement effectués dans l'estuaire du LAY, Domaine Public Maritime (DPM) pour maintenir un chenal navigable. A titre indicatif, lors d'un dragage en septembre – novembre 2006, l'extraction a été de 50 000 m³ ; 9 000 m³ en 2008 ; 15 000 m³ en 2009 et 15 000 m³ envisagés en 2011³.

2.2.4.2 Evolution du trait de cote

L'évolution du trait de côte résulte des gradients dans la dérive littorale. Dans l'étude DHI 2008, l'évolution historique du trait de côte issue de l'analyse des photos aériennes de 1975 et 2001, a été reproduite à travers une modélisation du régime hydrosédimentaire basée sur des données représentatives de cette période.

2.2.4.2.1 Unité sédimentaire des Sables d'Olonne à La Tranche sur Mer

Le transport sédimentaire net du cordon en avant de la Forêt domaniale de Longeville est stable. La capacité de transport net est de plus ou moins 25 000 m³/an dans la direction Nord-Sud selon les variations interannuelles du climat de houle.

Il n'y a toutefois pas de fuite de sable vers l'unité sédimentaire située au sud via la Pointe Grouin du Cou.

Le secteur du Goulet sur la commune de Longeville sur Mer est marqué par l'érosion de son trait de côte (-1.2 m/an).

³ Gestion sédimentaire de l'estuaire du LAY, étude de définition – note de problématique, DDTM de la Vendée, version de février 2011

Aléa d'érosion et de submersion

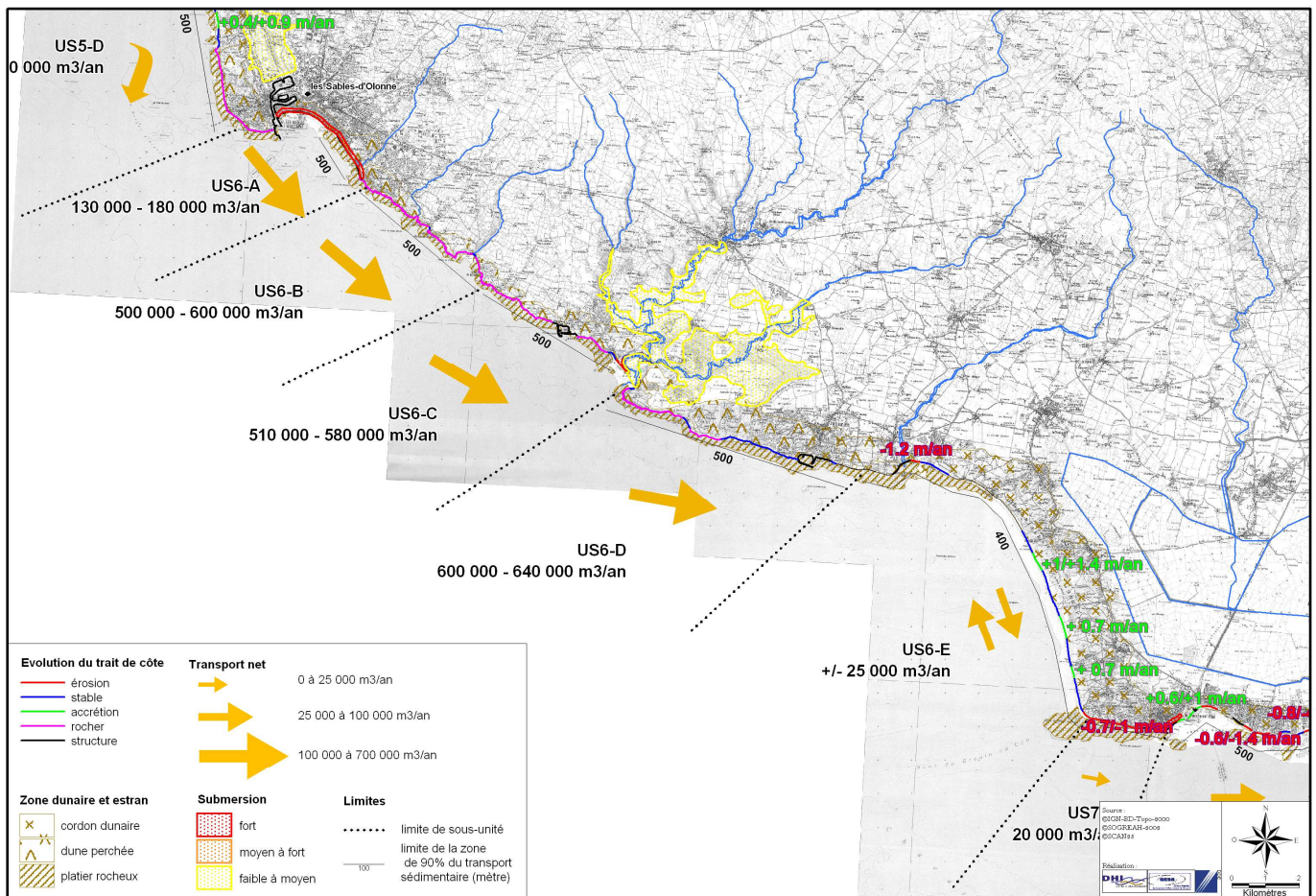


Figure 11 : zones d'érosion et d'accrétion de l'unité sédimentaire des Sables d'Olonne à La Tranche sur mer (DHI, 2008)

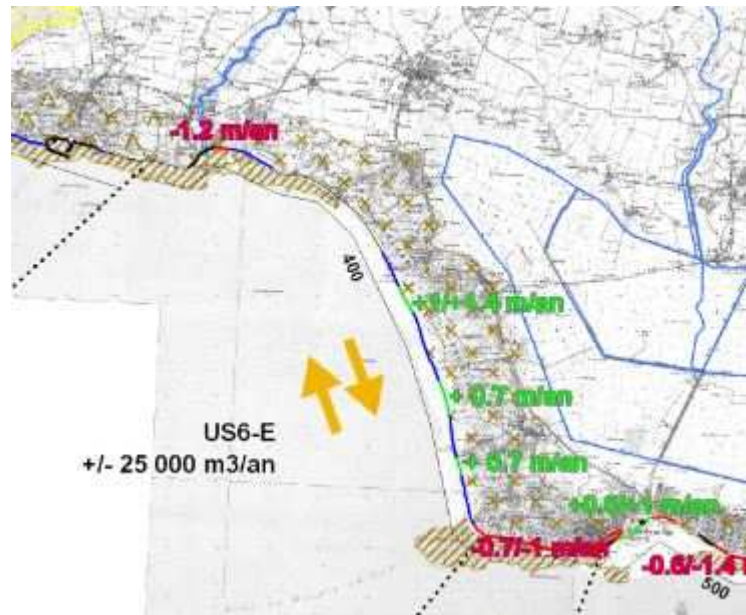


Figure 12 : zones d'érosion et d'accrétion - zoom sur le secteur de la Forêt domaniale de Longeville (DHI, 2008)

2.2.4.2.2 Unité sédimentaire de La Tranche sur Mer à Triaize

A court terme, il peut être admis que la variabilité du climat de houle observée de 1979 à 2001 est suffisamment représentatif de la variabilité climatique des 20 années à venir. Il s'en suit que l'évolution historique des deux dernières décennies du 20^{ème} siècle peut être extrapolée aux deux premières décennies du 21^{ème} siècle. De manière générale, une prévision de la localisation du trait de côte en 2027 peut donc être obtenue en multipliant les taux d'évolution annuels observés entre 1975 et 2001 par 20.

L'analyse des photos aériennes de 1975 et 2001 fait apparaître les grandes tendances des secteurs en érosion / accrétion ou stables :

- Le secteur entre la plage des Générelles et la Belle Henriette est en érosion significative avec des taux de -1 m/an pour le premier et de -5 m/an pour le second.
- Le littoral de la pointe d'Arçay est en accrétion dans sa partie Nord et en érosion / accrétion au Sud. Le reste du littoral est globalement structuré sauf sur la pointe de l'Aiguillon dont la façade Ouest est en érosion alors que sa façade Est est en accrétion. A noter que cette analyse n'est valable que pour les portions de côte sableuse.
- Les aléas de submersion sont très nombreux sur cette unité dû aux zones marécageuses de la pointe de l'Aiguillon. Au total on compte 5150 ha de terres submergées dont 609 ha avec un aléa fort, 487 ha avec un aléa fort à moyen et 4054 ha avec un aléa faible à moyen.

L'étude DHI, commanditée par l'Etat a ainsi permis de dresser une carte indiquant sur le trait de côte, les zones d'érosion et d'accrétion d'une unité homogène bien identifiée.

3. CARACTERISATION DE L'ALEA INONDATION

3.1 DETERMINATION DES SCENARIOS ETUDIES

Dans le cadre de l'élaboration d'un PAPI, trois typologies de scénarios d'inondation doivent être étudiés :

- ▶ un événement occasionnant les premiers débordements ;
- ▶ un événement correspondant à une occurrence centennale ;
- ▶ un événement extrême aux conséquences exceptionnelles.

Les scénarios correspondant suivants ont été retenus :

- ▶ Scénario de premiers débordements
 - Maritime : analyse de la période de retour de l'évènement entraînant les premières submersions pouvant impacter des zones à enjeux.
 - Fluvial : analyse des événements de différentes périodes de retour avec comme condition limite aval le niveau marin des premières submersions maritime et choix de l'occurrence entraînant les premiers débordements sur les zones à enjeux.
- ▶ Scénario d'occurrence centennale
 - Maritime : Xynthia sans apport fluvial avec condition de digue 2012 sans rupture.
 - Fluvial : crue de période de retour 100 ans, utilisant comme condition limite aval, un niveau marin correspondant aux premiers débordements.
- ▶ Scénario extrême
 - Maritime : Xynthia + 20cm concomitant avec une crue décennale sur le Lay, avec conditions de digues 2012 sans rupture. Comme les résultats de premiers débordements le montrent, ce scénario peut être assimilé à un évènement maritime exceptionnel couplé à un évènement de premier débordement sur le Lay.
 - Fluvial : crue de période de retour 500 ans, avec comme condition limite aval, un niveau marin correspondant aux premiers débordements.

Ces scénarios ont fait l'objet de discussions en commission de coordination des trois PAPI du pourtour de la baie de l'Aiguillon. L'objectif était de s'assurer d'une cohérence entre les hypothèses retenues dans chacun des PAPI.

Les hypothèses supplémentaires suivantes ont également été retenues :

- ▶ **Impluvium** : comme indiqué ci-après, les modélisations montrent un impact faible de l'impluvium. Afin de gagner en terme de lisibilité, l'impluvium n'est pas pris en compte dans le cadre des simulations des différents scénarios.
- ▶ **Ouvrage du Braud** : l'ouvrage du Braud est assimilé à un clapet :
 - Lorsque le niveau marin est important, supérieur au niveau fluvial, le clapet est fermé. Pas d'échange.
 - Lorsque le niveau marin est plus faible que le niveau fluvial, le clapet est ouvert.

- **Concomitance entre le pic de crue du Lay et les marées** : en considérant un évènement type 1983, la largeur de l'hydrogramme reconstituée au niveau de sa pointe couvre un cycle entier de marée. Il y a donc, à un moment de la crue, concomitance entre le pic de crue et le pic de marée. Les simulations réalisées considèrent ainsi une concomitance entre le pic de la marée et le pic de la crue.

► **Prise en compte du cordon dunaire de la Belle Henriette :**

Ce secteur a été particulièrement impacté par la tempête Xynthia : treize brèches se sont formées sur le cordon de premier rang. D'après l'étude « *Prévision d'évolution du trait de côte de la Belle Henriette* » (DHI – 2007), le secteur est en érosion. D'après l'étude « *Programme d'actions pour la prévention des submersions marines sur le Secteur de la Belle Henriette* » (CETE de l'Ouest ⁴– 2012), le cordon dunaire n'est pas considéré comme fiable pour la protection contre les submersions marines.

Au vu de ces éléments, il est convenu d'effacer le cordon dunaire pour la modélisation du deuxième scénario (Xynthia sans apport fluvial avec condition de digue 2012 sans rupture) et pour celle du troisième scénario (Xynthia +20cm concomitant avec une crue décennale sur le Lay, avec condition de digue 2012 sans rupture).

Le cordon est arasé à la cote +3mNGF. Un petit merlon situé juste à l'Ouest du cordon de premier rang (près du secteur urbain des Rouillères) est également arasé car il n'a pas vocation à être entretenu et ne peut pas être considéré comme une digue.

La figure suivante illustre la prise en compte de l'arasement du cordon dunaire :

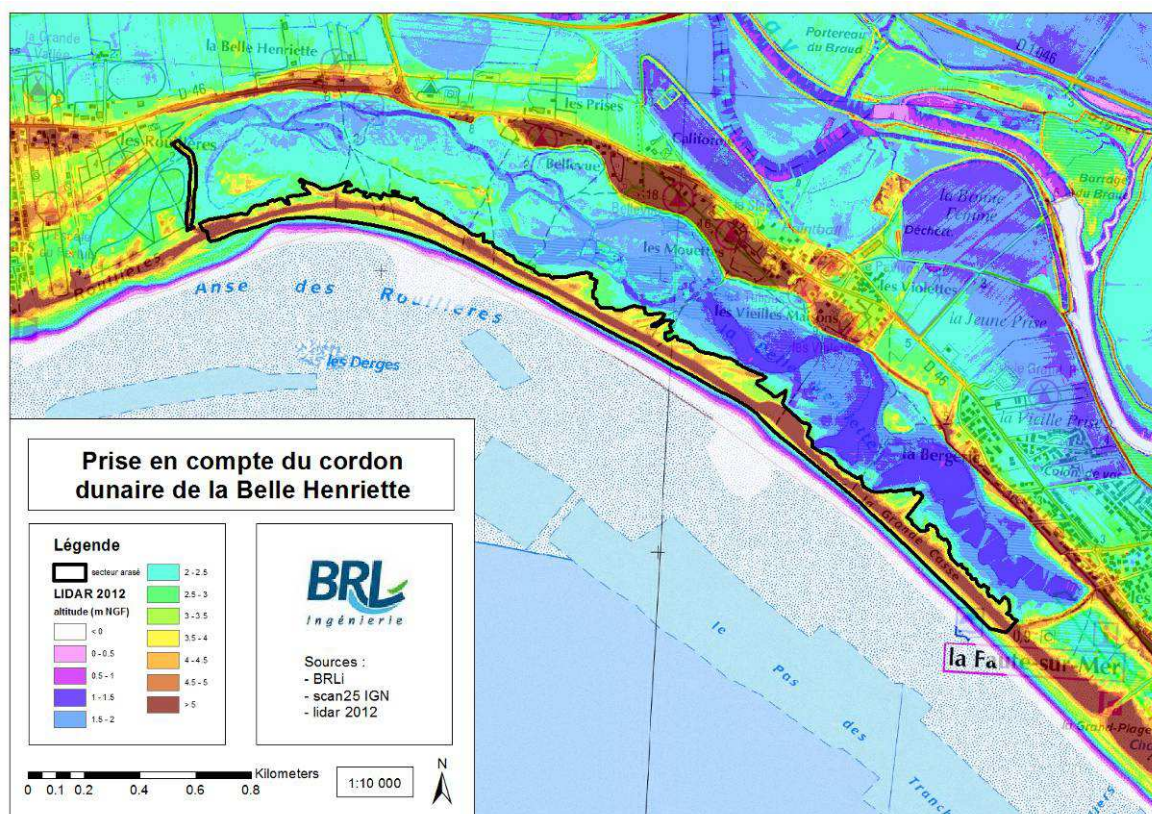


Figure 14 : Prise en compte de l'arasement du cordon dunaire de la Belle Henriette

⁴ Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de l'Ouest

3.2 ANALYSE HYDROLOGIQUE

3.2.1 Présentation des bassins versants

Les bassins versants sont présentés de façon simplifiée sur fond topographique sur la carte ci-après mais également dans l'atlas cartographique joint.

Le bassin versant du Lay possède une superficie globale de 2 165 km² (incluant les marais de la partie aval).

A son origine, le Lay se compose du Petit Lay, du Grand Lay, du Loing et de la Smagne, quatre affluents qui forment un bassin versant de 1044 km² au droit de Mareuil-sur-Lay. Les reliefs sont marqués à l'amont et s'adoucissent rapidement après leur confluence.

Au niveau du Mareuil-sur-Lay, les eaux du Marillet rejoignent le Lay. Cet affluent draine un bassin de 184 km². Puis c'est le tour de l'Yon et du Graon, au droit de Noailles, de venir confluer avec Lay en drainant respectivement des bassins de 360 km² et 63 km².

Dans sa partie aval, la pente du Lay s'affaiblit encore pour traverser la zone de Marais. Ces derniers ne font pas partie du bassin versant du Lay, leurs exutoires étant situés à l'entrée de l'estuaire. A noter la présence de Troussepoil, à l'ouest de la zone d'étude, qui vient alimenter le marais de Moricq. Il possède un bassin versant de 67 km².

Le tableau suivant résume les caractéristiques morphologiques des bassins versants :

Cours d'eau	Surface BV (km ²)	Linéaire (km)	Pente moyenne pondérée
Le Lay jusqu'à Mareuil	1044	80	0.160%
Le Marillet jusqu'à sa confluence	184	28	0.274%
L'Yon jusqu'à sa confluence	360	55	0.113%
Le Graon jusqu'à sa confluence	63	17	0.169%
Le Troussepoil jusqu'au marais de Moricq	67	17	0.110%
Le Lay depuis Mareuil jusqu'à la RD1046	167	37	0.002%
Les marais desséchés de Moricq	53	-	-
Les marais mouillés mouillés de Luçon 1	87	-	-
Les marais de Triaize	26	-	-
Les marais desséchés de St Michel en l'Herm + polders	47	-	-
Les marais de St Michel en l'Herm	37	-	-
Le Lay et la zone de la Tranche/la Faute	30	-	-

Figure 15 : Caractéristiques morphologiques des bassins versants du Lay et de ses affluents

Les bassins versants sont principalement composés de prairie, et en moindre mesure de forêts. L'urbanisation est globalement faible mis à part dans la zone littorale. Le tableau suivant donne l'occupation des sols des bassins versants :

Cours d'eau	Bâti	Forêt	Prairie	Eau libre	Autres
Le Lay jusqu'à Mareuil	2.8%	6.3%	90.4%	0.3%	0.3%
Le Marillet jusqu'à sa confluence	2.5%	6.2%	90.1%	0.8%	0.3%
L'Yon jusqu'à sa confluence	6.1%	2.1%	89.8%	0.4%	1.7%
Le Graon jusqu'à sa confluence	2.5%	5.3%	90.5%	1.3%	0.4%
Le Trousepoil jusqu'au marais de Moricq	2.4%	6.2%	91.2%	0.3%	0.0%
Le Lay depuis Mareuil jusqu'à la RD1046	2.7%	0.8%	96.6%	0.0%	0.0%
Les marais desséchés de Moricq	5.0%	13.1%	81.3%	0.2%	0.4%
Les marais mouillés mouillés de Luçon 1	4.7%	3.2%	91.3%	0.6%	0.2%
Les marais de Triaize	0.7%	0.0%	99.3%	0.0%	0.0%
Les marais desséchés de St Michel en l'Herm + polders	3.1%	0.0%	95.5%	0.9%	0.4%
Les marais de St Michel en l'Herm	2.0%	0.0%	96.6%	0.0%	1.4%
Le Lay et la zone de la Tranche/la Faute	20.2%	22.5%	29.7%	8.8%	18.8%

Figure 16 : Occupation des sols des bassins versants de Lay et de ses affluents

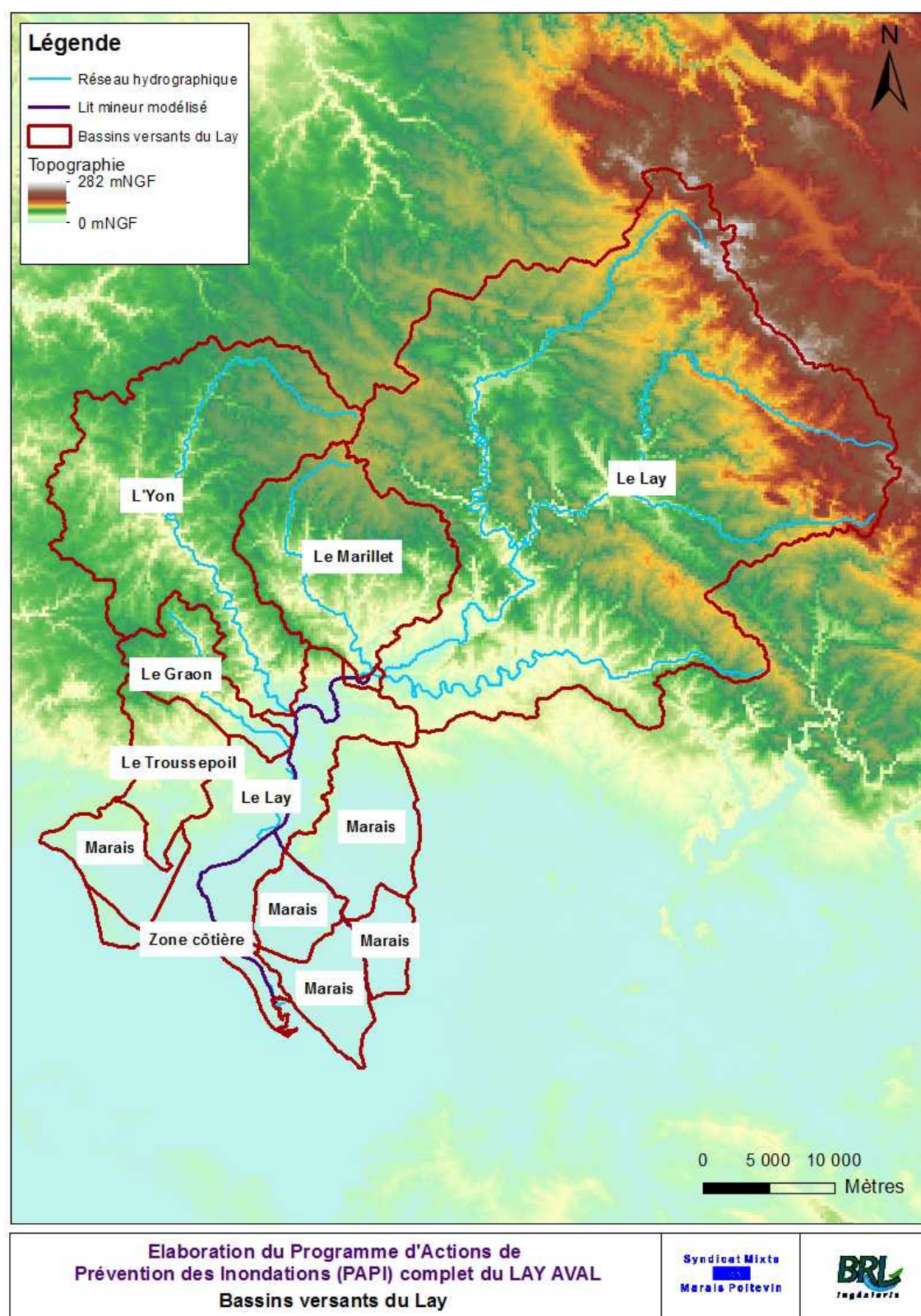


Figure 17 : Carte du bassin versant du LAY

3.2.2 Construction des hydrogrammes de crue

L'analyse hydrologique a pour but de construire les hydrogrammes de crues à injecter dans le modèle hydraulique fluvial.

Les crues étudiées sont de deux types :

► Les crues réelles observées

Dans le cadre de la présente étude, il s'agit des trois crues suivantes :

- Crue du 12 au 22 décembre 2011,
- Crue du 28 septembre au 2 octobre 1999,
- Crue du 5 au 15 avril 1983.

Les crues réelles observées ont servi au calage du modèle hydrologique et du modèle hydraulique.

► Les crues fréquentielles théoriques

Dans le cadre de la présente étude, il s'agit des sept crues suivantes :

- Crue de période de retour 2 ans (biennale),
- Crue de période de retour 5 ans (quinquennale),
- Crue de période de retour 10 ans (décennale),
- Crue de période de retour 20 ans (vicennale),
- Crue de période de retour 50 ans,
- Crue de période de retour 100 ans (centennale),
- Crue de période de retour 500 ans.

Les crues fréquentielles permettent de caractériser le fonctionnement du bassin versant en associant l'intensité de la crue à une fréquence d'apparition.

Les hydrogrammes à injecter ont été construits en fonction des différents types de zones d'apports définies dans le modèle hydraulique et des données disponibles au niveau des stations hydrométriques et des postes pluviographiques. On distingue plusieurs zones d'apport :

► **Zones d'apport de type « bassin versant »** (zone au relief légèrement à fortement marqué avec possibilité de définir un thalweg principal qui canalise les écoulements) :

- Si on dispose de données hydrométriques sur un bassin versant jaugé voisin aux caractéristiques morphométriques et agropédologiques similaires, l'hydrogramme de la zone est obtenu par ratio de superficie avec l'hydrogramme du bassin versant jaugé. Ainsi, l'hydrogramme de l'Yon à Dompierre a permis d'obtenir les hydrogrammes du Graon et du Troussepoil en entrée du modèle pour les trois crues réelles de 1983, 1999 et 2011 ou encore la sommation des hydrogrammes du Grand Lay, du Petit Lay, de la Smagne et du Loing a permis de reconstituer l'hydrogramme du Lay à Mareuil pour la crue de 1983.
- Si on ne dispose que de données pluviographiques, l'hydrogramme de la zone est générée en utilisant un modèle hydrologique SCS à partir du hyétogramme⁵ des pluies.
Cette méthode a été appliquée pour les crues réelles en l'absence de données hydrométriques, et systématiquement pour les crues fréquentielles. Les hyétogrammes de pluies fréquentielles utilisés sont de type Kiefer en 48 heures, établis selon les quantiles de pluies horaires et un coefficient d'abattement spatial de 78%.

► **Zones d'apport de type « impluvium »** (zone de plaine sans possibilité de définir un thalweg marqué) : on applique un coefficient d'infiltration (transformation de la pluie « brute » en pluie « nette ») de 90% et on moyenne l'apport sur 24 heures.

⁵ Courbe représentant l'intensité de la pluie en fonction du temps.

La carte de localisation des zones d'apport pour le modèle d'hydraulique fluviale qui distingue les zones de type « bassin versant » et celles de type « impluvium » est présentée ci-après :

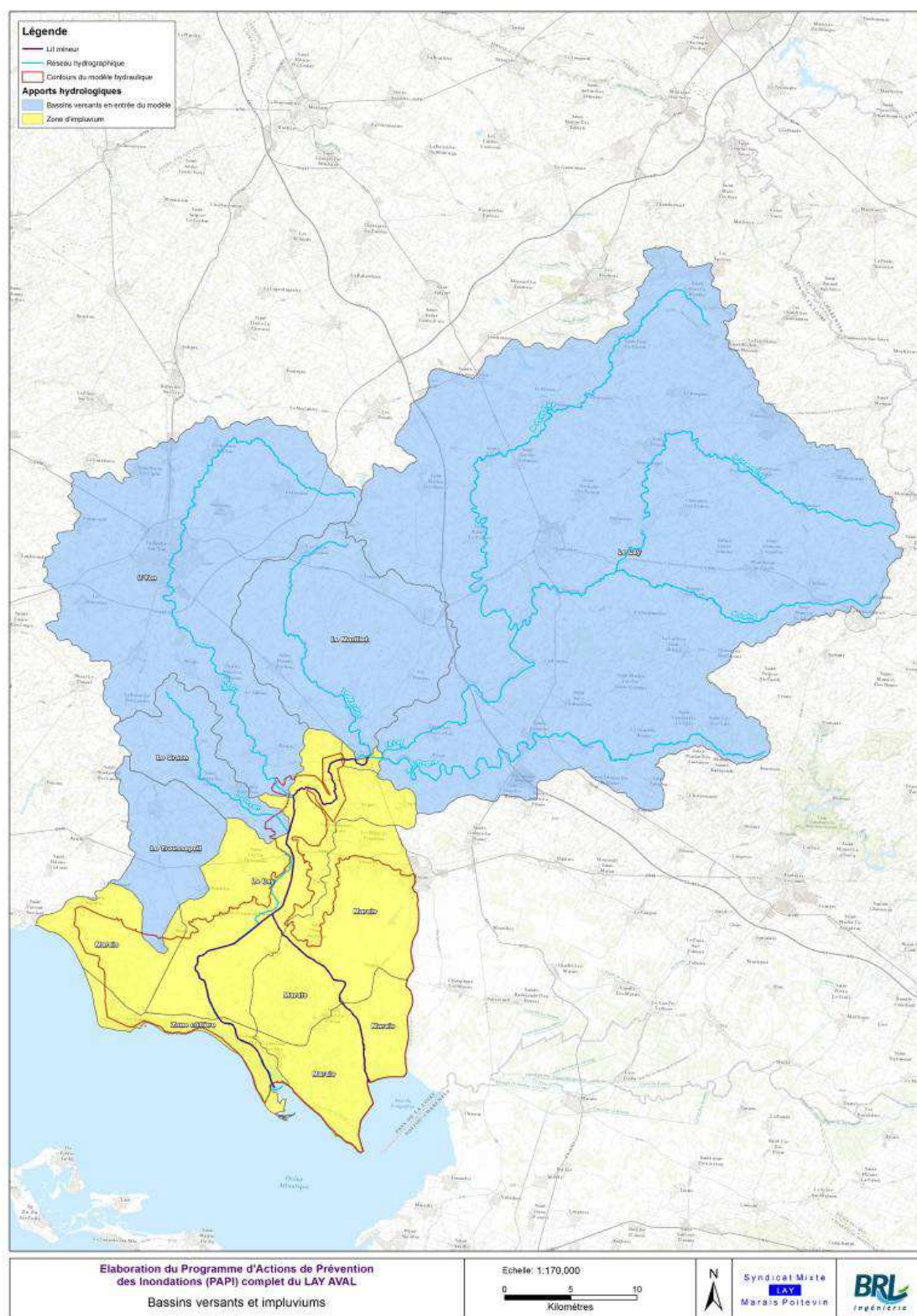


Figure 18 : Bassins versants et impluviums

CONSTRUCTION DES HYETOGRAMMES FREQUENTIELS

Les hyétogrammes fréquentiels ont été construits selon méthode dite de Kieffer, iso-fréquentiel pour toutes les durées (avec des intensités extrêmement fortes pour les très courtes durées de 1 à 3 h, ce qui maximise le débit de pointe lorsqu'on utilise un modèle de transformation pluie/débit).

Les quantiles de pluies horaires de 1h, 2h,..., 24h,..., 48h sont issues de l'« Etude hydrologique des crues – Confortement du barrage du Mervent », Stucky, octobre 2008. Le quantile de pluie centennale est estimé à 101.3 mm en 24 heures et 119.1 mm en 48 heures.

Période de retour [ans]	Pluie [mm]						
	2h	3h	6h	12h	24h	48h	96h
2	18.8	22.7	29.0	32.1	41.9	49.3	70.6
5	26.2	31.7	40.4	44.7	58.4	68.6	98.4
10	30.5	36.9	47.1	52.2	68.1	80.0	114.7
20	35.4	42.8	54.5	60.5	78.9	92.7	132.9
50	41.0	49.6	63.2	70.1	91.5	107.6	154.1
100	45.4	54.9	70.0	77.6	101.3	119.1	170.6
500	55.4	67.0	85.5	94.8	123.7	145.4	208.3
1000	59.8	72.3	92.2	102.2	133.4	156.8	224.7
5000	69.8	84.4	107.6	119.3	155.7	183.0	262.2
10000	74.1	89.6	114.3	126.7	165.4	194.4	278.6

Figure 19 : Quantiles de pluies horaires de 1h, 2h,..., 24h,..., 48h (« Etude hydrologique des crues – Confortement du barrage du Mervent » - Stucky, octobre 2008)

L'abattement spatial de la pluie a été pris en compte en appliquant un coefficient d'abattement spatial de 78%, qui permet d'intégrer l'importance du bassin versant.

Les hyétogrammes fréquentiels de période de retour 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 500 ans ont ainsi été construits suivant cette méthodologie.

APPLICATION DE LA METHODE SCS

La méthode du Soil Conservation Service (nouvellement appelée National Resources Conservation Service) a été mise au point aux Etats Unis sur la base de résultats de mesures pluvio-hydrométriques pratiquées sur plusieurs centaines de bassins versants. Cette méthode est appliquée et calée sur de nombreux bassins jaugés français avec des résultats assez proches de la réalité. Ce modèle permet de déterminer des hydrogrammes de crue à partir d'une relation pluie/débit.

Temps de concentration et aptitude au ruissellement

Le temps de concentration (t_c) utilisé dans la méthode SCS est déterminé par la formule de Kirpich :

- $T_c = ((0.87 \times L^3)/H)^{0.385}$
- L : longueur du plus grand thalweg.
 - H : dénivelée correspondante.

Pour le bassin versant du Lay à Mareuil (plus grande zone d'apport), le temps de concentration est de 24 heures. Il a été considéré une durée de pluie égale à deux fois le temps de concentration de la plus grande zone d'apport, à savoir une durée de pluie totale de 48 heures.

Les coefficients CN qui caractérisent l'aptitude au ruissellement dans la méthode SCS sont obtenus en fonction de la nature et de l'occupation des sols.

Le tableau ci-après fournit les paramètres obtenus pour chaque sous bassins versant :

Désignation du BV	Longueur (km)	Pente (m/m)	Aire (km ²)	CN	tc [h]
Le Graon jusqu'à sa confluence avec le Lay	17	0.17%	62.6	76.7	7
Le Lay jusqu'à l'entrée du modèle	82	0.16%	1048.7	76.7	24
Le Marillet jusqu'à sa confluence avec le Lay (Mareuil sur Lay)	28	0.27%	184	76.7	8
Le Trousepoil jusqu'au Marais de Moricq	17	0.11%	66.8	76.6	8
L'Yon jusqu'à sa confluence avec le Lay	55	0.11%	359.5	77.2	20

3.2.3 Calage du modèle hydrologique

Les crues réelles de septembre-octobre 1999 et de décembre 2011 ont servi au calage du modèle hydrologique.

Pour ces deux crues, les hydrogrammes observés au niveau des stations ont été comparés aux hydrogrammes simulés afin de juger de la bonne représentativité hydro-temporelle de chaque évènement.

Afin de quantifier les performances du modèle, le critère de Nash a été utilisé :

- ▶ Calculé avec Q (le débit) : indicateur sur la validité du calage en terme de débit de pointe,
- ▶ Calculé avec \sqrt{Q} : indicateur sur la validité du calage en terme de volume de crue.

On peut considérer que pour :

- ▶ Nash < 60%, le calage n'est pas acceptable,
- ▶ 60% < Nash < 70%, le degré de performance est passable,
- ▶ 70% < Nash < 80%, le degré de performance est moyen,
- ▶ 80% < Nash < 90%, le degré de performance est bon,
- ▶ 90% < Nash < 100%, le degré de performance est excellent.

Le tableau ci-dessous synthétise les résultats :

Crue	Station	Débit de pointe [m ³ /s]		Volume de crue [Mm ³]		Critère de Nash	
		observé	simulé	observé	simulé	Q	Q ^{1/2}
2011	Le Lay à Mareuil	165.5	169.9	25.3	22.0	88%	72%
	Le Marillet à Mareuil	35.6	47.0	4.7	5.5	90%	90%
	L'Yon à Nesmy	68.8	73.7	13.4	9.7	78%	60%
	L'Yon à Dompierre	18.6	22.8	1.9	2.1	83%	77%
1999	Le Lay à Mareuil	262.6	263.5	57.2	50.5	88%	67%
	Le Marillet à St Florent	27.1	30.3	4.3	4.3	89%	76%
	L'Yon à Dompierre	24.9	25.2	3.8	3.1	94%	81%

Figure 20 : Calage du modèle hydrologique - Caractéristiques des hydrogrammes observés et calculés

Au vu des résultats mentionnés dans le tableau précédent, le degré de performance du modèle est jugé comme bon en terme de débit de pointe et moyen en terme de volume de crue. En effet, la méthode SCS est moins performante pour les faibles débits, ce qui se traduit par une imprécision plus importante sur les volumes des hydrogrammes.

Le modèle hydrologique est donc considéré comme correctement calé pour simuler les crues de projet.

3.2.4 Résultats pour les crues historiques et fréquentielles

Le tableau ci-dessous synthétise les valeurs de débit de pointe et les valeurs de volume des hydrogrammes du Lay à Mareuil :

Crue	Débit de pointe [m ³ /s]	Volume de crue [Mm ³]
2011	165	28
1999	263	39
1983	314	102
Q2	55	5.5
Q5	105	11
Q10	192	19
Q20	276	27
Q50	364	35
Q100	458	44
Q500	633	59
Q1000	717	67
Q5000	917	84
Q10000	1010	93

Figure 21 : Débits de pointe et volumes de crue des hydrogrammes du Lay

La crue de 2011 possède une occurrence légèrement inférieure à la décennale en terme de débit de pointe et légèrement supérieure à l'occurrence 20 ans en terme de volume de crue.

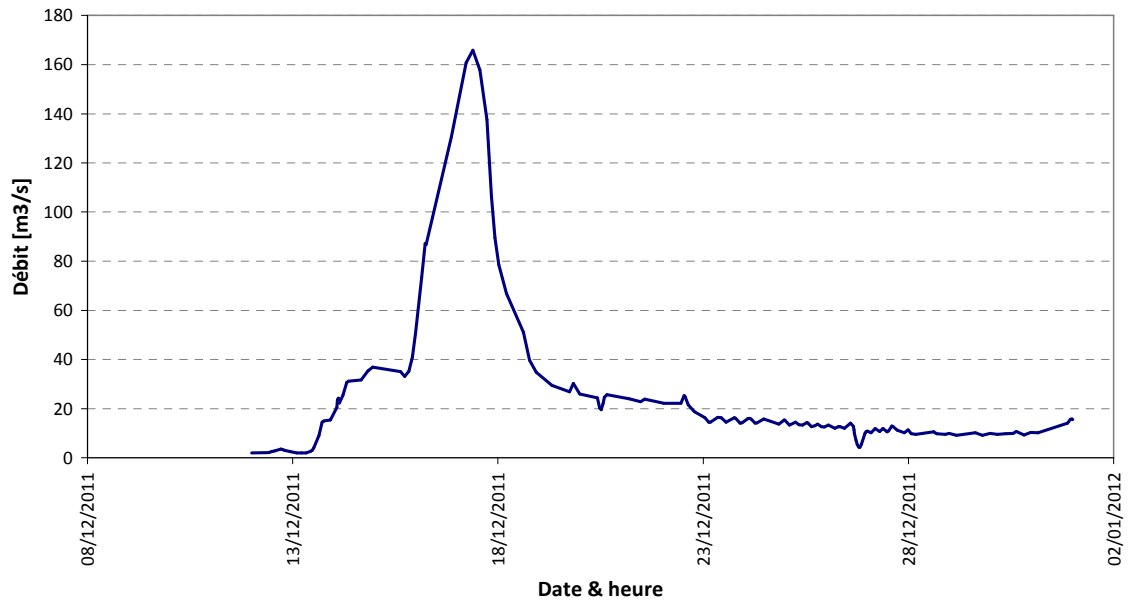


Figure 22 : Hydrogramme du Lay à Mareuil - Crue de 2011

La crue de 1999 a une occurrence légèrement inférieure à 20 ans en terme de débit de pointe et légèrement supérieure à 50 ans en terme de volume de crue.

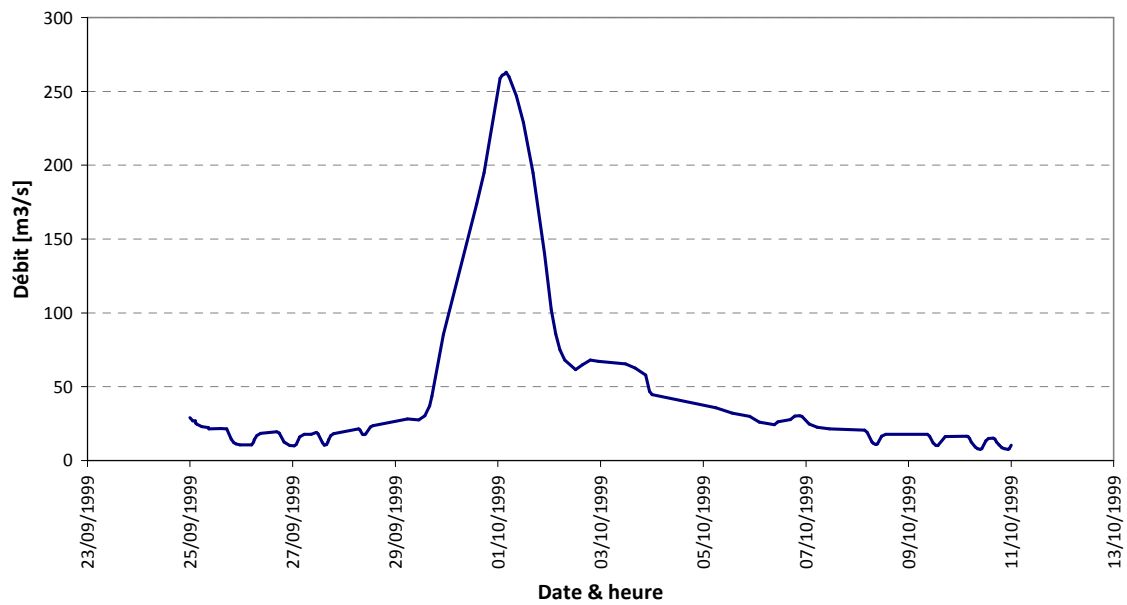


Figure 23 : Hydrogramme du Lay à Mareuil - Crue de 1999

La crue de 1983 a une occurrence comprise entre 20 et 50 ans en terme de débit de pointe. Concernant le volume, l'affectation d'une occurrence est plus délicate, l'évènement étant composé d'une succession de plusieurs pics de pluie.

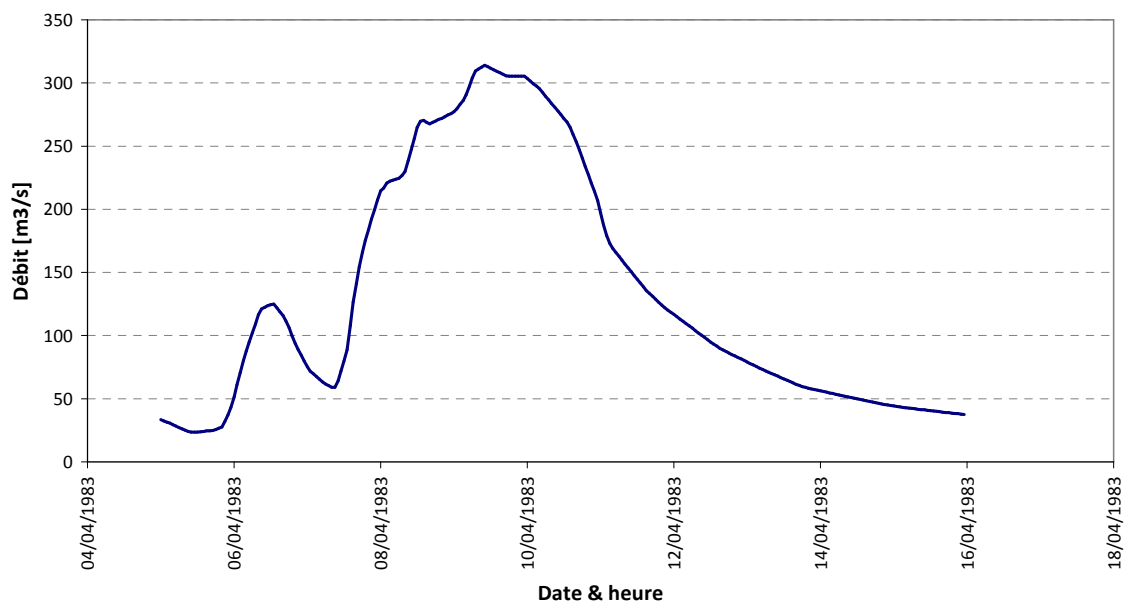


Figure 24 : Hydrogramme du Lay à Mareuil - Crue de 1983

Les hydrogrammes pour les évènements fréquentiels sont les suivants :

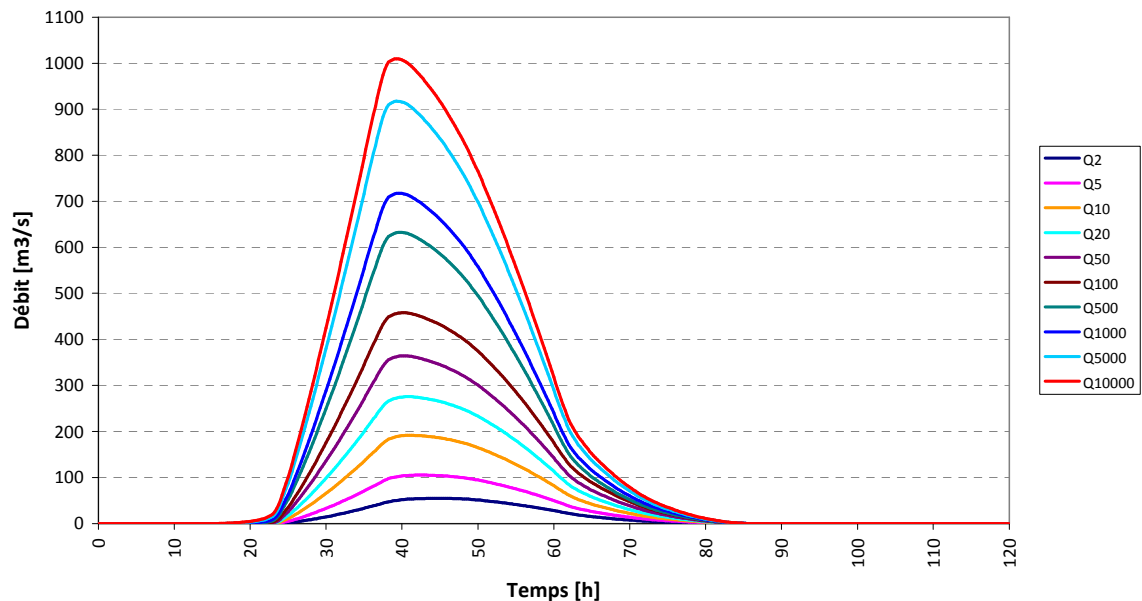


Figure 25 : Hydrogramme du Lay à Mareuil - Crues fréquentielles

3.3 CONSTRUCTION ET CALAGE DES MODELES HYDRAULIQUES

3.3.1 Modèle maritime

3.3.1.1 Logiciel utilisé

Le logiciel TELEMAT-2D appartient au système de modélisation en éléments finis TELEMAT qui est développé par le Laboratoire National d'Hydraulique d'EDF en respect des procédures d'Assurance de la Qualité des Logiciels Scientifiques et Techniques de la Direction des Etudes et Recherches d'EDF.

TELEMAT regroupe un ensemble de logiciels dédiés aux problèmes de mécanique des fluides de l'environnement : courantologie bi et tridimensionnelle, houle, sédimentologie, qualité d'eau.

Les principaux avantages que présente le système TELEMAT en regard de la présente étude sont les suivants :

- Le terrain est représenté par un assemblage d'éléments triangulaires de tailles et de formes variables formant le maillage de calcul. Cette technique « éléments finis » procure deux avantages essentiels :
 - le maillage épouse avec fidélité les géométries complexes du modèle: les digues et les chenaux sont ainsi représentés avec précision,

- elle autorise de densifier le maillage et donc d'affiner les résultats fournis par le modèle dans les zones d'intérêt.
- ▶ L'outil de génération de maillage intégré au système TELEMAC adapte la densité du maillage à différents critères comme la profondeur ou la pente des fonds. Il réalise un compromis entre les besoins en précision dans les régions où l'hydraulique est complexe (estran, berges d'un chenal, etc.) et le nombre total de points. Cette caractéristique est essentielle pour maintenir au modèle son caractère opérationnel en termes de précision et de temps de réponse.

Utilisé par de nombreux centres de recherche et bureaux d'étude dans le monde, TELEMAC figure actuellement parmi les outils les plus performants du marché.

Le logiciel TELEMAC-2D résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions d'espace horizontal. Ses résultats principaux sont, en chaque point du maillage de résolution, la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sur la verticale.

TELEMAC-2D trouve ses applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale et est capable de prendre en compte les phénomènes physiques suivants :

- ▶ Propagation des ondes longues avec prise en compte des effets non linéaires,
- ▶ Frottement sur le fond,
- ▶ Influence de la force de Coriolis,
- ▶ Influence de phénomènes météorologiques : pression atmosphérique et vent,
- ▶ Turbulence,
- ▶ Ecoulements torrentiels et fluviaux,
- ▶ Influence de gradients horizontaux de température ou de salinité sur la densité,
- ▶ Coordonnées cartésiennes ou sphériques pour les grands domaines,
- ▶ Zones sèches dans le domaine de calcul : bancs découvrant et plaines inondables,
- ▶ Entraînement par le courant et diffusion d'un traceur, avec des termes de création ou de disparition,
- ▶ Suivi de flotteurs et dérives lagrangiennes,
- ▶ Traitement de singularités : seuils, digues, buses,
- ▶ Prise en compte des forces de traînée des structures verticales,
- ▶ Prise en compte des phénomènes de porosité,
- ▶ Prise en compte des courants de houle (par couplage avec les modules ARTEMIS et TOMAWAC).

3.3.1.2 Méthodologie employée

La principale difficulté pour modéliser le phénomène de submersion marine sur la zone d'étude est la surface importante de cette zone combinée à des ouvrages de faible dimension (dignes notamment) qui nécessitent une représentation fine.

Les lignes structurantes du modèle sont les digues des canaux/rivières, les digues des polders ainsi que les routes en remblais. Le choix a été fait de modifier la représentation des crêtes de ces ouvrages pour pouvoir les modéliser à une échelle spatiale supérieure à la largeur de celle-ci. Les lignes de crête sont donc transformées en surfaces.

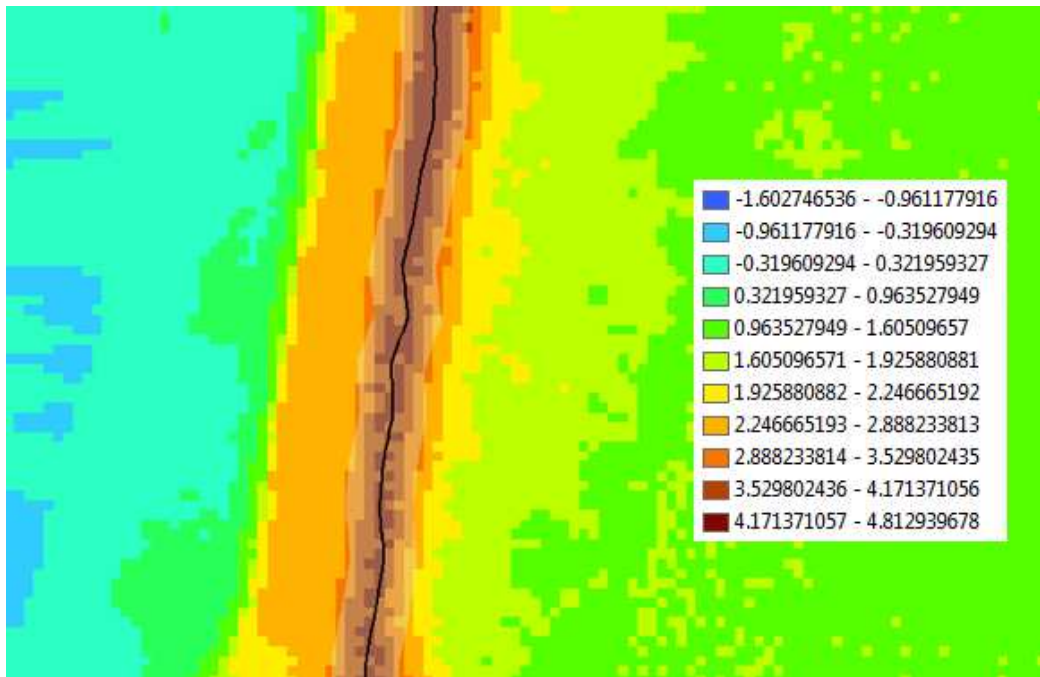


Figure 26 : Modélisation des digues 1/500ème (Digue du polder 2)

Les cotes de la ligne de crête (ligne noire) sont appliquées sur la surface du polygone blanc transparent pour optimiser la modélisation.

Les zones urbaines sont modélisées à l'échelle de l'îlot urbain. Le coefficient de Strickler est adapté suivant les zones (urbain/plaine) pour représenter les différences de frottement de l'eau sur le fond.

3.3.1.3 Echelle spatio-temporelle et hypothèses de base

L'emprise du modèle est définie par la topographie de la zone d'étude.

En terre, le modèle s'arrête au niveau de l'iso ligne 4m80 NGF.

La frontière maritime est limitée :

- à l'ouest par le plan d'eau du Maupas : on considère que le trait de côte plus à l'ouest est infranchissable,
- à l'est par le canal de Luçon : le canal de Luçon n'est pas débordant et ses digues constituent une frontière physique entre les bassins du Lay et de Vendée Sèvre Autizes.

Le modèle s'étend en mer à 25 m du trait de côte de manière à bien représenter les phénomènes marins locaux.

Pour la réalisation d'un modèle numérique, le choix des pas de temps et d'espace est primordial. Ce choix est contraint à la fois par la résolution correcte du système d'équations des phénomènes à modéliser et par le temps de calcul de la simulation.

Pas d'espace

Concernant le choix du pas d'espace, le domaine d'étude est discrétisé en éléments de petite taille appelés « mailles » ; l'ensemble des mailles entre elles constituant un maillage. La taille de la maille ou pas d'espace du modèle a été choisi en fonction de la résolution graphique désirée :

- ▶ Digue : 10m
- ▶ Zones urbaines : 10m
- ▶ Plaine ou polder inondés pendant Xynthia : 100m
- ▶ Plaine ou polder non inondés pendant Xynthia : 250m

Ces tailles sont des ordres de grandeur et varient suivant les contraintes du modèle : contour, ligne structurante ou proximité d'une autre taille de maille. La taille des mailles s'adapte entre ces différentes zones pour avoir un maillage continu et progressif.

On modélise toutes les digues submergées pendant la tempête Xynthia et uniquement les digues principales au-delà de cette zone. Les zones étendues d'altitudes supérieures à 4m80 NGF à l'intérieur du modèle ne sont pas maillées car elles ne seront pas submergées.

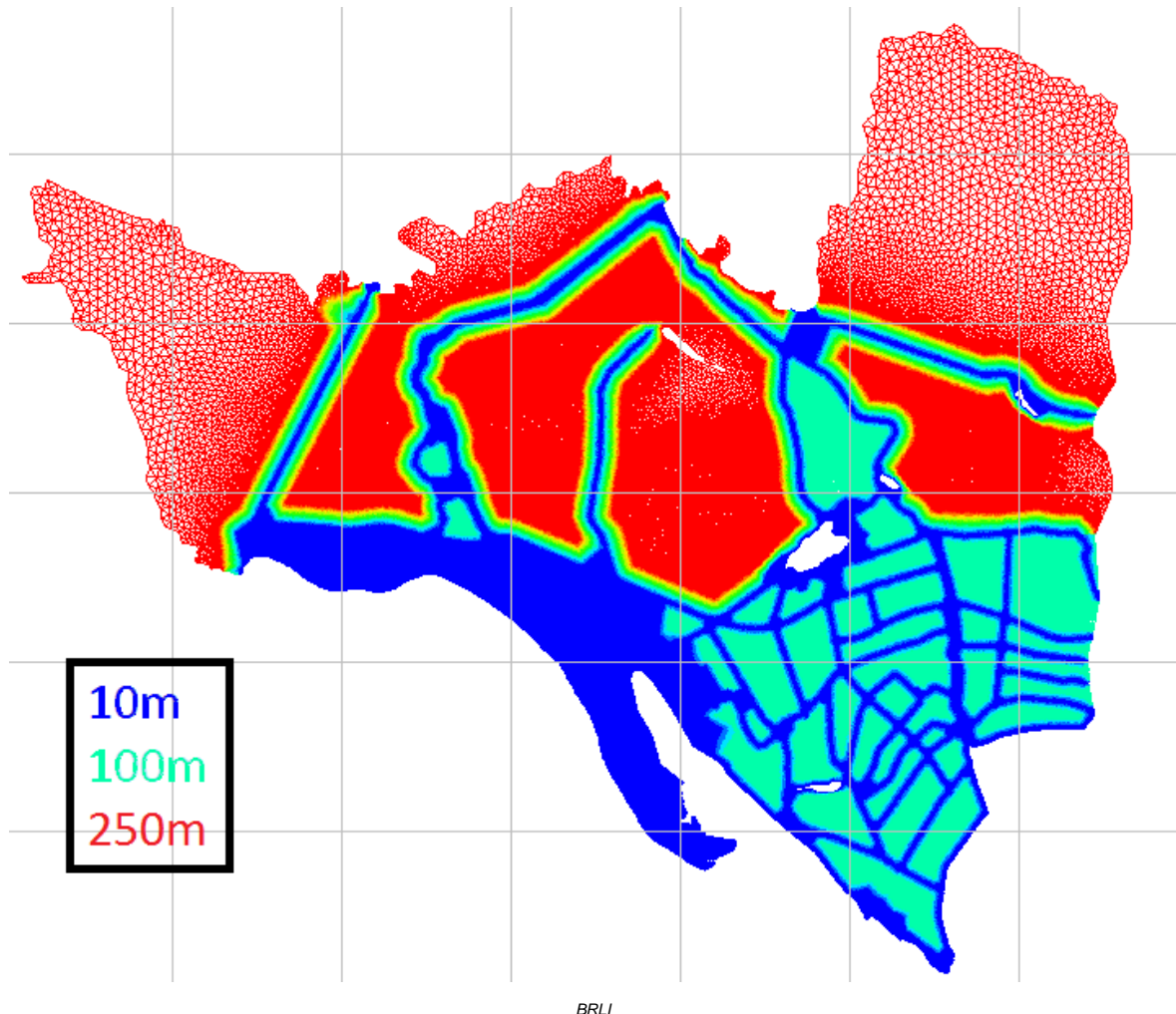
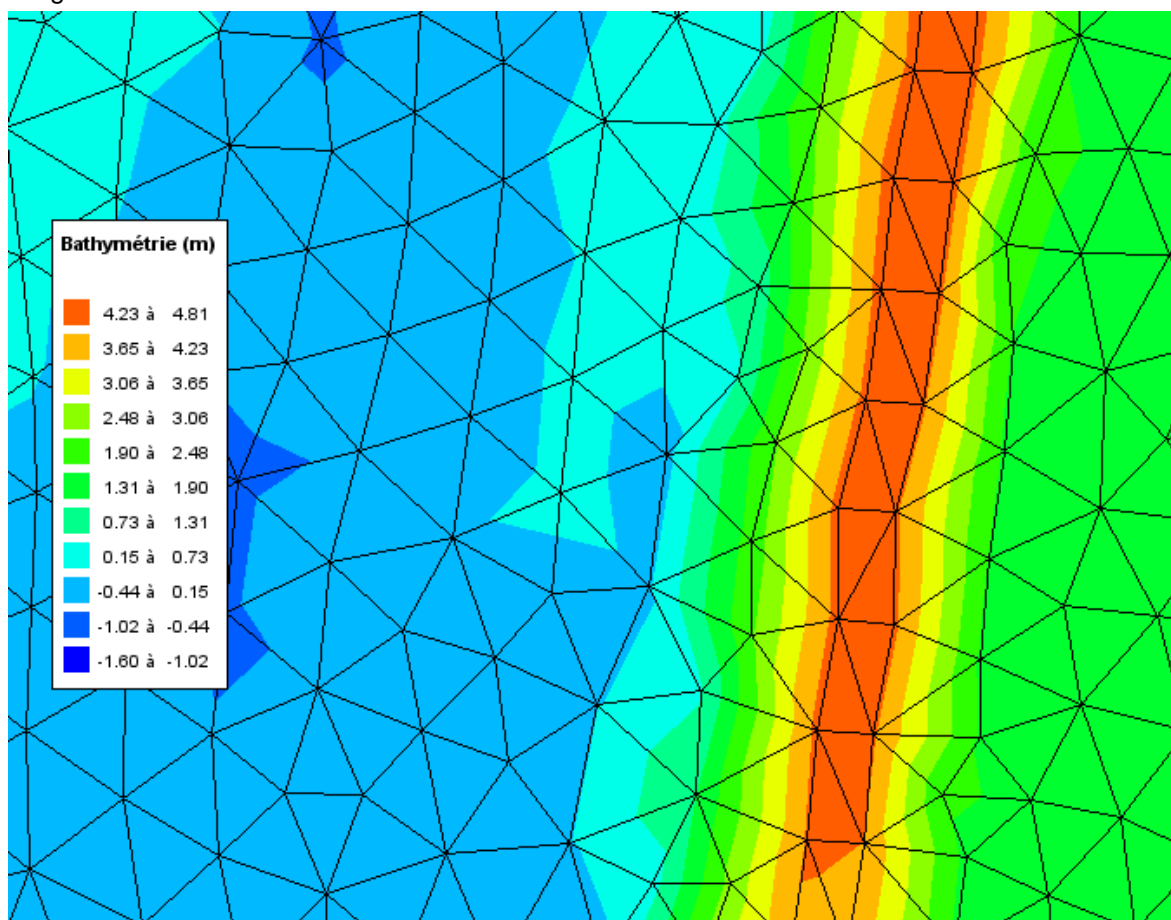


Figure 27 : Architecture du modèle maritime et taille des mailles de calcul

Le modèle comporte 1 470 000 mailles (éléments triangulaires) et 738 000 nœuds de calcul.

Au niveau des lignes de structures, le maillage est contraint, il doit nécessairement suivre ces lignes structurantes. Ceci permet de bien modéliser les crêtes de digues comme on peut le voir sur la figure suivante.



BRLI

Figure 28 : Maillage au niveau d'une digue (exemple de la digue du polder 2)

Pas de temps de calcul

Le pas de temps est dépendant du nombre de mailles sur le domaine et de la précision souhaitée sur les calculs. Le pas de temps retenu est variable avec pour maximum 5 secondes, ce qui permet un bon compromis entre vitesse de calcul et bonne représentation des écoulements.

Concernant la résolution numérique du système d'équations, les hypothèses simplificatrices suivantes ont été retenues :

- Non prise en compte des effets estuariens, sauf précisions contraires pour les modèles couplés maritime et fluvial, (débits à l'exutoire des fleuves côtiers considérés comme négligeables devant la submersion marine),

- Modélisation sur presque un cycle de marée, d'une étale de basse mer à la suivante. Il n'est pas nécessaire de modéliser complètement les étales de basse mer car il n'y a pas d'apport d'eau à ce moment.

3.3.1.4 Conditions aux limites

Le modèle comporte deux frontières : une solide et une liquide.

La frontière solide se comporte comme une paroi imperméable, l'eau ne peut pas la franchir. Cette frontière est placée à une altitude élevée par rapport à la topographie (4m80 NGF) donc elle ne perturbe pas l'écoulement. Son but est de délimiter le modèle.

La frontière liquide se situe à 25m au large du trait de côte. C'est par cette frontière que le modèle est forcé : on y impose la hauteur de la surface libre (le niveau d'eau). Le choix d'une limite à 25m du trait de côte a été fait par rapport aux données utilisées pour le forçage. En effet, on utilise les données issue du modèle océanique mis au point par l'Université de La Rochelle (cf. 1.2 Données de forçage du modèle) qui possède une résolution de 25m au niveau du trait de côte. En se plaçant à 25m on récupère donc les données des derniers points de calcul en eau. La frontière au niveau du trait de côte de ce modèle à grande échelle étant une frontière solide, on ne pouvait donc pas l'utiliser pour extraire des données. Le fait de se placer au plus près du trait de côte permet de récupérer des données très précises en terme de houle et de niveau d'eau. En effet, il existe des phénomènes très locaux au niveau de la bande côtière : le déferlement des vagues ainsi que le forçage du vent génèrent une accumulation d'eau et donc une élévation du niveau marin très locale (wave setup et wind setup).

Ci-dessous une illustration du wave setup et du wind setup. On observe une différence de niveau pour un point situé à 25m du trait de côte comparé à un point situé à 1km du trait de côte.

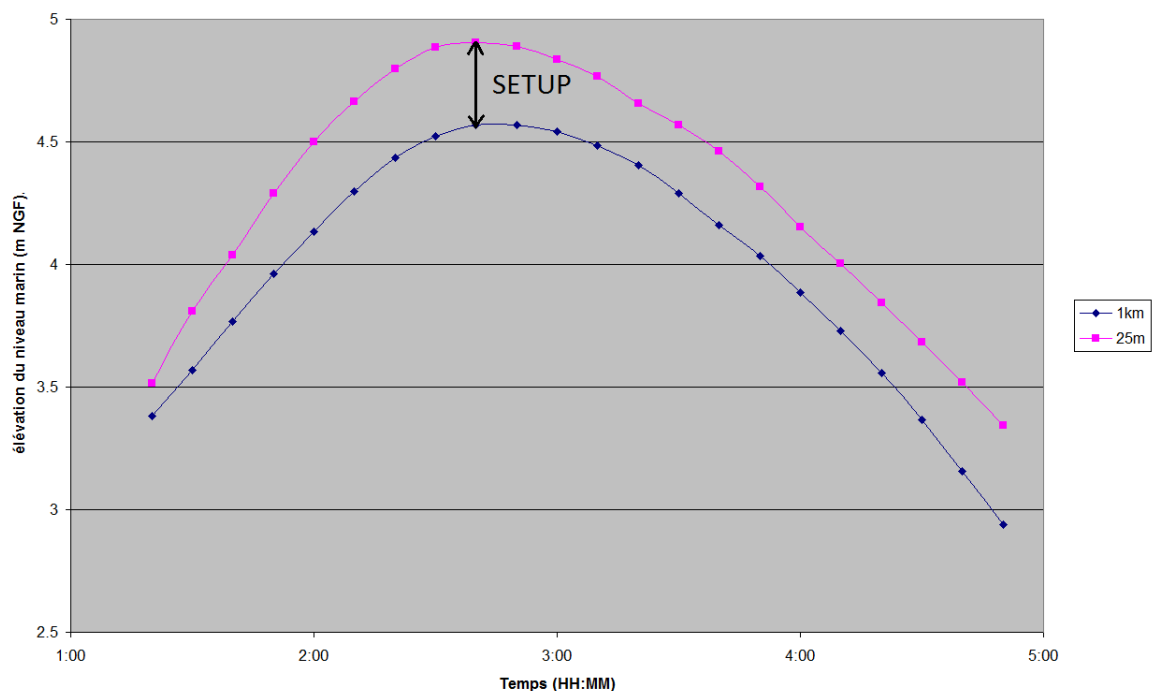


Figure 29 : Wave setup et Wind setup, tempête Xynthia, 28 février 2010, baie de l'Aiguillon

Les données du modèle océanique mis au point par l'Université de La Rochelle utilisées ici sont des séries temporelles d'élévation du niveau marin. Ces séries qui, comme indiqué ci-avant, sont relevées à 25m du trait côte possèdent des points tous les kilomètres environ le long de celui-ci. Ces données sont filtrées : les séries aberrantes sont éliminées. Le niveau maximum de chaque série temporelle sur la zone d'étude est disponible sur l'atlas cartographique joint.

3.3.1.5 Méthodologie du calage

Le calage du modèle consiste à simuler un événement historique pour ajuster certains paramètres physiques du modèle afin de représenter au plus juste la réalité. Le principal paramètre de calage est la valeur du coefficient de Strickler qui traduit les différences de frottements de l'eau sur le fond en fonction de la nature du fond.

L'évènement historique de calage est la tempête Xynthia pour laquelle on dispose de nombreux éléments (zones inondées et niveaux d'eau). Les données historiques sont fournies par l'ouvrage « La tempête Xynthia du 28 février 2010, retour d'expérience en Loire-Atlantique et en Vendée » publié par le Centre d'Etudes Techniques et de l'Équipement de l'ouest en juillet 2012 (on nommera cet ouvrage le REX dans la suite du rapport).

En plus des zones inondées et des niveaux d'eau, le REX fournit l'emplacement et la tailles des brèches générées lors de la tempête Xynthia. Le REX fournit également l'emplacement et la taille de zones qui ont subies des « dégradations multiples ». Ces dégradations correspondent aux dégradations suivantes :

- ▶ déstructuration de l'ouvrage nécessitant des réparations,
- ▶ érosion de crête ou des talus arrière des digues,
- ▶ déstructuration et effondrement de parapets.

Le modèle utilisé pour le calage est construit à partir du lidar version 2010 (état de la bathymétrie à l'époque de la tempête Xynthia). Il comporte des brèches et des zones dégradées sur les digues indiquées par le REX. Les premiers essais de calage nous ont montré un manque d'information au niveau des brèches et des zones dégradées. En effet, on ne connaît pas la dynamique de rupture pour les brèches (durée de formation de la brèche, cote basse de la brèche). On ne connaît pas non plus la dynamique des « dégradations multiples » (durée de formation et cote également). Ces informations n'étant pas disponibles, nous avons opté pour la stratégie suivante : le calage comportera deux simulations.

- ▶ La première simulation minimise la tempête Xynthia, les brèches et les dégradations multiples ne sont pas modélisées.
- ▶ La seconde simulation maximise la tempête Xynthia, les brèches et les dégradations multiples sont modélisées dès le début de la simulation. Le REX fournit une plage de valeur pour les brèches, la valeur maximale de la plage est retenue. La cote basse de la brèche est amenée à la cote du terrain naturel. Pour les zones de « dégradations multiples », on abaisse les cotes à +3m50 NGF.

Le calage consistera à vérifier que ces deux simulations forment bien une « enveloppe » autour des données du REX. Enfin, certains points de calage ne subissent presque pas l'influence des brèches et des dégradations comme par exemple dans le lit mineur du Lay. Pour ces points, la cote devrait être similaire pour les deux simulations et calée sur les données du REX.

Le forçage utilisé pour les deux simulations provient du modèle océanique mis au point par l'Université de La Rochelle présenté précédemment.

3.3.1.6 Résultats du calage

Les points de calage sont figurés sur les cartes ci-après.

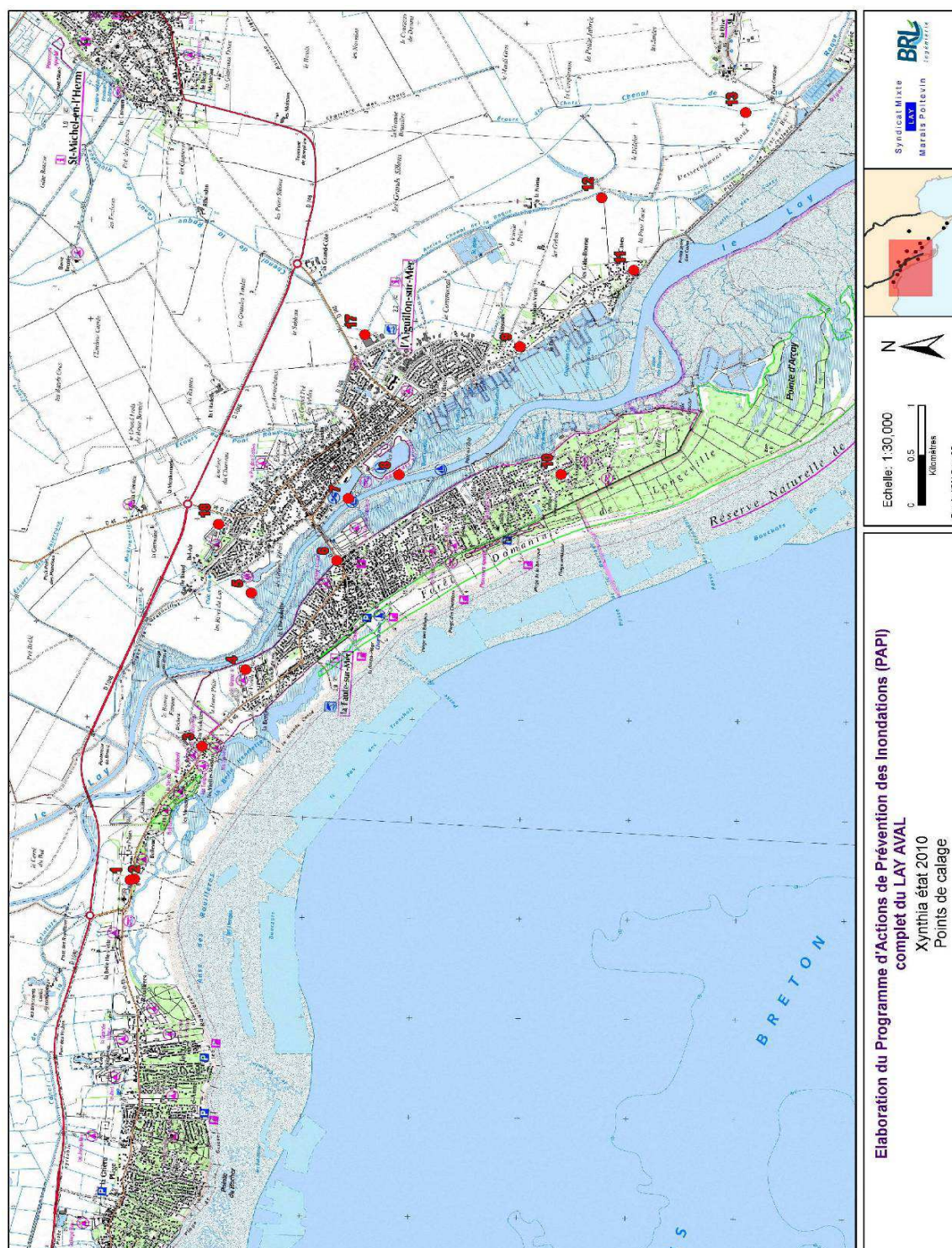
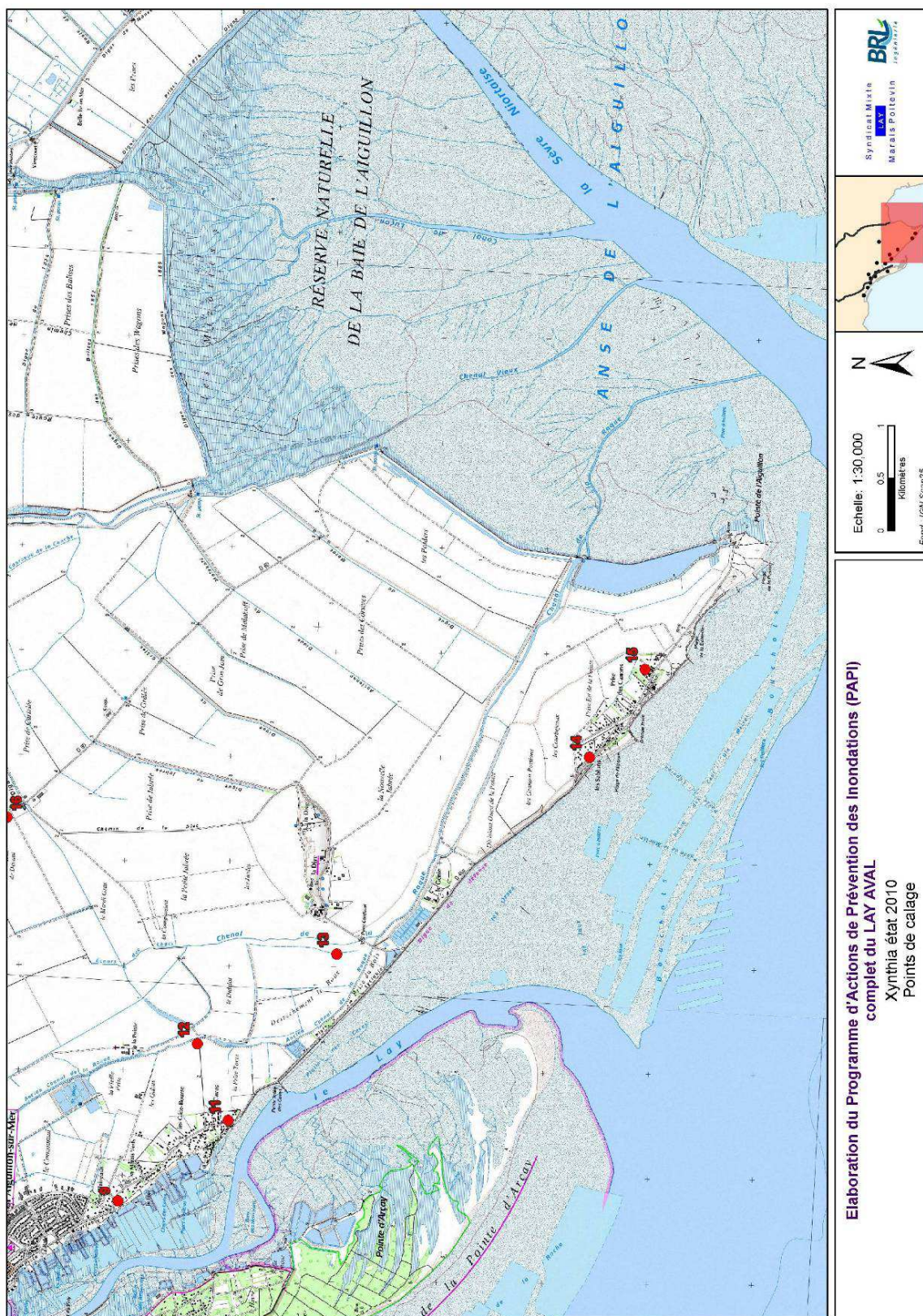


Figure 30 : Xynthia état 2010 - Points de calage



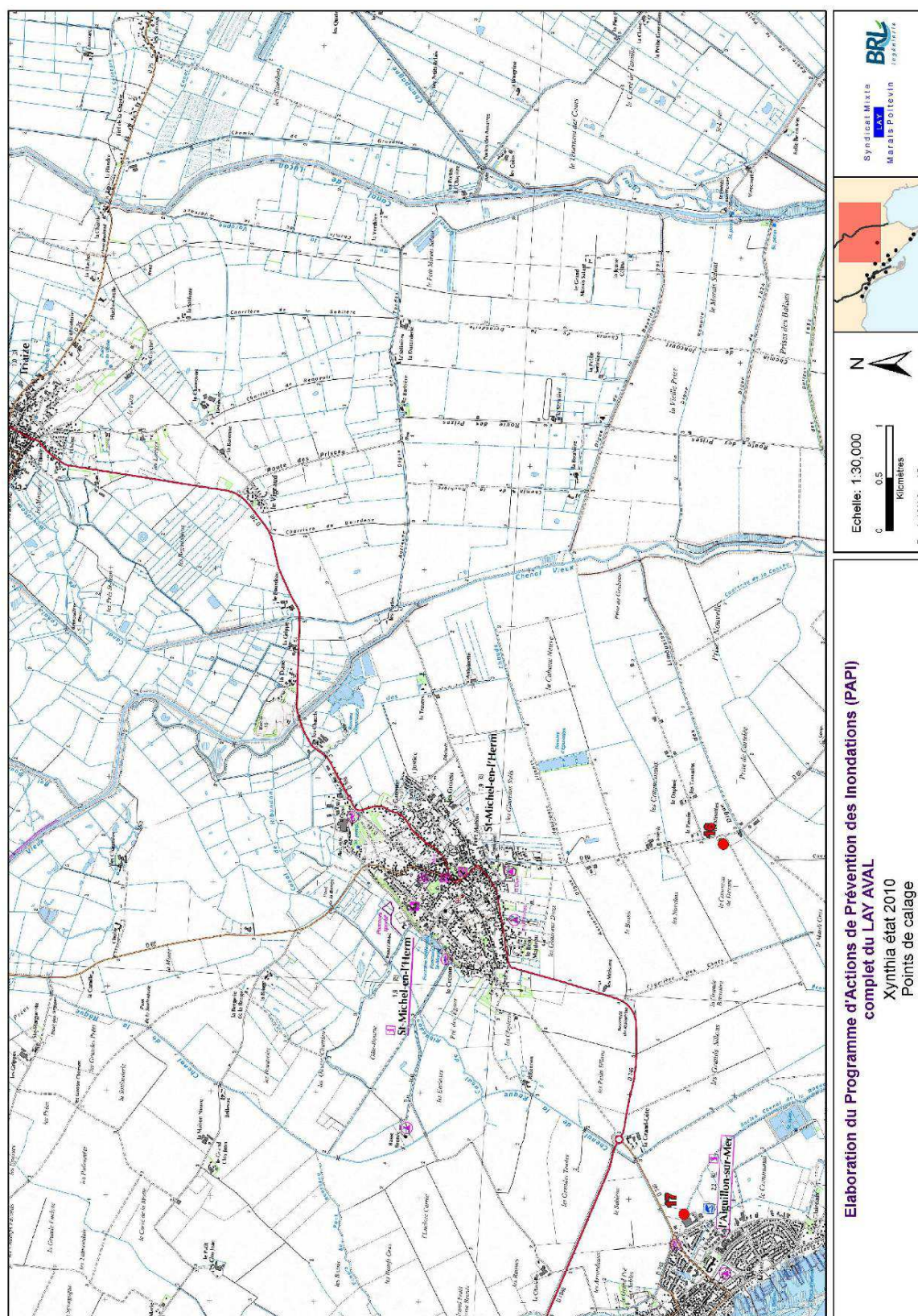


Figure 32 : Xynthia état 2010 - points de calage

Les résultats des simulations de la tempête Xynthia en état 2010 avec et sans brèches sont présentés dans l'atlas cartographique.

Pour chacun de ses points de calage, on compare les données du REX (Xynthia), le modèle état 2010 sans brèche et le modèle état 2010 avec brèches. Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

REX (données Xynthia)	Points (cf. carte)	1	2	3	4	5	6
	cote (m NGF)	3.67	4.64	3.66	2.86	4.39	4.32
Xynthia état 2010 avec brèches	cote (m NGF)	3.42	4.38	3.75	3.75	4.21	4.24
	écart (m)	-0.25	-0.26	0.09	0.89	-0.18	-0.08
Xynthia état 2010 sans brèche	cote (m NGF)	NI	2.28	NI	NI	4.44	4.51
	écart (m)	-	-2.36	-	-	0.05	0.19
REX (données Xynthia)	Points (cf. carte)	7	8	9	10	11	12
	cote (m NGF)	4.59	4.70	4.47	3.48	3.06	2.70
Xynthia état 2010 avec brèches	cote (m NGF)	4.41	4.50	4.58	4.34	3.68	2.55
	écart (m)	-0.18	-0.20	0.11	0.86	0.62	-0.15
Xynthia état 2010 sans brèche	cote (m NGF)	4.52	4.55	4.57	NI	3.05	1.68
	écart (m)	-0.07	-0.15	0.10	-	-0.01	-1.02
REX (données Xynthia)	Points (cf. carte)	13	14	15	16	17	18
	cote (m NGF)	2.70	2.91	3.22	1.80	2.56	2.09
Xynthia état 2010 avec brèches	cote (m NGF)	2.74	3.43	3.77	2.55	2.56	2.18
	écart (m)	0.04	0.52	0.56	0.75	0.00	0.09
Xynthia état 2010 sans brèche	cote (m NGF)	1.36	1.89	NI	NI	NI	NI
	écart (m)	-1.34	-1.02	-	-	-	-
légende	Points de calage dépendants des brèches						
	Points de calage indépendants des brèches						
	NI : non inondé, pas d'écart calculé						

BRLI

Figure 33 : Tableau de calage Xynthia état 2010

On distingue deux types de points :

- les points dont la cote dépend du scénario avec ou sans brèche (en rouge, points situés à l'arrière du cordon de digue)
- les points dont la cote est moins sensible au scénario avec ou sans brèche (en vert, points situés en lit mineur du Lay)

Pour les points « en rouge », on considère que le point est calé à partir du moment où la cote mesurée est bien comprise entre l'enveloppe minimale (scénario sans brèche) et l'enveloppe maximale (scénario avec brèche).

Pour les points « en vert », les cotes résultants des modèles avec ou sans brèche sont sensiblement identiques. On considère que le point est calé à partir du moment où la cote mesurée et la cote calculée sont semblables.

Pour les points de calage dépendants des brèches (en rouge) :

- ▶ Dix points sont calés : écart positif avec des brèches et écart négatif sans brèches.
- ▶ Trois points présentent des « erreurs » de 15 à 26cm (points 1, 2 et 12).

Pour les points de calage indépendants des brèches (en vert, lit mineur de Lay) :

- ▶ Les cinq points sont calés, l'écart entre le modèle et la réalité ne dépasse pas 20cm.

Le calage du modèle est donc satisfaisant : quinze points sur dix-huit sont bien calés et les trois autres présentent un décalage altimétrique acceptable.

3.3.2 Modèle fluvial

3.3.2.1 Logiciel utilisé

ISIS est un logiciel de simulation hydraulique des écoulements en rivière ou canaux développé par HALCROW et WALLINGFORD. Basé sur la résolution des équations de Barré de St Venant, il est particulièrement adapté à l'étude des réseaux complexes maillés ou ramifiés et à la simulation des champs d'inondation en régime permanent ou transitoire.

Il rend également bien compte des écoulements dans les secteurs endigués et propose au droit des singularités des méthodes de calcul performantes :

- ▶ méthode de Bradley de l'USPBR pour le calcul du remous des ponts,
- ▶ équations de seuils et déversoirs divers : mince, épais, rectangulaire, parabolique...

La modélisation du lit majeur proposée sous forme d'une structure à casier permet de se rapprocher d'une modélisation bidimensionnelle, on parle dans ce cas de représentation pseudo bidimensionnelle et il est alors possible de rendre compte d'écoulements selon différents axes.

3.3.2.2 Structure du modèle

Le modèle hydraulique, qui couvre une surface de 312 km², a pour objectif de rendre compte du fonctionnement hydraulique du Lay et de sa zone d'expansion de crue pour des événements rares. Il s'attache donc à modéliser les écoulements dans les axes d'écoulements principaux et le champ majeur mais ne vise pas à restituer fidèlement le fonctionnement du réseau de drainage secondaire (des marais notamment).

La figure ci-après présente la structure du modèle.

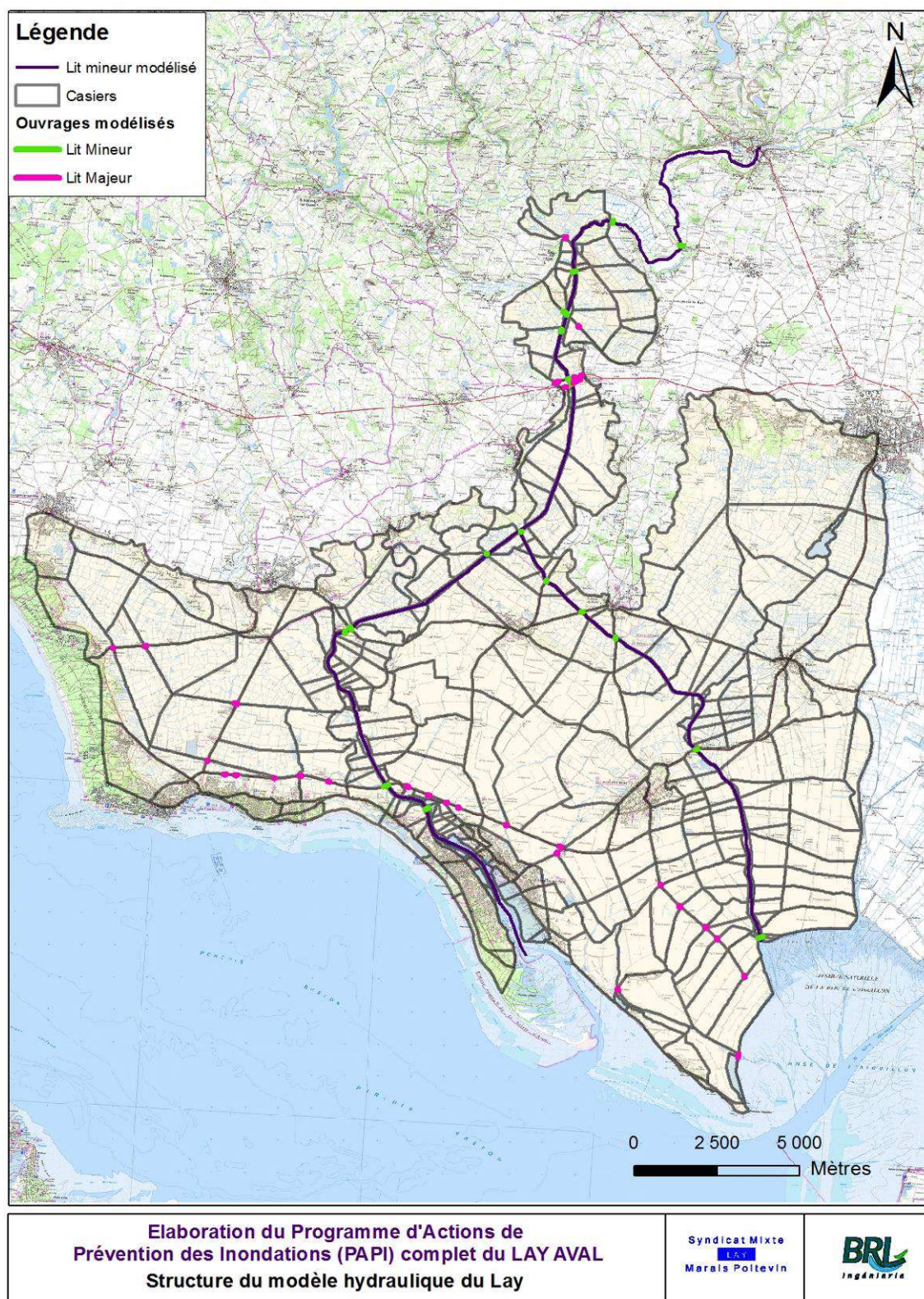


Figure 34 : Structure du modèle hydraulique

LITS MINEURS

Les axes principaux d'écoulements modélisés sont le lit mineur du Lay et le chenal Vieux. Cela représente un linéaire de 56 km modélisé par 57 profils en travers provenant soit d'études antérieures, soit de levés entrepris dans la présente étude (cf. chapitre 2.1.3). Compte tenu des caractéristiques du terrain, le lit mineur du Lay est modélisé :

- ▶ en filaire sur la partie amont de Mareuil-sur-Lay à Morteveille, décrit uniquement avec des profils en travers
- ▶ en filaire avec casiers latéraux de Morteveille à l'estuaire, décrit avec des profils en travers et des lois de déversements.

Les profils en long des digues levés dans le cadre de diagnostics antérieurs ont été intégrés au modèle afin de reproduire correctement les débordements du lit mineur. Dans les zones sans donnée topographique spécifique, les berges ont été modélisées par extraction de la donnée Lidar.

CHAMP MAJEUR

Le champ majeur est modélisé par l'intermédiaire de 325 casiers de tailles variables adaptés à la géométrie du terrain et à la précision recherchée. Leurs frontières se basent notamment sur les singularités que sont les remblais routiers, les canaux endigués et les reliefs naturels. La donnée topographique permettant de définir la géométrie des casier provient du Lidar.

OUVRAGES

Le modèle prend en compte 50 ouvrages hydrauliques principaux. Ils se répartissent de la façon suivante :

- ▶ 16 ouvrages en lit mineur : la majorité sont des ponts routiers. Les barrages de gestion de niveaux de Morteveille et Moricq sont modélisés par des orifices et déversoirs considérés comme ouverts lors du passage de la crue. Le barrage du Braud en entrée de l'estuaire et la porte des Wagons en aval du Chenal Vieux fonctionnent comme des portes à flots, c'est-à-dire que les écoulements sont autorisés seulement de l'amont vers l'aval (fonctionnement en clapet).
- ▶ 34 ouvrages en champs majeurs : les ouvrages sont principalement des franchissements sous des remblais. Ils sont pris en compte dans le modèle en insérant des ouvertures correctement dimensionnées dans les liaisons inter-casiers.

3.3.2.3 Prise en compte de l'impluvium

L'importance de l'impact de l'impluvium est analysée à travers la crue historique de 1999 et la crue centennale. Les figures ci-après présentent les hyétogrammes pris en compte dans nos simulations pour ces deux événements. A noter qu'un écart de 5h environ existe entre le pic de pluie et le pic de crue en amont de la zone d'étude.

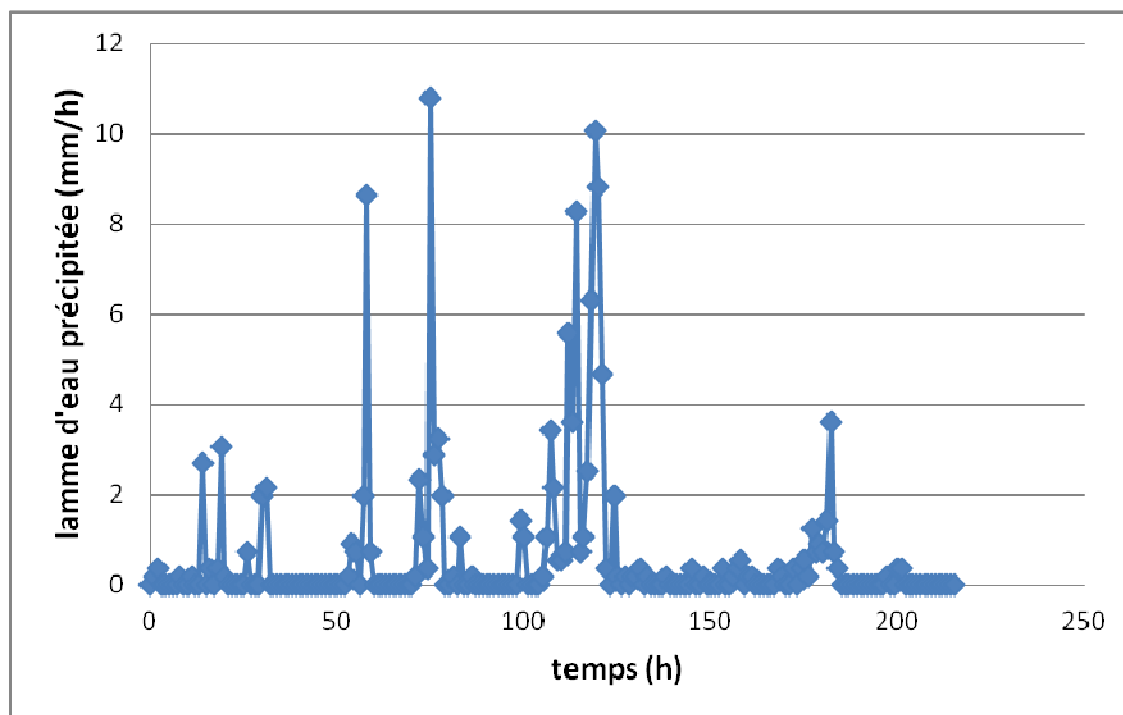


Figure 35 : Hyétogramme de la crue 1999

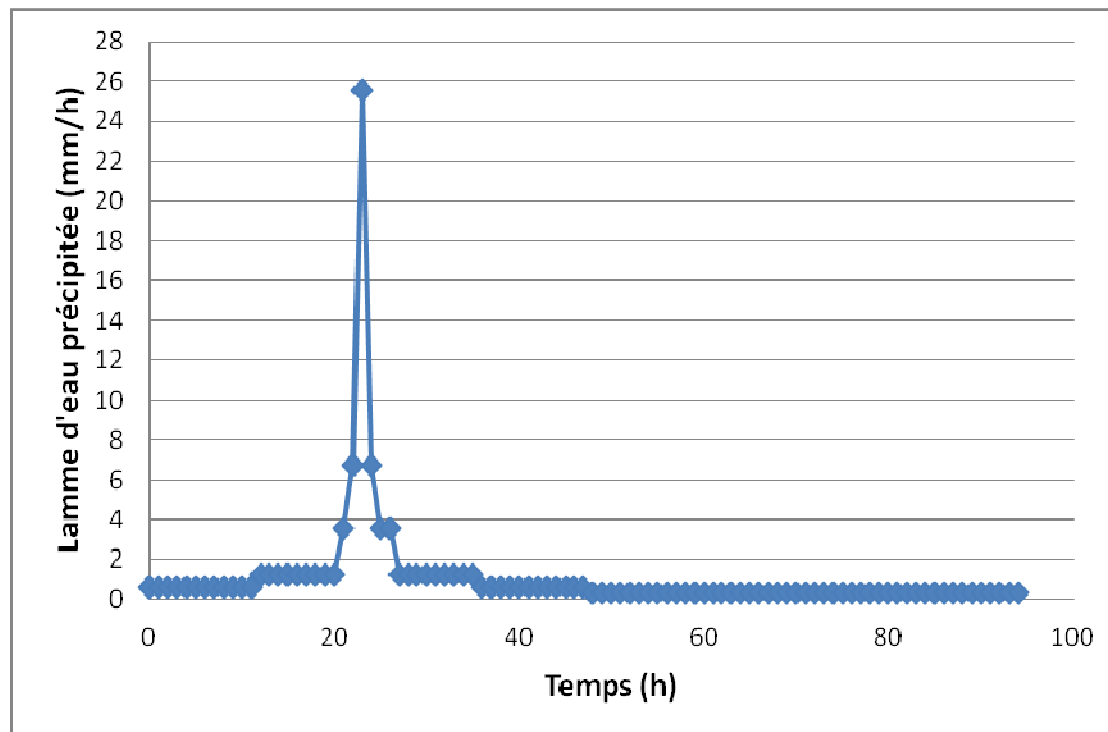


Figure 36 : Hyétogramme de la crue centennale

Afin d'étudier l'impact de l'impluvium, l'analyse porte sur la différence de cote obtenue avec ou sans prise en compte de l'impluvium en 6 points représentatifs de la zone d'étude :

- Point 1 : dans le champ majeur rive droite en aval de Morteveuille
- Point 2 : dans le méandre asséché de la Bretonnière
- Point 3 : dans le champ majeur rive droite au niveau de Curzon
- Point 4 : dans le champ majeur rive gauche au niveau de Lairoux
- Point 5 : au milieu du marais de Moricq en rive droite
- Point 6 : au milieu du marais de Saint Michel en l'Herm en rive gauche

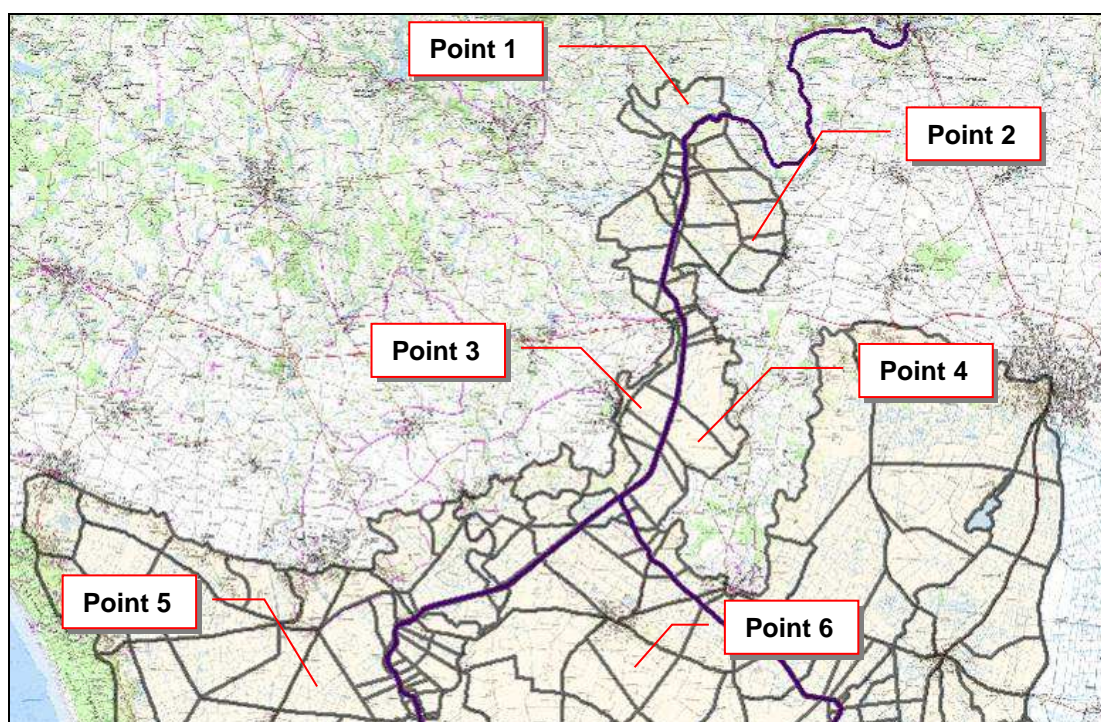


Figure 37 : Localisation des points d'analyse de l'impact de l'impluvium

Le tableau suivant montre les différences de niveaux obtenus pour les deux événements étudiés au maximum de la crue.

Point d'analyse	Impact de l'impluvium à l'instant du niveau maximal	
	Différence avec ou sans impluvium pour Q1999	Différence avec ou sans impluvium pour Q100
Point 1	0 cm :	0 cm
Point 2	5 cm	3 cm
Point 3	0 cm	3 cm
Point 4	0 cm	1 cm
Point 5	20 cm*	30 cm*
Point 6	20 cm*	20 cm*

Figure 38 : Impact de l'impluvium en plusieurs points de la zone d'étude pour les crues 1999 et centennale.

En ce qui concerne les points de 1 à 4, on constate un impact très limité de l'impluvium sur les niveaux obtenus, inférieur à 5 cm. Cela peut s'expliquer par la superficie d'impluvium plutôt faible dans cette zone à comparer aux volumes débordés dans le champ majeur.

Il est important de noter que les points 5 et 6 ne sont pas inondés lorsque l'impluvium n'est pas pris en compte. Par conséquent, la valeur indiquée ne correspond pas à une différence de niveau d'eau mais à une lame d'eau par rapport au terrain naturel. Cette lame d'eau n'est pas généralisée sur l'ensemble de la surface considérée. Elle correspond à la lame d'eau concentrée et accumulée dans les aspérités du terrain comme, par exemple, les canaux ou les dépressions.

Comme indiqué précédemment, le modèle hydraulique mis en œuvre dans la présente étude a pour objectif de simuler le fonctionnement du Lay et des marais pour des événements rares. Dans ce contexte, le réseau de canaux secondaires n'est pas modélisé. Par conséquent, le devenir de la pluie tombant avant l'arrivée de la crue ou la pluie tombant dans des zones non concernées par la crue, n'est pas correctement décrit car l'effet du drainage n'est pas pris en compte. L'accumulation de l'eau est alors surestimée.

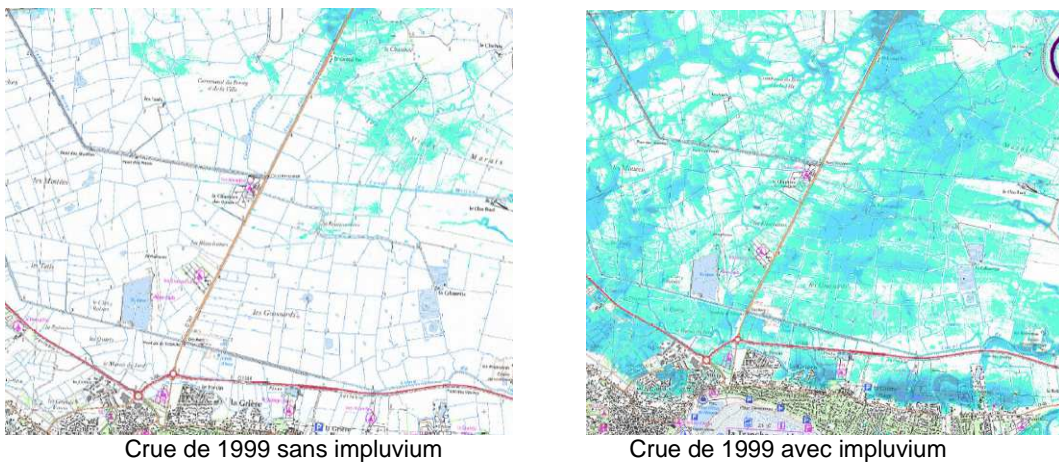


Figure 39 : Impact de l'impluvium dans le marais de Moricq pour la crue de 1999

Cette analyse montre donc que l'impact de l'impluvium est faible dans la partie amont, et que l'absence de modélisation du réseau secondaire entraîne une surestimation des zones inondées par l'impluvium. C'est pourquoi les crues ont été simulées sans prendre en compte l'impluvium.

3.3.2.4 Données de calage

La crue de 1960, considérée comme une crue centennale, est la plus marquante dans les mémoires. Elle a occasionné des dégâts importants. Cependant, le manque de donnée empêche de reproduire cet événement. Le calage du modèle se base donc sur des crues plus récentes dont nous possédons des enveloppes de crues estimées : 1983 et 1999 .

CRUE DE 1983

La crue de 1983 a une période de retour comprise entre 20 et 50 ans par rapport à son débit de pointe. L'événement se caractérise par plusieurs périodes de pluies successives qui ont produit un volume important. Ainsi, en termes de volume global, l'événement peut être classé comme très rare.

A noter qu'à cette date, le remblai de la voie ferrée possédait des franchissements hydrauliques permettant aux écoulements de transiter vers le marais de Moricq.

En l'absence de mesures pour la période étudiée, la condition aval maritime pour la crue de 1983 provient du logiciel de prévision de marée SHOMAR (source SHOM). Le limnigramme des niveaux aval est présenté ci-dessous :

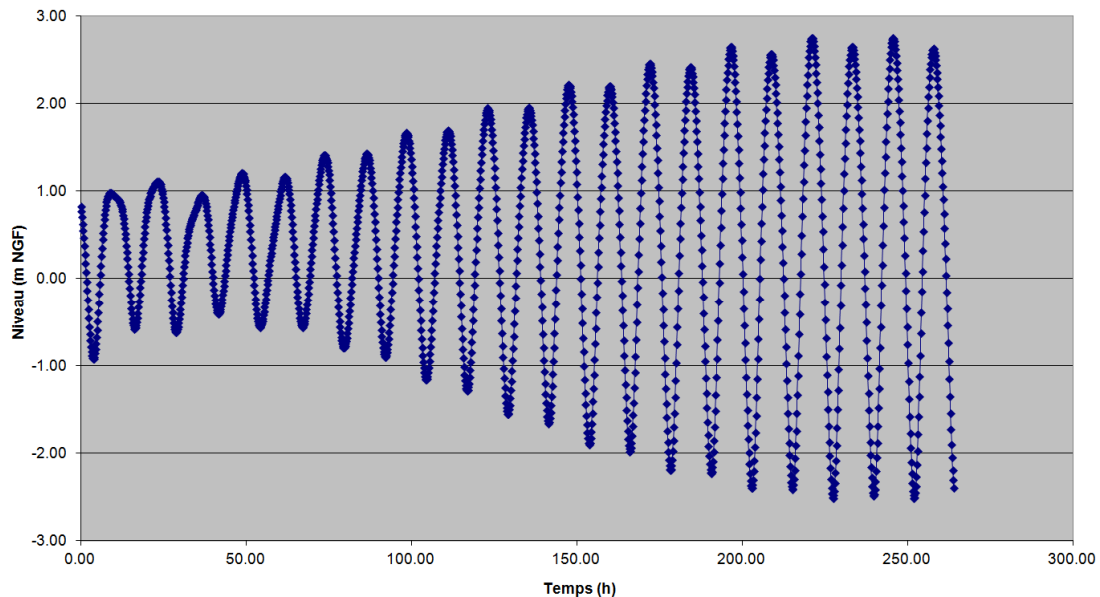


Figure 40 : Prévisions de niveaux du SCHOM La Rochelle - La Pallice entre le 05/04/1983 et le 16/04/1983

CRUE DE 1999

La crue de 1999 possède un débit de pointe d'occurrence légèrement inférieur à la Q20. En terme de volume, la crue est de l'ordre d'une Q50.

La voie ferrée au niveau du barrage de Moricq a été modifiée entre 1983 et 1999 avec l'obstruction des anciens franchissements hydrauliques.

Les conditions avals proviennent des mesures REFMAR® (Les observations du marégraphe de La Rochelle - La Pallice sont la propriété du SHOM et du Grand Port Maritime de La Rochelle et sont mises à disposition sur le site des Réseaux de référence des observations marégraphiques, refmar.shom.fr). Le limnigramme des niveaux avals est présenté ci-dessous :

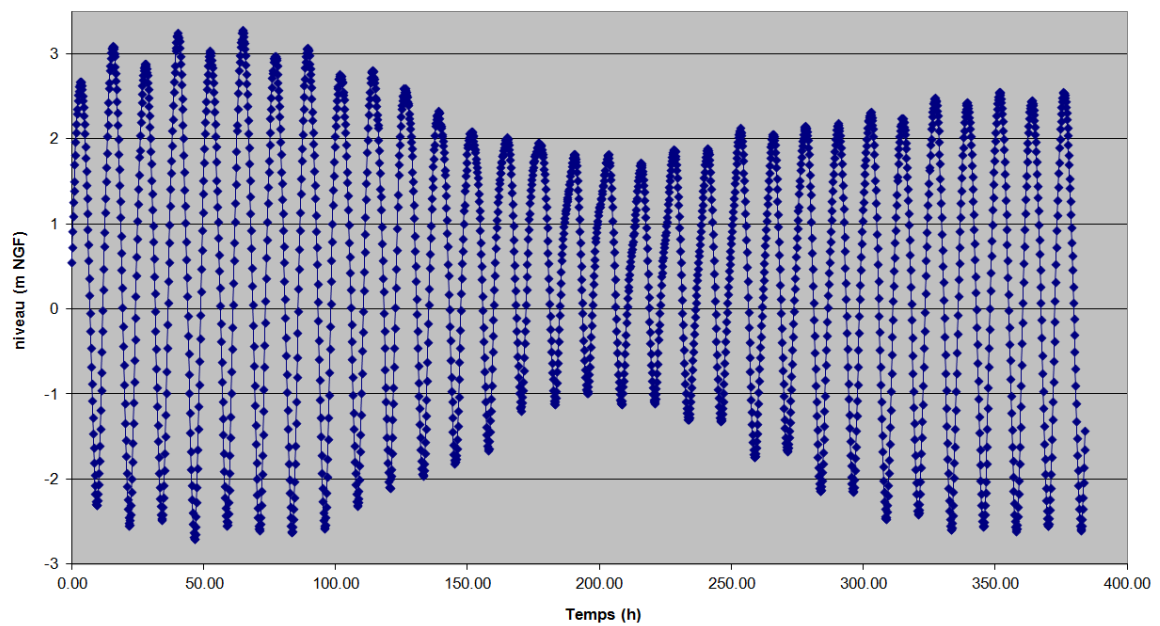


Figure 41 : Mesures REFMAR® à la station La Rochelle - La Pallice entre le 25/09/1999 et le 11/10/1999

3.3.2.5 Résultats du calage

CRUE DE 1983

La cartographie des hauteurs d'eau calculées est comparée à l'enveloppe de crue observée en 1983 sur la carte ci-après (Figure 42).

On observe une bonne concordance entre les calculs et l'enveloppe estimée pour la crue de 1983, notamment l'inondation du marais de Moricq par le franchissement des écoulements en rive droite au droit de barrage de Moricq (voie ferrée).

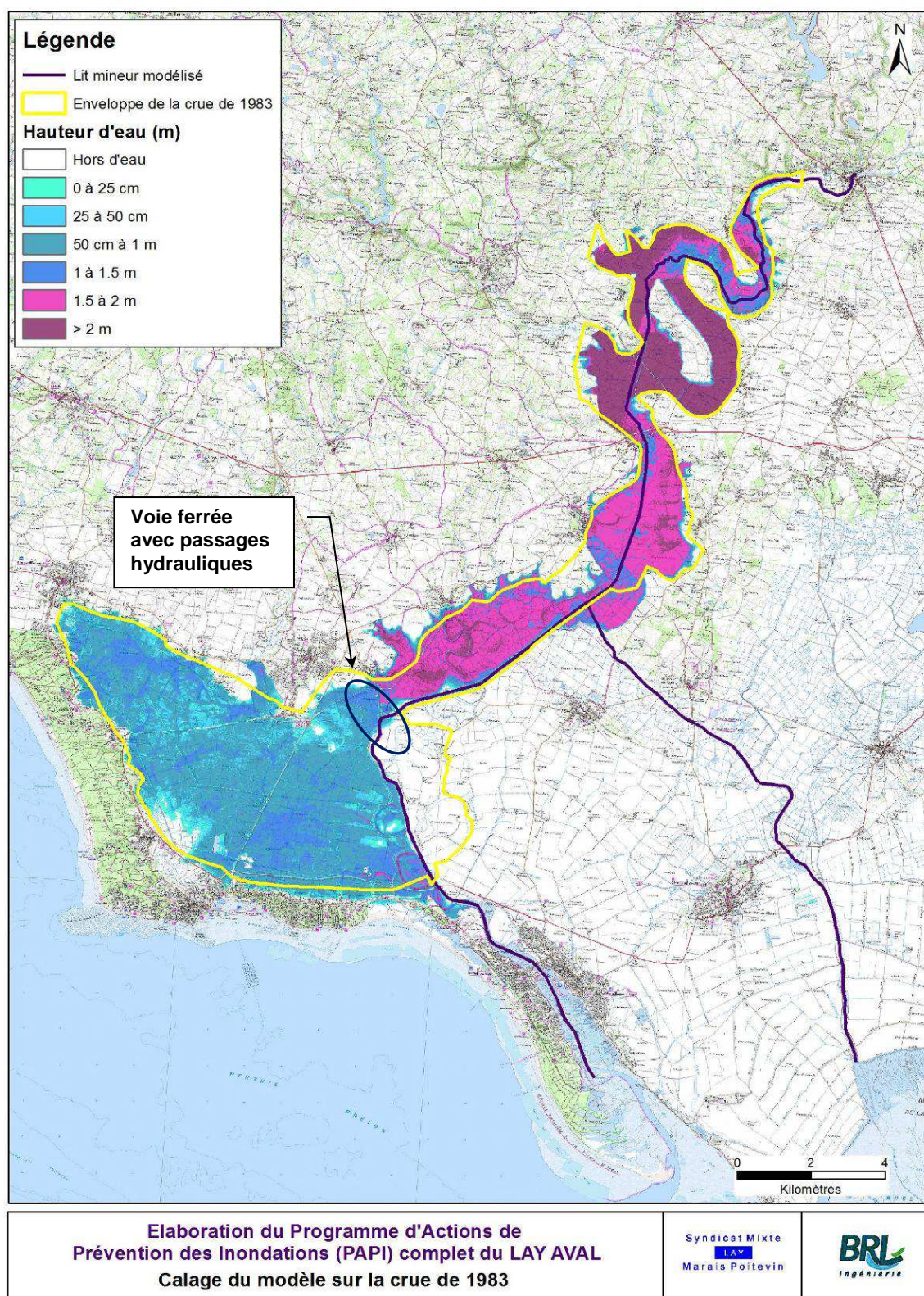


Figure 42 : Calage du modèle sur le crue de 1983

CRUE DE 1999

La cartographie des hauteurs d'eau calculées est comparée à l'enveloppe de crue observée en 1999 sur la carte ci-après.

La zone inondée définie par la simulation hydraulique est proche de l'enveloppe historique estimée.

On note qu'en rive droite du barrage de Moricq, la voie ferrée et la route départementale contiennent les écoulements en amont et évitent ainsi l'inondation du marais de Moricq.

La zone inondée au Nord-Ouest du marais de Moricq provient de l'injection de l'hydrogramme du Trousepoil dans le marais. Etant donné que cette zone n'a visiblement pas été impactée par les inondations durant la crue de 1999, il est probable que ces volumes aient été pris en charge par le réseau de drainage.

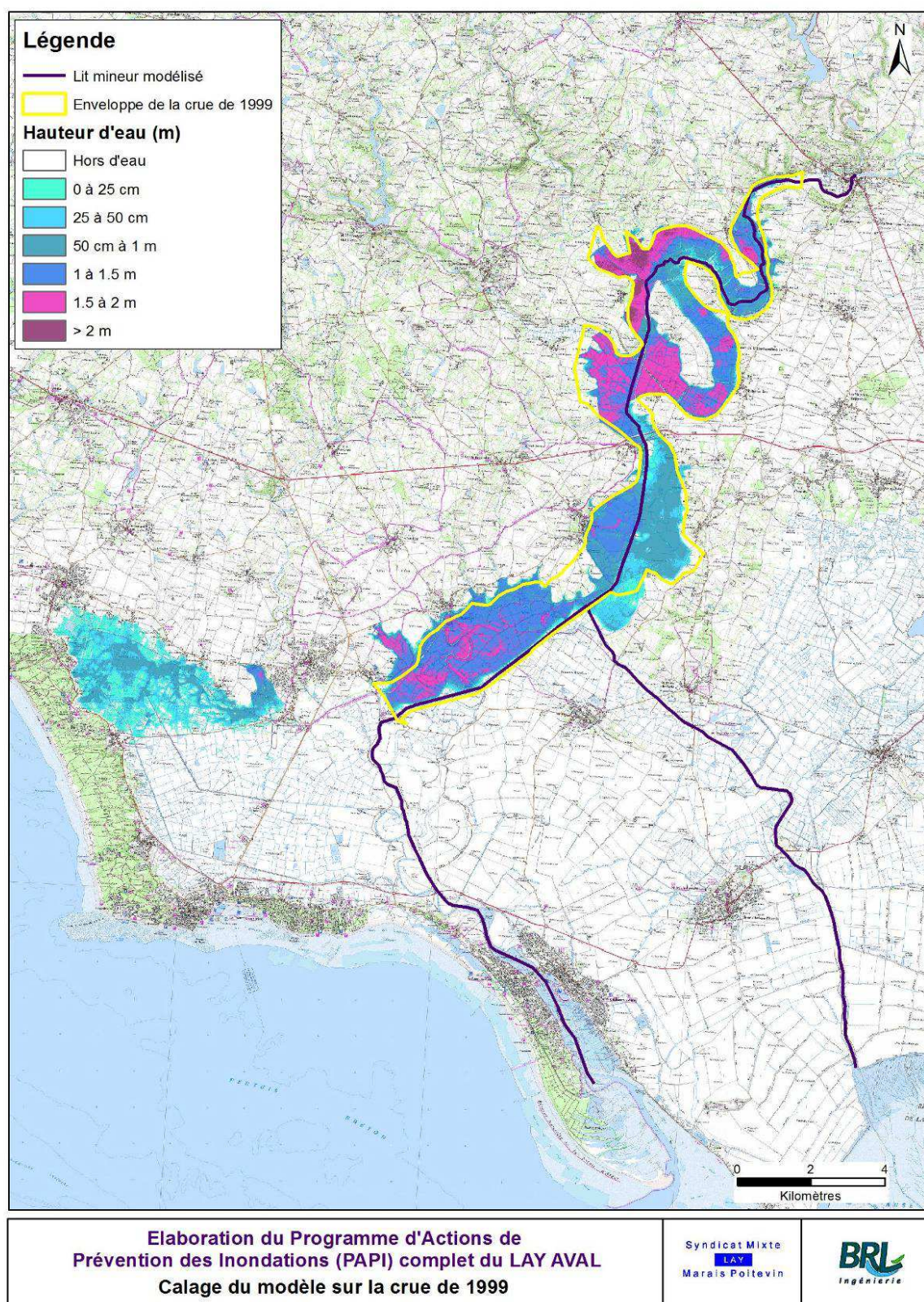


Figure 43 : Calage du modèle sur le crue de 1999

3.4 SCENARIO 1 – PREMIERS DEBORDEMENTS

3.4.1 Premiers débordements maritimes impactant un enjeu

Le scénario de premier débordement correspond au niveau d'eau qui entraîne les premières submersions marines et donc les premiers dégâts sur la zone d'étude. L'objectif est d'associer une période de retour à ce niveau d'eau pour qualifier la tempête de premier débordement.

3.4.1.1 Localisation des points de premiers débordements

Le lidar utilisé pour construire la bathymétrie de ce modèle est la version 2012 qui représente la situation actuelle au niveau du trait de côte. Pour le reste du modèle, la version 2010 est utilisé.

Lors d'une tempête, le niveau d'eau n'est pas identique le long du trait de côte sur la zone d'étude du fait de la géographie des lieux. Il faut donc utiliser un forçage hydrodynamique représentant ces variations géographiques du niveau d'eau. Le forçage de la tempête Xynthia convient parfaitement pour cette modélisation : on utilise les données du modèle océanique mis au point par l'Université de La Rochelle présenté précédemment.

Le point de premier débordement observé dans ce cas se situe au niveau de la pointe de l'Aiguillon. L'altitude de ce point fournie par les données lidar est de **3.85m NGF**. Le point de premier débordement est représenté sur la carte ci-après (figure 44), ainsi que les premiers débordements au droit des zones urbanisées.

La cote de 3.85 m NGF correspond au niveau marin relevé au marégraphe de La Rochelle lors de la tempête Martin du 27 décembre 1999. Ce niveau est donc cohérent avec les aléas de référence retenus dans les PAPI Nord Aunis et Vendée Sèvre Autizes.

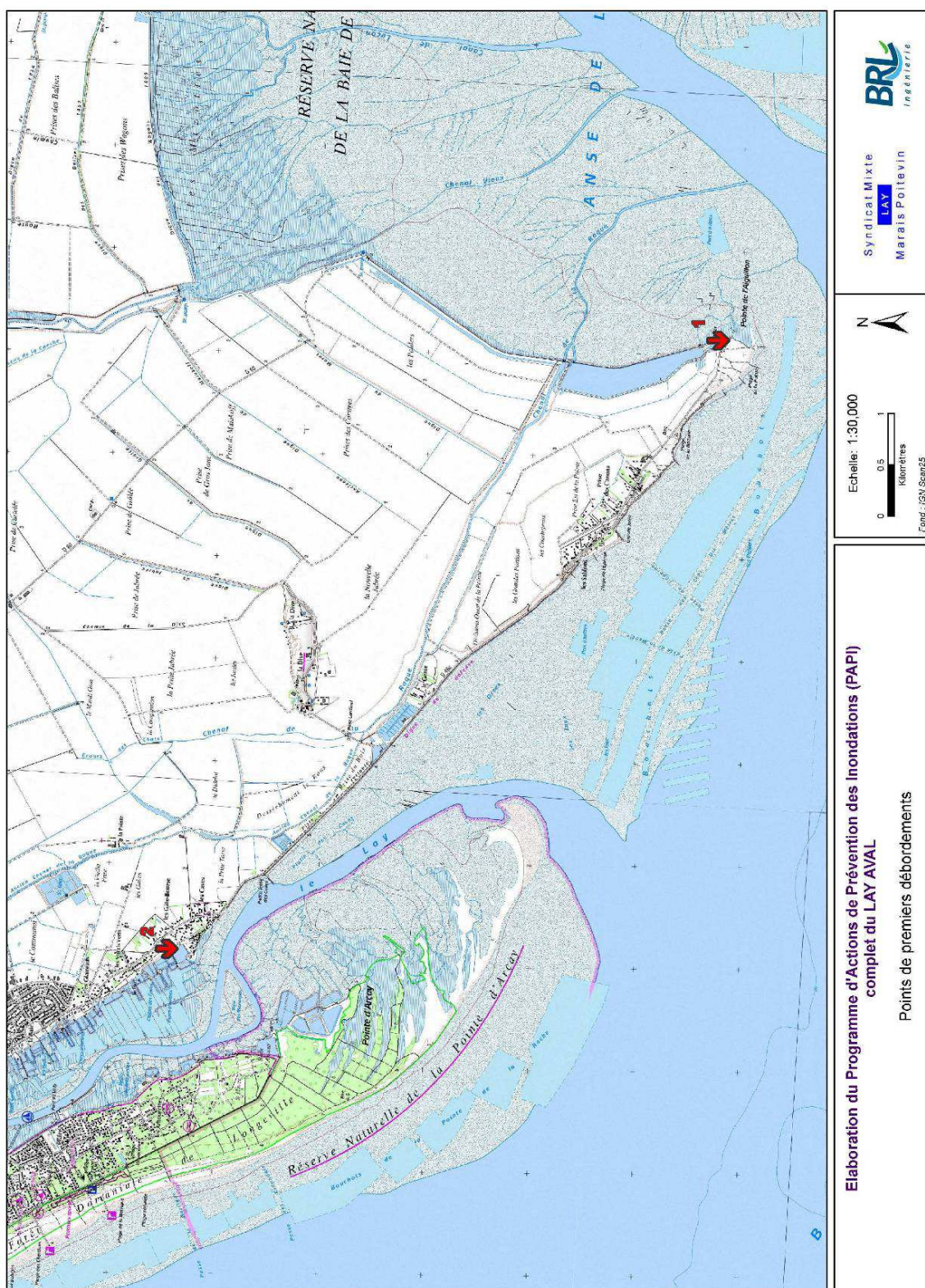


Figure 44 : Points de premiers débordements maritimes

3.4.1.2 Calcul de la période de retour

La référence utilisée ici pour calculer une période de retour à partir d'un niveau d'eau est issue de l'ouvrage : « Les niveaux marins extrêmes le long des côtes de France et leur évolution – SHOM – 2008 ».

Cet ouvrage propose une relation entre les niveaux d'eau marins extrêmes et les périodes de retour ou probabilités d'occurrence. Ces niveaux d'eau marins extrêmes prennent en compte la marée astronomique ainsi que les surcotes d'origine météorologiques mais pas la houle (on considère ainsi que le paramètre « niveau d'eau » est le plus pénalisant, à l'image du phénomène Xynthia). La figure suivante illustre cette relation au port de La Rochelle – La Pallice.

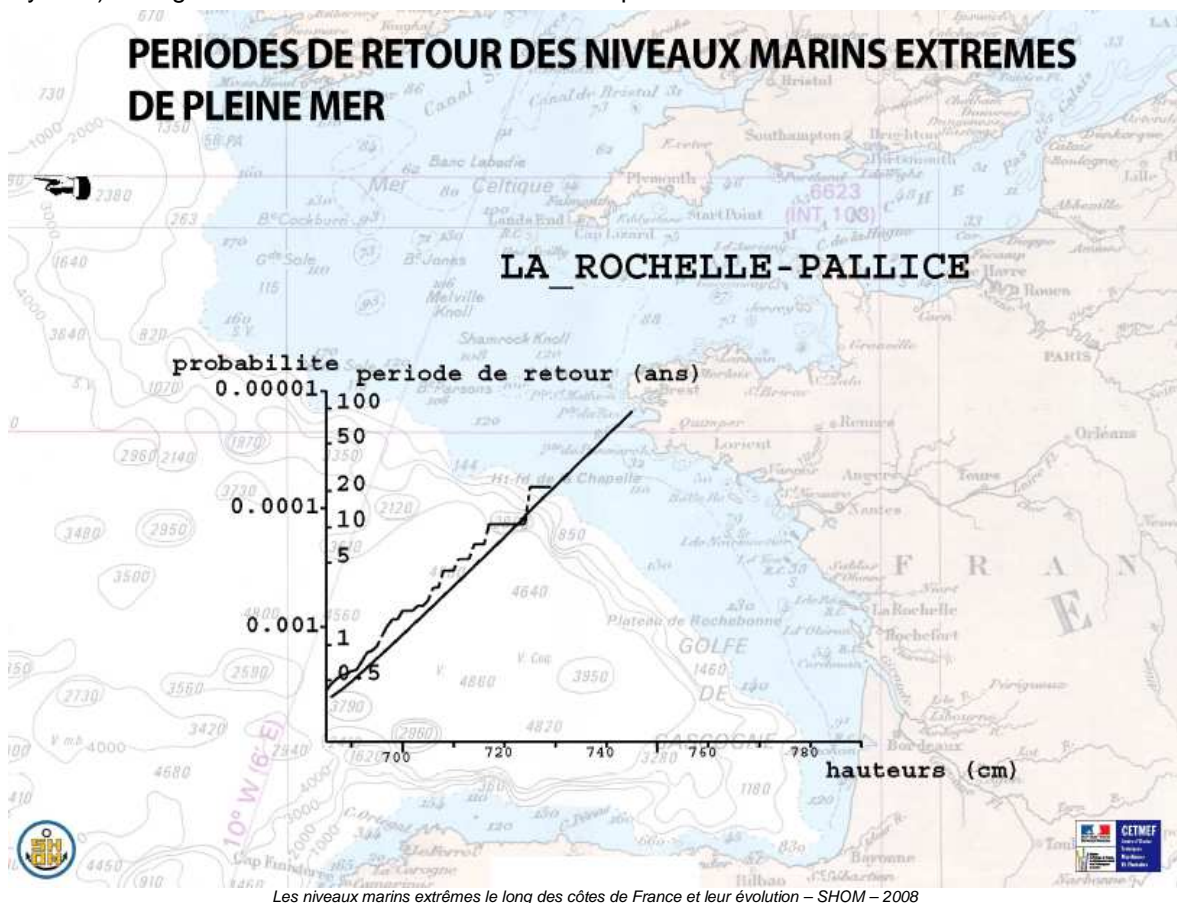
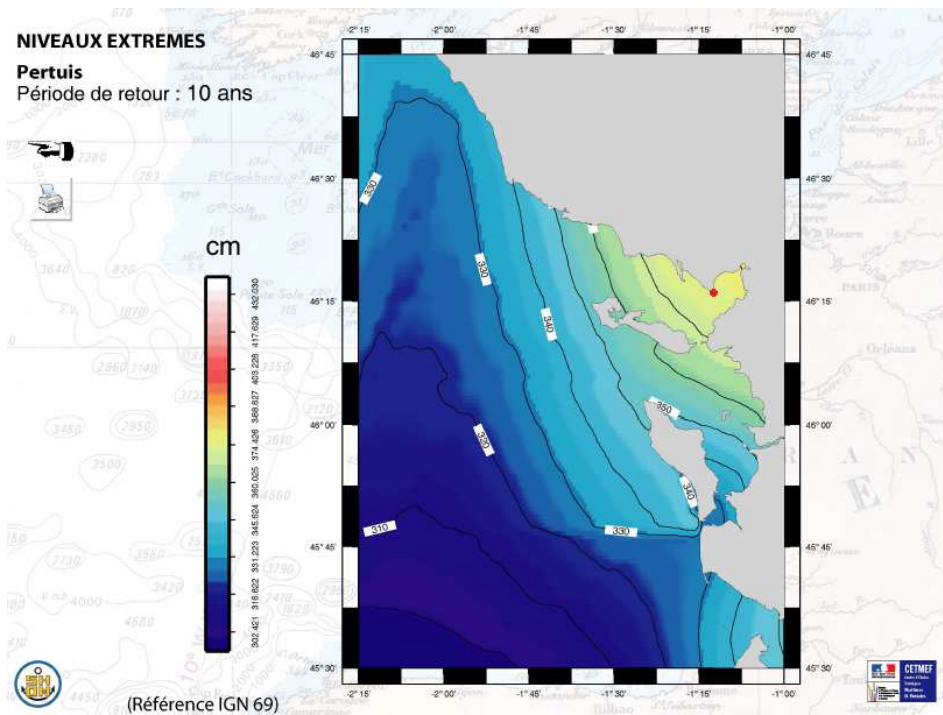


Figure 45 : Périodes de retour des niveaux marins extrêmes de pleine mer - La Rochelle-Pallice

La courbe en traits pointillés représente les valeurs mesurées et la courbe en traits pleins représente la relation extrapolée. Il faut bien noter que si la période de retour est trop importante, la courbe extrapolée perd de son sens. Il semble que cette loi ne soit valable que pour des événements d'une période de retour inférieure à 50 ans. La période de retour de la tempête Xynthia ne pourrait pas être estimée par cette méthode.

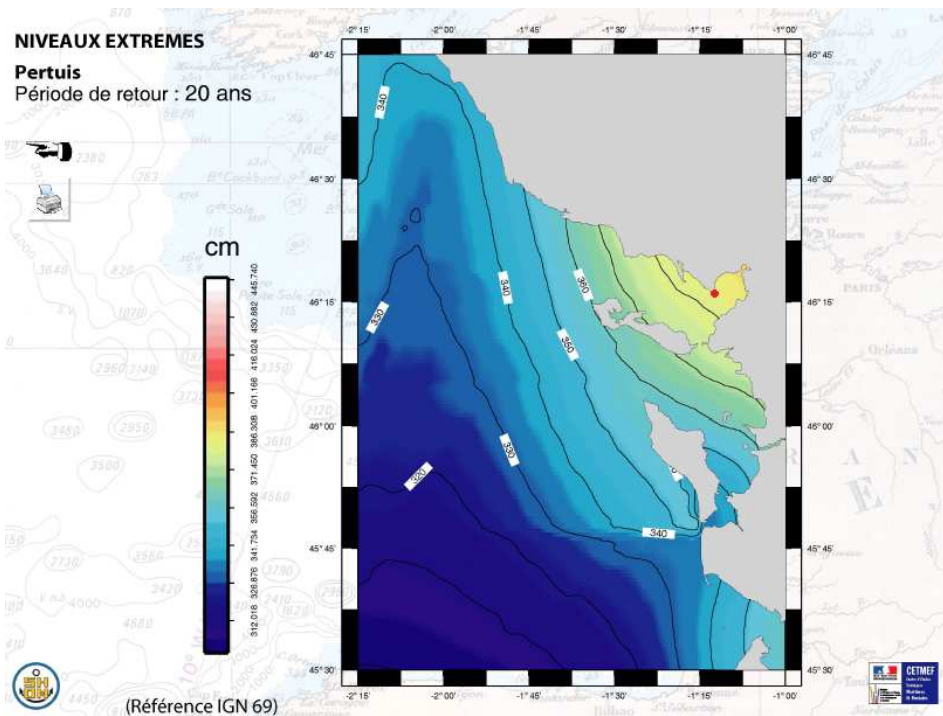
Cette courbe est valable uniquement au niveau de La Rochelle – La Pallice.

L'ouvrage du SHOM propose également des cartographies des niveaux d'eau marins extrêmes sur toute la zone des Pertuis charentais pour des périodes de retour de 10, 20, 50 et 100ans.



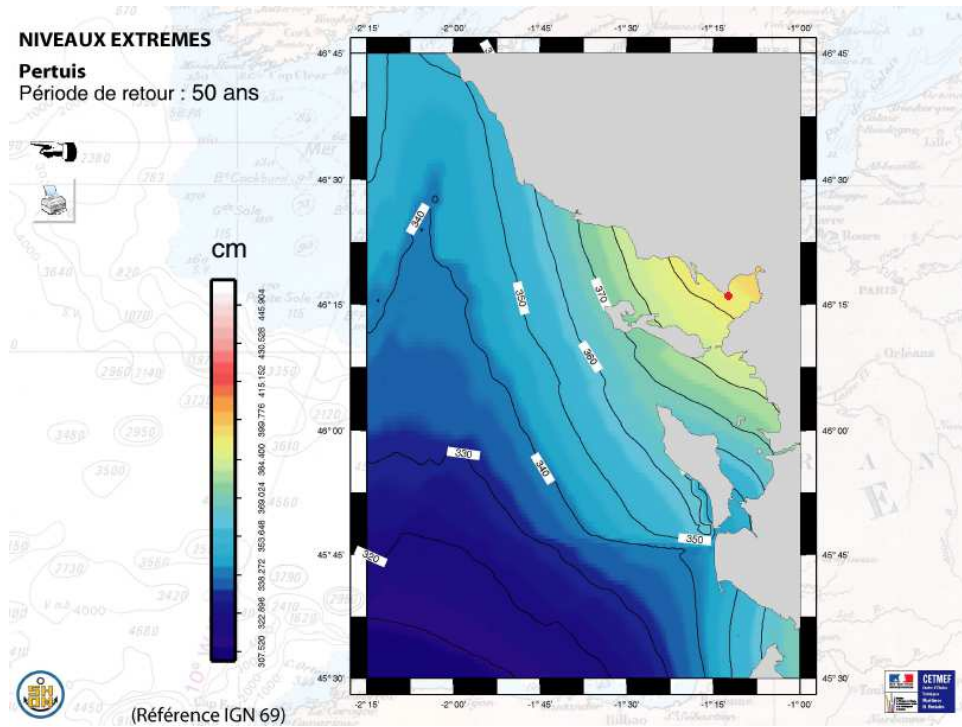
Les niveaux marins extrêmes le long des côtes de France et leur évolution – SHOM – 2008

Figure 46 : Niveaux marins extrêmes, Pertuis charentais, 10 ans



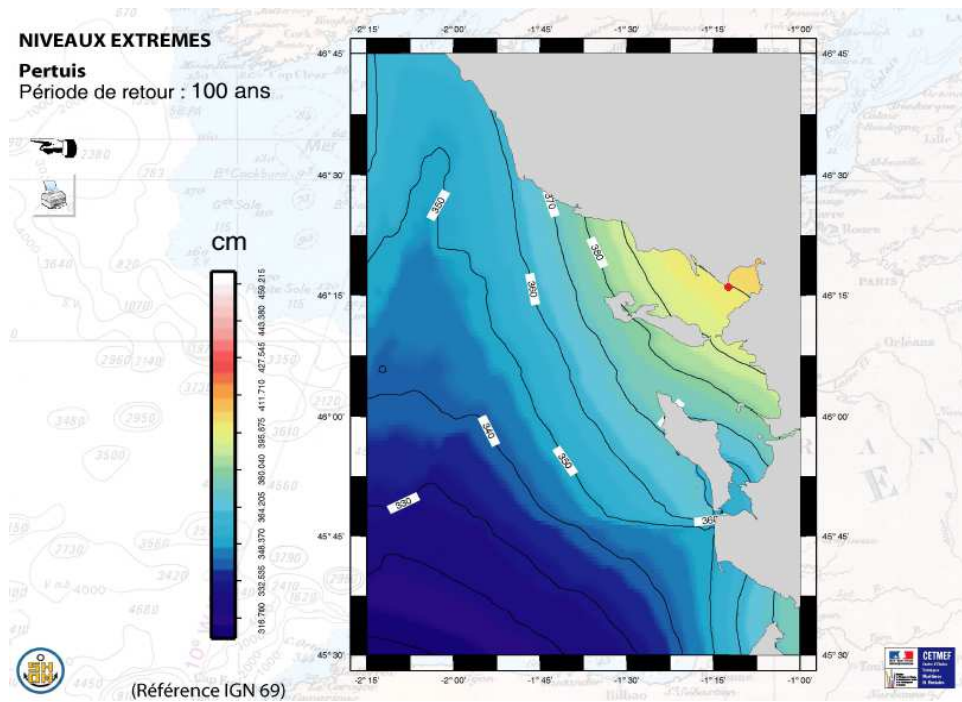
Les niveaux marins extrêmes le long des côtes de France et leur évolution – SHOM – 2008

Figure 47 : Niveaux marins extrêmes, Pertuis charentais, 20 ans



Les niveaux marins extrêmes le long des côtes de France et leur évolution – SHOM – 2008

Figure 48 : Niveaux marins extrêmes, Pertuis charentais, 50 ans



Les niveaux marins extrêmes le long des côtes de France et leur évolution – SHOM – 2008

Figure 49 : Niveaux marins extrêmes, Pertuis charentais, 100 ans

A partir de ces quatre cartes, on extrait une relation reliant les périodes de retour aux niveaux marins extrêmes sur le secteur du premier débordement (la pointe de l'Aiguillon).

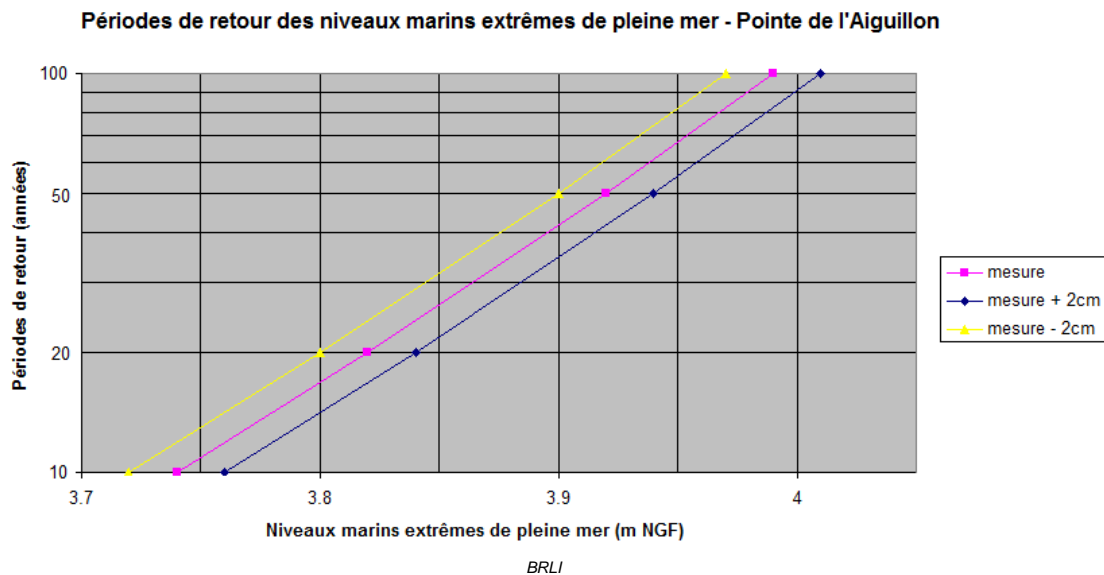


Figure 50 : Périodes de retour des niveaux marins extrêmes de pleine mer - Pointe de l'Aiguillon

La précision des lectures de hauteur d'eau en fonction du code de couleur est estimée à $\pm 2\text{cm}$, ce qui entraîne donc une incertitude dans la détermination de la période de retour associée.

A une hauteur d'eau de 3.85m NGF, au point de premier débordement, correspond une période de retour de 25 à 35 ans environ.

La période de retour pour le point de premier débordement estimée ici reste inférieure à 50 ans et valide bien l'hypothèse faite au départ du calcul. Il faut bien noter que la valeur de période de retour est extrêmement sensible à la valeur de la hauteur d'eau. A titre d'exemple, une hauteur d'eau de premier débordement avec 5cm supplémentaires donnerait une période de retour de 40 à 55 ans.

3.4.2 Premiers débordements fluviaux impactant un enjeu

3.4.2.1 Méthodologie proposée

La notion d'impact sur les enjeux dans le cas du Lay peut être de plusieurs ordres. Il peut s'agir de pâturages ou zones agricoles situées dans le champs majeur naturel fréquemment inondés par débordement du lit mineur, ou bien des zones urbaines situées sur les versants de la vallée à la limite du champ d'expansion des crues.

L'analyse des premiers débordements couvre ces deux problématiques en engageant deux méthodes d'analyse :

- Estimation de la capacité du lit mineur et des lieux de premiers débordements
- Définition des enveloppes de zone inondable pour une palette de diverses périodes de retour.

CAPACITE DU LIT MINEUR

L'analyse des premiers débordements du lit mineur est menée sous deux angles différents :

- ▶ Estimer la capacité du lit mineur en tout point du linéaire en régime permanent, sans prendre en compte les débordements en amont d'un point considéré.
- ▶ Analyser les débordements en considérant la dynamique de la crue. Cette approche nécessite d'étudier une crue représentative et les lieux de débordements. Ainsi, lorsqu'on étudie la partie aval, les niveaux et donc les débordements sont tributaires des éventuels débordements en amont.

Ces deux approches permettent de définir la capacité du lit mineur sur l'ensemble du linéaire et de compléter l'analyse purement capacitaire avec la connaissance de la dynamique de la crue.

Dans la partie aval, du barrage de Moricq à l'estuaire, les conditions maritimes ont une importance première dans les débordements du lit mineur. Ainsi, l'influence aval est étudiée dans les deux approches :

- ▶ Capacitaire sur le lit mineur : définition de la capacité pour 4 valeurs de niveaux constants marins : 1, 2, 3 et 4 mNGF
- ▶ Analyse dynamique des débordements pour les crues fréquentielles : marégramme correspondant aux premiers débordements maritimes : la cote de la marée haute est établie à 3.8 mNGF.

ENVELOPPES DES ZONES INONDABLES

L'objectif de la démarche est de visualiser l'évolution de l'emprise de la zone inondable pour des crues de périodes croissantes et localiser les enjeux impactés de type bâti. Ainsi, les crues simulées sont celles pour lesquelles le lit mineur déborde largement et où le champ majeur est entièrement mis à contribution. La définition des enveloppes de crue se fait sur les crues de périodes de retour 10, 20, 50, 100 et 500 ans.

Pour l'ensemble de ces événements, les conditions maritimes correspondent aux premiers débordements maritimes avec une marée haute à 3.8 mNGF (cf. 3.5.2.1 Hypothèses)

3.4.2.2 Capacité du lit mineur

Analyse capacitaire en régime permanent

L'analyse capacitaire du lit mineur en régime permanent ne prend pas en compte les débordements amonts. Cela implique que l'intégralité du débit parcourt le linéaire d'étude. Ainsi, un tronçon aval considéré comme débordant peut ne pas l'être en réalité grâce à l'effet tampon des débordements amonts.

Le tableau suivant présente la capacité théorique du lit mineur par tronçon pour une condition aval de 0 mNGF.

La localisation des tronçons est figurée sur la carte ci-après.

N°	Tronçon	Identification du tronçon	Débit 1er débordement RG	Débit 1er débordement RD	Gamme de période de retour	Période retour estimée	Affluents contributaires
1	LA001 - LA009	Mareuil-sur-Lay au Barrage de Morteveuille	80	80	$2 < T < 5$	2.5	Lay, Marillet
2	LA009 - LA012	Barrage de Morteveuille à la voie SNCF	80	80	$2 < T < 5$	< 2	Lay, Marillet, Yon
3	LA012 à LA013	Voie SNCF à la RD949	111	70	$2 < T < 5$	< 2	Lay, Marillet, Yon, Graon
4	LA013 à LA014i3	RD949 à la Porte de Prés Jaillard (Chenal Vieux)	200	200	$5 < T < 10$	6	Lay, Marillet, Yon, Graon
5	LA014i3 à LA017	Porte de Prés Jaillard (Chenal Vieux) au Barrage de Moricq	281	243	$5 < T < 10$	9	Lay, Marillet, Yon, Graon
6	LA017 à LA026	Barrage de Moricq au lieu-dit "Les Mottes"	354	327	$10 < T < 20$	9	Lay, Marillet, Yon, Graon
7	LA026 au LA032	Lieu-dit "Les Mottes" au Barrage du Brauld	560	510	$20 < T < 50$	19	Lay, Marillet, Yon, Graon

Figure 51 : Capacité du lit mineur - analyse en régime permanent sans débordement (l'intégralité du débit transite vers l'aval) - Condition aval maritime constante : 0 mNGF.

Le tableau suivant présente la capacité du lit mineur selon différentes conditions maritimes aval. Il est important de noter que la période de retour est calculée sur la base des débits de pointe des hydrogrammes amont. Elle ne prend absolument pas en compte la probabilité d'occurrence de la condition aval

N°	Tronçon	Débit 1er débordement							
		Niveau mer = 0 mNGF		Niveau mer = 2 mNGF		Niveau mer = 3mNGF		Niveau mer = 4 mNGF	
		Q lit min.	Période de retour	Q lit min.	Période de retour	Q lit min.	Période de retour	Q lit min.	Période de retour
1	LA001 - LA009	80	2.5	80	2.5	70	< 2	65	< 2
2	LA009 - LA012	80	< 2	80	< 2	64	< 2	55	< 2
3	LA012 à LA013	70	< 2	70	< 2	68	< 2	58	< 2
4	LA013 à LA014i3	200	5	200	5	186	5	170	4
5	LA014i3 à LA017	243	6	243	6	224	6	182	5
6	LA017 à LA026	327	9	302	9	257	7	72	< 2
7	LA026 au LA032	510	19	492	18	434	14	221	6

Figure 52 : Capacité du lit mineur selon la condition maritime aval (la période retour provient des débits de pointe des hydrogrammes en amont, elle n'intègre pas l'occurrence de la condition aval - évènement maritime)



Figure 53 : Localisation des tronçons de l'analyse capacitaire

Analyse des débordements pour les crues fréquentielles

La carte ci-après (figure 54) présentant la dynamique de la crue centennale est également consultable dans l'atlas cartographique joint. Elle permet de visualiser les lieux de débordements et la dynamique des écoulements qui est semblable pour l'ensemble des crues fréquentielles.

La démarche consiste à déterminer le débit dans le lit mineur qui correspond au premier débordement de chaque tronçon d'étude.

Conclusion

Les deux angles d'analyse complémentaires permettent de montrer que les débordements en amont ont lieu pour des crues de période de retour faible, moins de 2 ans. Ces débordements mettent à contribution l'ensemble du champ majeur du Lay. Cela génère un écrêtement très important de la crue. Les débordements sont fréquents de l'amont du barrage de Morteveille jusqu'à l'aval du Port la Claye.

Sur le linéaire entre l'aval de Port la Claye et le barrage de Moricq, les écoulements transitent de l'amont dans les champs majeurs gauche et droit. Cependant, aucun débordement n'a lieu par-dessus les digues du lit mineur sur cette partie du linéaire.

La carte ci-après (figure 55) présente la capacité du lit mineur par tronçon venant des deux approches. Les valeurs en amont (couleur verte) correspondent à des lieux de débordement effectifs (analyse des crues fréquentielles). Les valeurs en aval (couleur rouge) correspondent à des zones sans débordement effectif pour les crues fréquentielles simulées (analyse capacitaire en régime permanent pour une condition aval de 3 mNGF).

Sur le linéaire aval du Lay, à proximité du lieu-dit « Les Tendres », des débordements sont observés pour les crues de fréquences rares. Il est délicat dans le cadre de la présente approche d'affecter une période de retour à ces débordements car ils sont principalement dus au niveau marin élevé (3.8 mNGF à marée haute pour notre hypothèse de premier débordement).



Figure 54 : Dynamique de la crue centennale du LAY

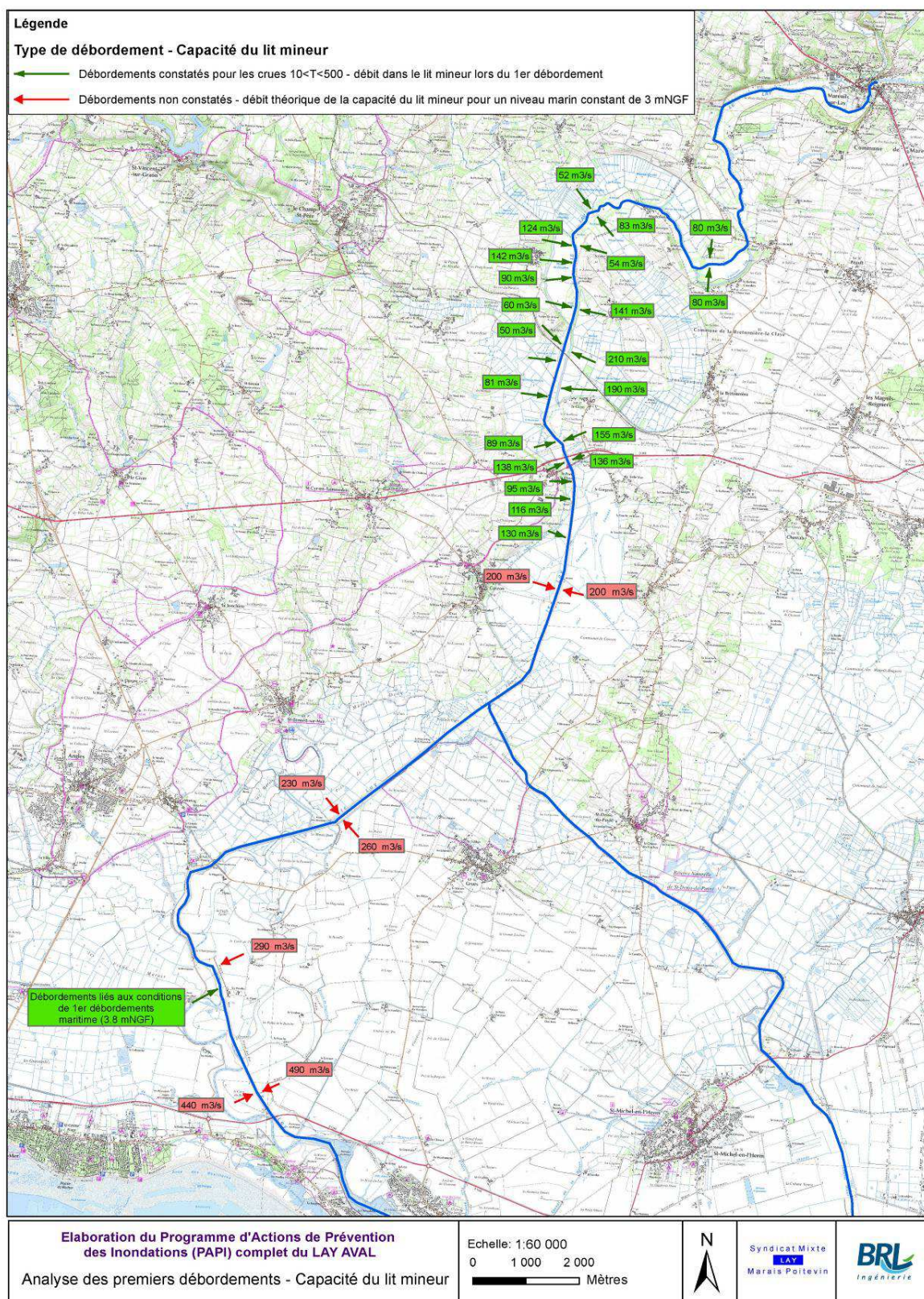


Figure 55 : Analyse des premiers débordements sur le LAY - Capacité du lit mineur

3.4.2.3 Enveloppes des zones inondables

La carte des enveloppes des zones inondables des crues de période de retour 10, 20, 50, 100 et 500 ans est consultable dans l'atlas cartographique joint.

L'emprise des zones inondables est proche pour toutes les périodes de retour. Elle correspond au champ d'expansion naturel des crues du Lay facilement identifiable. En effet, on distingue une démarcation claire entre la plaine composée de marais drainés par d'innombrables canaux et les versants de la vallée au dénivelé marqué à leur base sur lesquels sont localisés les villages surplombant la plaine.

La limite de la zone inondable est donc proche des habitations au niveau de plusieurs villages sans pour autant les impacter véritablement : la Couture, le Coteau Gourdon, Noailles, la Bretonnière, la Claye, le Port la Claye, le Gorgeais, le Payré et d'autres hameaux. Des villages sont légèrement impactés mais cela concerne un nombre limité d'habitations pour des occurrences rares (à l'exception de Morteveille):

- ▶ Lavaud (Port Soulay) : à partir de T=50 ans
- ▶ Les Pacaudières : à partir de T=500 ans
- ▶ Morteveille : à partir de T=20 ans
- ▶ L'île : à partir de T=500 ans
- ▶ Curzon : à partir de T=100 ans
- ▶ Saint Benoist-sur-Mer : à partir de T=50 ans
- ▶ Moricq : à partir de T=500 ans (à partir de T=50 ans pour la Barboire)

3.5 SCENARIO 2 – EVENEMENT D'OCCURRENCE CENTENNALE

3.5.1 Evènement maritime

On considère que l'évènement centennal maritime est la tempête Xynthia (la période de retour est estimée entre 80 et 150 ans). Le lidar utilisé pour construire la bathymétrie de ce modèle est la version 2012 qui représente la situation actuelle au niveau du trait de côte : de nombreuses rehausses et confortement de digues ont été réalisés depuis 2010. Comme présenté dans les hypothèses de calcul, le cordon dunaire de la Belle Henriette est effacé.

Pour le reste du modèle, la version 2010 est utilisée. De plus, **cette simulation ne prend en compte aucune brèche**, on suppose que les ouvrages, même franchis ne sont pas détruits. Les coefficients de Strickler utilisés sont ceux établis lors du calage du modèle. Le forçage utilisé provient du modèle océanique mis au point par l'Université de La Rochelle présenté précédemment. Ces hypothèses sont présentées au chapitre 4.3.1.4.

Les résultats de cette simulation sont représentés sur les cartes de l'atlas cartographique joint.

On peut résumer l'impact d'un évènement centennal par secteur :

- ▶ Zone de la Tranche sur mer :
 - Submersion complète de la lagune de la Belle Henriette.
 - Submersions faibles du lieu-dit Saint Anne.

- Submersions importantes des quartiers Les Jars et les Rouillères.
- Route D46 franchie aux Rouillères ainsi qu'à l'Ouest des Prises avec inondation des secteurs bas en arrière (hauteurs d'eau faibles).
- ▶ Zone de la Faute sur mer :
 - Submersion complète de la lagune de la Belle Henriette.
 - Digue du Platin franchie avec inondation de la zone basse arrière limitée par la route D46
 - Submersions faibles près du Havre sur la côte est (estuaire du Lay).
 - Submersions très minimales près des Amourettes.
 - Submersions moyennes près du barrage du Braud au lieu-dit la Bonne Femme.
- ▶ Zone de l'Aiguillon :
 - Submersions moyennes autour de barrage du Braud (limitées par la digue du Grenouillet, des Grues et des Grands Relais).
 - Submersions notables au niveau du centre-ville et le long du littoral jusqu'au lieu-dit les Caves.
 - Aucune submersion entre le lieu-dit les Caves et la pointe de l'Aiguillon (digue du Génie et perré des Sablons).
 - Submersions moyennes au niveau de la pointe de l'Aiguillon (cordon dunaire de la pointe et digue du polder I).
- ▶ Zone de Saint Michel en l'Herm :
 - Submersions faibles sur la moitié sud de la digue du Polder II.
- ▶ Zone de Triaize :
 - Submersions faibles sur la digue des Wagons et le long du chenal Vieux.

Conclusion : Les zones inondées sont nettement plus faibles que lors de l'événement historique de la tempête Xynthia. Les zones les plus touchées sont sur la commune de l'Aiguillon : le centre-ville et les lieux dits au sud du centre-ville. La rehausse et le confortement des digues a un impact conséquent.

3.5.2 Evènement fluvial

La carte des hauteurs d'eau maximales de l'événement centennal fluvial est fournie dans l'atlas cartographique joint.

3.5.2.1 Hypothèses

L'événement centennal fluvial est basé sur les hydrogrammes calculés dans l'analyse hydrologique (cf. chapitre 3.2 Analyse hydrologique). La figure suivante présente les hydrogrammes du Lay et de ses affluents pour la crue centennale.

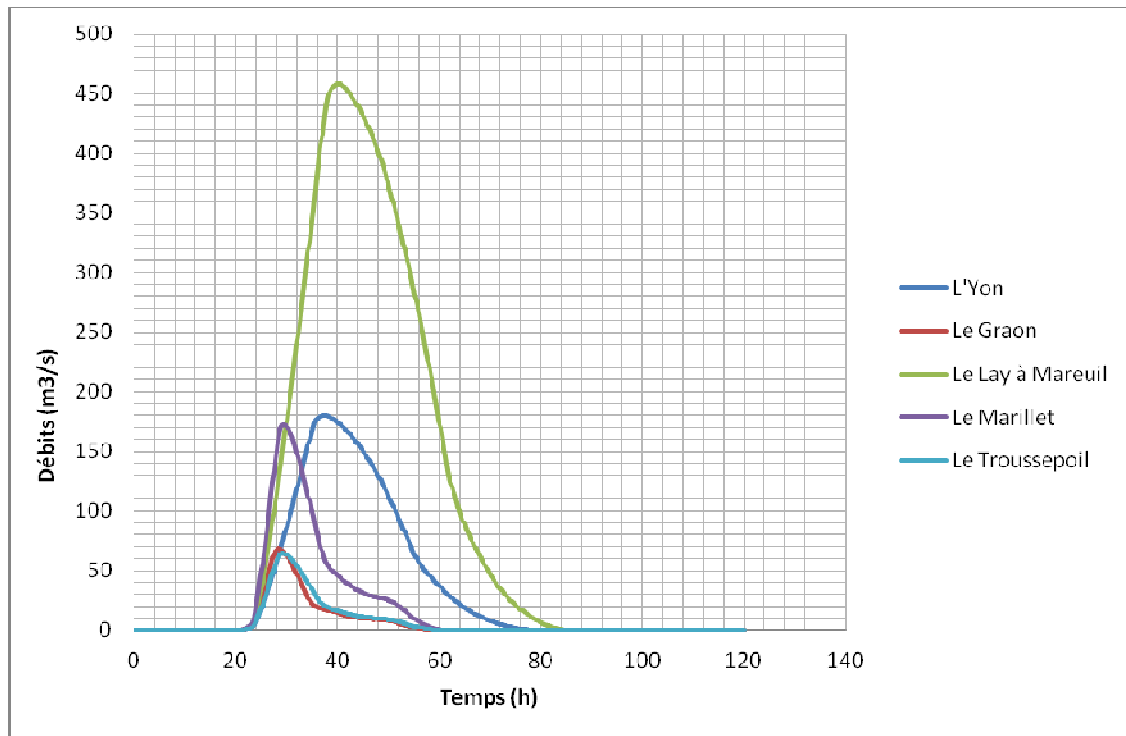


Figure 56 : Hydrogrammes du Lay et de ses affluents pour une crue centennale

Comme condition aval, on impose une succession de marées dont le niveau de marée haute est basé sur la cote de premiers débordements maritimes à 3.85 mNGF. Pour ce faire, on choisit un couple de marée et de surcote de même période de retour qui permettent d'atteindre la cote précédente. Afin que l'impact de la condition aval soit maximale, et pour se placer dans une situation défavorable, on fait coïncider la marée haute avec le passage du pic de crue en aval du Lay. Le marégramme obtenu est le suivant :

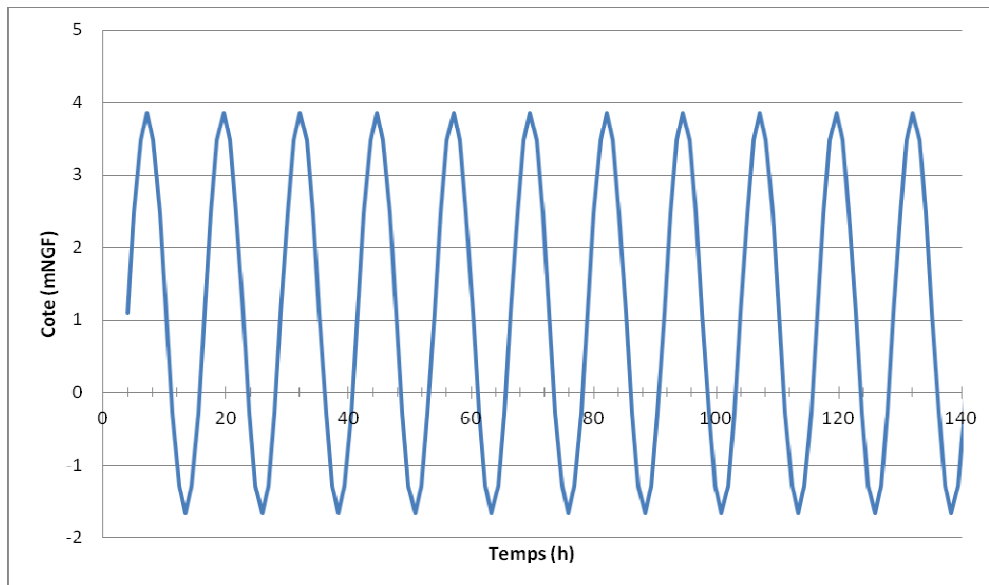


Figure 57 : Marégramme recréé à partir du niveau de 1er débordements maritimes

3.5.2.2 Analyse des résultats

3.5.2.2.1 Dynamique des écoulements

La carte indicative de la dynamique d'écoulements de la crue centennale est fournie dans l'atlas cartographique joint.

Comme exposé dans le chapitre « 3.4.2 Premiers débordements fluviaux impactant un enjeu », des débordements ont lieu très rapidement sur la partie amont. Le Lay sort de son lit au niveau de Couture et de Morteveille, et alimente par des écoulements en champs majeur et de nouveaux débordements du lit mineur, les marais mouillés situés à l'aval en rive droite. En rive gauche, à l'aval immédiat de Morteveille, des débordements s'écoulent vers l'ancien méandre du Lay. Ces écoulements rejoignent ceux provenant de la partie aval et remplissent le méandre.

Au droit de Noailles où la vallée se resserre, une grande partie du volume débordé regagne le lit mineur ou passe par le Marais de Noailles. La digue qui protège Noailles n'est pas submergée et contient les écoulements du Lay.

Plus en aval, une grande partie du débit déborde dans le Grand Marais de Marigny et transite ensuite en champ majeur droit. Une petite partie de ces écoulements regagnent le lit mineur en amont de Port-la-Claye tandis que le reste passe sous la RD 949 et la RD46 par des ouvrages de franchissement dans les remblais. En rive gauche, des écoulements de plus faibles ampleurs franchissent également les deux routes départementales.

En aval de Port-la-Claye, mis à part quelques échanges entre lit mineur et le champs majeur en rive droite, on n'observe plus de débordement. Le système fonctionne alors en écoulements parallèles déconnectés. Dans le champs majeurs gauche, les faibles écoulements provenant des ouvrages de décharge sous la RD 46 sont contenus en aval par les digues du Chenal Vieux. Dans le champs majeur droit, les écoulements circulent dans les marais jusqu'à buter sur la voie ferrée qui coupe la vallée au niveau du barrage de Moricq. Cette dernière retient les écoulements et évitent que les flots envahissent le marais de Moricq.

On observe une faible surverse par-dessus la voie ferrée au niveau de la Grande Lamberde au sud du village de Moricq. Les écoulements longent alors le GR de Pays de Moutiers au nord jusqu'à la RD 747. Un volume très faible déverse par-dessus le GR vers le marais de Moricq sans conséquence.

Remarque : dans la simulation de l'événement centennal, aucune rupture partielle ou totale de la voie ferrée n'a été considérée. Cet incident pourrait provoquer l'inondation subite du marais de Moricq.

En termes de hauteurs d'eau maximales atteintes, on peut diviser la zone amont de rétention en trois parties homogènes :

- ▶ Du barrage de Morteveille jusqu'à la Port-la-Claye (RD949) : les hauteurs d'eau sont en moyenne entre 2 et 2.5 m aussi bien en rive gauche qu'en rive droite.
- ▶ De Port-la-Claye à la porte de Prés Jaillard (Chenal Vieux) : les hauteurs d'eau s'échelonnent entre 1.30 et 1.60 m en rive gauche et droite.
- ▶ De la porte de Prés Jaillard au barrage de Moricq : la rive gauche n'est pas inondée. En revanche, les hauteurs d'eau en rive droite sont comprises entre 1.50 et 1.90 m.

Les vitesses maximales dans le lit mineur sont en moyenne de 1m/s, et 1.3 m/s localement. Les vitesses sont globalement faibles dans le champs majeur, inférieures à 0.3 m/s. On note néanmoins une exception au niveau du rétrécissement de la vallée à Port-la-Claye où les vitesses atteignent 1.6 m/s.

3.5.2.2.2 Laminage du Lay amont

Le champ majeur du Lay est clairement définie de Mareuil-sur-Lay à Moricq. Il est composé principalement de terrains agricoles séparés par un réseau dense de canaux. L'habitat y est historiquement rare.

Le champ majeur est mis à contribution pour des crues fréquentes inférieures à la décennale, en particulier au nord de Port-la-Claye où le lit mineur n'est pas endigué de manière continue. Cela permet un écrêtement important des crues et donc un laminage du débit de pointe transitant dans le tronçon aval entre Moricq et l'estuaire du Lay bordé par la Faute-sur-Mer et l'Aiguillon-sur-Mer.

La figure 58 compare l'hydrogramme de la somme des apports du Lay et celui à l'aval du barrage de Moricq. On constate que le débit de pointe de l'hydrogramme entrant est de 700 m³/s et le débit de pointe sortant atteint 160 m³/s, soit un laminage de 77 %. Outre la réduction du débit de pointe, on constate un étalement de l'hydrogramme avec une durée totale au moins doublée.

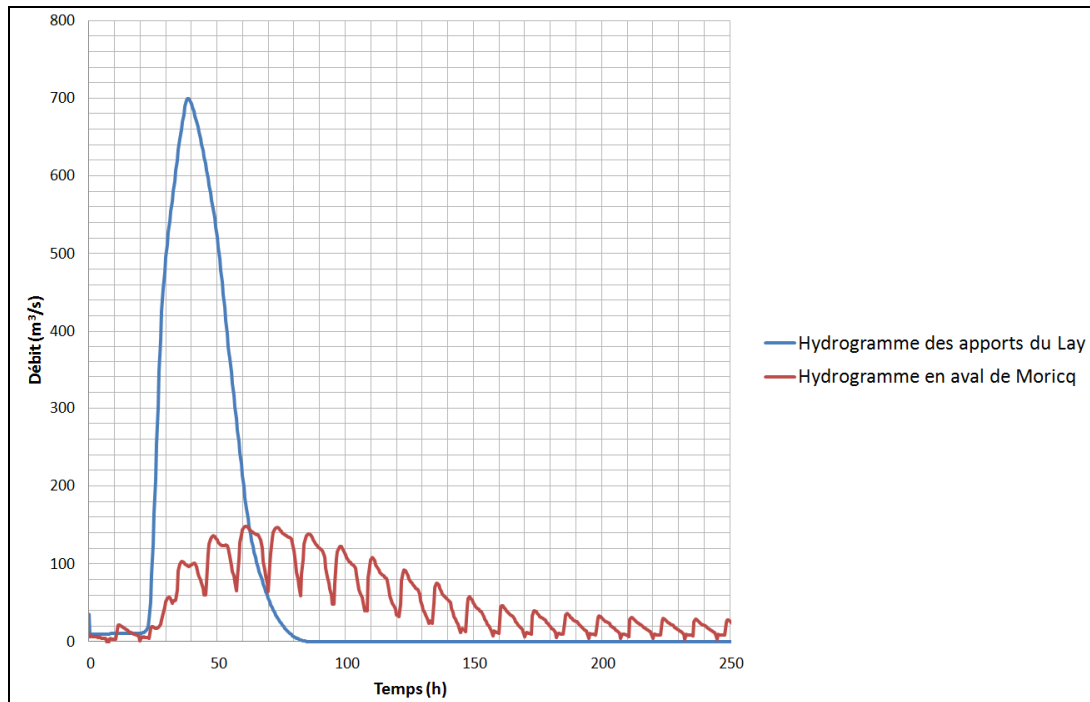


Figure 58 : Capacité de laminage du Lay amont pour une crue centennale

La capacité de laminage du bief amont du Lay se traduit par une rétention amont, et donc des hauteurs d'eau élevées. Ainsi, on obtient des hauteurs d'eau comprises entre 1.5 et 2 m, généralement supérieures à 2m en amont de Port-la-Claye. La figure ci-après détaille les hauteurs d'eau au droit de Moricq. La topographie particulière qui forme un rétrécissement ainsi que la voie ferrée et la RD25 constituent un point dur hydraulique. Ces remblais protègent le marais de Moricq de l'inondation provenant du champ majeur droit.

Pour l'événement centennal, la zone du camping située entre la voie ferrée et la route est hors d'eau. Ainsi, la perte de charge est maximale sur la voie ferrée avec une hauteur d'eau de 1.60m environ en amont (figure 59).

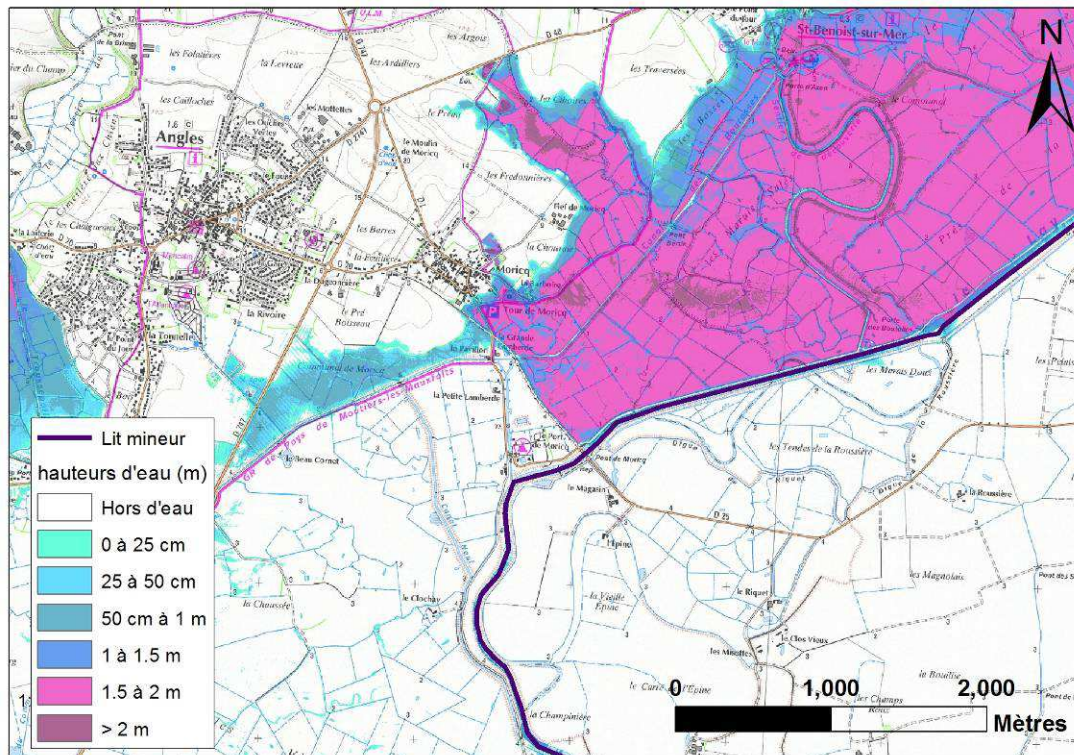


Figure 59 : Crue centennale - Zoom sur le secteur de Morigq

3.6 SCENARIO 3 – EVENEMENT EXCEPTIONNEL

3.6.1 Évènement exceptionnel maritime

3.6.1.1 Méthodologie de croisement

L'évènement exceptionnel maritime est un événement combiné maritime et fluvial. Il comporte une tempête de type Xynthia plus 20 cm et une crue décennale du Lay.

Les modèles (modèle ISIS pour le fluvial et modèle TELEMAC pour le maritime), étant dépendants l'un de l'autre à leur frontière commune, le couplage se fait par processus itératif.

La cartographie de l'évènement exceptionnel se fera en croisant les résultats du modèle fluvial et du modèle maritime. La limite entre les deux modèles se situe au niveau du barrage du Braud : les débordements en amont du Braud seront cartographiés avec le modèle fluvial et les débordements en aval avec le modèle maritime.

3.6.1.1.1 Hypothèses modèle maritime

Le lidar utilisé pour construire la bathymétrie de ce modèle est la version 2012 qui représente la situation actuelle au niveau du trait de côte : de nombreuses rehausses et confortement de digues ont été réalisés depuis 2010. Pour le reste du modèle, la version 2010 est utilisée. Comme présenté dans les hypothèses de calcul, le cordon dunaire de la Belle Henriette est effacé. De plus, **cette simulation ne prend en compte aucune brèche**, on suppose que les ouvrages, même franchis ne sont pas détruits. Les coefficients de Strickler utilisés sont ceux établis lors du calage du modèle. Le forçage utilisé provient du modèle océanique mis au point par l'Université de La Rochelle présenté précédemment. L'ajout de 20 cm aux cotes de forçage est uniforme dans le temps et dans l'espace.

3.6.1.1.2 Hypothèses modèle fluvial

Le modèle basé sur le lidar de 2010 est repris. Des modifications sont apportées dans la partie maritime aux alentours du Braud en utilisant le lidar de 2012 afin de mieux définir les digues. Les conditions amonts sont les hydrogrammes de la crue décennale calculés dans le chapitre « 3.2 Analyse hydrologique ».

3.6.1.2 Résultat des modélisations

La simulation Xynthia + 20 cm sans la crue décennale (notée Xp20) est la première itération du processus. La simulation Xynthia + 20 cm avec la crue décennale (notée Xp20_Q10) est la troisième itération du processus. La figure ci-dessous montre les résultats en terme de niveau d'eau pour le modèle maritime au niveau du barrage du Braud. On remarque que le pic de niveau d'eau « a déjà convergé ».

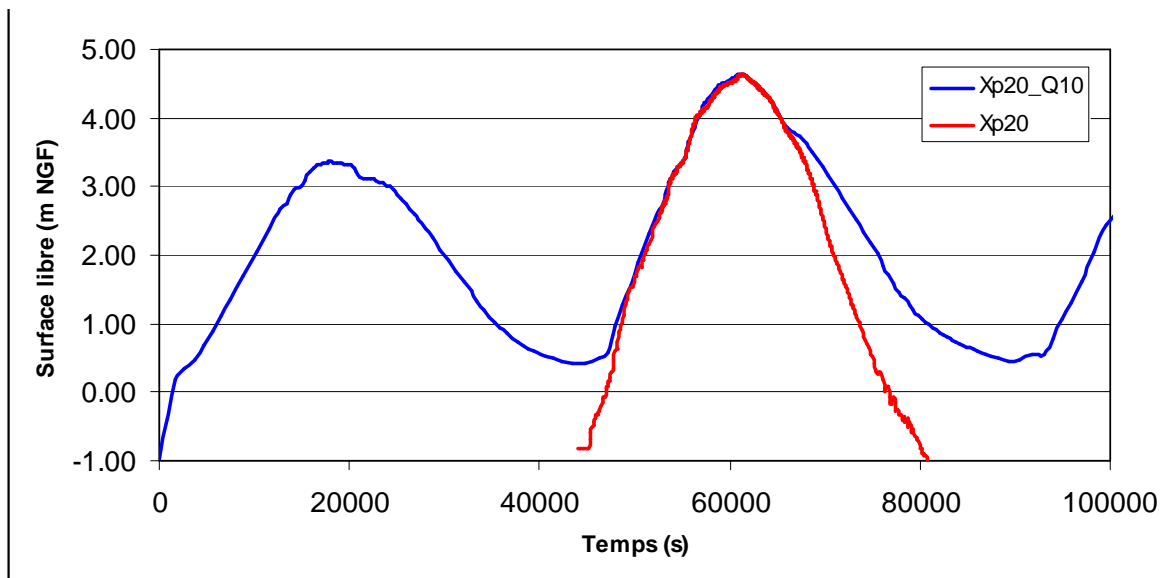


Figure 60 : Comparaison des niveaux Xynthia + 20 cm seule et avec la crue décennale, en aval immédiat du barrage du Braud : résultats du modèle maritime

La simulation Xynthia + 20 cm avec la crue décennale notée Xp20_Q10_0 est la deuxième itération du processus. C'est-à-dire que la condition aval provient de la simulation Xp20 présentée précédemment. La simulation Xynthia + 20 cm avec la crue décennale notée Xp20_Q10_1 est la quatrième itération. La condition aval provient de la simulation maritime Xp20_Q10 présentée précédemment. Ces deux itérations sont réalisées sur le modèle fluvial. La figure ci-après compare les niveaux obtenus pour les deux simulations détaillées en amont du barrage du Braud. On constate que les niveaux maximums atteints sont très proches avec une différence de l'ordre de 4 cm. Étant donné la précision du modèle, on peut considérer que le processus a convergé.

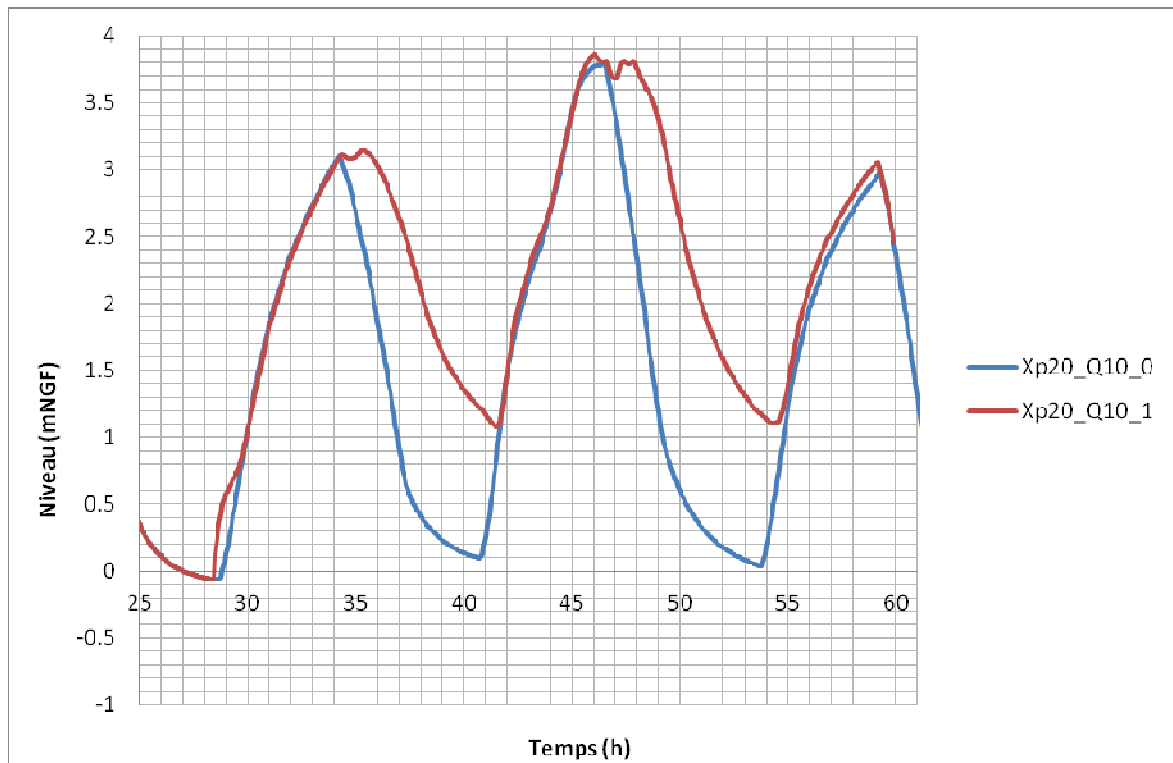


Figure 61 : Comparaison Xynthia + 20 cm + Crue décennale (itérations 2 et 4) : résultats du modèle fluvial en amont du barrage du Braud

La carte des hauteurs maximales pour l'événement exceptionnel est consultable dans l'atlas cartographique joint.

En ce qui concerne la partie maritime, les débordements ont lieu principalement sur la zone urbaine de la Tranche-sur-Mer et de l'Aiguillon-sur-Mer. On observe des hauteurs d'eau moyenne d'environ 1 m mais elles peuvent atteindre localement 2 m. Les eaux sont contenues par la RD1046. La route D46 est franchie si bien que les inondations par l'océan et par l'estuaire du Lay se rejoignent sur le secteur de la Jeune Prise. Au sud de l'estuaire, des écoulements inondent les lieux-dits des « Glaireaux » et des « Gâte-Bourse » ainsi que le marais à l'arrière jusqu'au chenal de la Raque.

Au niveau fluvial, on constate des débordements sur l'aval en rive gauche causés directement par la surcote de Xynthia et le volume déversé par-dessus le barrage du Braud. Le volume débordé est de l'ordre de 1.3 millions de m³, et reste contenu entre les digues du lit mineur et celles des anciens méandres du Lay. Aucun autre débordement n'est observé du barrage du Braud au barrage de Moricq. A l'amont de ce dernier, le lit majeur joue le rôle de champs d'expansion comme pour les événements fluviaux plus rares décrits dans la présente étude. A la différence de la crue centennale décrite dans le chapitre correspondant, les débordements ont lieu presque exclusivement en rive droite où les hauteurs d'eau sont d'environ 1.5 m en amont à l'aval vers Noailles et 1 m en aval aux alentours de Moricq.

3.6.2 Évènement exceptionnel fluvial

3.6.2.1 Hypothèses

L'événement fluvial exceptionnel est basé sur les hydrogrammes calculés dans le cadre de l'analyse hydrologique sur le Lay et ses affluents pour la crue d'occurrence 500 ans.

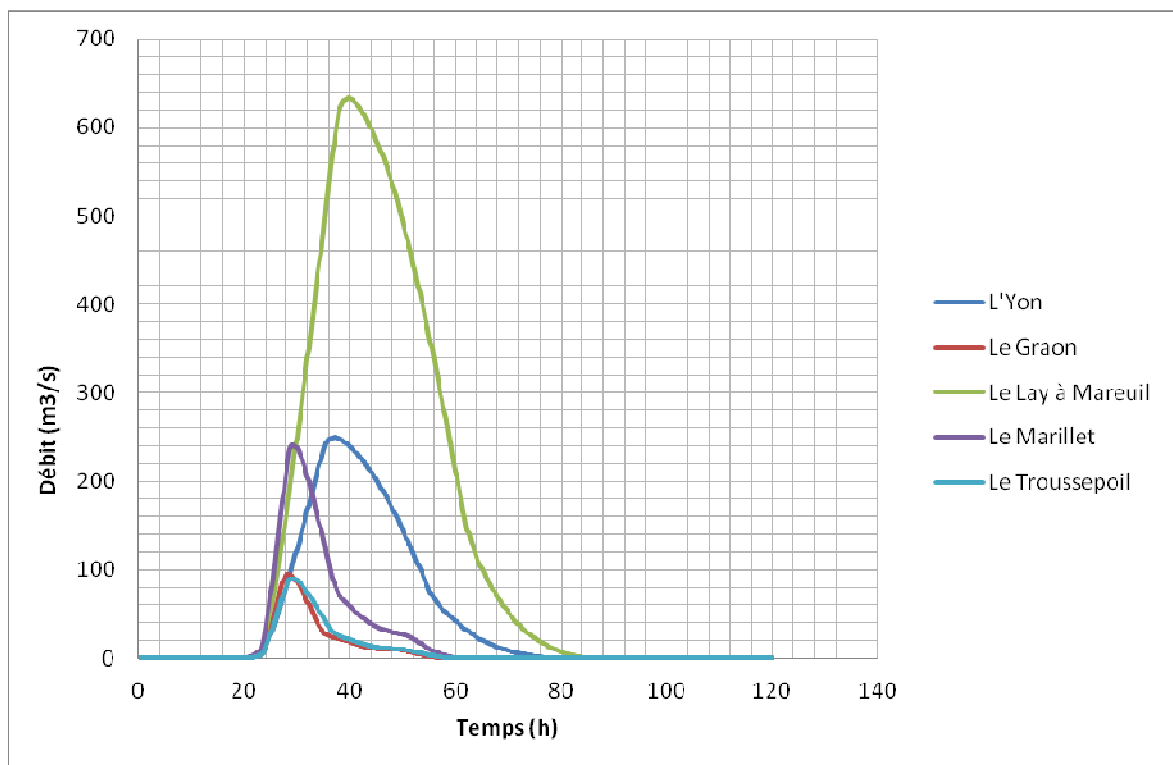


Figure 62 : Hydrogrammes du Lay et de ses affluents pour une crue d'occurrence centennale

La condition maritime aval est basée sur les premiers débordements maritimes, utilisée pour l'événement fluvial centennal et présentée ci-avant (Cf. §3.5.2).

3.6.2.2 Analyse des résultats

La carte des hauteurs d'eau maximales de l'événement fluvial exceptionnel est consultable dans l'atlas cartographique joint.

3.6.2.2.1 Dynamique des écoulements

La dynamique des écoulements pour la crue d'occurrence 500 ans entre Mareuil-sur-Lay et le barrage de Moricq est semblable à celle de la crue centennale expliquée au chapitre « 3.5 Scénario 2 – Evènement d'occurrence centennale ».

Contrairement à la crue centennale, un volume important franchit la voie ferrée au sud de Moricq pour inonder le marais par surverse au-dessus du GR de Pays de Moutiers. Le volume entrant dans le marais de Moricq est de l'ordre de 6 millions de m³. La plus grande partie des eaux est contenue entre les digues du lit mineur du Lay et la RD 747. On observe des hauteurs d'eau allant de 30 cm à 60 cm, pouvant atteindre 90 cm très localement.

En termes de hauteurs d'eau maximales atteintes dans le lit majeur, on peut diviser la zone amont de rétention entre trois parties homogènes :

- ▶ Du barrage de Morteveille jusqu'à la Port-la-Claye (RD949) : les hauteurs d'eau sont comprises 2.50 et 3.40 m.
- ▶ De Port-de-la-Claye à la porte de Prés Jaillard (Chenal Vieux) : les hauteurs d'eau s'échelonnent entre 1.60 et 2 m en rive gauche et droite.
- ▶ De la porte de Prés Jaillard au barrage de Moricq : la rive gauche n'est pas inondée. En revanche, les hauteurs d'eau en rive droite sont comprises entre 1.70 et 2.20 m.

Les vitesses maximales dans le lit mineur sont en moyenne de 1 m/s, localement 1.5 m/s. Les vitesses sont globalement faibles dans le champs majeur. On note néanmoins une exception au niveau du rétrécissement de la vallée à Port-la-Claye où les vitesses sont plus importantes.

3.6.2.2.2 Laminage du Lay amont

La rôle que joue le bief amont dans le laminage des crues du Lay est expliqué dans le chapitre 3.5.2.2.2 relatif à l'événement centennal.

La figure 63 présente l'hydrogramme de la somme des apports du Lay et celui à l'aval du barrage de Moricq pour l'événement fluvial exceptionnel. On constate que le débit de pointe de l'hydrogramme entrant est de 963 m³/s et le débit de pointe sortant atteint 200 m³/s, soit un laminage de 79 %. Outre la réduction du débit de pointe, on constate un étalement de l'hydrogramme avec une durée totale presque triplée.

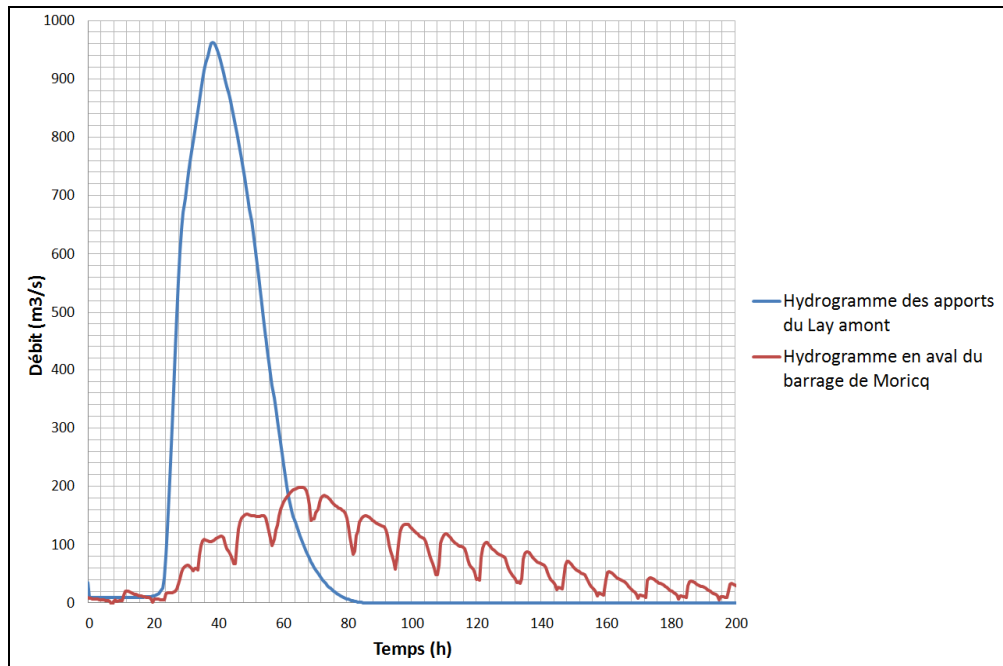


Figure 63 : Capacité de laminage du Lay amont pour une crue exceptionnelle (T=500 ans)

La capacité de laminage du bief amont du Lay se traduit par une rétention amont, et donc des hauteurs d'eau élevées. Ainsi, on obtient des hauteurs d'eau comprises entre 1.5 et 2.5 m, généralement supérieures à 2.5 m en amont de Port-la-Claye. La figure suivante détaille les hauteurs d'eau au droit de Moricq. La topographie particulière qui forme un rétrécissement ainsi que la voie ferrée et la RD25 constituent un point dur hydraulique. Ces remblais protègent le marais de Moricq de l'inondation provenant du champs majeur droit.

Pour l'événement exceptionnel, la zone du camping située entre la voie ferrée et la route s'inonde à partir d'un certain niveau. De plus, le marais de Moricq à l'aval est submergé par les débordements par-dessus la voie ferrée et la RD. Ainsi, la perte de charge au maximum de la crue est de 50 cm de part et d'autre de la voie ferrée. En revanche, durant la montée des eaux, la perte de charge instantanée peut atteindre 1.50 m (casier aval non encore rempli). Au droit de la RD25, on observe une perte de charge de 50 cm environ.

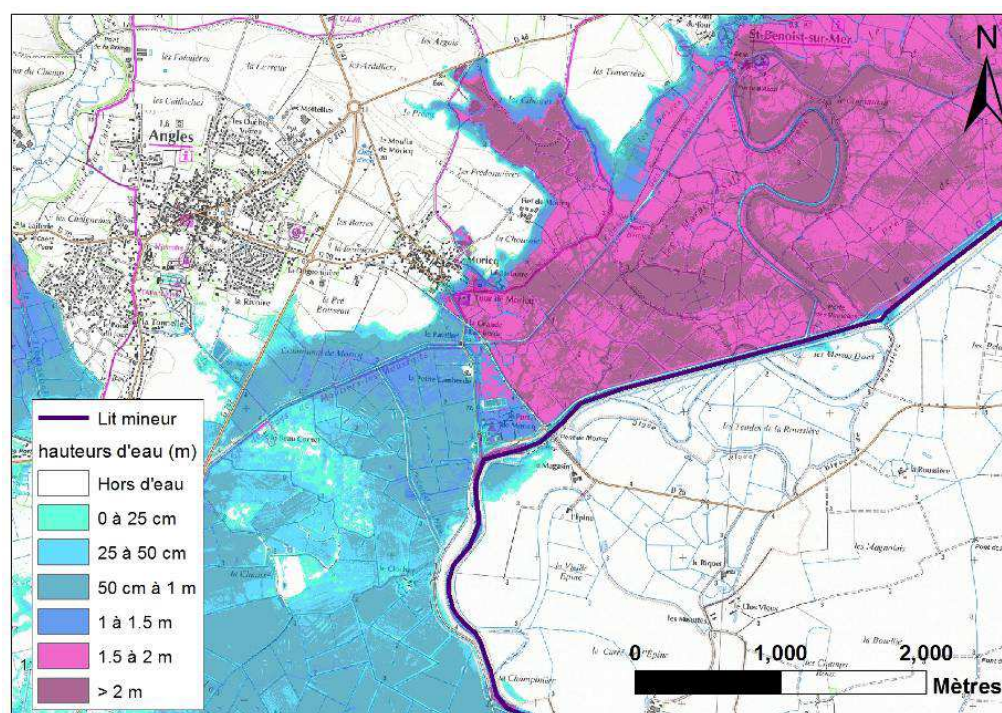


Figure 64 : Evènement exceptionnel (T=500 ans) - Zoom sur le secteur de Moricq

4. RECENSEMENT DES ENJEUX EXPOSES, HIERARCHISATION DES RISQUES INONDATIONS

L'analyse des enjeux impactés par les différents phénomènes d'inondations doit permettre l'élaboration d'un diagnostic du risque du territoire. Ces éléments contribueront à l'élaboration d'une stratégie de gestion des inondations du territoire.

4.1 CREATION DE LA BASE DE DONNEES DES ENJEUX

Cette première mission relative aux enjeux vise à recueillir, élaborer, organiser et spatialiser les données relatives aux différents enjeux du territoire et à les intégrer dans une base de données géographique afin de constituer la base des enjeux socio-économiques du territoire inondable.

Cette base de données géographique des enjeux, concrétisée par un atlas des enjeux, doit permettre également la réalisation des analyses cout-bénéfices.

Elle contient trois types d'entités de base :

- ▶ des polygones représentant les entités surfaciques d'occupation du sol,
- ▶ des points localisant des enjeux ponctuels ou de surface réduite,
- ▶ des enjeux linéaires (voies de communications).

La base des enjeux ainsi créée sera confrontée aux aléas hydrauliques dans le cadre du diagnostic du risque inondation.

4.2 SECTEUR PRIS EN COMPTE

La mission relative à la création de la base des enjeux est réalisée en parallèle aux investigations hydrauliques qui déboucheront sur une connaissance fine des aléas hydrauliques du territoire et notamment des emprises maximales des zones inondables.

Le secteur d'étude pour l'analyse des enjeux doit a minima couvrir le territoire inondable. Celui-ci n'étant pas totalement connu, nous avons réalisé l'analyse des enjeux en nous appuyant sur l'emprise maximisée des casiers des modèles hydrauliques pour la partie fluviale et avons intégré les secteurs potentiellement soumis aux aléas marins.

4.3 ANALYSE SURFACIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL

Au travers de la création d'une couche surfacique d'occupation du sol, nous pourrions aborder plusieurs aspects de la vulnérabilité et du risque du territoire en identifiant :

- ▶ Les secteurs d'habitat,
- ▶ Les zones d'activités économiques, industrielles,
- ▶ Les équipements publics présentant de grandes surfaces,
- ▶ les surfaces cultivées ou agricoles,
- ▶ le milieu naturel.

4.3.1 Nomenclature

La base d'occupation du sol a été réalisée à partir de la nomenclature adaptée aux objectifs de l'étude. Cette nomenclature répond en effet aux deux objectifs de la mission socio-économique du projet : réaliser un diagnostic du risque inondation du territoire et réaliser l'analyse cout/bénéfices des projets de réduction des inondations qui seront proposés.

La nomenclature complète comporte 18 classes générales et 27 classes spécifiques aux cultures issues du Recensement Graphique Parcellaire (RGP). Cette nomenclature imbriquée est déclinable en 3 niveaux en fonction de l'utilisation souhaitée.

Occupation du sol	regroupement 1	regroupement 2
Equipements de missions de sécurité civile	Equipements de missions de sécurité civile	urbanisé
Espaces verts artificialisés (sports, loisirs, espaces verts urbains, cimetière)	Espaces verts artificialisés (sports, loisirs, espaces verts urbains, cimetière)	urbanisé
Etablissement Recevant du Public	Etablissement Recevant du Public	urbanisé
Habitat continu (Centre bourg)	Habitat continu (Centre bourg)	urbanisé
Habitat individuel urbain ou rural et mixte	Habitat individuel urbain ou rural et mixte	urbanisé
activité agricole	activité agricole	activité eco
activité agricole élevage	activité agricole élevage	activité eco
Activités industrielles, commerciales, artisanales et autres équipements	Activités industrielles, commerciales, artisanales et autres équipements	activité eco
camping	camping	activité eco
DIVERS	autres	agriculture
cultures fortes VA	cultures maraichère, horticulture	agriculture
LEGUMES-FLEURS	cultures maraichère, horticulture	agriculture
GEL (SURFACES GELEES SANS PRODUCTION)	gel	agriculture
GEL INDUSTRIEL	gel	agriculture
AUTRES GELS	gel	agriculture
grandes cultures	grandes cultures	agriculture
BLE TENDRE	grandes cultures	agriculture
MAIS GRAIN ET ENSILAGE	grandes cultures	agriculture
ORGE	grandes cultures	agriculture
AUTRES CEREALES	grandes cultures	agriculture
COLZA	grandes cultures	agriculture
TOURNESOL	grandes cultures	agriculture
AUTRES OLEAGINEUX	grandes cultures	agriculture
PROTEAGINEUX	grandes cultures	agriculture
PLANTES A FIBRES	grandes cultures	agriculture
SEMENCES	grandes cultures	agriculture
RIZ	grandes cultures	agriculture
LEGUMINEUSES A GRAINS	grandes cultures	agriculture
FOURRAGE	grandes cultures	agriculture
FRUITS A COQUE	grandes cultures	agriculture
AUTRES CULTURES INDUSTRIELLES	grandes cultures	agriculture
CANNE A SUCRE	grandes cultures	agriculture
Prairies permanentes, sol non cultivé et gel agricole	prairies	agriculture
ESTIVES LANDES	prairies	agriculture
PRAIRIES PERMANENTES	prairies	agriculture
PRAIRIES TEMPORAIRES	prairies	agriculture
Serres	serre	agriculture
Vignes	vergers-arboriculture	agriculture
Vergers et oliviers	vergers-arboriculture	agriculture
VERGERS	vergers-arboriculture	agriculture
VIGNES	vergers-arboriculture	agriculture
OLIVIERS	vergers-arboriculture	agriculture
ARBORICULTURE	vergers-arboriculture	agriculture
Bois, forêts	Bois, forêts	naturel
Espaces ouverts non agricoles (friches urbaines et autres)	Espaces ouverts non agricoles (friches urbaines et autres)	naturel
plans d'eau	plans d'eau	eau

Figure 65 : Occupation du sol - nomenclature

4.3.2 Méthodologie

Les principales bases de références disponibles ont été exploitées afin de garantir une représentation la plus fiable possible des enjeux du territoire et également un niveau équivalent de précision sur l'ensemble du secteur étudié.

Les secteurs urbanisés, continus ou diffus, à vocation habitat ou secteurs d'activités ont été délimités par photo-interprétation des orthophotographies de 2009 (20 cm). Les bâtiments de la BDTOPO et de la BDParcellaire (2011 et 2012) ont également été exploités, à la fois pour prendre en compte les évolutions de l'urbanisation et bien identifier les enjeux diffus (habitat, exploitations agricoles).

La nature des cultures des secteurs agricoles ont été définis majoritairement à partir du Recensement Graphique Parcellaire (nomenclature en 28 postes). Elle a également été complétée par la photo-interprétation, notamment à proximité des secteurs urbanisés.

Pour les secteurs boisés et naturels non agricoles, la BDTOPO a été exploitée, complétée par la photo-interprétation.

Les équipements ou établissements publics ayant une surface significative, proviennent de la BDTOPO ou directement de la photo-interprétation.

Les données du SIGLOIRE ont été utilisées pour localiser et caractériser les campings. Chaque camping est caractérisé par son nombre d'étoiles et sa capacité d'accueil.

4.4 ENJEUX PONCTUELS

Les équipements et principaux Etablissement Recevant du Publics (ERP) ont été identifiés en grande partie à partir de la BDTOPO. La base de points mis en place est cependant complétée à partir d'éléments issus de l'analyse des orthophotos et des données exogènes exploitées dans le cadre de la photo-interprétation ayant aboutie à la réalisation de la carte d'occupation du sol.

Cette base de données permet d'identifier et de classer les principaux enjeux du territoire :

- ▶ **stratégiques pour la gestion de crise** : mairies (administratifs), casernes de pompier, gendarmeries,...
- ▶ **Sensibles (population vulnérable)** : établissements hospitaliers (santé), établissement d'enseignement
- ▶ **Culturels** : musées, lieux de culte,
- ▶ **Sport et loisirs** : camping, piscine, parcs de loisirs, villages de vacances
- ▶ **Stations d'épuration** (généralement lagunage).

4.5 ENJEUX LINEAIRES

La problématique des déplacements et des phénomènes d'ilot sera abordée. Le réseau routier est ainsi intégré à la base des enjeux qui sera confrontée aux aléas.

Les tronçons routiers ont été classés selon leur importance en trois niveaux :

- ▶ Réseau principal,

- Réseau secondaire,
- Autres voies.

Cette classification s'appuie sur la nomenclature de la BDTOP.

Les résultats du recensement des enjeux ont fait l'objet de cartes présentées dans l'atlas cartographique joint.

4.6 HIERARCHISATION DES RISQUES

La hiérarchisation des risques consiste à analyser le croisement des enjeux recensés avec les aléas inondations.

Sur le territoire d'étude, deux types d'aléa distincts sont distingués : l'aléa inondation par débordement de cours d'eau à l'amont, et l'aléa submersion marine à l'aval.

Cette analyse des enjeux touchés est complétée par une estimation des populations résidentes en zone inondable.

4.6.1 Alea débordement de cours d'eau

4.6.1.1 Occupation du sol

Période de retour	activité économique	cultures	eau	naturel	urbanisé	Total général
10 ans	5	2 085	103	312	2	2 507
	0,2%	83,2%	4,1%	12,4%	0,1%	
20 ans	8	3 076	120	434	4	3 642
	0,2%	84,5%	3,3%	11,9%	0,1%	
50 ans	9	3 428	129	503	6	4 075
	0,2%	84,1%	3,2%	12,3%	0,2%	
100 ans	11	3 638	143	549	10	4 351
	0,3%	83,6%	3,3%	12,6%	0,2%	
500 ans	42	5 600	208	753	21	6 624
	0,6%	84,5%	3,1%	11,4%	0,3%	

Figure 66 : Surfaces inondées par type d'occupation du sol, en ha, pour chaque crue fluviale

La quasi-totalité des surfaces submersibles, quelle que soit la période de retour de la crue, est constituée par des surfaces agricoles (85%) et naturelles (15%). Les surfaces urbanisées inondables représentent moins de 0,5% des terres inondées en surface.

Les surfaces inondées évoluent de manière significative (+45%) entre la crue décennale et la crue de période de retour 20 ans. Elles augmentent relativement peu ensuite jusqu'à la crue centennale (+19% entre les occurrences 20 ans et 100 ans), pour augmenter à nouveau de manière importante pour la crue de période de retour 500 ans. Cette forte progression des zones inondées pour la crue 500 ans concerne essentiellement la rive droite du Lay, à l'aval, sur les communes de Angles et Longeville-sur-Mer.

L'ensemble des surfaces urbanisées impactées par les inondations jusqu'à la crue centennale se situe en limite de zone inondable. Pour la crue de période de retour 500 ans, quelques habitations ou bâtiments d'activités agricoles sont totalement en zone inondable (commune de Angles).

Deux secteurs urbanisés sont relativement plus exposés aux inondations que les autres : il s'agit des habitations au lieu-dit Morteveille situé juste en amont de l'ouvrage de régulation sur la commune de la Bretonnière-La-Claye, et les constructions les plus basses du Port-Soulay à Lavaud.

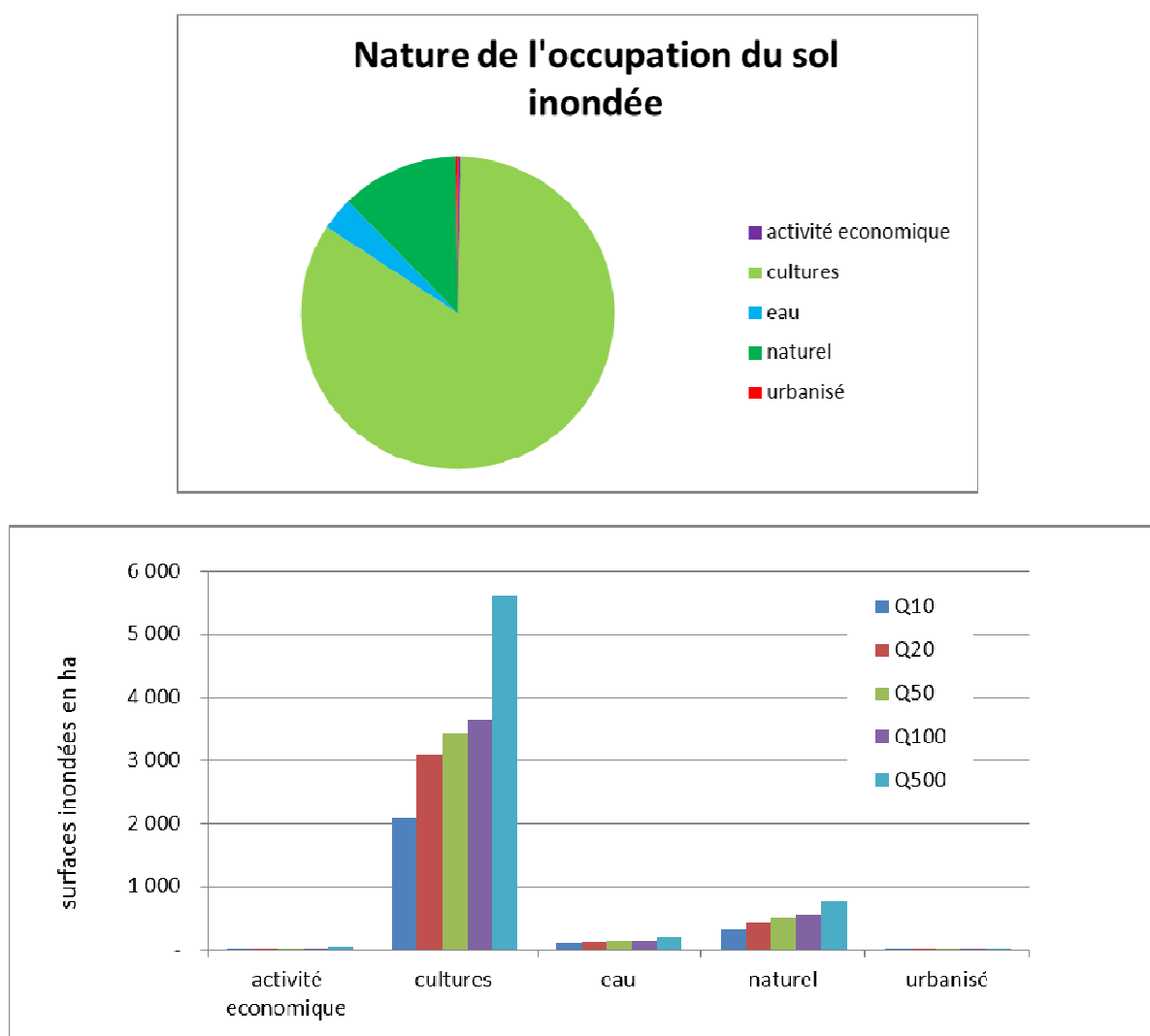


Figure 67 : Nature de l'occupation du sol inondée (fluvial)

4.6.1.2 Enjeux ponctuels et campings

Compte tenu des rares surfaces urbanisées impactées par les inondations, on ne dénombre pas dans ce secteur d'enjeux stratégiques ou vulnérables impactés par les inondations.

La station d'épuration de la commune de Angles est cependant située en limite de zone inondable pour les crues de période de retour 100 et 500 ans. La station de lagunage de la Tranche sur mer pourrait également être impactée pour la crue de période de retour 500 ans

Quatre campings sont impactés par les crues fréquentes, douze sont concernés par les crues très importantes (occurrence 500 ans).

Commune	Nom du Camping	capacité	Période de retour de la crue				
			10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	500 ans
LONGEVILLE SUR MER	LE TROUSSEPOIL	40	x	x	x	x	x
LA TRANCHE SUR MER	LES ALMADIES	392					x
ANGLES	LE PORT DE MORICQ	88		x	x	x	x
ANGLES	LE CLOS COTTET	196					x
LONGEVILLE SUR MER	LA MICHENOTIERE	120					x
SAINT BENOIST SUR MER	LE MARAIS	30	x	x	x	x	x
LA TRANCHE SUR MER	LES JONQUILLES	344					x
LA TRANCHE SUR MER	LA BELLE HENRIETTE	206					x
LA TRANCHE SUR MER	LE COTTAGE FLEURI	232					x
LA TRANCHE SUR MER	LE JARD	350					x
LA TRANCHE SUR MER	LA GRANDE VALLEE	56					x
LA TRANCHE SUR MER	LES BLANCS CHENES	370					x

Figure 68 : Campings touchés par les inondations, pour chaque crue (fluvial)

4.6.1.3 Population résidente

Commune	Période de retour de a crue				
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	500 ans
Angles				1	15
Curzon					
Grues					
La Bretonnière-la-Claye		2	3	3	9
La Couture				3	4
La Tranche-sur-Mer					2
Lairoux					2
Longeville-sur-Mer	1	1	1	1	2
Mareuil-sur-Lay-Dissais	1	2	2	2	2
Péault	1	2	6	18	32
Saint-Benoist-sur-Mer				4	12
Saint-Cyr-en-Talmondais					
Total général	4	7	13	33	80

Figure 69 : Estimation des populations impactées par commune pour chaque crue (fluvial)

	Période de retour de a crue				
Hauteur d'eau	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	500 ans
inférieure à 50 cm	45%	45%	59%	70%	57%
inférieure à 1 m	80%	82%	79%	88%	87%
inférieure à 1,5 m	96%	91%	92%	94%	95%

Figure 70 : Estimation des populations impactées et niveau d'exposition, pour chaque crue (fluvial)

Les surfaces inondables touchant peu de secteurs urbanisés, on dénombre peu de personnes en zone inondable. L'estimation de la population en zone inondable, du fait des méthodes de calcul et des nombreux effets de bord, minimise vraisemblablement ces estimations.

4.6.2 Alea submersion marine

L'aléa submersion marine sur le bassin versant du Lay concerne six communes littorales :

- ▶ La Tranche-sur-Mer
- ▶ La Faute-sur-Mer
- ▶ L'Aiguillon-sur-Mer
- ▶ Grues
- ▶ Saint-Michel-en-l'Herm
- ▶ Triaize

4.6.2.1 Occupation du sol

scénario	activité économique	cultures	eau	naturel	urbanisé	Total général
scénario Xynthia état 2012	85	624	128	431	101	1 369
	6,2%	45,6%	9,3%	31,4%	7,4%	
scénario Xynthia+20cm et crue décennale du Lay	115	1 352	136	545	178	2 327
	5,0%	58,1%	5,9%	23,4%	7,7%	

Figure 71 : Surfaces inondées par type d'occupation du sol, en hectares, pour chaque crue (maritime)

Le territoire impacté par l'aléa submersion marine est fortement urbain, notamment sur l'Aiguillon-sur-Mer où plus de 50% du territoire urbanisé est exposé à l'évènement de type Xynthia +20cm.

La quasi-totalité des surfaces urbanisées soumises à l'aléa submersion marine concerne seulement les trois communes touristiques littorales de La Tranche-sur-Mer, La Faute-sur-Mer, L'Aiguillon-sur-Mer, et un petit secteur urbanisé sur la commune de Grues, dans le prolongement de L'Aiguillon-sur-Mer.

Les secteurs touchés sur les communes de Saint-Michel-en-l'Herm et Triaize sont constitués uniquement de zones cultivées et d'espaces naturels.

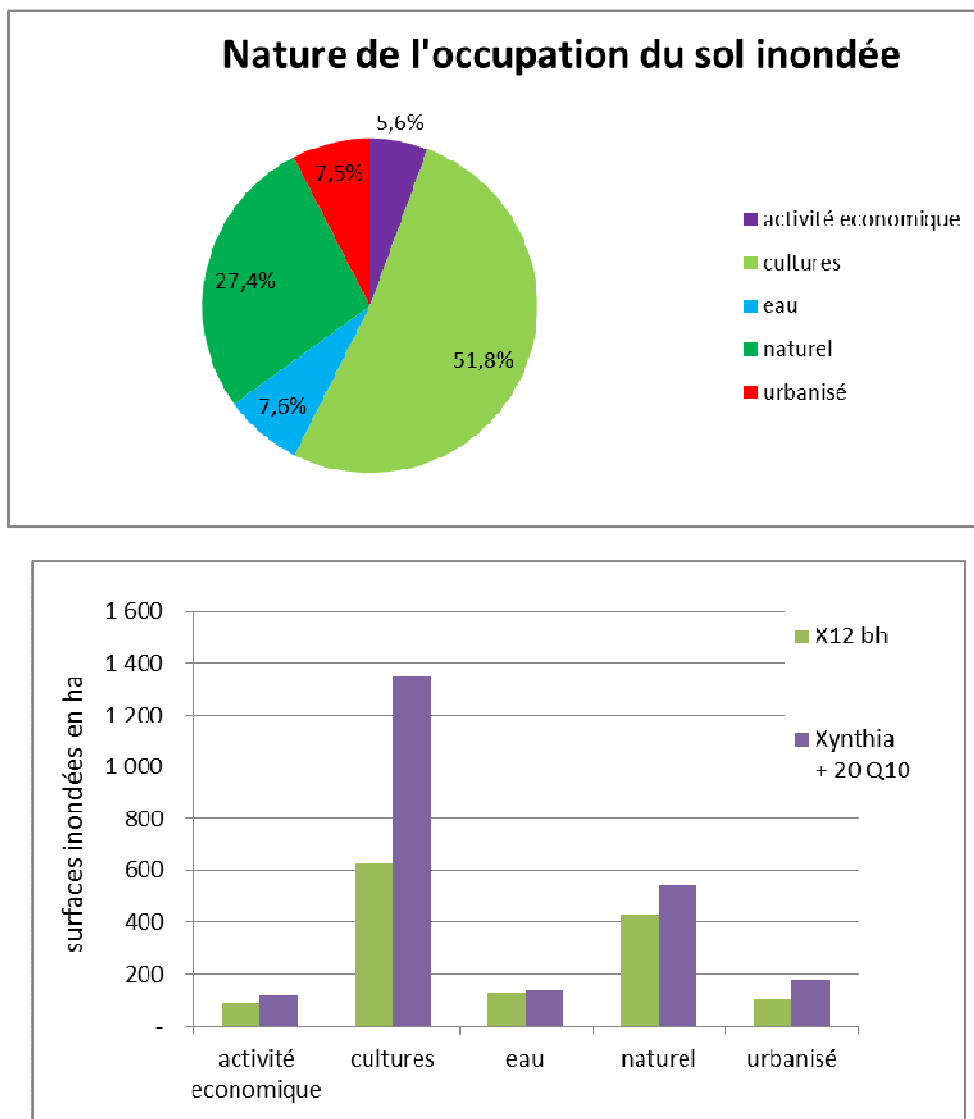


Figure 72 : Nature de l'occupation du sol inondée (maritime)

L'évolution des surfaces submersibles entre les deux scénarios (+69%) touche l'ensemble des typologies d'enjeux, même si l'évolution est bien plus importante (plus que du simple au double) pour les surfaces agricoles.

4.6.2.2 Enjeux ponctuels

établissements stratégiques	COMMUNE	scénario Xynthia état 2012	scénario Xynthia+20cm et crue décennale du Lay
Caserne de pompier	L'Aiguillon-sur-Mer	de 25 à 50 cm	de 50 à 75 cm
Mairie	L'Aiguillon-sur-Mer		limite de zone inondable
total		1	2

Figure 73 : Enjeux ponctuels impactés par les évènements maritimes

La caserne de pompier de l'Aiguillon, située au sud du village, près du lac de loisirs, est impactée pour les deux évènements testés. Pour le scénario de type Xynthia + 20cm, la hauteur d'eau y est supérieure à 50 cm.

La mairie de l'Aiguillon-sur-Mer située en limite de la zone submergée est encore accessible en cas de crise.

Inclus dans le tissu urbain impacté, de nombreux campings sont soumis au risque submersion marine.

camping	COMMUNE	scénario Xynthia état 2012	scénario Xynthia+20cm et crue décennale du Lay
L'AIGUILLON SUR MER	LA BAIE	x	x
GRUES	BEL AIR	x	x
GRUES	LE PRE DES SABLES		x
LA FAUTE SUR MER	LE PAVILLON BLEU		x
LA TRANCHE SUR MER	LA GRIERE II		x
LA TRANCHE SUR MER	L'ESCALE DU PERTHUIS	x	x
LA TRANCHE SUR MER	LES ROULLIERES	x	x
LA TRANCHE SUR MER	LES JONQUILLES		x
LA TRANCHE SUR MER	LA BELLE HENRIETTE		x
LA TRANCHE SUR MER	LE JARD		x
LA TRANCHE SUR MER	LES PRISES I	x	x
LA TRANCHE SUR MER	LA GRANDE VALLEE	x	x
LA TRANCHE SUR MER	LES PRISES II		x
LA TRANCHE SUR MER	LES JARDS		x
LA FAUTE SUR MER	LE FAUTAIS		x
LA FAUTE SUR MER	LE GRAND R		x
LA FAUTE SUR MER	LES TULIPES II		x
LA FAUTE SUR MER	LES VIOLETTES		x
total		6	18

Figure 74 : Campings impactés par les évènements maritimes

La station de traitement des eaux usées de la Tranche-sur-Mer se situe en limite de la zone de submersion pour l'évènement de type Xynthia + 20cm.

	COMMUNE	scénario Xynthia état 2012	scénario Xynthia+20cm et crue décennale du Lay
stations d'épuration	La Tranche-sur-Mer	0	limite de zone inondable
total		0	1

4.6.2.3 Population résidente

Commune	scénario Xynthia état 2012	scénario Xynthia+20cm et crue décennale du Lay
Grues		29
La Faute-sur-Mer	3	26
La Tranche-sur-Mer	36	52
L'Aiguillon-sur-Mer	745	1 272
Saint-Michel-en-l'Herm	1	2
Total général	785	1 381

Figure 75 : Estimation des populations en impactées par commune, pour chaque scénario maritime

Hauteur d'eau	scénario Xynthia état 2012	scénario Xynthia+20cm et crue décennale du Lay
inférieure à 10 cm	27%	21%
inférieure à 25 cm	49%	40%
inférieure à 50 cm	79%	63%
inférieure à 1 m	98%	94%

Figure 76 : Estimation des populations impactées et niveau d'exposition, pour chaque scénario maritime

Avec une population résidente exposée de près de 1300 habitants, la commune de l'Aiguillon-sur-Mer concentre plus de 90% de la population des communes du bassin du Lay exposée à la submersion marine.

4.6.3 Monétarisation des enjeux, estimation des dommages

4.6.3.1 Doctrine d'estimation des dommages

Les fonctions de dommages exploitées pour chaque type d'enjeux ont fait l'objet de discussions entre les partenaires du PAPI afin de permettre une même base de calcul pour les PAPI du pourtour de la baie de l'Aiguillon en cours.

Les fonctions retenues sont issues de l'adaptation des fonctions de dommages préconisées dans les annexes techniques du guide national PAPI et d'adaptation liées au contexte local et aux retours d'expérience (Xynthia) : notamment la salinité des eaux pour la submersion marine qui entraîne des surdommages aux enjeux bâtis (habitations) et à l'agriculture.

Les fonctions de dommage retenues sont présentées en annexe 4.

4.6.3.2 Tests de sensibilité

Afin de prendre en compte les incertitudes associées à :

- la définition des aléas hydrauliques, notamment la hauteur d'eau, de chaque crue simulée,
- à l'estimation des seuils des premiers planchers des biens bâtis,
- à la saisonnalité pour les enjeux agricoles,

Trois modélisations de dommages sont effectuées par crue hydrauliquement simulée, en variant les hauteurs d'eau impactant les enjeux de plus ou moins 20 cm autour de la valeur issue des modélisations.

Pour les enjeux agricoles, la saisonnalité est prépondérante pour l'estimation des dommages, bien plus que les variations de hauteurs d'eau. Aussi, dans le cadre du test de sensibilité, nous avons retenu pour chaque type de culture et chaque classe de hauteurs d'eau trois valeurs de dommages surfaciques correspondant à la période, entraînant :

- le minimum de dommages aux cultures
- la maximum de dommages aux cultures
- la valeur moyenne retenue.

4.6.3.3 Résultats secteur fluvial

Estimation des dommages en euros			
Période de retour	Sensibilité à -20cm et saisonnalité basse pour les cultures	Résultat	Sensibilité à + 20cm et saisonnalité haute pour les cultures
10 ans	2 872 032	3 044 877	3 237 429
20 ans	4 374 699	4 621 725	4 803 453
30 ans	5 178 760	5 423 500	5 681 080
100 ans	5 990 705	6 427 122	6 787 149
500 ans	11 703 878	13 725 814	17 116 960
Dommage Moyen Annuel *	620 000	670 000	720 000

Figure 77 : Estimation des dommages, pour chaque scénario en euros

* Le Dommage Moyen annuel est calculé en retenant les hypothèses suivantes :

- Période de retour de la crue des premiers dommages : 5 ans
- Calcul des dommages de la crue infinie par application d'un coefficient 1.3 aux dommages de la dernière crue simulée (500 ans)

Les dommages sont principalement associés aux enjeux agricoles, qui représentent de 60% des dommages pour la crue de période de retour 500 ans, à 90% pour la crue décennale.

Au fur et à mesure de l'importance des crues, les dommages associés aux habitations et aux campings augmentent. Ces dommages passent de 10% pour la crue décennale à près de 40% pour la crue de période de retour 500 ans.

Le tableau des dommages par type d'enjeux est présenté en annexe 4.

4.6.3.4 Résultats secteur maritime

Les périodes de retour des événements étudiés sont les suivantes :

- Premiers débordements : 30 ans (Cf. §3.4.1),
- Évènement Xynthia : 120 ans
- Évènement Xynthia+20cm concomitant avec une crue décennale du Lay : 200 à 300 ans (250 ans retenu pour le calcul du Dommage Moyen Annuel).

Pour l'estimation du Dommage Moyen Annuel, les dommages de la crue infinie correspondent à 1.3 fois les dommages de l'évènement Xynthia+20cm concomitant avec une crue décennale du Lay.

	Estimation des dommages en euros		
	Xynthia		
communes	Sensibilité à -20cm et saisonnalité basse pour les cultures	Résultats	Sensibilité à +20cm et saisonnalité haute pour les cultures
Grues	510 983	1 052 364	2 819 044
L'Aiguillon-sur-Mer	35 984 325	52 814 748	74 582 072
La Faute-sur-Mer	372 423	759 519	1 776 165
La Tranche-sur-Mer	13 081 326	18 270 728	24 828 261
Saint-Michel-en-l'Herm	1 325 127	1 338 949	1 483 259
Triaize	1 199 458	1 199 458	1 199 458
total	52 473 642	75 435 766	106 688 259

Figure 78 : Estimation des dommages, pour le scénario Xynthia, en euros

	Estimation des dommages en euros		
	Xynthia+20cm et crue décennale du Lay		
communes	Sensibilité à -20cm et saisonnalité basse pour les cultures	Résultats	Sensibilité à +20cm et saisonnalité haute pour les cultures
Grues	98 430	165 912	196 868
L'Aiguillon-sur-Mer	15 577 084	25 594 472	39 633 118
La Faute-sur-Mer	229 927	287 243	358 053
La Tranche-sur-Mer	7 480 243	10 669 504	14 512 099
Saint-Michel-en-l'Herm	493 528	495 278	560 992
Triaize	743 007	743 007	743 007
total	24 622 219	37 955 416	56 004 137

Figure 79 : Estimation des dommages, pour le scénario Xynthia+20 et crue décennale du LAY, en euros

Le dommage moyen annuel obtenu est de 1 067 128 millions d'euros (dans une fourchette de sensibilité à plus ou moins 20cm de 716 189 à 1 525 028 €).

Les dommages de ce secteur proviennent à plus de 90% des enjeux urbains. L'habitat est largement prédominant (80%).

Les campings, du fait des installations type bungalow, engendrent des dommages significatifs, de l'ordre de 10% des dommages du secteur.

Les tableaux des dommages par type d'enjeux sont présentés en annexe 4.

4.6.3.5 Conclusion

Le territoire impacté est de 2,3 km² sur le secteur maritime (Xynthia +20cm), et 6.6 km² sur le secteur fluvial (occurrence 500 ans).

Ces résultats mettent en évidence l'importance des dommages dans les secteurs urbanisés du littoral.

5. DEFINITION D'OBJECTIFS, ELABORATION DE LA STRATEGIE LOCALE

Les cartes de synthèse du diagnostic de l'atlas cartographique joint permettent de croiser les informations suivantes :

- ▶ Etat des digues,
- ▶ Limite des zones inondées pour les événements caractéristiques,
- ▶ Recensement des enjeux dans les zones inondées.

A partir de ce diagnostic, il s'agit de définir les objectifs et la stratégie adaptée au contexte local que l'on propose de mettre en œuvre dans le futur programme d'actions.

La démarche PAPI est une démarche consensuelle (diagnostic partagé et stratégie validée par toutes les parties) et justifiée (analyse des enjeux et analyses coûts/bénéfices des actions proposées).

Suite au diagnostic établi précédemment, ainsi qu'aux différents entretiens et concertations qui ont eu lieu avec les représentants des communes du bassin versant, la stratégie qui ressort pour diminuer le risque inondation et la vulnérabilité du territoire et des populations se décline selon les sept grands axes PAPI.

5.1 SENSIBILISER ET INFORMER LES POPULATIONS

Avant tout projet de travaux de protection contre les inondations, la priorité concerne le volet communication et sensibilisation au risque inondation.

La mémoire des événements extrêmes antérieurs doit être cultivée de manière à ce que chacun se souvienne et ait conscience du risque. Les natifs du territoire, habitués au flux et reflux des eaux marines sur le littoral et dans les marais, ont généralement appris à vivre avec ce risque. Il en va différemment pour la population non résidente possédant des résidences secondaires - nombreuses sur le bassin versant - et fréquentant le territoire essentiellement l'été, et donc peu habituée aux tempêtes hivernales et submersions associées.

Trop souvent les leçons du passé ne sont pas correctement répétées et apprises. Mettre l'accent sur la communication autour des tempêtes dramatiques passées permettra à chacun de se souvenir que le risque existe, et ainsi de diminuer l'effet de « surprise » en général meurtrier face à l'évènement. Il s'agit de développer une culture du risque.

Outre la culture de la mémoire, il est tout aussi important d'informer de manière pragmatique les populations sur les risques qu'elles encourent lors d'une submersion marine ou une crue, et quels sont, dans ce cas, la conduite et les bons gestes à adopter, afin d'une part, éviter les effets de panique, et d'autre part, limiter les dégâts.

Une population bien informée avec de bons réflexes valent autant que des ouvrages de protection qui ne seront jamais infaillibles.

La stratégie proposée consiste à :

- veiller à ce que les différentes parties prenantes s'acquittent bien de leurs obligations d'information, et pour ce faire s'assurer en permanence que les processus et moyens à mettre en œuvre soient bien opérationnels,
- mettre en place un dispositif complémentaire permettant de sensibiliser et d'informer le public, sous la forme d'un plan de communication et d'un observatoire du littoral, qui permettra de plus de relier la problématique crue à l'ensemble des composantes de l'identité du marais.

Ces différents points sont explicités ci-dessous.

Récapitulatif des obligations

Parmi les principales obligations il faut rappeler celles :

- ▶ A l'initiative du maire : transmission aux populations des éléments d'informations sur les risques existants – DICRIM : Dossier d'Information Communal sur les Risques Majeurs –, respect des prescriptions des PPR (Plan de Prévention des Risques) inondations et littoraux, établissement et mise à jour des PCS, information régulière des populations.
- ▶ A l'initiative de l'Etat : établissement des PPR : ceux-ci permettent d'améliorer la connaissance du risque et de réglementer les conditions d'occupation du sol en fonction du zonage de l'aléa. Un PPRi a été approuvé sur le Lay amont ainsi que sur les communes de la Faute-sur-Mer et l'Aiguillon. Des PPR sont en cours d'élaboration sur les territoires du Syndicat Mixte du bassin du Lay et du Syndicat Mixte Vendée-Sèvre-Autizes (Cf. figure 80).
- ▶ A l'initiative du Préfet : relais des services de Prévision des Crues auprès des maires pendant les périodes de crise, établissement du DDRM : Dossier Départemental des Risques Majeurs (édition 2003, mise à jour en 2005) qui permet d'afficher au niveau départemental les risques susceptibles d'affecter les territoires des communes.

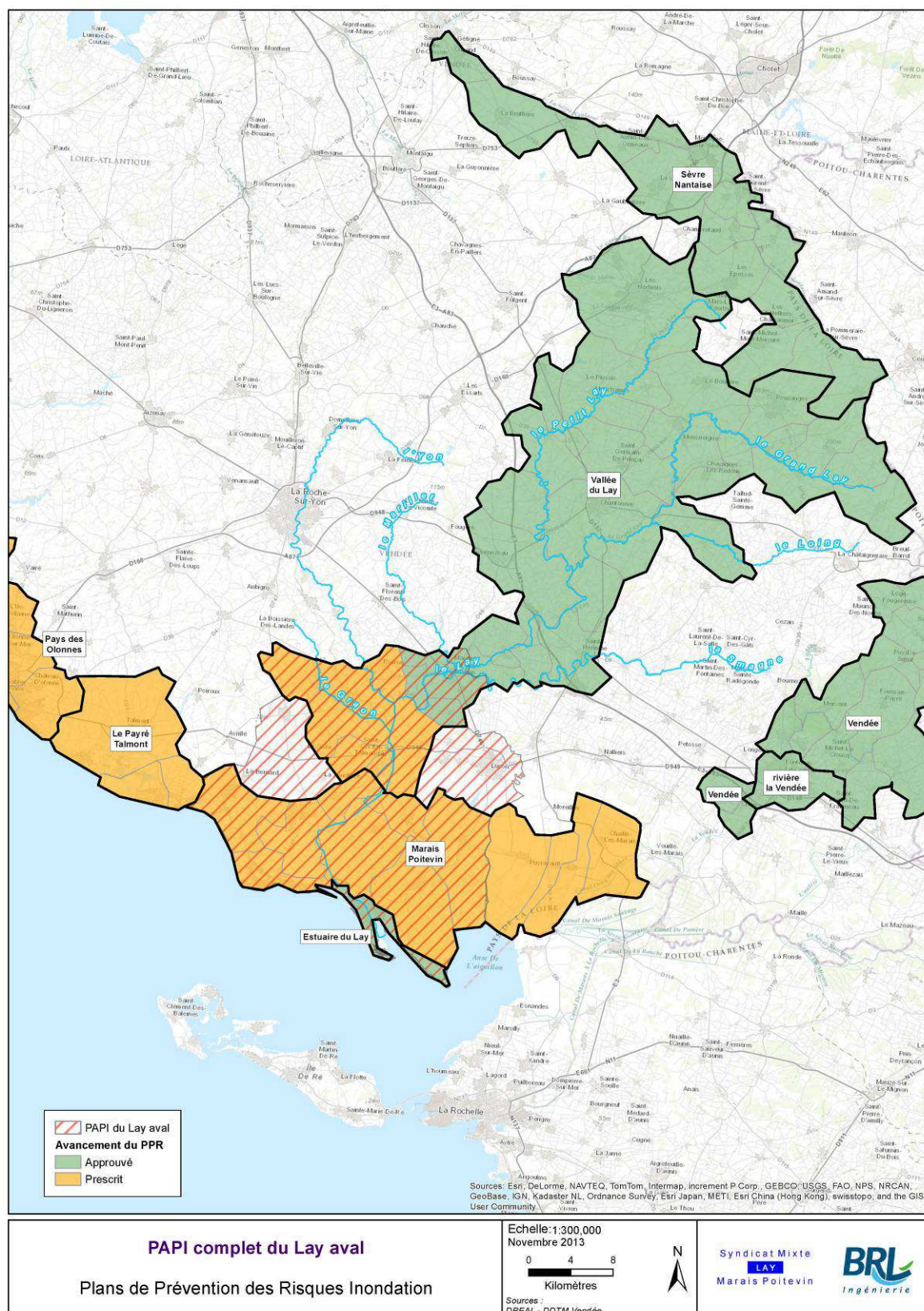


Figure 80 : Périmètres des Plans de Prévention des Risques Inondation et Littoraux

L'inventaire des repères de crues.

La loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 (article 42) a apporté un début de réponse au besoin d'entretenir la mémoire et la conscience du risque et d'éviter la disparition des repères de crues. Il s'agit aujourd'hui de l'article L.563-3 du Code de l'Environnement qui impose aux maires de réaliser l'inventaire des repères existants sur le territoire communal et d'établir les repères correspondant aux crues historiques et aux nouvelles crues exceptionnelles.

Une campagne de pose de repères de crue sera définie en détail dans le cadre du présent PAPI (phase 2). Les repères de crue recensés qui seront utilisés pour cette analyse sont issus de l'atlas des zones inondables et du retour d'expérience de Xynthia.

L'information régulière des populations.

Il appartient aux municipalités de faire connaître à la population les zones soumises à des risques prévisibles d'inondation par les moyens à leur disposition : affichage et publicité municipale.

Un plan d'information doit être mis en place par les municipalités visant à organiser la transmission aux populations, organismes et services concernés, des informations qui leur sont communiquées par les services compétents. Les modalités et le contenu de ce plan sont laissés à l'initiative des municipalités.

En application de l'article L.125-2 du code de l'environnement, dans les communes sur le territoire desquelles a été prescrit ou approuvé un plan de prévention des risques naturels prévisibles, le maire informe la population au moins une fois tous les deux ans, par des réunions publiques communales ou tout autre moyen approprié, sur les caractéristiques du ou des risques naturels connus dans la commune, les mesures de prévention et de sauvegarde possibles, les dispositions du plan, les modalités d'alerte, l'organisation des secours, les mesures prises par la commune pour gérer le risque, ainsi que sur les garanties prévues à l'article L.125-1 du code des assurances.

L'INFORMATION COMPLEMENTAIRE

Mise en œuvre d'un plan de communication –

Un plan de communication sera mis en œuvre, qui comprendra plusieurs actions, telles que la réalisation de plaquettes ou autres documents sur support multimédia à l'attention des scolaires, de documents d'information pour les élus, l'organisation d'expositions ou encore la mise en place d'un observatoire du risque.

Une campagne de communication sur le « souvenir » et les risques peut ainsi être envisagée dans ce cadre, rassemblant images et témoignages de Xynthia.

Le plan d'action de communication pourrait être envisagé dans le cadre d'un axe commun aux 3 PAPI en cours. Cela pose la question de la maîtrise d'ouvrage d'une telle action : l'Observatoire du risque (Cf. ci-après), Littoralis (lieu de mémoire de la Faute et l'Aiguillon en cours de réflexion), le Parc interrégional du Marais Poitevin, ...

Ces actions, qu'il convient de reconduire de façon régulière, sont indispensables pour maintenir la conscience du risque et lutter contre l'oubli.

La sensibilisation et la formation des élus est essentielle à la prise en compte de la problématique inondation dans les opérations d'aménagement du territoire qu'ils initient et ce très tôt, au moment de la définition du parti d'aménagement.

Les exercices de simulation et les procédures de révision régulière des outils de gestion de crise comme le PCS sont autant d'éléments qui contribuent à maintenir très vive cette conscience du risque chez les gestionnaires de crise. La sensibilisation et la responsabilisation des populations permettront encore d'accroître l'efficacité des moyens de prévention envisagés.

Observatoire du littoral, observatoire du risque

Un projet d'observatoire du littoral émerge du milieu associatif de la Tranche sur Mer : l'observatoire de l'Estran Tranchais. L'association est actuellement aidée des partenaires suivants :

- ▶ la Municipalité de La Tranche-sur-Mer qui subventionne et qui a mis à disposition les archives municipales,
- ▶ L'Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes,
- ▶ Les Fonds Européens pour le financement d'une stagiaire Master 2, qui a rédigé un mémoire portant sur un projet d'observatoire et a recensé une importante base de données.

Un observatoire du littoral est une structure qui collecte, qui centralise et qui met à disposition des données diverses sous forme d'indicateurs destinés à la surveillance, la gestion, l'élaboration et l'évaluation des politiques souhaitées.

On pourrait envisager que cette initiative soit étendue à un observatoire du risque inondation qui dépasse le cadre communal de la Tranche. De telles démarches ont vu le jour en France dans le Gard par exemple, en partenariat avec les services de l'Etat, la région Languedoc Roussillon, l'inspection académique, les chambres d'agriculture et de commerce et de l'industrie et les syndicats de bassins versants.

Les objectifs sont les suivants : améliorer les connaissances pour renforcer la culture du risque au sein de la population, aider à la programmation des actions et évaluer l'intervention publique dans ce domaine.

5.2 SURVEILLANCE, PREVISION

La stratégie proposée est ici :

De s'appuyer sur les moyens de surveillance et de prévision existants,

D'achever la couverture du bassin du Lay en surveillance/prévision en mettant en place un système sur le Lay aval et sur l'Yon,

De mettre en place une surveillance/prévision centralisée à l'échelle du bassin du Lay et des communes côtières de la zone, intégrant les risques de submersion marine et fluviale.

Surveillance

Sur le bassin du LAY, la surveillance demeure du ressort de l'Etat. Le réseau de surveillance météorologique et débitmétrique (crue) va être renforcé.

- En matière de prévision météorologique, METEO FRANCE en partenariat avec le Département de la Vendée a entrepris l'installation d'une nouvelle station météorologique dans l'estuaire du LAY.

La station a été installée en 2012 sur la commune de Grues, à proximité du BRAUD (parcelle 203 appartenant au syndicat mixte, porteur du PAPI) près de tronçon Nord de la digue de Grues.

- La DDTM a également un projet d'installation de marégraphes. Ce projet est développé dans le programme d'actions du PAPI (rapport phase 3).
- Concernant la mesure des débits de crue, le SAGE du LAY dans sa disposition 8.4.2 prévoit l'installation de deux stations de mesures consultables à distance :

- ▶ à Mouchamps (pont de la Gaillarderie sur le Petit Lay),
- ▶ à Saint Valérien (La Chauvelière sur la Smagne).

En dehors des besoins spécifiques à la prévision des crues, la connaissance de la relation pluie-débit, le calage des images radar, la connaissance de la ressource peuvent également nécessiter la mise en place de points de mesure complémentaires.

Prévision

Sur le bassin versant par le SPC 17

Le Service Prévision de Crue Vienne-Charente-Atlantique met en place depuis 2010 un système de prévision de crue sur le tronçon prioritaire du LAY à Mareuil sur Lay. Il est opérationnel et consultable sur le site de Vigicrues depuis décembre 2013.

Dans cette optique, des modélisations hydrologiques ont été produites en 2011. Des relevés topographiques de toutes les habitations inondables de Mareuil sur Lay permettront de déterminer les seuils d'alerte (jaune, rouge).

Le SPC 17 a prévu sur ces prochaines années d'étudier l'opportunité d'un système d'alerte sur l'YON (en lien avec la ville de la Roche sur Yon) ainsi que sur l'estuaire.

Sur l'estuaire et le littoral

Vis-à-vis du risque de submersion marine, METEO FRANCE met en œuvre depuis octobre 2011, un système de prévision de submersion marine grâce à des modélisations plus fines avec différents niveaux d'alerte (vert, jaune, orange et rouge). Mais le niveau de précision n'est pas suffisant vis-à-vis des attentes et des procédures.

Le territoire suivi par le SPC s'arrête à Mareuil. Une étude de faisabilité de prévisions sur le tronçon aval (influence principalement maritime) est en cours de réflexion.

Vers un système de surveillance/prévision centralisé

Il s'agirait de mettre en place un système centralisé sur le secteur intégrant les phénomènes marins et fluviaux, préparant un système d'alerte et de gestion de crise **à la même échelle et cohérent à un « PCS » intercommunal.**

5.3 ALERTE ET GESTION DE CRISE

La stratégie proposée est de mettre en place une alerte et une gestion de crise efficace et optimisant la solidarité et les moyens sur l'ensemble du secteur, en minimisant les pertes de charge (minimiser le nombre d'interlocuteurs, centraliser les moyens,..)

- Mise en place d'un « PCS » global
- Mise en œuvre d'un système d'alerte centralisé, intégrant les phénomènes marins et fluviaux, et une assistance à la gestion de crise.

Plans communaux de sauvegarde (PCS)

L'article 13 de la loi n° 2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile a créé le Plan Communal de Sauvegarde. Le dispositif est précisé par le décret n° 2005-1156 du 13 septembre 2005.

« Le plan communal de sauvegarde regroupe l'ensemble des documents de compétence communale contribuant à l'information préventive et à la protection de la population. Il détermine, en fonction des risques connus, les mesures immédiates de sauvegarde et de protection des personnes, fixe l'organisation nécessaire à la diffusion de l'alerte et des consignes de sécurité, recense les moyens disponibles et définit la mise en œuvre des mesures d'accompagnement et de soutien de la population. Il peut désigner l'adjoint au maire ou le conseiller municipal chargé des questions de sécurité civile.

Il est obligatoire dans les communes dotées d'un plan de prévention des risques naturels prévisibles approuvé ou comprises dans le champ d'application d'un plan particulier d'intervention. »

Le PPR fixe un délai pour sa réalisation. La mise en œuvre du plan communal ou intercommunal de sauvegarde relève de chaque maire sur le territoire de sa commune.

Outil utile au maire dans son rôle d'acteur majeur de la gestion d'un événement de sécurité civile, ce nouveau plan s'intègre dans l'organisation générale des secours. Il forme avec les plans ORSEC une nouvelle chaîne complète et cohérente de gestion des événements portant atteinte aux populations, aux biens et à l'environnement. Organisant la réponse de proximité en prenant en compte l'accompagnement et le soutien aux populations ainsi que l'appui aux services de secours, le PCS est le maillon local de l'organisation de la sécurité civile.

La mise en œuvre de ces plans est essentielle : c'est la pré-identification des mesures à prendre selon la gravité de l'événement qui permettra de gagner un temps précieux au moment de la crise. Un plan d'intervention graduée est ainsi établi qui permet de s'adapter à l'évolution de la situation.

La principale difficulté réside dans l'appréciation correcte de la nature de l'événement mais il ne s'agit pas de connaître avec précision le débit de crue qui va arriver mais plutôt un ordre de grandeur. L'aide du SPC et/ou des informations des divers réseaux locaux ou d'une assistance externalisée peut permettre à l' élu de prendre les décisions adaptées avec un niveau de fiabilité qui s'améliorera au cours du temps avec les retours d'expérience. A ce titre on ne peut que souligner l'intérêt des exercices de simulation prévus dans le cadre de la mise en œuvre des PCS et de la révision de ces plans selon une périodicité maximale de 5 ans. On comprend également l'intérêt de l'installation au moins provisoire d'appareils de mesure permettant d'améliorer progressivement la connaissance de la relation entre la pluviométrie et le débit et les conséquences constatées : cela milite pour une organisation du retour d'expérience.

L'amélioration des dispositifs de prévision et d'alerte sera un élément indispensable à la mise en œuvre efficace et à bon escient des PCS. Il est en effet souhaitable de limiter les « fausses alertes » mais il est également nécessaire que les gestionnaires de crise soient conscients des limites du système et que cette information soit transmise aux populations concernées. Il est donc souhaitable de prévoir une information lorsqu'un événement ne s'est pas déroulé comme prévu (soit qu'il se soit déroulé ailleurs – problème de localisation – ou d'intensité) afin que les populations comprennent et intègrent mieux cette problématique.

A l'heure actuelle (janvier 2014), les PCS sont terminés sur seize communes et neuf sont en cours d'élaboration. Sur deux communes, la réalisation des PCS n'a pas débuté (figure 81).

Les PCS sont rendus obligatoires sur les communes ayant fait l'objet d'un PPR, dans un délai de deux ans suivant la date d'approbation.

L'Association des Maires de Vendée accompagne depuis 2010 les communes dans la rédaction de tels documents.

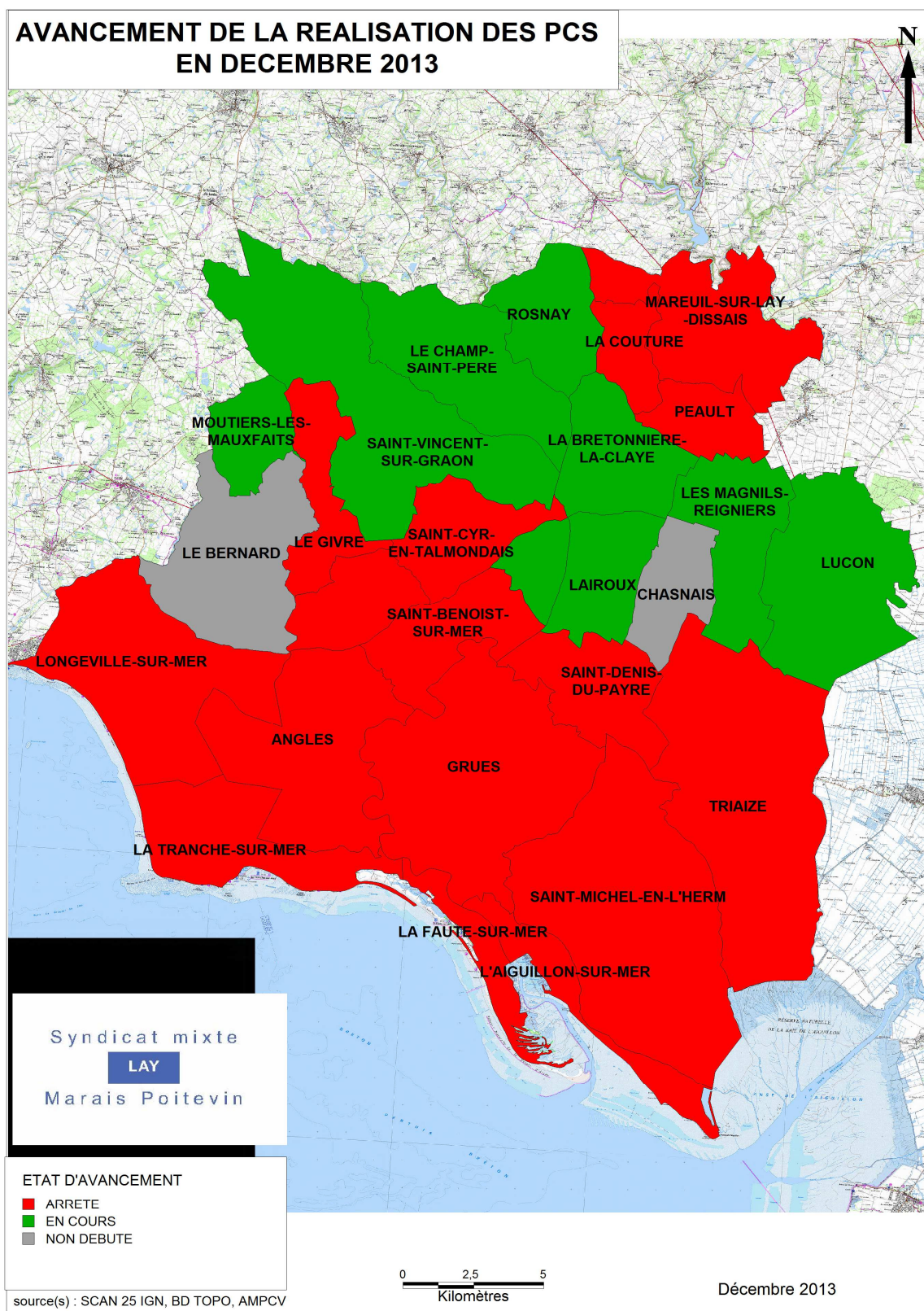


Figure 81 : Etat d'avancement des Plans Communaux de Sauvegarde

Vers un « PCS » intercommunal estuarien ?

Une volonté d'élaborer un « PCS » intercommunal émane de certaines communes (La Faute sur mer, Longeville sur Mer). Cela permettrait d'envisager une organisation face à la crise qui mutualiserait les moyens comme les points de rassemblement, et qui programmerait l'aide des communes voisines. Il permettrait aussi d'organiser l'accès et l'évacuations aux zones inondées.

En cas de crise grave comme lors de Xynthia, les trois communes de la Faute sur Mer, L'Aiguillon sur Mer et La Tranche sur Mer se retrouvent isolées (et le centre de secours en zone inondable). Un « PCS » Intercommunal serait le cadre idéal d'une réflexion permettant une réponse adaptée à un tel contexte. Les communes du littoral sont divisées en deux intercommunalités : Talmondaise pour Longeville sur Mer et Pays né de la mer pour les autres).

Vers un schéma d'alerte plus global ?

Les élus sont demandeurs de plus d'informations, ainsi que d'une aide et d'une interprétation des informations et surtout de leur évolution.

Par ailleurs, le diagnostic a montré que la conjugaison des phénomènes (crue du Lay, submersion marine) doit être prise en considération.

L'idée est de disposer d'une information **centralisée** qui permette d'anticiper suffisamment tôt sur la nature de l'événement de crise concernant un territoire donné afin de prendre les mesures de précaution et de sauvegarde nécessaires : dans le cas où ces communes sont dotées de plans de sauvegarde, cela leur permettra notamment de situer l'événement sur le Plan d'intervention gradué.

La définition d'un schéma d'alerte sur l'ensemble du bassin versant répond à une disposition du SAGE approuvé en 2011.

Cependant la question de la maîtrise d'ouvrage reste posée pour la création de ce schéma d'alerte et de l'organisation avec la Préfecture et le SDIPC lors de la crise. Depuis l'expérience de Xynthia, ce schéma d'alerte devrait intégrer la zone estuarienne, ce qui n'est actuellement pas le cas.

Si les communes les plus exposées aux submersions sont déjà équipées de PCS voire de systèmes d'alerte (pour l'Aiguillon sur mer et la Faute sur Mer), un « PCS » global et un schéma d'alerte à l'échelle du bassin versant doit être envisagé.

Un tel système pourrait reposer sur un système couplant les problématiques maritimes et fluviales, et la mise en place d'un appui spécifique à la gestion de crise de submersion auprès des communes, « temps réel ».

5.4 REGLEMENTER (PRISE EN COMPTE DU RISQUE DANS L'URBANISME)

5.5 REDUIRE LA VULNERABILITE

Les évolutions climatiques nous réservent de plus en plus d'épreuves et nous obligeront à une adaptation permanente. Il s'agit de garder à l'esprit qu'il est souvent vain de vouloir lutter contre la nature, avec des ouvrages de protection par exemple, et que l'adaptation est souvent la meilleure des solutions.

Le niveau marin moyen augmente au fil des siècles et ce phénomène s'accélère avec le changement climatique, ce qui ne fera qu'accentuer les risques de submersions marines. C'est un phénomène contre lequel il est difficile de lutter, à moins de protéger toutes les zones urbanisées littorales par des « murs anti-submersion ». De tels ouvrages de protection peuvent ne pas présenter beaucoup de bénéfices si les enjeux qu'ils protègent sont trop faibles par rapport à leurs coûts de construction et d'entretien. Dans ce cas, il est pertinent d'accepter des solutions telles que le repli stratégique et la diminution de la vulnérabilité.

La stratégie proposée est de s'appuyer sur les procédures existantes, mises en place dans le cadre des Plans de Prévention des Risques qui vont bientôt couvrir toutes les communes exposées au risque inondation sur le bassin versant du Lay.

L'élaboration de documents d'urbanisme adaptés au risque, et de prescriptions associées

L'outil privilégié permettant de réglementer l'occupation du sol en fonction du risque inondation est le PPR inondation. Ce document approuvé est une servitude d'utilité publique qui doit obligatoirement être annexée au document d'urbanisme (PLU ou POS) et qui s'impose à toute personne publique ou privée.

Le règlement détermine différents types de règles applicables dans chacune des zones considérées (on fait généralement la distinction entre « zones rouges » - celles où les constructions nouvelles sont interdites - « zones bleues » - celles où celles-ci restent autorisées sous réserve de prescriptions particulières - et « zones blanches » - constructions sans contraintes concernant les risques). Il traite des projets nouveaux, des constructions et activités existantes, il peut fixer des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde, collectives et individuelles. Il peut conditionner les autorisations de construire à la réalisation préalable et à la validation (dans des conditions bien précises) de travaux de protection, à la mise en place d'une maîtrise d'Ouvrage collective (publique ou privée ou mixte) et des conditions pérennes d'entretien des ouvrages.

Le PPR peut également imposer aux communes de réaliser un schéma d'assainissement pluvial pour maîtriser le ruissellement pluvial urbain.

Le PPR est souvent vécu comme très contraignant car il se traduit par des mesures restreignant le potentiel de développement de l'urbanisation ; les modalités de concertation et d'association des collectivités locales ont fait l'objet de réflexions récentes afin de favoriser leur appropriation au niveau local.

L'élaboration des PPR en cours porté par l'état, va donc aboutir à la définition de zones non constructibles ou constructibles sous conditions (vide sanitaire hors d'eau dans les zones urbanisées d'aléa modéré) et de prescriptions urbanistiques et architecturales sur le bâti existant.

Des mesures de réduction de la vulnérabilité du bâti existant exposé vont être rendues obligatoires pour les particuliers et entreprises et seront subventionnées en partie par l'état dans les 5 ans après l'approbation du PPR.

Il s'agira de mesures de type : création d'espaces refuges dans les bâtiments dépourvus d'étages et exposés à des hauteurs de submersion importantes, équipements de batardeaux permettant de retarder les entrées d'eau par les ouvertures, surélévation du système électrique, arrimage des cuves de fioul, clapets anti-retour sur assainissement non séparatif, ...

L'accompagnement des particuliers et des professionnels dans leurs démarches d'adaptation aux prescriptions et de diminution de leur vulnérabilité.

L'état a mis en place une opération d'accompagnement des particuliers et entreprises dans le cadre des prescriptions rendues obligatoires par les PPRI. Cependant celle-ci est limitée dans le temps (la mission conseil s'est achevée au 31 décembre 2013) et devra être reconduite.

La vulnérabilité des infrastructures publiques

Certaines infrastructures publiques sont situées en zones inondables sur la bassin du Lay. Elles devront être diagnostiquées en vue d'envisager la réduction de la vulnérabilité le cas échéant.

La vulnérabilité du centre de secours de l'Aiguillon sur Mer

Par ailleurs, il faut envisager la mise hors d'eau du centre de secours de l'Aiguillon sur Mer. Touché lors de la tempête Xynthia, il n'a pas été possible pour le SDIS 85 de trouver un nouveau terrain pour reconstruire le centre dans un secteur hors d'eau. La difficulté tient au caractère inondable étendu sur la commune, de sa densité de construction et de la nécessité de maintenir un service opérationnel accessible rapidement par les pompiers en cas d'inondation.

Une réflexion a été engagée pour savoir si l'on peut envisager la réduction de la vulnérabilité du centre de secours.

5.6 RALENTIR LES ECOULEMENTS

Le diagnostic montre que la zone en amont de Moricq présente un large champ d'inondation fortement mobilisé dès les crues fréquentes.

La submersion de ces zones peu urbanisées et des marais mouillés contribue au ralentissement dynamique des crues du Lay avant leur arrivée sur la zone aval. Cela permet d'éviter tout débordement à l'aval de Moricq jusqu'à la période de retour 100 ans, à la condition qu'aucune brèche n'apparaisse sur les digues existantes.

La stratégie est donc de pérenniser ce fonctionnement en :

- Garantissant le caractère rural et/ou naturel de ces zones : le caractère inondable par la crue de référence du PPR en cours va entraîner l'inconstructibilité de ces zones par un document opposable aux tiers et qui viendra se superposer au PLU des communes.

5.6.1 Aménagement de la zone des méandres ou reconnexion des boucles du Lay

L'aménagement de la zone des méandres (ou reconnexion des boucles du Lay) ne présente pas d'intérêt vis-à-vis du ralentissement dynamique des crues, compte tenu des faibles volumes d'expansion qui seraient regagnés en écartant les digues au regard du volume total de la crue.

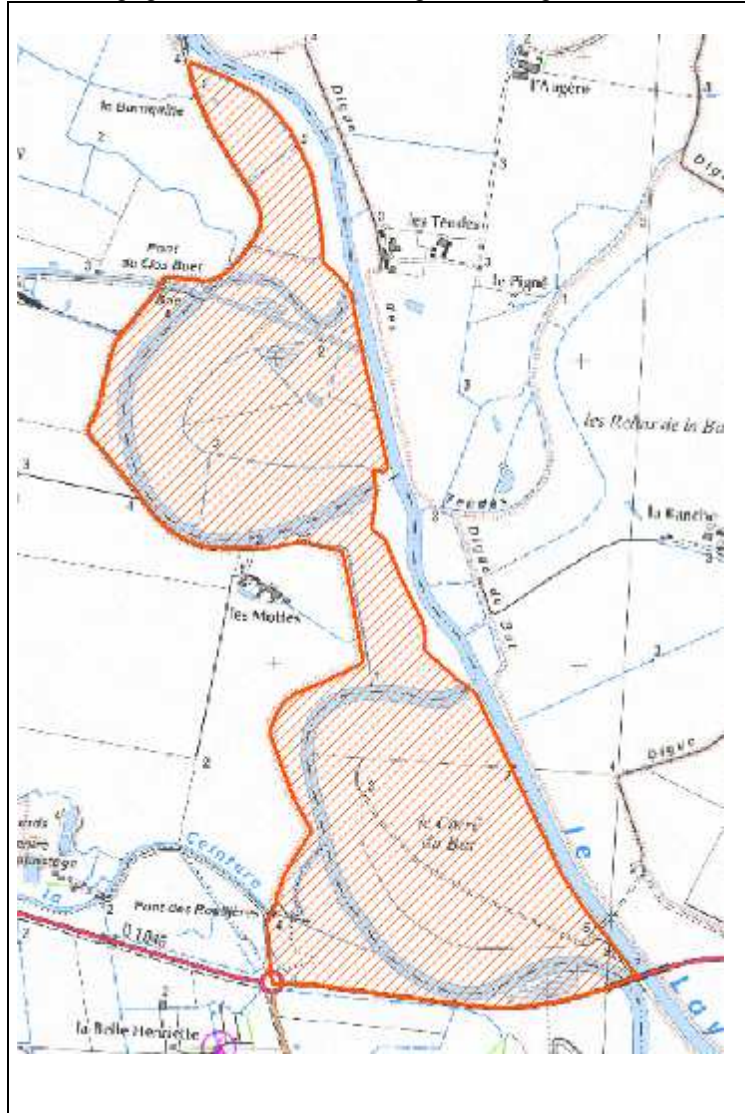


Figure 82 : Emprise estimée de la zone de reconnexion des boucles du Lay

Cependant l'aménagement d'un espace de liberté du cours d'eau présente peut être un intérêt en terme de transport solide et certainement en terme de restauration écologique.

En effet le volume de l'hydrogramme de la crue centennale est de 40 millions de m³ :

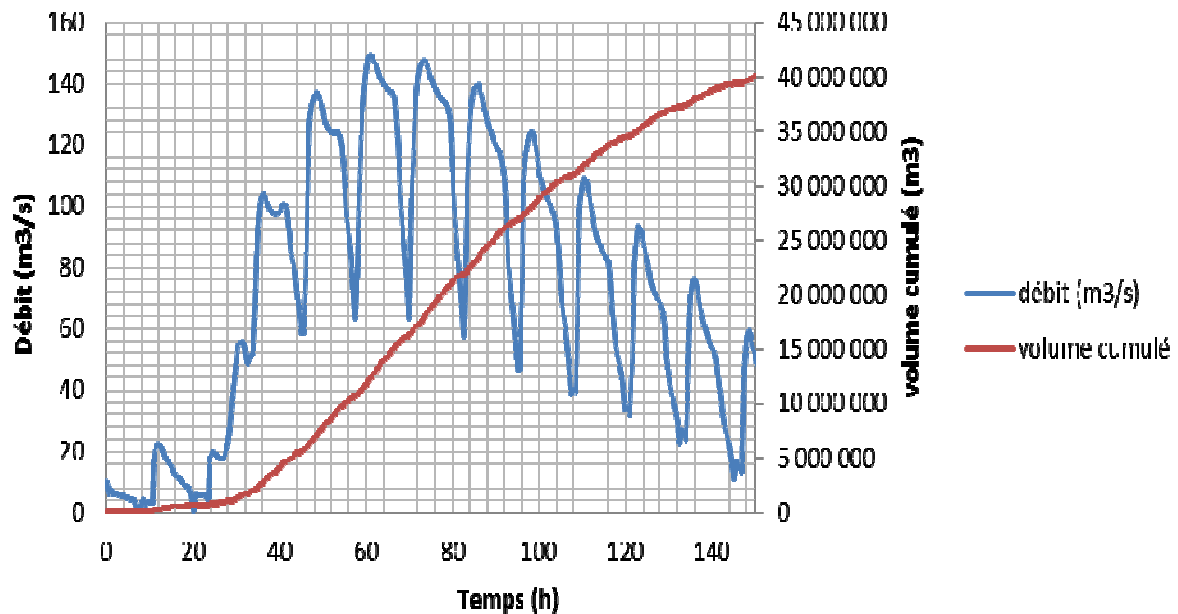


Figure 83 : Hydrogramme de la crue centennale

Or le volume d'expansion de crue disponible dans le secteur des méandres à la cote 4 m NGF est estimé à environ 3,3 millions de m³, ce qui représente seulement 8% du volume de la crue centennale. Cela ne permettrait donc pas de ralentir suffisamment les écoulements pour écrêter le débit de pointe.

De plus, la multitude de propriétaires sur ce secteur (Cf. cartes annexe 5), met en exergue la difficulté foncière d'un tel projet dans le délai imparti.

5.6.2 Rôle du déversoir de Lairoux et arches de ancienne RD 2949

Cet ouvrage situé en rive gauche du Lay entre la route départementale et l'ancienne RD 2949, est actuellement hors service. Il est envisagé d'optimiser les débordements en champ majeur gauche.

L'analyse des résultats du modèle montre que les débordements en rive gauche ont lieu à l'amont des deux routes, et que le remplissage des casiers se fait correctement par les ouvrages de décharge sous les remblais routiers.

La mise en service de l'ouvrage ne se justifierait que pour pallier à l'insuffisance des ouvrages sous le premier remblai ou pour inonder plus tôt la rive gauche qu'en situation actuelle.



Figure 84 : Localisation du déversoir de Lairoux

5.7 GESTION DES OUVRAGES DE PROTECTION HYDRAULIQUE

Stratégie proposée :

- Dignes de protection maritimes : garantir la protection des zones habitées par ces digues jusqu'à un événement correspondant à Xynthia+20cm, optimiser les protections pour les zones non habitées, éventuellement en prenant en compte les digues secondes,
- Dignes de protection fluviales : garantir la tenue des digues qui délimitent la zone d'écrêtement des inondations et protègent essentiellement des enjeux agricoles,
- « Officialiser » le rôle de digue de la voie ferrée par classement de l'ouvrage, ce qui permettra de mettre en place un programme de surveillance et d'entretien,
- Optimiser l'évacuation de l'eau des zones inondées : drainage, portes à la mer,...
- Etudier l'intérêt d'un délestage par le chenal vieux.

La stratégie proposée dans le PAPI pour le secteur maritime de la baie de l'Aiguillon tient compte des discussions réalisées lors des commissions et des comités techniques de coordination des trois PAPI de la baie de l'Aiguillon.

Cette coordination a abouti à la rédaction commune d'une stratégie reprise dans les stratégies de chacun des PAPI du pourtour de la baie.

Cette stratégie est précisée par des analyses détaillées présentées en phase 3.

ANNEXES

ANNEXE 1 – BIBLIOGRAPHIE

Dénomination	Forme	Source	Auteur	Description
Etude Antea/BCEOM - Anse de l'aiguillon sur mer	PDF Couches MapInfo	Web	Antea/BCEOM	Etude des ouvrages de défense contre les états de mer
09/08/2012 - GDR				
Atlas des zones inondables des fleuves côtiers vendéens - Lot 2	PDF - jpg	CD1	CETE de l'Ouest	Approche hydrogéomorphologique pour les crues exceptionnelles
Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux	PDF		CETMEF	Rapport + Annexes + fiches études + enjeux Descriptif des données utilisées pour l'étude (possibilité de récupérer celles qui nous intéressent ?)
Etude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen	PDF - jpg		GEOS / DHI	Rapport + cartes : études sur les aléas submersion marine et effets de l'érosion Description des caractéristiques sédimentologiques des différentes zones (US1 à US6 inutiles)
EPRI Loire - Bretagne (PDF Livres DREAL)	PDF	CD2	DREAL	Evaluation des risques et conséquences des inondations à l'échelle du bassin Loire-Bretagne - Listing des événements marquants d'inondation dans le passé
Digues Territoire SMMP	JPG	CD2	SMMP	Description géographique des gestionnaires de digues sur l'estuaire du Lay et les polders de la baie de l'aiguillon (bassin du Lay aval)
Photos Xynthia DREAL	JPG	CD2	DREAL	Photos aériennes
Atlas Hydrauliques	PDF	CD2		3 atlas : Lay / Vendée - Autizes / Curé - Analyse territoriale des enjeux liés à l'usage des sols
PPR La faute sur Mer / L'aiguillon sur mer	PDF	CD2		PPRI
Amélioration des connaissances sur les fonctions et usages des zones humides : évaluation économique sur des sites tests : le cas de la lagune de la Belle-Henriette	PDF	CD2	ACTeon/ Ecovia	Description de l'activité du site (chasse, pêche, urbanisation, caractéristiques faune/flore)
Base de données d'observation des effets de la tempête Xynthia sur le littoral	PDF	CD2	BRGM	Base de données : caractéristiques générales du point d'observation ; observation sur la submersion marine ; observation sur les évolutions morphologiques induites par la tempête ; observation sur les dégâts occasionnés par Xynthia ; observation diverses.
Tempête Xynthia : compte rendu de mission préliminaire	PDF	CD2	BRGM	Mission de terrain du 8 au 12 mars pour recueillir des infos
Etude des risques de submersion marine sur la commune de la Tranche-sur-Mer	PDF	CD2	DHI	Modélisation d'une submersion centennale à l'aide du logiciel Mike 21
Document d'objectifs Natura 2000 du Maris Poitevin	PDF	CD2	Natura 2000 ?	Gestion concertée des sites du réseau Natura 2000

Dénomination	Forme	Source	Auteur	Description
La tempête Xynthia du 28 février 2012 - Synthèse	PDF	CD2	FFSA GEMA	/ Bilan humain et matériel , conséquences au niveau des assurances
Approche de la gestion des cordons littoraux : mise au point et application d'un indice d'érosion (Zone des Pertuis Charentais, France)	PDF	CD2	J. Musereau Université européenne de Bretagne Rennes 2	Construction d'un indice d'érosion localement défini et facile à mettre en œuvre
Le risque d'inondation en Vendée	PDF	CD2	C. Delabruyere	Descriptif des inondations en Vendée ; Manifestation, risques, mesures à prendre...
Atlas aléas submersion littoral Vendée	PDF Couches MapInfo	CD3	SOGREAH	Tables MapInfo : aléas, IGN / Cartes pdf d'aléas
CGU des données géographiques numériques de l'IGN	PDF	CD4 (Docs PAPI)	/	/
Digue_SMMP_BLAY	Couches MapInfo	CD4 (Docs PAPI)		Couches répertoriant les digues entre l'aiguillon sur mer et la digue du Lay
SCAN_CASSINI	JP2 ???	CD4 (Docs PAPI)		
SCAN_ETAT_MAJOR_1845	JP2 ???	CD4 (Docs PAPI)		
10/08/2012 - GDR				
SOGREAH_Mars2011_REX_Xynthia_Charente-Maritime	PDF	CD5	Sogreah	Eléments de mémoire sur la tempête Xynthia description du phénomène, recensement des données, état des lieux des zones submergées
Aspects morphologiques de la partie occidentale du marais poitevin	PDF		Abel Bouhier	Aspects "géologiques" de la zone + évolution morphologique du littoral
PCS La Tranche sur Mer Septembre 2011	PDF			Plan communal de sauvegarde : définition et prévention des risques
Niveaux marins extrêmes de pleine et basse mer en Manche et Atlantique	PDF		SHOM (Lucia Pineau- Guillou Céline Perherin)	Calcul des niveaux marins extrêmes à partir de l'ensemble des données marégraphiques dispos au SHOM jusqu'en novembre 2009
Digue_Grands_Relais_Aiguillon	PDF	CD6	EGIS Eau	Etudes de diagnostics intéressant la sécurité civile pour la digue des grands relais
Digues ASVL DossierPSR	PDF	CD6	ARCADIS	
Ortho_1920	Couches MapInfo	CD6		
Revue de presse Xynthia	PDF	CD6		
03/09/2012 - GDR				
Anziani_2010_xynthia_culture_du_risque	PDF	CD6	Sénat	Rapport d'information au nom de la mission sur les conséquences de la tempête Xynthia

Dénomination	Forme	Source	Auteur	Description
Evaluation à mi parcours du plan d'action gouvernemental pour le marais poitevin	PDF	CD6	Eric BINET - Alain ESCAFRE - Françoise FOURNIE	Gestion de l'eau dans le marais poitevin
La crise Xynthia à l'aulne de l'histoire	PDF	CD6	Groupe de recherche SUBMERSIONS	Enseignements et enjeux contemporains d'une histoire des submersions
L'évolution récente de l'aiguillon-La-Faute-sur-Mer (Vendée)	PDF	CD6	Claude Cabanne	Evolution en termes de population, tourisme etc
Retour d'expériences après la tempête Xynthia en France, leçons pour les Pays Bas	PDF	CD6	HKV Consultants	Analyse de la sécurité contre l'inondation
Rapport d'information sur les raisons des dégâts provoqués par la tempête Xynthia	PDF	CD6	Assemblée Nationale	Analyse de la réponse suite à la catastrophe
Dossier départemental des risques majeurs	PDF	CD6	Préfecture de la Vendée	Prévention des risques
Une étude hydrosédimentaire globale du littoral vendéen	PDF	CD6	CETMEF / DDE	Méthodo de l'étude, description et caractérisation des agents morphodynamiques
Xynthia - Outils et perspectives	PDF	CD6	Géolittomer (université de Nantes)	
Diagnostic Digue Aiguillon		CD9		Digue du génie, digue des grands relais
Diagnostic Digue la Faute		CD9		
REX Xynthia	PDF Couches MapInfo	CD9	CETE de l'Ouest	Cartes sous forme pdf et SIG de la submersion marine par Xynthia (échelle 10 000 et 25 000)
SAGE Lay	PDF	CD1	o SMMP	
Atlas 2011 VSA	xls	CD8		Atlas des points de suivi des niveaux d'eau - Bassin de la Vendée - Sèvre - Autizes
Canal Luçon		SMVSA1		Rapport diagnostic de digues canal de Luçon
ISL Juin 2010	PDF - xls	SMVSA1	ISL	Diagnostic de digues de protection contre la mer
Plans de recollement	PDF Couches MapInfo	SMVSA1		Pour projet de restauration des digues à la mer
04/09/2012 - GDR				
BDCarto	Couches MapInfo	SMVSA2	BRL	Couches SIG donnant des infos du point de vue administratif, routier, réseaux hydrographiques, voies ferrée...
Gestionnaires	Couches ArcGIS	SMVSA2	BRL	Couches SIG des gestionnaires sur la VSA, au format ArcGIS ou Mapinfo
IGN	Couches ArcGIS MapInfo	SMVSA2	BRL	Carte IGN
PCI+ff 2010	Couches MapInfo	SMVSA2	BRL	Infos "géographiques" (parcelles, voies SNCF, lieux dits...)
PLU	Couches MapInfo	SMVSA2	BRL	PLU, POS, cartes communales...
Réseaux	Couches MapInfo	SMVSA2	BRL	Ouvrages hydrauliques, digues, lits mineurs... => données hydrauliques

Dénomination	Forme	Source	Auteur	Description
Atlas zones inondables fleuves	JPG	SMVSA3	CETE de l'ouest	Atlas des zones inondables des fleuves Vendée/SèvreNiortaise
Atlas des risques inondables des cours d'eau principaux en 1998	PDF	SMVSA3	Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement	Principaux cours d'eau : Charente / Boutonne / Seugne / Seudre / Sèvre Niortaise
Atlas des risques littoraux en Charente maritime	PDF	SMVSA3	Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement	Zone d'étude : au sud de Charron
05/09/2012 - GDR				
Rapport Xynthia 2010 03	PDF	SMVSA3	BRGM	
Recensement des submersions marines historiques	PDF	SMVSA3	BRGM	Recensement des submersions marines depuis 1694 jusqu'en 1940
Vulnérabilité du territoire aux risques littoraux	PDF	SMVSA3	CETMEF	
Expertise des zones de solidarité Xynthia en Charente-Maritime	PDF	SMVSA3	CGEDD	Mission d'expertise après Xynthia sur 12 sites : Charron et sites plus au sud
Expertise des zones de solidarité Xynthia en Charente-Maritime	PDF	SMVSA3	CGEDD	Rapport détaillé relatif au site de Charron
Urbanisme	Couches MapInfo	SMVSA4		
Atlas zones inondables fleuves	JPG	SMVSA5	CETE de l'ouest	Atlas des zones inondables du Lay aval
Atlas submersion marine	PDF	SMVSA5	SOGREAH	
Ile de Ré	PDF	SMVSA5	Artélia	PAPI
BVL_RESEAUX_OUVRAGES	Couches MapInfo	CD7 (envoi	5)	Données hydrauliques (caneaux, cours d'eau etc)
Plans de recollement digue de Noailles	DWG	CD7 (envoi	5)	Plans de recollement de la digue nord de Noailles
SCAN25_LB93_Vendee	Couches MapInfo	CD7 (envoi	5)	Scan 25
Sogreah gestion durable du trait de cote	PDF Couches MapInfo	CD7 (envoi	5)	SOGREAH Contient des couches SIG d'ouvrages, des fiches d'inspection et un rapport PDF
Bilan chiffré Xynthia	PDF			
CCTP Sud Vendée	PDF			CCTP d'étude des aléas naturel sur le "sud Vendée et Marais Poitevin"

Dénomination	Forme	Source	Auteur	Description
Etude sur la connaissance des risques inondation et submersion - Limites_inondables_Sèvre	Couches - Mapinfo	Terrain	Antonin	SOGREAH
Etude sur la connaissance des risques inondation et submersion - Synthèse générale étude	Couches - Mapinfo	Terrain	Antonin	SOGREAH
Etude sur la connaissance des risques inondation et submersion - Rapport	PDF	Terrain	Antonin	SOGREAH
Photos digues	JPG	Terrain	Antonin	Photos des digues et ouvrages dans le BV du Lay
ORTHO_2009	Couches - Mapinfo			Orthophotos du secteur du Lay
GDR - 18/09/2012				
Etude sur la continuité écologique des cours d'eau Lay et Yon - Bathymétrie			Bureau Veritas	Profil en travers du Lay entre Mreuil sur Lay et le barrage de Moricq, et de l'Yon.
21/09/2012 - GDR				
Digues de la Pergola	PDF - Autocad	CD	ARCADIS	Etudes d'avant projet de la digue de la Pergola (l'Aiguillon sur Mer)
Digue des Grands relais	PDF - Autocad	CD	ARCADIS	Etudes d'avant projet de la digue des Grands relais (l'Aiguillon sur Mer)
LCHF_de_1981_a_1986	PDF	CD		Etudes sédimento sur l'embouchure du Lay
Aménagement hydraulique de la basse vallée du Lay - Etude d'impact		CD	SCE	
Modélisation maritime du secteur de la Belle Henriette	Fichiers pour modèle Télémac	CD		
Etude Antea / BCEOM - Relevés bathymétriques de l'estuaire du Lay	PDF - Autocad	CD	Antea/BCEOM	
L'aiguillon sur mer juillet 2012		CD		PPRI : cartes d'aléa, enjeux, note de présentation du PPRI
La Faute sur mer juillet 2012		CD		PPRI : cartes d'aléa, enjeux, note de présentation du PPRI
MAJ_2012_Baies_Aiguillon_Bourgneuf	Rasters	CD		Compléments LITTO3D Baie de l'Aiguillon
01/10/2012 - GDR				
Inondations de 1909 en Vendée	PDF	Archives Syndicat BV du Lay	Divers	Articles de journaux et rapports sur les inondations de 1909
Ouest France spécial inondations de 1995	PDF	Archives Syndicat BV du Lay		Articles de journaux sur les inondations de 1995 sur l'ouest de la France

Dénomination	Forme	Source	Auteur	Description
Etude sur la connaissance des risques inondation et submersion - Limites_inondables_Sèvre	Couches - Mapinfo	Terrain	Antonin	SOGREAH
Etude sur la connaissance des risques inondation et submersion - Synthèse générale étude	Couches Mapinfo	Terrain	Antonin	SOGREAH
Etude sur la connaissance des risques inondation et submersion - Rapport	PDF	Terrain	Antonin	SOGREAH
Photos digues	JPG	Terrain	Antonin	Photos des digues et ouvrages dans le BV du Lay
ORTHO_2009	Couches Mapinfo			Orthophotos du secteur du Lay
GDR - 18/09/2012				
Etude sur la continuité écologique des cours d'eau Lay et Yon - Bathymétrie			Bureau Veritas	Profil en travers du Lay entre Mreuil sur Lay et le barrage de Moricq, et de l'Yon.
21/09/2012 - GDR				
Digues de la Pergola	PDF Autocad	CD	ARCADIS	Etudes d'avant projet de la digue de la Pergola (l'Aiguillon sur Mer)
Digue des Grands relais	PDF Autocad	CD	ARCADIS	Etudes d'avant projet de la digue des Grands relais (l'Aiguillon sur Mer)
LCHF_de_1981_a_1986	PDF	CD		Etudes sédimento sur l'embouchure du Lay
Aménagement hydraulique de la basse vallée du Lay - Etude d'impact		CD	SCE	
Modélisation maritime du secteur de la Belle Henriette	Fichiers pour modèle Télémac	CD		
Etude Antea / BCEOM - Relevés bathymétriques de l'estuaire du Lay	PDF Autocad	CD	Antea/BCEOM	
L'aiguillon sur mer juillet 2012		CD		PPRI : cartes d'aléa, enjeux, note de présentation du PPRI
La Faute sur mer juillet 2012		CD		PPRI : cartes d'aléa, enjeux, note de présentation du PPRI
MAJ_2012_Baies_Aiguillon_Bourgneuf	Rasters	CD		Compléments LITTO3D Baie de l'Aiguillon
01/10/2012 - GDR				
Inondations de 1909 en Vendée	PDF	Archives Syndicat BV du Lay	Divers	Articles de journaux et rapports sur les inondations de 1909
Ouest France spécial inondations de 1995	PDF	Archives Syndicat BV du Lay		Articles de journaux sur les inondations de 1995 sur l'ouest de la France

Dénomination	Forme	Source	Auteur	Description
Archives azi	PDF	Archives Syndicat BV du Lay		Archives de zones inondables
ORTHO_1950	Couches MapInfo	Archives Syndicat BV du Lay		
ORTHO_2006	Couches MapInfo	Archives Syndicat BV du Lay		Orthophotos du secteur du Lay, 2006
02/10/2012 - GDR				
Atlas Ouvrages VSA	Dossier	?	?	Fiches Ouvrages sur le secteur VSA
Xynthia (photos sans sources)	JPG	Archives Syndicat BV du Lay	?	Photos aériennes prises après Xynthia
PPRI Lay Amont	PDF	Archives Syndicat BV du Lay	SOGREAH	PPRI du Lay Amont
Atlas des zones inondables de l'Yon	PDF	Archives Syndicat BV du Lay	SOGREAH	Rapport
Opportunité et faisabilité d'un dispositif de prévisions de crues sur le bassin du Lay	PDF	Archives Syndicat BV du Lay	SOGREAH	Rapport phases 1 à 4
Appel à projets PAPI	PDF		Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement	Cahier des Charges Général PAPI
Plan submersion rapides	PDF		Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement	Présentation de la démarche définie par l'Etat pour assurer la sécurité des personnes dans les zones exposées aux phénomènes de submersions rapides
Plans leves aiguillon	PDF		?	PDF avec fond de plan = orthophoto avec données topographiques
Etude relative à la maîtrise d'ouvrage en matière de gestion du trait de côte en Pays de la Loire	PDF		KPMG	Synthèse des particularités du littoral des pays de la Loire
PAPI d'intention du Lay	PDF		SMMP	Dossier de candidature du PAPI
Litto3D_Aiguillon	Couches MapInfo			Litto_3D sur la Pointe de l'Aiguillon

Dénomination	Forme	Source	Auteur	Description
Archives azi	PDF	Archives Syndicat BV du Lay		Archives de zones inondables
ORTHO_1950	Couches MapInfo	Archives Syndicat BV du Lay		
ORTHO_2006	Couches MapInfo	Archives Syndicat BV du Lay		Orthophotos du secteur du Lay, 2006
02/10/2012 - GDR				
Atlas Ouvrages VSA	Dossier	?	?	Fiches Ouvrages sur le secteur VSA
Xynthia (photos sans sources)	JPG	Archives Syndicat BV du Lay	?	Photos aériennes prises après Xynthia
PPRI Lay Amont	PDF	Archives Syndicat BV du Lay	SOGREAH	PPRI du Lay Amont
Atlas des zones inondables de l'Yon	PDF	Archives Syndicat BV du Lay	SOGREAH	Rapport
Opportunité et faisabilité d'un dispositif de prévisions de crues sur le bassin du Lay	PDF	Archives Syndicat BV du Lay	SOGREAH	Rapport phases 1 à 4
Appel à projets PAPI	PDF		Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement	Cahier des Charges Général PAPI
Plan submersion rapides	PDF		Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement	Présentation de la démarche définie par l'Etat pour assurer la sécurité des personnes dans les zones exposées aux phénomènes de submersions rapides
Plans leves aiguillon	PDF		?	PDF avec fond de plan = orthophoto avec données topographiques
Etude relative à la maîtrise d'ouvrage en matière de gestion du trait de côte en Pay de la Loire	PDF		KPMG	Synthèse des particularités du littoral des pays de la Loire
PAPI d'intention du Lay	PDF		SMMP	Dossier de candidature du PAPI
Litto3D_Aiguillon	Couches MapInfo			Litto_3D sur la Pointe de l'Aiguillon

Dénomination	Forme	Source	Auteur	Description
03/10/2012 - GDR				
Gestions de crues du complexe de Mervent	PDF		Coyne et Bellier ?	Tableaux de gestions des crues de 2007 à 2011 + règlement du complexe
Diagnostic des digues du Grenouillet	PDF Autocad	-	EGIS Eau	Rapport + annexes
04/10/2012 - GDR				
PL_PT	PDF - xls			Profils en long et en travers des canaux des Abbés, de la Baisse, du Clain, de Vix, du Controt de Vix, des ceintures des hollandais et de la Taillée
09/10/2012 - GDR				
Synthèse sur les études d'onde de rupture du barrage de Mervent	PDF		Stucky	Carte de synthèse des études d'ondes de rupture réalisées sur la zone
Etude hydrosédimentaire Secteur des Générelles	PDF		DHI	Rapport final de l'étude hydroséd du secteur des Générelles (La Tranche sur mer)
Etude hydrosédimentaire Anse du Maupas : modélisation 2D	PDF		DHI	Rapport final de l'étude hydroséd de l'anse du Maupas par modélisation 2D
Topo Marais de Mouillepie	Autocad xls	-	UNIMA	Plans topo de la digue de Mouillepie dans le cadre de son renforcement et réhaussement
IIBSN	PDF		IIBSN	Bilan des inondations sur le périmètre SAGE de la Sèvre Niortaise et projet PAPI
Repères de crues IIBSN	PDF		IIBSN	Démarche, législation liées aux repères de crues
PSR définitif				Plan de submersion Rapide
Atlas Ouvrages Champagné les Marais	PDF			Fiches ouvrages sur la zone du marais de Champagné
Atlas Ouvrages Petit Poitou				Fiches ouvrages sur la zone du marais du Petit Poitou
Topo Autre étude GEOS3D	PDF Autocad	-	GEOS3D	Topographie d'ouvrages
PPRI Fontenay le Comte	Couches ArcGIS			Couches ArcGIS des parcelles, communes, zones de végétation et zones en eau...
11/10/2012 - GDR				
Hydrologie Mervent	PDF		Stucky	Rapport + Complément : Analyse hydrologique au barrage de Mervent, en partant de l'étude des pluies extrêmes jusqu'à l'établissement des débits de crues
16/10/2012 - GDR				
15399.dwg	Autocad		Arcadis	Plan Autocad des digues du Lay (polylignes 3D)
14995_Reconstruction.dwg	Autocad		Arcadis	Plan Autocad de la Digue du Polder II (Baie de l'Aiguillon)
15859.dwg	Autocad		Arcadis	Plan Autocad des digues du Chenal Vieux
linéairediguesdeswagons.dwg	Autocad		Arcadis	Plan Autocad de la Digue des Wagons (PL et PT) (polylignes 3D)
18/10/2012 - GDR				
Champagné.xls	xls			PL du Canal de Champagné du pont à Didot aux Amarres
l'Epine.xls	xls			PL du canal de l'Epine sur 3400 de part et d'autre du canal de la Morandière
19/10/2012 - AMA				
Scan - Version temp - Etude continuité éco	PDF - .Doc		NCA, Etudes & Conseils en Environnement	Description du marais, son historique, ses travaux, le fonctionnement hydraulique, les acteurs du marais,
22/10/2012 - GDR				
Etude_Rupture_Barrage_Mervent	Couches Mapinfo			Données Mapinfo du PPRI
23/10/2012 - GDR				
Etude sur la continuité écologique des cours d'eau Lay et Yon : Compléments Topo Caricaie	PDF Couches MapInfo	-	Bureau Veritas	Données de dimensions d'ouvrages et du Chenal Vieux et du Lay sous forme de couches MapInfo Plans des ouvrages en PDF
29/10/2012 - GDR				

Dénomination	Forme	Source	Auteur	Description	
Diagnostic de la digue de Grues	PDF		ISL	Diagnostic de sûreté, surveillance et proposition de protection	
Profils en travers Sauvaget, Boisse l'île d'Elle, abord du barrage	PDF		Ch. Millet	Profil en travers	
07/11/2012 - GDR					
Atlas des zones inondables du Lay 1999	PDF		SCE	Atlas des zones inondables du Lay, Grand lay et Petit Lay jusqu'à Mareuil : cartes et rapport	
Atlas des zones inondables de l'Yon	PDF		SOGREAH	Atlas des zones inondables de l'Yon	
Atlas des zones inondables de la Maine	PDF		SOGREAH	Atlas des zones inondables de la Maine : cartes et rapport	
Atlas des zones inondables des zones inondables des fleuves côtiers vendéens - Lot 4	PDF		CETE de l'Ouest	Auzance, Ciboule, Vertonne	
PPRI Vendée	PDF			Cartes d'aléas et note de présentation (manque rapport)	
Atlas des zones inondables de l'Autize			SOGREAH	Atlas des zones inondables de l'Autize : cartes et rapport	
Atlas des zones inondables des zones inondables des fleuves côtiers vendéens - Lot 5	PDF		CETE de l'Ouest	Etier de Sallertaine	
Atlas des zones inondables des zones inondables des fleuves côtiers vendéens - Lot 3	PDF		CETE de l'Ouest	Jaunay et Vie	
PPRI Sèvre Nantaise	PDF		BCEOM	PPRI de la Sèvre Nantaise : rapport et cartes d'aléas	
Atlas des zones inondables des zones inondables des fleuves côtiers vendéens - Lot 1	PDF		CETE de l'Ouest	Sèvre Niortaise et Marais Poitevin	
Atlas des zones inondables des zones inondables des fleuves côtiers vendéens - Lot 6	PDF		CETE de l'Ouest	Le Payré talmont	
14/11/2012 - GDR					
Sèvre_1851	PDF			Données sur le régime de la Sèvre en 1851	
Enjeux_Lay	Couches Mapinfo		SOGREAH	Polygones MapInfo contenant des infos sur les enjeux	
29/11/2012 - GDR					
SIG Enjeux	Couches Mapinfo		Plate-forme SIG Loire	Couches MapInfo répertoriant les lycées du pays de la Loire, les campings et les centres d'accueil de jeunesse vendéens.	
PT_Lay	PDF - xls		SCP Siaudeau	Profils en travers levés du Lay	
04/12/2012 - GDR					
PT_Chenal_Vieux	PDF - xls		SCP Siaudeau	Profils en travers levés du Chenal Vieux	
06/12/2012 - GDR					
tache urbaine faute-aiguillon.ogg	Vidéo		CETE de l'Ouest	Vidéo montrant l'évolution des parcelles construites à la Faute et l'Aiguillon	
Complexe de Mervent : crues	PDF			Crues de 1998 et 1999 : hydrogrammes	
19/12/2012 - AMA					
Topo geo3D	DWG - PDF - XLS			Levés topo de l'Autize, la Vendée, les canaux de Luçon, Hollandais, 5 abbés	
Levé_DiguesMer_PostXintha (fichier 14988.dwg)	DWG			Levés topo de quelques tronçons des digues à la mer	
25/02/2012 - AMA					
Enjeux EGEO SOLUTIONS	Shape			Zonage des enjeux	
04/06/2013 - SMVSA					
Photos du 04062013	Jpeg	SMV	SA	SMVSA	Photos digue arière marrais de Mouillepie
21/06/2013 - CBS					
diag merlon SDIS Pergola	pdf	Syndicat	Lay	AGEOS Etudes	diagnostic initial du merlon compris entre la caserne des pompiers et la Pergola sur la commune de l'Aiguillon sur mer
prévision crues bv Loire Bretagne	pdf, autocad	Syndicat	Lay	DREAL	Schéma directeur de prévision des crues bassin Loire Bretagne
17/07/2013 - AMA					

Dénomination	Forme	Source	Auteur	Description
EDD - Dignes aval Lay - Dignes et barrage Braud - Dignes Chenal Vieux- Digue à la mer	pdf	Syndicat Lay	Arcadis-Artelia	Diag des digue, analyse des scénarios de défaillances - localisation des brèches + parties communes à une EDD
Données PHE	pdf shapes	Syndicat Lay		Divers données PHE
Prévision des crues Vendée	pdf	Syndicat Lay	Artelia	intérêt pour la stratégie
17/07/2013 - AMA+B186				
AFR-12-1703-10101-A-Note-scenarios-defaillance-ASVL	pdf	Syndicat Lay	Arcadis-Artelia	Complément EDD présentatnt les simulations réalisées
08/08/2013 - AMA				
Simulations Artelia PAPI Sèvre	shapes	Syndicat Lay	Arcadis-Artelia	Simulations avec et sans brèches: Xynthia, Xynthia+20
04/09/13 - NPR				
Photos-Merlon	jpeg	Syndicat Lay	Julie Lowenbruck	Photos merlon en val du port de l'Aiguillon
Merlon-SDIS-Pergola	PDF Autocad	Syndicat Lay	Agéos	Diagnostic caserne des pompiers à la Pergola - Aiguillon
SMVSA - Coûts des travaux digues tempête Xynthia	pdf + xls	SMVSA	Agéos	Prix travaux urgence post Xynthia
PSR_Rehausse_du_Port_Version_2	pdf	Syndicat Lay	Arcadis	PSR port de l'Aiguillon
19/09/13 - NPR				
Gestionnaire_dignes_Blau	jpeg + sig	Syndicat Lay	Julie Lowenbruck	gestionnaires et classes des digues
Dignes_secondes_envisagees	pdf	Syndicat Lay	Julie Lowenbruck	dignes 2ndes étudiées Aiguillon
sept-13				
PAPI Nord Aunis	pdf	SYNHA	UNIMA	
étude des protections en vue des PAPI	pdf + shp	SYNHA	ARTELIA	Etude Artelia 3 PAPI
Sc3 sans crue sans breche	shape	SYNHA	ARTELIA	Etude Artelia 3 PAPI
09/10/13 - NPR				
Métrés+Estimations ABCDFCamping-BHA-10-09	pdf	Arcadis	Bruno Vasseur	chiffrage digue Est la Faute
Métrés+Estimations APS- LA TRANCHE - BELLE-HENRIETTE	pdf	Arcadis	Bruno Vasseur	chiffrage digue Belle Henriette la Tranche
Métrés+Estimations AVP_LaFaute-Platin-MES_2_20-09-2013	pdf	Arcadis	Bruno Vasseur	chiffrage digue Platin la Faute
Métrés+Estimations-Digue ouest BHA-10-09	pdf	Arcadis	Bruno Vasseur	chiffrage digue Ouest la Faute
10/10/13 - NPR				
RA13F030-PRO-v1	pdf	Syndicat Lay	ISL	PRO travaux Grues et Grenouillet
RA13F030-EDD-Grues-et-Grenouillet-v1	pdf	Syndicat Lay	ISL	EDD Grues et Grenouillet
FICHES_DIGUES_RETRAIT	Word	Syndicat Lay	Julie Lowenbruck	diag très sommaire des digues 2ndes
14/10/13 - NPR				
08-Fche-CETE-Digue-amont-rive-droite-bordant-RD46	pdf	Syndicat Lay	CETE de l'Ouest	diag merlon RD46
61-09860-DIA-10001-PLA-A secteur camping	pdf	Syndicat Lay	CETE de l'Ouest	fiche topo correspondante

ANNEXE 2 – TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Avis de la CMI du 13 décembre 2011	7
Figure 2 : Périmètre du PAPI	9
Figure 3 : Enveloppe estimée de la crue de 1960	11
Figure 4 : Enveloppes estimées des crues de 1983 et de 1999	13
Figure 5 : Caractéristiques météo-océaniques de la tempête Xynthia par rapport au port de référence de La Rochelle – La Pallice	15
Figure 6 : Zone inondée durant la tempête Xynthia (donnée issue du REX)	16
Figure 7 : Principaux ouvrages hydrauliques	18
Figure 8 : Port de référence de la zone d'étude	21
Figure 9 : Références altimétriques	22
Figure 10 : Surcote dans les Pertuis Charentais	22
Figure 11 : zones d'érosion et d'accrétion de l'unité sédimentaire des Sables d'Olonne à La Tranche sur mer (DHI, 2008)	31
Figure 12 : zones d'érosion et d'accrétion - zoom sur le secteur de la Forêt domaniale de Longeville (DHI, 2008)	32
Figure 13 : zones d'érosion et d'accrétion de l'unité sédimentaire de La Tranche sur Mer à Triaize (DHI, 2008)	33
Figure 14 : Prise en compte de l'arasement du cordon dunaire de la Belle Henriette	35
Figure 15 : Caractéristiques morphologiques des bassins versants du Lay et de ses affluents	36
Figure 16 : Occupation des sols des bassins versants de Lay et de ses affluents	37
Figure 17 : Carte du bassin versant du LAY	38
Figure 18 : Bassins versants et impluviums	41
Figure 19 : Quantiles de pluies horaires de 1h, 2h,..., 24h,..., 48h (« Etude hydrologique des crues – Confortement du barrage du Mervent » - Stucky, octobre 2008)	42
Figure 20 : Calage du modèle hydrologique – Caractéristiques des hydrogrammes observés et calculés	44
Figure 21 : Débits de pointe et volumes de crue des hydrogrammes du Lay	45
Figure 22 : Hydrogramme du Lay à Mareuil – Crue de 2011	45
Figure 23 : Hydrogramme du Lay à Mareuil – Crue de 1999	46
Figure 24 : Hydrogramme du Lay à Mareuil – Crue de 1983	46
Figure 25 : Hydrogramme du Lay à Mareuil – Crues fréquentielles	47
Figure 26 : Modélisation des digues 1/500 ^e (Digue du polder 2)	49
Figure 27 : Architecture du modèle maritime et taille des mailles de calcul	50
Figure 28 : Maillage au niveau d'une digue (exemple de la digue du polder 2)	51
Figure 29 : Wave setup et Wind setup, tempête Xynthia, 28 février 2010, baie de l'Aiguillon	52
Figure 30 : Xynthia état 2010 - Points de calage	54
Figure 31 : Xynthia état 2010 - Points de calage	55
Figure 32 : Xynthia état 2010 - points de calage	56
Figure 33 : Tableau de calage Xynthia état 2010	57
Figure 34 : Structure du modèle hydraulique	59
Figure 35 : Hyétoqramme de la crue 1999	61
Figure 36 : Hyétoqramme de la crue centennale	61
Figure 37 : Localisation des points d'analyse de l'impact de l'impluvium	62
Figure 38 : Impact de l'impluvium en plusieurs points de la zone d'étude pour les crues 1999 et centennale	62
Figure 39 : Impact de l'impluvium dans le marais de Moricq pour la crue de 1999	63
Figure 40 : Prévisions de niveaux du SCHOM La Rochelle – La Pallice entre le 05/04/1983 et le 16/04/1983	64
Figure 41 : Mesures REFMAR ® à la station La Rochelle – La Pallice entre le 25/09/1999 et le 11/10/1999	65
Figure 42 : Calage du modèle sur le crue de 1983	66
Figure 43 : Calage du modèle sur le crue de 1999	68
Figure 44 : Points de premiers débordements maritimes	70

Figure 45 : Périodes de retour des niveaux marins extrêmes de pleine mer - La Rochelle-Pallice	71
Figure 46 : Niveaux marins extrêmes, Pertuis charentais, 10 ans	72
Figure 47 : Niveaux marins extrêmes, Pertuis charentais, 20 ans	72
Figure 48 : Niveaux marins extrêmes, Pertuis charentais, 50 ans	73
Figure 49 : Niveaux marins extrêmes, Pertuis charentais, 100 ans	73
Figure 50 : Périodes de retour des niveaux marins extrêmes de pleine mer - Pointe de l'Aiguillon.....	74
Figure 51 : Capacité du lit mineur – analyse en régime permanent sans débordement (l'intégralité du débit transite vers l'aval) – Condition aval maritime constante : 0 mNGF.	76
Figure 52 : Capacité du lit mineur selon la condition maritime aval (la période retour provient des débits de pointe des hydrogrammes en amont, elle n'intègre pas l'occurrence de la condition aval – évènement maritime).....	76
Figure 53 : Localisation des tronçons de l'analyse capacitaire.....	77
Figure 54 : Dynamique de la crue centennale du LAY	79
Figure 55 : Analyse des premiers débordements sur le LAY - Capacité du lit mineur	80
Figure 56 : Hydrogrammes du Lay et de ses affluents pour une crue centennale	83
Figure 57 : Marégramme recréé à partir du niveau de 1er débordements maritimes	84
Figure 58 : Capacité de laminage du Lay amont pour une crue centennale	86
Figure 59 : Crue centennale - Zoom sur le secteur de Morigq	87
Figure 60 : Comparaison des niveaux Xynthia + 20 cm seule et avec la crue décennale, en aval immédiat du barrage du Braud : résultats du modèle maritime.....	88
Figure 61 : Comparaison Xynthia + 20 cm + Crue décennale (itérations 2 et 4) : résultats du modèle fluvial en amont du barrage du Braud	89
Figure 62 : Hydrogrammes du Lay et de ses affluents pour une crue d'occurrence centennale	90
Figure 63 : Capacité de laminage du Lay amont pour une crue exceptionnelle (T=500 ans).....	92
Figure 64 : Évènement exceptionnel (T=500 ans) - Zoom sur le secteur de Morigq	93
Figure 65 : Occupation du sol - nomenclature.....	96
Figure 66 : Surfaces inondées par type d'occupation du sol, en ha, pour chaque crue fluviale	98
Figure 67 : Nature de l'occupation du sol inondée (fluvial).....	99
Figure 68 : Campings touchés par les inondations, pour chaque crue (fluvial).....	100
Figure 69 : Estimation des populations impactées par commune pour chaque crue (fluvial)	100
Figure 70 : Estimation des populations impactées et niveau d'exposition, pour chaque crue (fluvial)	101
Figure 71 : Surfaces inondées par type d'occupation du sol, en hectares, pour chaque crue (maritime)	101
Figure 72 : Nature de l'occupation du sol inondée (maritime)	102
Figure 73 : Enjeux ponctuels impactés par les événements maritimes	103
Figure 74 : Campings impactés par les événements maritimes.....	104
Figure 75 : Estimation des populations en impactées par commune, pour chaque scénario maritime	105
Figure 76 : Estimation des populations impactées et niveau d'exposition, pour chaque scénario maritime	105
Figure 77 : Estimation des dommages, pour chaque scénario en euros	106
Figure 78 : Estimation des dommages, pour le scénario Xynthia, en euros	107
Figure 79 : Estimation des dommages, pour le scénario Xynthia+20 et crue décennale du LAY, en euros.....	108
Figure 80 : Périmètres des Plans de Prévention des Risques Inondation et Littoraux	111
Figure 81 : Etat d'avancement des Plans Communaux de Sauvegarde	117
Figure 82 : Emprise estimée de la zone de reconnexion des boucles du Lay	121
Figure 83 : Hydrogramme de la crue centennale	122
Figure 84 : Localisation du déversoir de Lairoux.....	123

ANNEXE 3 - REFERENCES MARITIMES



XII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil
Cherbourg, 12-14 juin 2012
DOI: 10.5150/jngcgc.2012.099-B © Editions Paralia CFL
disponible en ligne – <http://www.paralia.fr> – available online

Contributions des vagues dans la surcote associée à la tempête Xynthia, février 2010

Xavier BERTIN¹, Kai LI¹, Aron ROLAND²,
Jean-François BREILH¹, Eric CHAUMILLON¹

1. UMR 7266 LIENSs CNRS-Université de La Rochelle,
Institut du Littoral et de l'Environnement, 2 rue Olympe de Gouges,
17000 La Rochelle, France.
xbertin@univ-lr.fr
2. Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources Management.
Technical University of Darmstadt, Germany.
aaronroland@gmx.de

Résumé :

La tempête Xynthia a sévèrement touché les littoraux situés dans la partie centrale du Golfe de Gascogne dans la nuit du 27 au 28 février 2010, en générant une surcote de plus d'1.50 m au marégraphe de La Pallice (La Rochelle). Cette surcote était en phase avec une marée haute de vives-eaux, ce qui a entraîné la submersion de nombreux cordons dunaires et inondé les zones basses du littoral. Notre étude vise à étudier les contributions des vagues dans la surcote associée à Xynthia, en combinant modélisation numérique et mesures *in situ*. Un nouveau système de modélisation numérique, basé sur le code de circulation océanique SELFE et le modèle spectral de vagues WWMII, a été mis en place pour l'Atlantique nord-est. Le couplage entre les vagues et les courants est complet en 2DH et en 3D et les deux modèles partagent la même grille de calcul non structurée et la même décomposition de domaine. Une fois calibré, ce système de modélisation numérique permet de reproduire les niveaux d'eau pendant Xynthia avec une erreur de l'ordre de 0.10 m et les hauteurs et périodes des vagues avec des erreurs de l'ordre de 15%. L'analyse des résultats numériques montre d'abord que la surcote a été amplifiée par la présence de vagues très jeunes et cambrées, qui augmentent la rugosité de l'océan. Cet état de mer est lié à la trajectoire atypique de la tempête Xynthia, qui a traversé le Golfe de Gascogne du SO vers le NE, réduisant la zone de génération des vagues à quelques centaines de kilomètres. A la côte, les gradients de tension de radiation des vagues contribuent à la surcote totale de quelques centimètres dans les ports à plus de 0.40 m au niveau des plages directement exposées aux houles océaniques. Cette étude montre que, pendant la tempête Xynthia, les vagues ont autant contribué à la surcote que le vent et les gradients de pression atmosphériques.

Mots-clés :

Surcote – Xynthia – Vagues – Pertuis charentais

*Thème 7 – Océanographie opérationnelle et situations extrêmes***1. Introduction**

Du fait de la présence d'un plateau continental large et de leur position sur la trajectoire des tempêtes hivernales, les littoraux d'Europe du nord-ouest sont soumis à des surcotes qui dépassent régulièrement le mètre. Les côtes basses, comme celles de la mer de Wadden ou des Pertuis Charentais, sont donc vulnérables à la submersion marine. La tempête Xynthia, qui a touché durement les littoraux de Vendée et de Charente Maritime dans la nuit du 27 au 28 février 2010, est venue rappeler tragiquement cette vulnérabilité. Une dépression à 970 hPa accompagnée de vents de SO soufflant de 100 à 130 km/h (jusqu'à 160 km/h sur l'île de Ré) a généré une surcote de plus d'1.50 m au marégraphe de La Pallice (La Rochelle). Cette surcote a coïncidé avec une marée haute de vives-eaux, si bien que le niveau de la mer a atteint la cote record de 4.5 m NGF à La Pallice. De nombreux cordons dunaires et digues ont été submergés, inondant de larges zones et occasionnant la mort de 47 personnes en Charente-Maritime et Vendée ainsi que des dégâts matériels colossaux. Le cas de la tempête Xynthia est très intéressant sachant que des travaux récents suggèrent que la période de retour d'une telle surcote soit supérieure à 50 ans (BERNARDARA *et al.*, 2011) alors que deux autres tempêtes d'intensité équivalente ont récemment frappé ce secteur (tempêtes Martin et Klaus en 2009). Notre équipe a déjà réalisé une simulation rétrospective de la tempête Xynthia à l'échelle du Golfe de Gascogne et a montré l'importance de l'âge des vagues et de la résonance de l'onde de tempête sur le plateau continental (BERTIN *et al.*, 2012). L'objectif de cette étude est d'analyser avec une résolution beaucoup plus fine (i.e. représentation des zones de déferlement) la contribution des processus induits par les vagues dans la surcote associée à Xynthia.

2. Zone d'étude

Notre étude se focalise sur la partie centrale du Golfe de Gascogne, caractérisée par un plateau continental large (figure 1). Le régime de marée est méso- à macro-tidal (marnage de vives-eaux > 6 m dans les Pertuis Charentais) et semi-diurne. Le régime d'agitation dans le Golfe de Gascogne a été analysé par DUPUIS *et al.* (2006), qui montrent que les hauteurs significatives (Hs) moyennes annuelles varient de 1.36 à Biscarosse à 1.81 à Yeu (figure 1) alors que Hs maximales dépassent 9 m pour ces deux sites. Les périodes moyennes annuelles sont de l'ordre de 6 à 7 secondes alors que les périodes de pic peuvent occasionnellement dépasser 20 s. Sur la base d'une simulation numérique rétrospective sur la période 1953-2009, DODET *et al.* (2010) ont montré que les directions moyennes (Dir) annuelles variaient de 300°N à 270°N du sud au nord de la zone.

*XII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil
Cherbourg, 12-14 juin 2012*

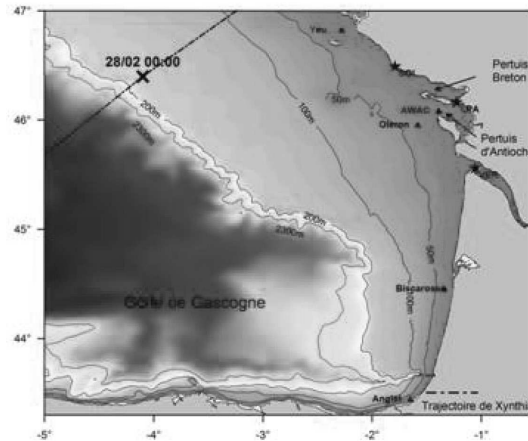


Figure 1. Bathymétrie du Golfe de Gascogne, trajectoire du centre de la tempête Xynthia, marégraphes (étoiles : Les Sables d'Olonnes, La Pallice et Verdon) et houlographes (triangles) utilisés pour la validation du modèle.

3. Le système de modélisation numérique

3.1 Description générale

Notre étude repose sur le développement et l'application d'un nouveau système de modélisation numérique, basé sur le couplage entre le code de circulation hydrodynamique SELFE (ZHANG & BAPTISTA, 2008) et le modèle spectral de vagues WWMII (ROLAND *et al.*, 2009). Le couplage entre les vagues et les courants est complet en 2DH et 3D et les deux modèles partagent les mêmes grille de calcul non structurée et décomposition de domaine, ce qui rend ce système de modélisation très efficace d'un point de vue computationnel et autorise le calcul parallèle massif.

3.2 Modèle de vagues

Le code spectral de vagues WWMII (ROLAND *et al.*, 2009) résout l'équation de conservation de la densité spectro-angulaire d'action des vagues. L'advection dans l'espace géographique est résolue sur la grille non-structurée, grâce à une méthode numérique de type *Fluctuation Splitting Schemes* (ABGRALL, 2006). WWMII calcule des paramètres moyens à partir du spectre d'énergie (tensions de radiation des vagues, vitesse de frottement, etc.) et échange ces variables avec SELFE directement par mémoire vive. Le modèle est forcé par des champs de vent provenant d'un assemblage entre des sorties du modèle GFS (*Global Forecast System*, NOAA) pour l'ensemble du domaine et du modèle ALADIN (Météo France) pour le Golfe de Gascogne et la manche (BERTIN *et al.*, 2012).

Thème 7 – Océanographie opérationnelle et situations extrêmes

3.3 Modèle de circulation hydrodynamique

Le modèle de circulation hydrodynamique SELFIE (ZHANG & BAPTISTA, 2008) résout les équations de Navier-Stokes sur une grille triangulaire non-structurée. Dans le cadre de cette étude, nous utilisons SELFIE en mode 2DH barotrope et les équations résolues sont donc les suivantes :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \int_{-h}^{\zeta} \vec{u} dz = 0$$

$$\frac{DU}{Dt} = -fU + \alpha g \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_A}{\partial x} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\vec{\tau}_{Sx} - \vec{\tau}_{Bx}}{\rho(\zeta + h)} - \frac{1}{\rho(\zeta + h)} \cdot \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right)$$

$$\frac{DV}{Dt} = fV + \alpha g \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_A}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\vec{\tau}_{Sy} - \vec{\tau}_{By}}{\rho(\zeta + h)} - \frac{1}{\rho(\zeta + h)} \cdot \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right)$$

Dans ces équations, ζ désigne l'élévation de la surface libre, U et V les composantes selon x et y de la vitesse intégrée sur la verticale, g est l'accélération de la gravité, f est la force de Coriolis, φ est le potentiel de marée astronomique, h est la bathymétrie, S_{xx} , S_{xy} et S_{yy} sont les tensions de radiation des vagues et τ_b est la contrainte de frottement au fond. τ_s correspond à la contrainte de surface et peut être calculée avec une paramétrisation de type quadratique ou dépendant des vagues. L'équation de continuité est résolue par une méthode de volumes finis alors que les équations de conservation de la quantité de mouvement sont résolues par une méthode de Galerkin continue. Le traitement Lagrangien des termes advectifs garantit une excellente stabilité numérique, même avec de grands pas de temps hydrodynamiques. SELFIE est forcé le long de sa frontière ouverte par le modèle régional de marée de PAIRAUD *et al.* (2006) et par le même forçage atmosphérique que celui utilisé par WWMII.

3.4 Implémentation du système de modélisation

L'espace géographique est discrétisé par une grille constituée d'éléments triangulaires et dont l'extension couvre l'Océan Atlantique Nord-Est (figure 2). Cette grille possède 502798 éléments (260622 nœuds), dont la taille varie de 30 km au large et loin des zones d'intérêt à 25 m au niveau des littoraux de Charente maritime et de Vendée. La résolution à la côte a été dictée par la nécessité de représenter convenablement les zones de déferlement pendant Xynthia. Le pas de temps hydrodynamique a été fixé à 60 s pour les deux modèles après avoir réalisé des tests de sensibilité et les simulations ont été démarrées au 10/02/2010.

4. Résultats

4.1 Prévision des vagues

Les prévisions de notre système de modélisation en termes de vagues ont été comparées avec les mesures disponibles dans le Golfe de Gascogne pendant Xynthia. La figure 3

*XII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil
Cherbourg, 12-14 juin 2012*

montre une comparaison avec les mesures réalisées par le Service Hydrographiques et Océanographique de la Marine au large de l'Île d'Oléron (figure 1). Cette comparaison montre que les Hs, Tp et Dir sont reproduites avec des erreurs quadratiques moyennes de l'ordre de 0.5 m, 2.8 s et 24°, respectivement. Pendant Xynthia, le ratio entre des Hs de l'ordre de 4 à 7 m et des Tp de l'ordre de 7 à 10 s indique un état de mer très jeune avec des vagues très cambrées. Dans le détail, notre modèle sous-estime les chutes de Tp et Dir observées au début de la tempête (figure 3).

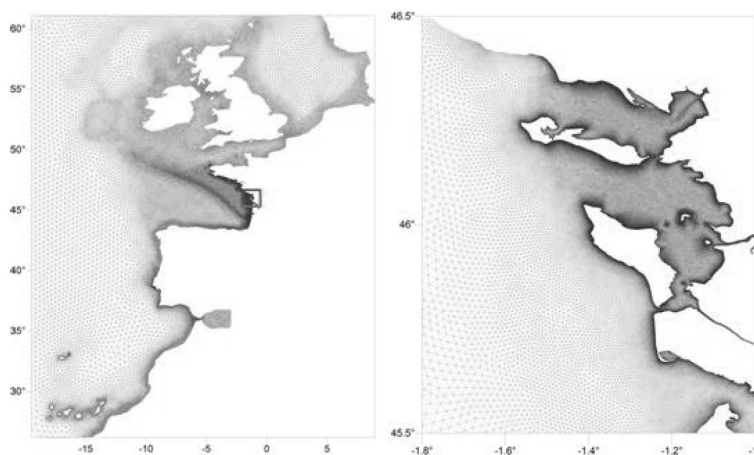


Figure 2. Grille de calcul non-structurée dont la résolution spatiale varie de 30 km au large à 25 m au niveau des littoraux de Charente-Maritime.

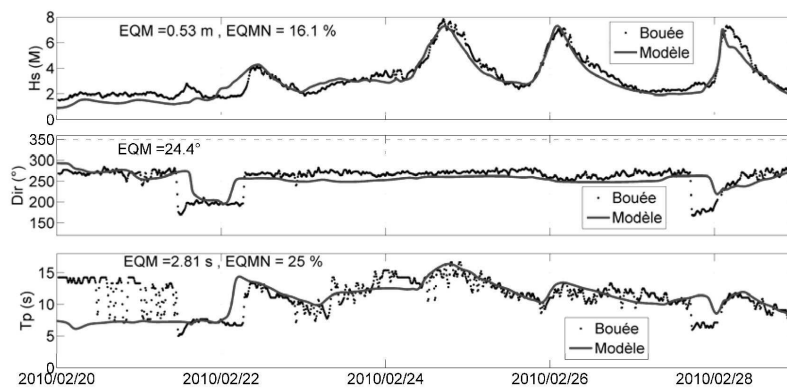


Figure 3. Comparaison entre les prévisions du modèle et les principaux paramètres de vagues mesurés au large de l'Île d'Oléron (figure 1).

Thème 7 – Océanographie opérationnelle et situations extrêmes

4.2 Prévisions des surcotes

Les prévisions de notre système de modélisation en termes de surcote ont été comparées avec la surcote déduite des mesures du marégraphe de La Pallice (LPA, figure 1). Cette comparaison montre que l'utilisation d'une paramétrisation quadratique pour calculer la contrainte liée au vent sous-estime la surcote d'environ 0.35 m (figure 4A, courbe magenta). L'utilisation d'une paramétrisation dépendante de vagues permet de reproduire la surcote de façon bien plus réaliste, avec légère sous-estimation de l'ordre de 0.05 à 0.10 m (figure 4-A).

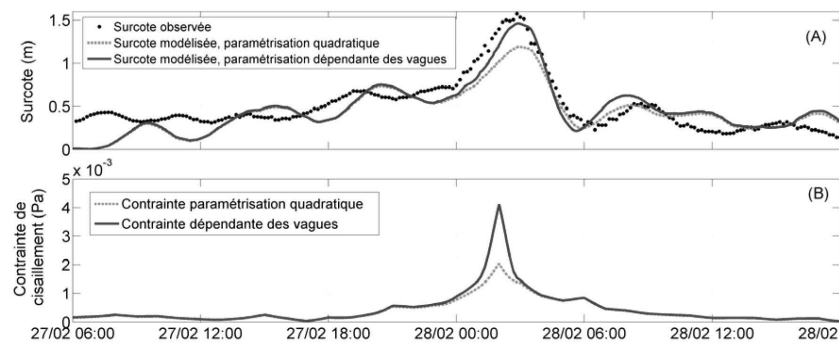


Figure 4. (A) Surcote observée (noirs), surcote modélisée avec une paramétrisation quadratique (magenta) et dépendant des vagues (bleue); (B) contrainte de cisaillement exercée par le vent pour les deux approches au niveau de la bouée « Oléron ».

5. Discussion

5.1 Importance de la rugosité de l'océan en présence de vagues

La comparaison entre la surcote prédite avec une paramétrisation quadratique et une paramétrisation dépendante des vagues montre que la seconde permet des prévisions bien plus réalistes, avec une différence de l'ordre de 20% entre les deux approches à la Pallice (figure 4-A). L'amélioration des prévisions de surcote en prenant en compte les vagues a déjà été reportée dans la littérature (e.g. MASTENBROAK *et al.*, 1993) et est liée à un état de mer particulier pendant Xynthia. Les mesures comme le modèle ont montré la présence de vagues très courtes et cambrées pendant Xynthia (figure 3). Cet état de mer augmente fortement la rugosité de l'océan et donc la contrainte liée au vent (figure 4-B) et explique la prévision d'une surcote plus importante en prenant en compte les vagues. Cet état de mer particulier peut être expliqué par la trajectoire atypique de Xynthia du sud-ouest vers le nord-est du Golfe de Gascogne (figure 1), qui réduit la zone de génération des vagues à quelques centaines de km seulement.

*XII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil
Cherbourg, 12-14 juin 2012*

5.2 Importance des vagues dans les zones de déferlement

La figure 5 montre une répartition spatiale du maximum de la surcote calculée en prenant en compte les gradients de tension de radiation des vagues (A) et en ne les prenant pas en compte (B). Cette figure montre que la différence atteint localement 0.4 m le long de la cote ouest de l'île d'Oléron (figure 5-C), ce qui correspond au *setup* induit par les vagues. De façon plus surprenante, ce mécanisme augmente également la surcote de l'ordre de 0.05 m dans les pertuis Charentais pour des profondeurs pour lesquelles il n'y a pas de déferlement bathymétrique. Ce comportement est expliqué par la présence de zones de déferlement kilométriques autour des îles de Ré et d'Oléron, qui induisent une surélévation du plan d'eau à l'échelle des Pertuis Charentais.

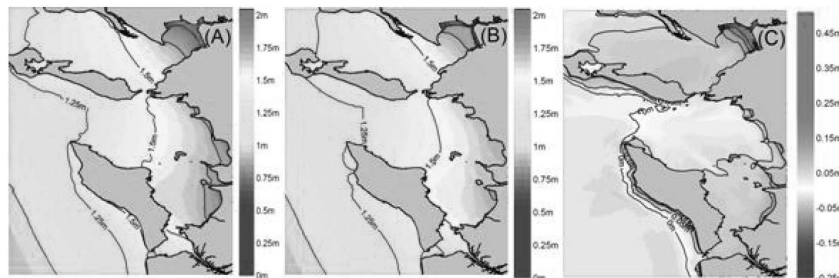


Figure 5. Carte d'iso-valeurs du maximum de la surcote calculée avec les gradients de tension de radiation des vagues (A), sans (B) et différence entre les deux approches (C).

6. Conclusions

Notre système de modélisation numérique permet de reproduire les vagues et les surcotes dans les pertuis Charentais avec une bonne précision pendant Xynthia. L'analyse des résultats du modèle montre tout d'abord une forte amplification de la surcote du fait de la présence de vagues jeunes et cambrées, qui augmentent la rugosité de l'océan. Cet état de mer particulier est lié à la trajectoire atypique de la tempête Xynthia. Le *setup* induit par les vagues atteint localement 0.4 m au niveau des littoraux directement exposés à la tempête, et, de façon surprenante, n'est pas négligeable dans les zones complètement abritées de l'agitation. Sachant que les niveaux d'eau sont désormais prédits de façon précise le long de la cote, les perspectives à court terme de notre équipe consistent à étendre notre grille de calcul vers les zones inondées pendant Xynthia, afin de réaliser des simulations dynamiques de cette inondation.

7. Remerciements

Les données de hauteur d'eau ont été obtenues grâce au système d'observation SONEL (www.sonel.org). Les auteurs remercient chaleureusement l'équipe développant de code

Thème 7 – Océanographie opérationnelle et situations extrêmes

SELFE (CMOP, EUA). Les données de vague au large d'Oléron ont été fournies par le SHOM et acquises dans le cadre des programmes MOUTON (DGA PEA 012401) et EPIGRAM (LEFE/IDAO et ANR-08-BLAN-0330-01). Les forçages atmosphériques proviennent de Météo France. Le projet "submersion marine" de l'UMR LIENSs bénéficie du soutien du FEDER, du CG17 et de la Région Poitou Charente.

8. Références bibliographiques

- ABGRALL R. (2006). *Residual distribution schemes: Current status and future trends*. Computers and Fluids 35, pp 641-669. doi:10.1016/j.compfluid.2005.01.007
- BERNARDARA P., ANDREEWSKY M., BENOIT M. (2011). *Application of regional frequency analysis to the estimation of extreme storm surges*. Journal of Geophysical Research 116, C02008. doi:10.1029/2010JC006229
- BERTIN X., BRUNEAU N., BREILH J.F., FORTUNATO A.B., KARPYTCHEV M., (2012). *Importance of wave age and resonance in storm surges: the case Xynthia, Bay of Biscay*. Ocean Modelling 42 (4), pp 16-30. doi:10.1016/j.ocemod.2011.11.001
- DODET G., BERTIN X., TABORDA R., (2010). *Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades*. Ocean Modelling 31, pp 120-131. doi:10.1016/j.ocemod.2009.10.010
- DUPUIS H., MICHEL D., SOTTOLICHIO A., (2006). *Wave climate evolution in the Bay of Biscay over two decades*. Journal of Marine Systems 63, pp 105-114. doi:10.1016/j.jmarsys.2006.05.009
- MASTENBROEK C., BURGERS G., JANSSEN P.A.E.M. (1993). *The dynamical coupling of a wave model and a storm surge model through the Atmospheric Boundary Layer*. Journal of physical Oceanography 23, pp 1856-1866. doi:10.1175/1520-0485(1993)023<1856:TDCOAW>2.0.CO;2
- PAIRAUD I.L., LYARD F., AUCLAIR F., LETELLIER T., MARSALEIX P. (2008). *Dynamics of the semi-diurnal and quarter-diurnal internal tides in the Bay of Biscay. Part 1: Barotropic tides*. Continental shelf Research 28, pp 1294-1315. doi:10.1016/j.csr.2008.03.004
- ROLAND A., CUCCO A., FERRARIN C., HSU T.-W., LIAU J.-M., OU S.-H., (...), ZANKE U. (2009). *On the development and verification of a 2-D coupled wave-current model on unstructured meshes*. Journal of Marine Systems 78, pp 244-254. doi:10.1016/j.jmarsys.2009.01.026
- ZHANG Y.L., BAPTISTA A.M. (2008). *SELFE: a semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite element model for cross-scale ocean circulation*. Ocean Modelling 21, pp 71-96. doi:10.1016/j.ocemod.2007.11.005



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Ocean Modelling

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ocemod

Importance of wave age and resonance in storm surges: The case Xynthia, Bay of Biscay

Xavier Bertin^{a,*}, Nicolas Bruneau^{b,1}, Jean-François Breilh^a, André B. Fortunato^b, Mikhail Karpytchev^a

^aUMR 6250 LIENSs CNRS-Université de La Rochelle, Institut du Littoral et de l'Environnement, 2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle, France

^bEstuaries and Coastal Zones Division, National Laboratory of Civil Engineering, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisbon, Portugal

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 August 2011

Received in revised form 21 September 2011

Accepted 2 November 2011

Available online 25 November 2011

Keywords:

Xynthia

Storm surge

Numerical model

Resonance

Wave age

Friction velocity

ABSTRACT

This study aims to hindcast and analyze the storm surge associated with Xynthia, a mid-latitude depression that severely hit the French central part of the Bay of Biscay on the 27–28th of February 2010. The main losses in human lives and damages were caused by the associated storm surge, which locally exceeded 1.5 m and peaked at the same time as a high spring tide, causing the flooding of low-lying coasts. A new storm surge modeling system was developed, based on the unstructured-grid circulation model SELFE and the spectral wave model WaveWatchIII. The modeling system was implemented over the North-East Atlantic Ocean and resulted in tidal and wave predictions with errors of the order of 3% and 15%, respectively. The storm surge associated with Xynthia was also well predicted along the Bay of Biscay, with only a slight underestimation of the surge peak by 3–8%. Numerical experiments were then performed to analyze the physical processes controlling the development of the storm surge and revealed firstly that the wind caused most of the water level anomaly through an Ekman setup process. The comparison between a wave-dependant and a quadratic parameterization to compute wind stress showed that the storm surge was strongly amplified by the presence of steep and young wind-waves, related to their rapid development in the restricted fetch of the Bay of Biscay. In the central part of the Bay of Biscay, both observed and predicted water level anomalies at landfall displayed ~6 h oscillations, with amplitudes of up to 0.2 m (10–20% of the surge peak). An analytical shelf resonance model and numerical experiments demonstrated that the period of the observed oscillations corresponds to the resonant mode of the continental shelf in the central part of the Bay of Biscay. It is concluded that these oscillations originate from the interactions between the water level perturbation and the continental shelf and this phenomenon is expected to be relevant at other places along the world's coastlines.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Storm surges correspond to abnormal variations in the ocean free-surface driven by atmospheric forcing associated with extra-tropical storms or tropical hurricanes and typhoons (Flather, 2001). At low-lying coasts, the largest damages are usually associated with the storm surge and the subsequent flooding rather than direct wind effects, particularly if the surge coincides with high tides. According to the governing shallow water equations (SWE), written in non conservative form, the wind stress is divided by the water depth, which causes the wind effect to be dominant over atmospheric pressure gradients in shallow waters. Low-lying coasts bordered by extensive continental shelves and exposed to the regular passing of hurricanes and storms are thus particularly vulnerable to storm surges and coastal flooding. The Bay of Bengal

combines these settings and is the region in the world where the deadliest hurricane-induced surges were reported. Thus, on the 12th of November 1970, the Bhola tropical cyclone struck and devastated Bangladesh and India's West Bengal, killing between 300,000 and 500,000 lives (Das, 1972; Flather, 2001). More recently, the tropical cyclone Nargis flooded the low-lying Irrawaddy delta (Birman, now Myanmar) in early May 2008 and killed over 130,000 people (Wolf, 2009). Also very vulnerable is the Gulf of Mexico, which combines a large continental shelf, shallow back-barrier and delta coastal morphologies, and the regular passing of tropical cyclones in late summer and autumn. Hurricane Katrina was the sixth-strongest Atlantic hurricane ever reported and was the costliest and the third deadliest in the history of the United States (84 billions \$ damage and 1500 deaths; Blake, 2007). Atmospheric pressure reached 920 mbar at landfall and maximum wind speed up to 70 m s⁻¹, which produced significant wave heights larger than 16 m and a storm surge exceeding 8 m in several locations along the Mississippi coastlines (Dietrich et al., 2010; Blake, 2007). To a slighter degree, North-Western Europe is also submitted to

* Corresponding author. Tel.: +33 546507636; fax: +33 546458274.

E-mail address: xbertin@univ-lr.fr (X. Bertin).

¹ Both authors contributed equally to this work.

storm surge and coastal flooding risks. Actually, this region of the world is located on the path of mid-latitude depressions and combines low-lying barrier islands and estuaries surrounded by large continental shelves. Thus, on the 31th of January 1953, a severe storm over the North Sea induced a surge that exceeded 3.0 m along the coast of Netherlands and peaked at the time of spring-tide high water. The subsequent high water level caused the breaching of 150 sea-dykes and the flooding of low-lying regions inhabited by around 750,000 people, 1836 of whom passed away tragically (Gerritsen, 2005; Wolf and Flather, 2005). On the other side of England, the Irish Sea is also exposed to large storm surges, despite being a small sea, not fully exposed to the Atlantic Ocean. The strong winds due to mid-latitude depressions blowing over water depths of the order of 40 m produce storm surges that can attain up to 2.5 m (Brown and Wolf, 2009; Brown et al., 2010). Due to sea-level rise and the potential increase in storminess resulting from climate change, extreme coastal flooding events are likely to increase in the future (Brown et al., 2010) while the population in coastal zones is expected to increase (IPCC, 2007). In this context, the accurate forecast of storm surges and subsequent coastal flooding appear highly priority for numerous socio-economical issues.

Storm surges are being investigated using numerical models since the mid nineteen sixties (Jelesnianski, 1965, 1966; Miyazaki, 1965; Miyazaki and Okada, 1975). Since these pioneering studies, the better understanding of oceanic physical processes together with an exponential growth of computational capacities have permitted the development of sophisticated modeling systems capable of efficiently simulating storm surges with a high resolution over large geographical extensions (e.g. Bunya et al., 2010; Dietrich et al., 2010). Among the abundant literature available on the subject, a common procedure consists of performing a hindcast of a relevant hurricane, and then analysing the physical processes responsible for the associated surge. Thus, several studies showed that, in shallow water, wind stress was dominant over the well known “inverse barometer effect” (Doodson, 1924) caused by atmospheric pressure gradients (Jones and Davies, 2007; Rego and Li, 2010). Under steady state and in deep water, the alongshore component of wind stress drives an “Ekman setup” (Shen and Gong, 2009; Kennedy et al., 2011) at the coast located to the right-side of the wind (in the northern hemisphere), although the cross-shore component of wind stress becomes dominant in shallower water due to the increase in bottom stress (Weisberg and Zheng, 2006; Rego and Li, 2010). Kennedy et al. (2011) reported a large water level anomaly along the coasts of Louisiana and Texas (USA) 12–24 h before the landfall of Hurricane Ike (2008) and attributed the origin of these forerunners anomalies to such an Ekman setup. Tide-surge interaction was also shown to be relevant for the adequate prediction of storm surges (Proudman, 1957; Wolf, 2009; Rego and Li, 2010; Zhang et al., 2010). According to Wolf (1981), shallow water effects (i.e. non-linear terms containing the total water depth in SWE) are dominant for tidal ranges larger than 3 m and water depths below 10 m. For larger depths (50 m) with significant tidal currents, Zhang et al. (2010) showed in the Taiwan Strait that the dominant effect in tide-surge interactions was non-linear bottom friction. Relative to the processes listed above, the importance of short waves in storm surges was investigated more recently. Thus, Mastenbroek et al. (1993) showed that including a wave-dependant drag coefficient in the calculation of wind stress improved storm surge prediction significantly. This conclusion was then confirmed by numerous authors (Brown and Wolf, 2009; Nicolle et al., 2009; Sheng et al., 2010). In nearshore zones, the inclusion of wave radiation stress gradients allowed for a proper representation of the wave-induced setup, which can represent several tens of centimeters in the total surge (Nicolle et al., 2009; Wolf, 2009; Bertin et al., 2009b; Dietrich et al., 2010; Brown et al.,

2011). In the recent years, the inclusion of recent theories for the representation of wave-current interactions in 3D (e.g. Mellor, 2008; Arduin et al., 2008) suggested that 3D wave-induced circulations could impact on the total surge in nearshore zones (Xie et al., 2008; Sheng et al., 2010; Bruneau et al., 2011).

This study aims to provide firstly a detailed hindcast of the storm surge associated with Xynthia, a mid latitude storm that severely hit low-lying coasts located in the central part of the Bay of Biscay on the 27–28th of February 2010. The second objective of this study is to analyse the physical processes responsible for the surge through numerical experiments. In particular, the relative contribution of atmospheric forcing and the effect of short waves are investigated to tentatively explain why the storm surge magnitude was exceptional while the storm was not. Finally, particular attention is paid to the analysis of the development of periodic oscillations after landfall over the continental shelf.

2. The study area

2.1. Geomorphic setting

The Bay of Biscay is located in the North-East Atlantic Ocean and is bounded to the East by the western coast of France and to the South by the Northern coast of Spain (Fig. 1). The abyssal plain located in the middle has maximum depths exceeding 5000 m. The continental shelf exhibits a contrasting morphology, with a very narrow continental shelf (10–40 km wide) along the Spanish coast and a wider continental shelf along the French border, which width increases from less than 50 km to the South to more than 200 km in front of the English Channel. From South to North, the central part of the French border is interrupted by six major embayments and estuaries: the Arcachon Lagoon, the Gironde Estuary, the Pertuis d'Antioche and the Pertuis Breton (Pertuis Charentais), the Bourgneuf Lagoon and the Loire Estuary. The Pertuis d'Antioche and the Pertuis Breton are backed by extensive coastal plains, which result from intense land reclamation that occurred until the 19th century (Bertin et al., 2005). A significant part of these low-lying plains is located below high-tide level and their shorelines consist of both natural barriers and sea walls.

2.2. Hydrodynamic setting

Tides in the Bay of Biscay are semi-diurnal, with small diurnal asymmetries. Along the French shelf break, the deep-water Kelvin wave induces a M2 wave with amplitude of the order of 1.3 m (Le Cann, 1990). Throughout its propagation over the continental shelf, the M2 grows by about 10–40% and its amplitude locally reaches 1.80 m in the Pertuis Breton (Fig. 1B). Diurnal waves K1 and O1 have amplitudes of the order of 0.07 m and display little spatial variations. In contrast, quarter diurnal waves M4, MS4 and MN4 experience a huge amplification throughout their propagation over the central part of the continental shelf. Thus, offshore of the Pertuis Charentais, the amplitudes of M4, MS4 and MN4 increase from 0.027 m, 0.006 m and 0.013 m near the shelf break to 0.18 m, 0.07 m and 0.09 m by 20 m water depth, respectively. Applying the analytical model of Clarke and Battisti (1981), Le Cann, showed that for the quarter-diurnal band, the shelf was close to resonance in its central part, thereby explaining this one order of magnitude amplification. The resulting spring tidal range at the coast exceeds 6 m in the Pertuis Breton and the Pertuis d'Antioche and reaches 4.5 m to the South and 5.5 m to the North, which induces tidal currents exceeding 2 m/s in the estuaries and tidal inlets (Bertin et al., 2005).

The Bay of Biscay is fully exposed to gravity waves generated in the North Atlantic Ocean. Butel et al. (2002) and Dupuis et al.

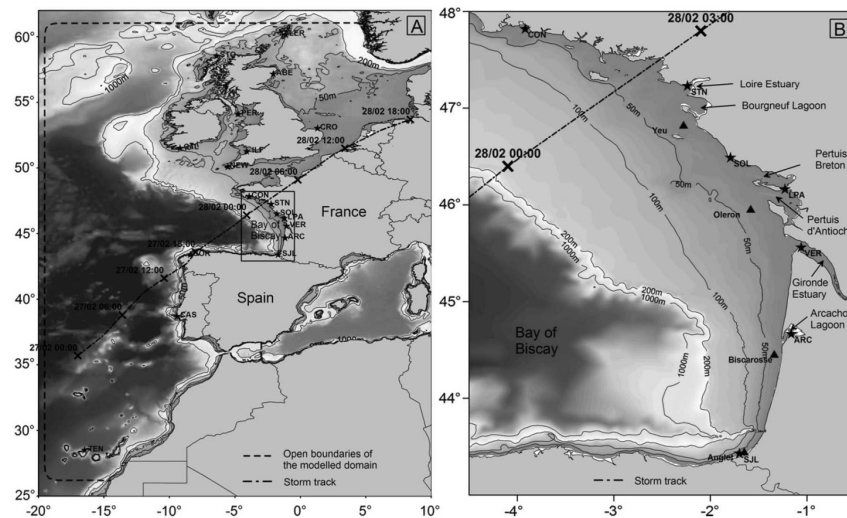


Fig. 1. A–Bathymetric map of the North-East Atlantic Ocean showing the boundary of the modeled domain, the tidal stations (stars) used for model validation and the storm track of Xynthia. B–Same as A–focused on the Bay of Biscay and locations of the wave riders (triangles). For the tidal stations, the following abbreviations were used: TEN for Tenerife (Spain), CAS for Cascais (Portugal), COR for A Coruña (Spain), SJL for Saint Jean de Luz (France), ARC for Arcachon (France), VER for Le Verdon (France), LPA for La Pallice (France), SOL for Sables D'Olonne (France), STN for Saint Nazaire (France), CON for Concarneau (France), CTL for Castletownshend (Ireland), NEW for Newlin (UK), ABE for Aberdeen (UK), ILF for Ilfracombe (UK), PER for Port-Erin (UK), CRO for Cromer (UK), STO for Stornoway (UK) and LER for Lerwick (UK).

(2006) provide a non-directional description of the wave climate in the Bay of Biscay based on the wave riders of Biscarosse (26 m water depth, Fig. 1B, data analyzed from 1980 to 2000), Yeu (33 m water depth, Fig. 1B, data analyzed from 1998 to 2000) and Biscay (4500 m water depth, 5.00°W–45.00°N, data analyzed from 1998 to 2001). The annual-mean significant wave heights H_s are 1.36 m at Biscarosse, 1.81 m at Yeu and 2.64 m at Biscay. The maximum H_s recorded over the analyzed periods are 9.70 m, 8.88 m and 13.9 m for Biscarosse, Yeu and Biscay, respectively. The annual-mean mean wave periods T_m range from 6 to 7 s at the three considered wave records, while peak wave periods T_p occasionally exceed 20 s. The wave climate inter-annual variability in the Bay of Biscay was investigated over the period 1953–2009 based on a numerical hindcast for the North Atlantic Ocean (Dodet et al., 2010), refined in the Bay of Biscay by Bertin and Dodet (2010). These studies showed that the winter-mean mean wave direction M_{wd} varies from N270° to the North to N300° to the South and its inter-annual variability is characterized by a standard deviation of the order of 5–7%. Winter-means of H_s and T_p display an inter-annual variability of the order of 20–30%, which was shown to be partly controlled by the North Atlantic Oscillation.

3. The Xynthia storm and the associated surge

Xynthia was a violent windstorm which crossed rapidly Western Europe between the 27th of February and the 1st of March 2010. Xynthia originated from a low-pressure zone located in the middle of the Atlantic Ocean around the latitude of the Tropic of Cancer. This depression intensified on the 27th in the morning and evolved towards a storm when reaching the coastlines of Portugal (Fig. 2), where instantaneous maximum wind speed exceeded 40 m/s to the North of the country. Xynthia crossed the North-Western part of the Iberic Peninsula at the end

of the day at 15–20 m/s and hit the French border of the Bay of Biscay in the night of the 28th of February, where sea-level pressure (SLP) reached its minimum at 969 mbar (Fig. 2). Southern to South-western winds ranging from 25 to 35 m/s (hourly mean at 10 m elevation) blew over the Southern part of the Bay of Biscay (Fig. 2) and maximum instantaneous values reached 45 m/s on Ré Island (Fig. 2). On the 28th of February, Xynthia pursued its way towards Belgium and Germany at 15–20 m/s and winds over the Bay of Biscay veered westward and weakened to 10–15 m/s. Meteorologically, Xynthia was not as exceptional as the storms Martin (27th of December 1999) and Klaus (23th January 2009), during which maximum winds exceeding 50–55 m/s were measured at the coast.

Xynthia generated a significant storm surge that reached its maximum in the central part of the Bay of Biscay. The largest storm surge value was recorded in La Pallice harbor (1.50 m), followed by the nearby stations of Les Sables d'Olonne to the North (1.25 m) and Graves to the South (1.05 m). Further North and closer to land-fall, the maximum storm surge reached 1.02 m at Saint-Nazaire and only 0.66 m at Concarneau (Fig. 3). The storm surge maximum value also decreased to the South of the Bay of Biscay, and reached 0.75 m at Arcachon and 0.49 m at Saint Jean de Luz (Fig. 3). According to Fig. 3, the maximum storm surge occurred at the same time along the coastlines of the Bay of Biscay (around 2:00 h \pm 1 h on the 28th of February 2010), except to the South at Saint Jean de Luz where the surge maximum peaked 6–7 h in advance (around the 27th of February at 20h00). After landfall, the water level anomaly in the central part of the Bay of Biscay (stations 2–5, Fig. 3) displays 6-h oscillations with heights of the order of the order of 0.30 m.

The storm surges measured at La Pallice and Les Sables d'Olonne were the largest values ever recorded at these sites since 1949 and 1970, respectively. Nevertheless, the records at these two stations are very discontinuous before numeric tide gauges were installed (in 1997 and 1999, respectively) and were not available during

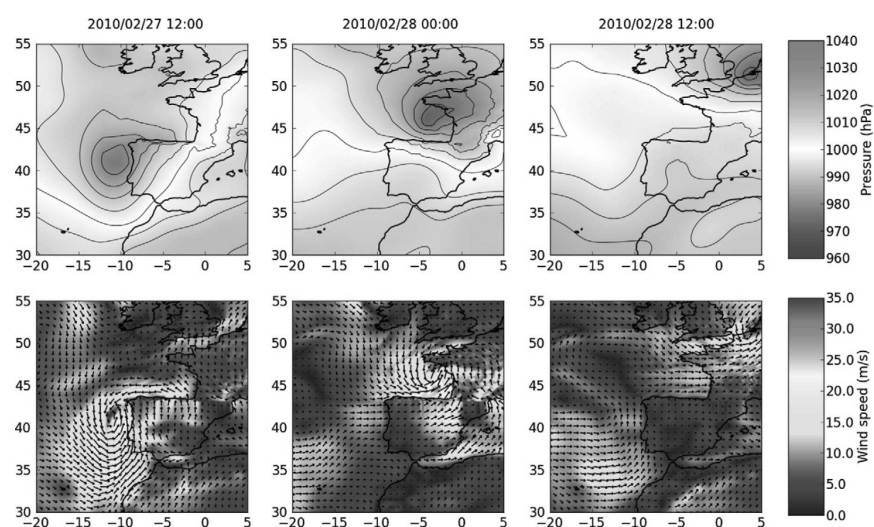


Fig. 2. Sea-level pressure and winds at 10 m during Xynthia. Data originating from the outputs of the atmospheric model Aladin (0.1°, Météo France) nested within the 0.25° GFS model (Environmental Modeling Center, 2003).

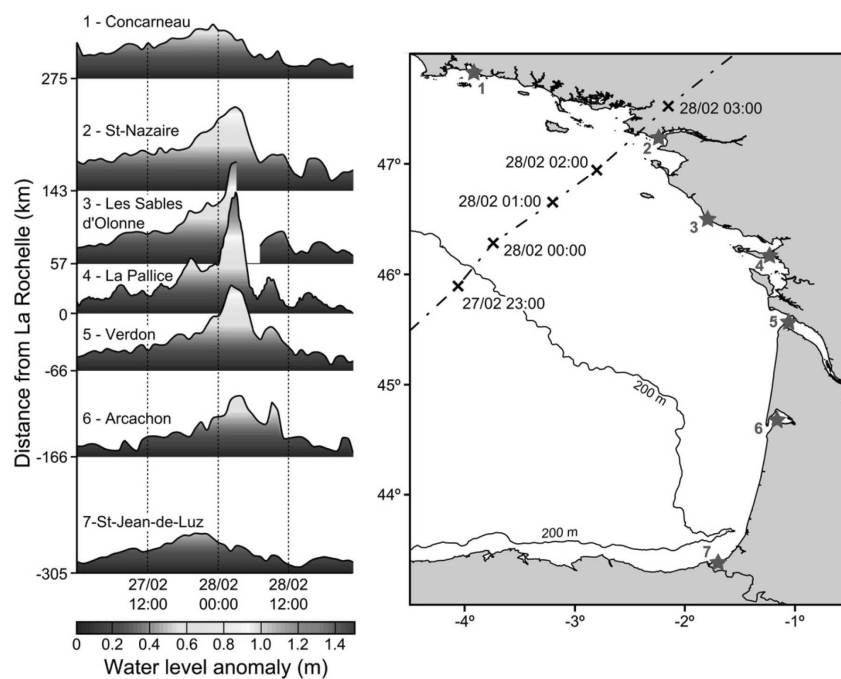


Fig. 3. Water level anomaly during Xynthia along the French coast of the Bay of Biscay, showing a maximum at La Pallice station (station 4). Stations located in the central part of the Bay of Biscay (2–5) show 6-h oscillations of the water level after landfall.

the storm Martin, which violently hit the region on the 27th December 1999 and probably caused a storm surge of the same order of magnitude as that of Xynthia (no data available). The storm surge recorded at Verdon corresponds to the second largest since 1989, but was largely exceeded during the storm Martin (1.55 m). At other stations, the maximum storm surge value reached during Xynthia is less exceptional and has a return period of 1–5 years.

Although the values for water level anomaly reached in the central part of the Bay of Biscay were exceptional (return period of the order of 20 years based on Regional Frequency Analyses by Bernardara et al. (2011) and Bardet et al. (2011)), the more exceptional fact is that the maximum surge occurred at the time of spring-tide high water. The corresponding total water level reached 8.01 m above marine chart datum in La Pallice, which value was shown to have a return period larger than 100 years (Simon, 2008). Many natural barrier and sea-walls were submerged and/or breached, causing the flooding of very large areas, some of which were inhabited. 47 people tragically died and material damages were estimated at 1.5 billion Euros.

4. Data and methods

4.1. The storm surge numerical model

In this study, we built a storm surge modeling system that couples externally (i.e. variables are exchanged between the two models through binary files) the state-of-the-art circulation models SELFE (Zhang and Baptista, 2008) and WaveWatchIII (Tolman, 2009).

4.1.1. The wave model

Gravity waves generation and propagation were simulated with the WaveWatchIII model (WWIII, version 3.14; Tolman, 2009), which is a 3rd generation model solving the wave energy balance equation (Hasselmann, 1974) by means of finite differences on regular structured grids. In the present study, the effects of currents on wave propagation were neglected, thus the resolved equation in spherical coordinates reads:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{c_g \sin \theta}{R \cos \phi} N \right) + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{c_g \cos^2 \theta}{R} N \right) \\ - \frac{\partial}{\partial k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} N \right) - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{N}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \frac{c_g \tan \phi \cos \theta}{R} N \right) \\ = \frac{S_{tot}}{\sigma} \end{aligned} \quad (1)$$

where t is time, λ and ϕ are the longitude and latitude respectively, σ is the relative wave frequency, k is the wave number and θ is the wave direction. N is the wave action density, c_g is the wave group velocity, d is the mean depth, R is the radius of the Earth and s and m correspond to the collinear and perpendicular coordinates to the wave propagation direction, respectively. The source terms S_{tot} represents wave growth by wind and wave decay due to white-capping, wave breaking and bottom friction. The parameterizations used for wave growth and whitecapping correspond to that of "Test 350" described in Ardhuin et al. (2010). A recent inter-comparison of the results obtained by the main prediction centers around the world revealed that the last version of WWIII, which includes the recent developments of Ardhuin et al. (2010), was the most accurate (Bidlot, 2008).

WWIII also provides the friction velocity u_* , required to compute the surface stresses of the hydrodynamic model. This friction velocity is calculated according to the formulation of Tolman and Chalikov (1996) and Tolman (2009). Assuming that the mean wind profile has a logarithmic shape (except in a thin surface near the

surface ocean), the velocity at a distance z above the water surface can be written:

$$u_z = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2)$$

where $\kappa = 0.4$ is the von Kármán constant and z_0 is the effective roughness parameter expressed by:

$$z_0 = \chi \sqrt{\alpha} \frac{u_*^2}{g} \quad (3)$$

with χ a constant set to 0.2 and α the Phillips conventional non-dimensional energy level at high frequencies. Combining Eqs. (2) and (3), the drag coefficient C_z at the z level becomes (Chalikov, 1995):

$$C_z = \left(\frac{u_*}{u_z} \right)^2 = \kappa^2 [R - \ln(C_z)]^{-2} \quad (4)$$

$$R = \ln \left(\frac{zg}{\chi \sqrt{\alpha} u_*^2} \right) \quad (5)$$

R is a non-dimensional parameter (Chalikov and Belevich, 1993). Finally, the parameter α is estimated parametrically according to Janssen (1989):

$$\alpha = 0.57 \left(\frac{u_*}{c_p} \right)^{3/2} \quad (6)$$

where c_p is the wave phase velocity and the ratio u_*/c_p is the inverse of the wave age W_a . Eq. (4) is then accurately approximated (Tolman, 2009) as:

$$C_z = 10^{-3} \left(0.021 + \frac{10.4}{R^{1.23} + 1.85} \right) \quad (7)$$

An important consequence of this parameterization is that C_z is an hyperbolic decreasing function of the W_a . As the last equations depend on the drag coefficient, an iterative method is used to solve the problem at the initialization. Assuming the friction velocity evolves slowly, the iterative method is not necessary during the time stepping.

A 0.1° regular grid was emplaced over the whole domain (Fig. 1A), which resulted in 122,094 nodes (323 by 378). This resolution was sufficient to reproduce adequately wave shoaling, refraction and dissipation by bottom friction on the shelf, but does not allow for a proper representation of surf-zones. The spectral space was discretized according to 24 equally spaced directions and 25 frequencies ranging from 0.041 Hz and 0.41 Hz with a logarithmic increment. The maximum global time step and the CFL propagation time step were set to 300 s. The model was forced over the whole domain by 3-hourly wind fields having a 0.25° resolution and originating from the GFS model (Environmental Modeling Center, 2003) and linearly interpolated over a 0.1° grid with a hourly time step. Hourly wind fields with a 0.1° resolution and originating from the Aladin – Meteo France model (Bénard, 2004) were nested over the whole Bay of Biscay and the English Channel. The model was forced along its open boundaries by wave spectra originating from the regional wave model of Dodet et al. (2010), forced by wind fields originating from the ERA-Interim reanalysis (Simmons et al., 2006).

4.1.2. The circulation model

The numerical model SELFE (Zhang and Baptista, 2008) solves the shallow water equations in 3D and was designed to simulate circulation and tracer evolutions for a large range of spatial scales and types of environments, spanning from very shallow lagoons and estuaries (Rodrigues et al., 2011) to large estuaries (Zhang and Baptista, 2008; Liu et al., 2011) and to continental

shelves and open ocean (Fortunato et al., 2011). The continuity equation is solved using a finite volume method while the momentum equations are solved using a Galerkin finite element method, based on an unstructured grid. The Lagrangian treatment of advective terms and a semi-implicit method insures numerical stability, even using large hydrodynamic time steps. SELFE uses a natural treatment of wetting and drying, which makes it suitable for inundation studies. The code is parallelized and uses PARMETIS domain-decomposition (<http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/metis/parmetis/overview>) to distribute the global mesh over several computational cores with the MPI (Message Passing Interface) protocol. In the present application, SELFE was used in 2-dimensional horizontal (2DH) barotropic mode. Considering the selected physical processes, and denoting by η the surface elevation and by \vec{u} the horizontal velocity, the corresponding equations read:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \int_{-h}^{\eta} \vec{u} dz = 0 \quad (8)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -f\vec{k} \times \vec{u} + \alpha g \vec{\nabla} \psi - \frac{\vec{\nabla} P_A}{\rho} - g \vec{\nabla} \eta + \frac{\vec{\tau}_S - \vec{\tau}_B}{\rho(\eta + h)} \quad (9)$$

where h the bathymetry, ρ is water density, f is the Coriolis factor, P_A is the sea-level atmospheric pressure, and α and ψ are the effective earth-elasticity factor and the earth tidal potential, respectively. Finally, $\vec{\tau}_B$ is the bottom stress computed using a quadratic friction law and $\vec{\tau}_S$ is the wind stress defined as:

$$\vec{\tau}_S = (\rho_a u_*^2) \quad (10)$$

where ρ_a is the air density.

At such large scale applications, spherical coordinates are preferably required because large errors occur with map projections. The strategy developed in SELFE and initially proposed by Comblen et al. (2009) consists in using a series of local frames at the different locations of the unstructured meshes, which permit to use the normal Cartesian system of coordinates with only simple coordinate transformations (Zhang et al., 2011).

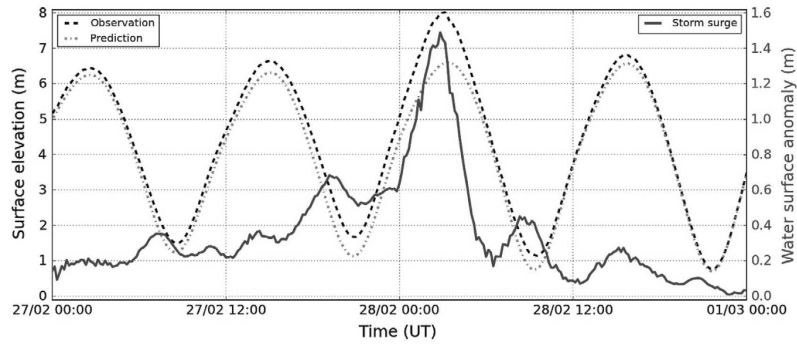


Fig. 4. Observed vs predicted water levels at La Pallice, showing a 1.50 m storm surge peak in phase with spring high tide.

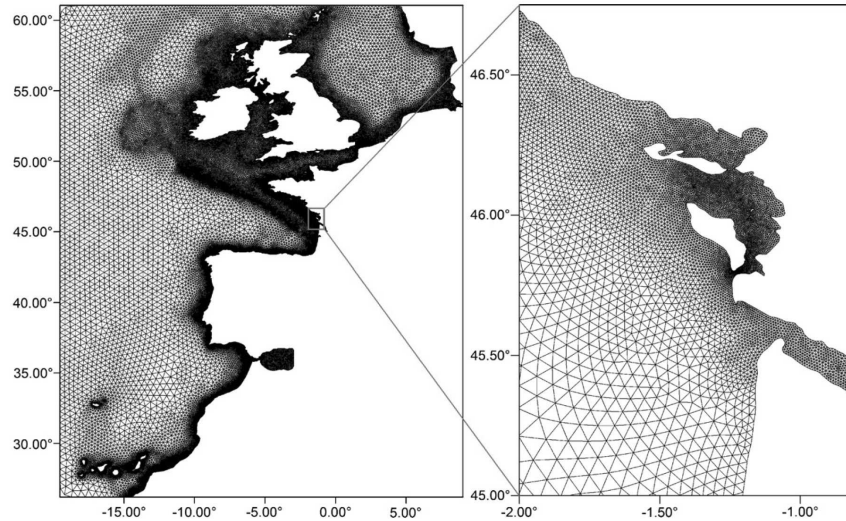


Fig. 5. The unstructured computational grid used to discretize the North-East Atlantic Ocean.

The geographical space is discretized by means of a 52,000 node unstructured grid (110,000 triangular elements) and extending from the Canary Islands to the South (20°N) to the North Sea to the North (61°N) and to –20° the West and to the Scandinavian Peninsula to the East (10° W) (Fig. 5). Such a large geographical extension was selected after several sensitivity tests on smaller grids, which did not permit to reproduce adequately the inverse barometric effect. The resolution of this grid ranges from 0.3° over abyssal plains to 0.02° on the shelf breaks and reaches 0.0025° around La Rochelle. The corresponding 250 m resolution does not allow for an adequate representation of dykes and natural barriers, which are typically 10–50 m wide. Thus, the areas flooded during Xynthia are not included in the present grid. The post-processing routine developed by Fortunato et al. (2011) was applied to the grid in order to improve its orthogonality. A 300 s hydrodynamic time-step was selected after several sensitivity tests in the range 60–600 s.

The model was forced by the astronomic tidal potential over the whole domain for the tidal constituents MM, MF, O1, K1, P1, Q1, M2, S2, N2 and K2. The model is also forced along its open boundaries by the 18 main tidal constituents of the region (O1, K1, P1, Q1, M2, S2, N2, K2, 2N2, L2, MU2, NU2, M4, MS4, MN4 and M6) obtained by linear interpolation of the regional tidal model of Paireaud et al. (2008). For storm surge applications, the model was forced over the whole domain by sea-level pressure fields originating from the same GFS-ALADIN combination and using the same procedure as for the wind-wave model. The coupling with WaveWatchIII was realized through the wind friction velocity U_* , linearly interpolated over the unstructured grid with a 300 s update. For the numerical experiments of Section 6.2, the model was also forced by wind fields originating from the GFS-ALADIN combination.

4.2. Field data

Sea-surface elevation data were collected at 17 stations spread over the whole modeled domain (Fig. 1) and available at the SONEL (www.sonel.org) and BODC (www.bodc.ac.uk/) databases. In order to calibrate and validate the tidal model, a common procedure was applied to the data from each station over the 2010 time-series. A harmonic analysis followed by a harmonic synthesis using the 59 main tidal constituents was performed using R_T_Tide (Leffler

and Jay, 2009) to remove the non-astronomic component of the elevation and allow for a consistent comparison with model results. For the seven stations located in the Bay of Biscay, the residual between the observed and synthesized elevation was computed to characterize the storm surge alongshore variability during Xynthia.

Wave conditions in the Bay of Biscay during Xynthia were characterized by means of three Datawell wave riders, deployed by CETMEF (French division for Fluvial and Maritime technical studies) at Anglet (25 m water depth), Yeux Island (32 m water depth) and by SHOM (French Naval Oceanographic Service) to the west of Oléron Island (35 m water depth).

5. Model validation

5.1. Tidal predictions

Our new regional tidal model was calibrated varying the friction coefficient C_d in the quadratic friction parameterization and best agreements were obtained using the uniform value of $C_d = 0.0025$ over the whole domain. SELFE was run over the whole year 2010 in order to meet the Rayleigh criterion and separate properly K2 from S2 (299 days at least). The model was then validated by comparing predicted against observed tidal amplitudes and phases for the 18 main tidal constituents imposed along its open boundaries. This comparison is presented in Table 1 for the main diurnal (O1), semi-diurnal (M2) and over-tide (M4) constituents at 17 stations spread over the modeled domain (Fig. 1, stars). For the stations located along the Atlantic Ocean (Tenerife, Cascais, A Coruña, St Jean de Luz, Verdon, La Pallice, Les Sables d'Olonne, Saint Nazaire and Concarneau; Fig. 1), amplitudes and phases are very well reproduced, with errors included in the ranges 0.00–0.03 m and 0–15°, respectively (Table 1). For stations located along the Channel Island, the North Sea and the Irish Sea (Newlin, Ilfracombe, Port-Erin, Cromer, Aberdeen, Lerwick, Stornoway and CastleTownsend; Fig. 1), discrepancies between model and data are slightly larger, being included in the ranges 0.00–0.15 m and 0–20°, for amplitudes and phases respectively (Table 1).

The model was then validated for the total elevations, which namely allows quantifying the impact of forcing the model with 20 constituents only. Thus, for the 17 selected stations, Root Mean Square Discrepancies (RMSD) were computed for elevation time-series synthesized from 59 constituents (harmonic analysis from

Table 1
Predicted against observed tidal amplitudes and phases for the main diurnal (O1), semi-diurnal (M2) and quart-diurnal (M4) constituents at 17 stations spread over the modeled domain. Root Mean Square Error on the total elevation and scatter index, defined as the RMSE normalized by the mean tidal range for each site.

Station name	O1				M2				M4				Total elevation	
	Amplitude (m)		Phase (°)		Amplitude (m)		Phase (°)		Amplitude (m)		Phase (°)		RMSD (m)	SI(–)
	Obs.	Model	Obs.	Model	Obs.	Model	Obs.	Model	Obs.	Model	Obs.	Model		
Tenerife (Canary)	0.06	0.05	299	304	0.70	0.69	28	29	0.01	0.01	105	133	0.03	0.02
Cascais (Portugal)	0.06	0.06	325	324	0.98	0.98	64	62	0.01	0.02	187	181	0.03	0.01
A Coruna (Spain)	0.08	0.07	335	331	1.15	1.18	88	85	0.01	0.01	288	297	0.08	0.03
St. Jean de Luz (France)	0.07	0.07	331	332	1.32	1.34	91	91	0.03	0.03	324	333	0.06	0.02
Verdon (France)	0.08	0.08	342	340	1.56	1.60	108	106	0.08	0.10	353	2	0.09	0.03
La Pallice (France)	0.08	0.08	336	337	1.73	1.71	96	96	0.25	0.26	5	9	0.08	0.02
Sables d'Olonne (France)	0.08	0.08	349	338	1.54	1.55	94	95	0.15	0.16	11	3	0.06	0.02
St. Nazaire (France)	0.08	0.08	340	338	1.71	1.68	107	97	0.18	0.18	50	26	0.08	0.02
Concarneau (France)	0.07	0.07	340	328	1.45	1.47	94	95	0.06	0.07	37	31	0.07	0.02
Newlin (UK)	0.06	0.06	339	1.03	1.73	1.63	102	123	0.11	0.07	103	121	0.09	0.04
Ilfracombe (UK)	0.07	0.07	1	5	3.00	2.91	160	164	0.11	0.10	346	322	0.15	0.04
Port-Erin (UK)	0.11	0.10	52	56	1.82	1.76	320	316	0.01	0.02	78	113	0.10	0.08
Cromer (UK)	0.17	0.16	143	157	1.51	1.55	202	186	0.08	0.09	324	274	0.11	0.03
Aberdeen (UK)	0.13	0.13	61	67	1.29	1.30	23	24	0.03	0.03	264	323	0.08	0.03
Lerwick (UK)	0.09	0.07	34	46	0.56	0.64	311	311	0.01	0.03	275	314	0.10	0.08
Stornoway (UK)	0.11	0.09	354	353	1.33	1.16	197	195	0.06	0.01	218	213	0.17	0.06
Castle townsend (Ireland)	0.02	0.02	293	309	1.09	1.13	129	137	0.03	0.01	276	196	0.09	0.04

2010 elevation data). In order to compare consistently model skill from one station to another, a Scatter Index (SI) was defined as the ratio between the RMSD and the mean tidal range at each station. In accordance with the validation performed on constituent amplitudes and phases, the model performs best at the stations located along the Atlantic Ocean, with RMSD and SI included in the ranges 0.03–0.09 m and 1–3%, respectively. The model also performs slightly worse in the English Channel, the North Sea and the Irish Sea, with RMSD and SI included in the ranges 0.09–0.17 m and 3–8%, respectively. Among the various hypotheses to explain the relatively weaker predictive skills of the model in the northern part of the modeled domain, it can be argued that it originates from the resolutions of the unstructured grid as well as of the bathymetric data, which are too coarse to represent adequately the complex coastal morphology around UK and Ireland. Another limitation could be related to the use of a uniform bottom drag coefficient, while most of the stations are bordered by shallow and extensive continental shelves where strong tidal currents occur. Nevertheless, these errors are acceptable, particularly in the scope of the present study focused on the Bay of Biscay, where model predictions are very good.

5.2. Wave predictions

WWIII predictions were compared against data sampled off-shore the Oléron Island, which corresponds to the region where the largest storm surge occurred (Figs. 3 and 4). Fig. 6 shows that the model is able to reproduce quite satisfactory the temporal evolution of mean wave parameters around Xynthia, with RMSD of 0.45 m, 13° and 2 s for significant wave height (H_s), peak direction (P_{dir}) and peak period (T_p), respectively. Once normalized by the data, the RMSD result in scatter indexes of 16% and 15% for H_s and T_p , respectively. The model captures well the different peaks of H_s , with only a slight underestimation (bias of –0.09 m). During

Xynthia, the wave peak direction shifts rapidly from W (N260°) to S (N160°) while T_p drops to 6 s, but these behaviors are also well captured by the model. The model globally performs very well during Xynthia, although this storm was characterized by very steep ($H_s = 7$ m vs $T_p = 7$ –10 s) and young waves ($W_a = 9$). This performance is noteworthy and can be attributed to recent improvements of dissipation terms in WWIII (Arduin et al., 2010),

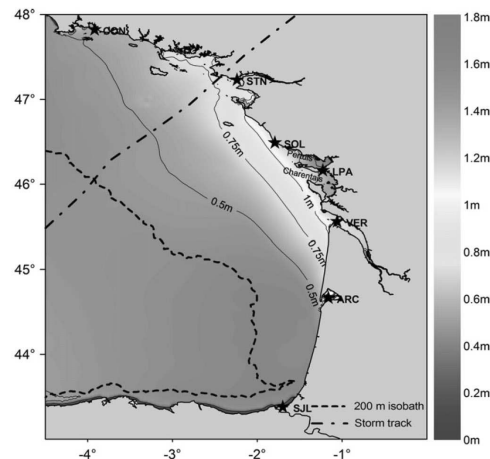


Fig. 7. Contour map of the modeled maximum storm surge in the Bay of Biscay, showing a maximum of 2.0 m in the inner part of the Pertuis Charentais. The dashed line corresponds to the 200 m isobath line and represents the continental shelf break.

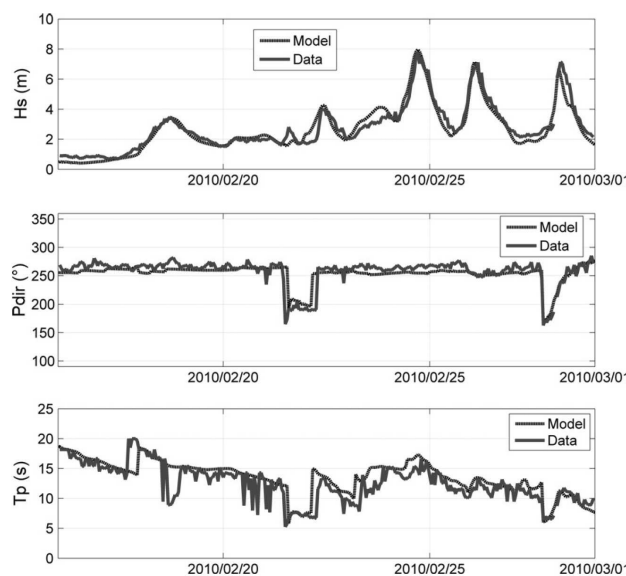


Fig. 6. Times series of wave characteristics (H_s , P_{dir} and T_p) at the Oléron buoy (dark plain triangle on Fig. 1b), near La Rochelle. Comparisons between the data (dashed black line) and model predictions (solid blue line). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

before which such young and steep waves were often strongly overestimated (Ardhuin et al., 2009).

5.3. Storm surge predictions

The maximum values of the predicted storm surge in the Bay of Biscay are shown on Fig. 7. This figure shows firstly that the storm surge is less than 0.5 m outside the continental shelf and progressively increases with shallower depths. Storm surge exceeds 1.0 m in the central part of the Bay of Biscay and reaches its maximum in the inner part of the Pertuis Charentais (around 1.75 m).

The predictions of the water surface anomalies were compared against observations at six different locations in the Bay of Biscay over a two day windows centered on Xynthia (Fig. 8). Both in terms of peak magnitude and phase, the model succeeds to reproduce quite satisfactorily the surge induced by Xynthia in the Bay of Biscay. Considering the three stations where the surge was the largest (Les Sables d'Olonne, La Pallice and Le Verdon), the peak deviations and the phase lags between the model and the data are of around -6%, -8% and 3% and -30 min, 40 min and 30 min, respectively. The RMSD and bias were calculated at the stations over this two-day period (Table 2) and were included in the ranges 0.12–

0.17 m and -0.13 to -0.01 m, respectively. In more details, a 0.10–0.20 negative bias was obtained at every station about 24 h before landfall. The model also succeeded to reproduce the development of 6-h oscillations that occurred in the central part of the Bay of Biscay after landfall (St Nazaire, Les Sables d'Olonne, La Pallice and Verdon, Fig. 8).

6. The physical processes controlling the storm surge during Xynthia

6.1. The impact of atmospheric forcings

In order to evaluate the respective contributions of wind and atmospheric sea-level pressure gradients (SLP) in the whole storm surge, synthetic numerical simulations were performed, considering SLP only (Fig. 9 – curve a), wind only (Fig. 9 – curve b), the algebraic sum of both contributions (Fig. 9 – curve c) and these results were compared against the baseline simulation that includes winds and SLP (Fig. 9 – curve d).

These numerical experiments show firstly that the sum of the contributions of SLP and wind effects closely matches the baseline simulation, which suggests the insignificance of non-linear

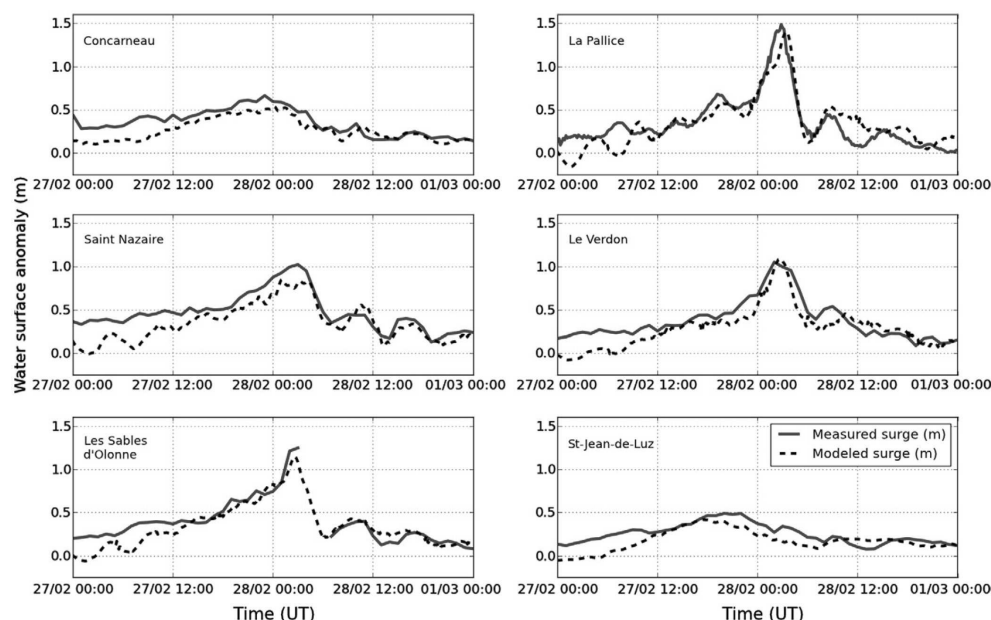


Fig. 8. Predicted (solid blue line) against observed (dashed black line) water level anomaly at Concarneau, St Nazaire, Les Sables d'Olonne, La Pallice, Le Verdon and St Jean de Luz stations, showing a good agreement between model and data. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Table 2

Statistical results of modeled/observed surge comparisons for a set of seven stations (stars in Fig. 3b) located in the Bay of Biscay: station name, Root Mean Square Discrepancies (RMSD) and Bias.

Stations	Concarneau	Saint-Nazaire	Les Sables d'Olonne	La Pallice	Verdon	Saint-Jean-de-Luz
RMSD (m)	0.12	0.17	0.12	0.16	0.15	0.12
Bias (m)	-0.086	-0.129	-0.054	-0.014	-0.092	-0.079

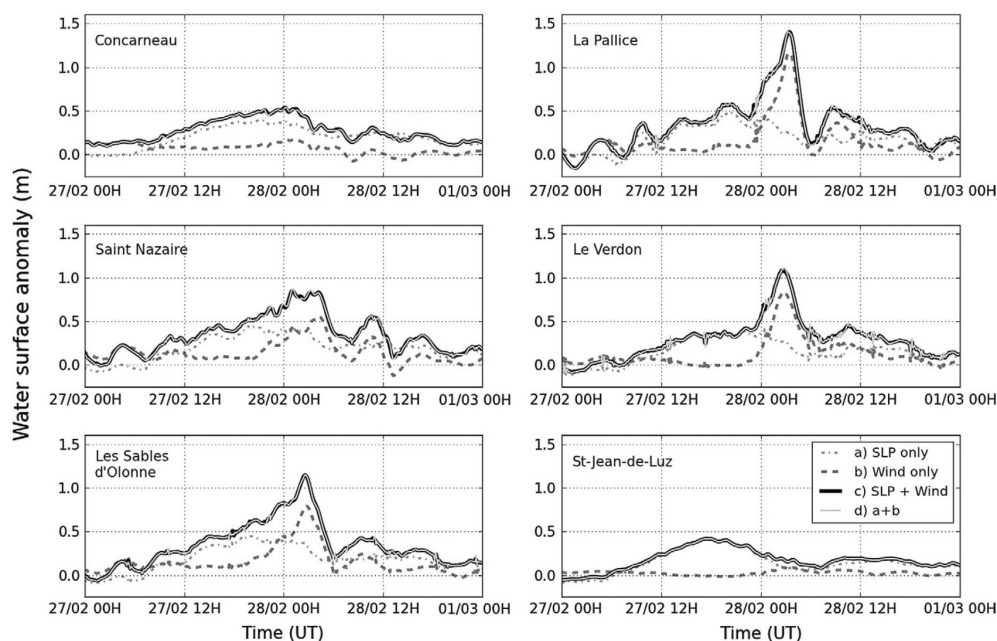


Fig. 9. Time series of water level anomalies computed considering (a) SLP only, (b) wind only, (c) SLP and wind and sum of (a) and (b).

interactions between SLP and wind. At Concarneau and St Jean de Luz, SLP drives 70–100% of the total storm surge. The weak contribution of wind at Concarneau can be explained by its offshore orientation during a large part of the storm (Fig. 2), while at Saint Jean de Luz, it can be related to the very narrow continental shelf (Fig. 1B). At Saint-Nazaire (Fig. 1), which is the station closest to landfall and thus exposed to the lowest SLP, wind and SLP have roughly an equivalent contribution in the whole storm surge. In the central part of the Bay of Biscay (Sables d'Olonne, La Pallice and Verdon; Fig. 1), the wind effect is clearly dominant upon SLP and drives between 70% and 80% of the whole storm surge. These results corroborate previous studies, which showed that wind stress is the dominant factor in the generation of storm surge in shallow waters (Jelesnianski, 1966; Rego and Li, 2010).

In the northern hemisphere, the Coriolis Effect causes the main storm surge to peak to the right side of the storm track at landfall (Kennedy et al., 2011). In order to verify this hypothesis in the case of Xynthia, a synthetic simulation was performed turning off the Coriolis force into SELFE and comparing it with the baseline simulation (Fig. 10).

This test shows that turning off the Coriolis force reduces the whole storm surge by 20–30% at the four stations located in the central part of the Bay of Biscay and where the largest storm surge occurred. This behavior demonstrates that a significant part of the surge was due to a Coriolis-induced Ekman transport, related to the South to South-west oriented wind.

6.2. The impact of waves

The storm surge model ran at the earliest stage of this study utilized the quadratic parameterization of Zeng et al. (1998) to compute wind stresses and systematically underestimated the surge

peak by 20–30% in the central part of the Bay of Biscay. This simpler parameterization is compared against our baseline simulation (Fig. 11), which utilizes a wave-dependant parameterization to compute wind stress (Section 4.1.1). This comparison shows that the two approaches perform similarly except during the storm peak, where the surge with the wave-dependant parameterization for wind stress is 30% larger. Several studies (Mastenbroek et al., 1993; Zhang and Li, 1996; Moon, 2005; Brown and Wolf, 2009; Nicolle et al., 2009; Sheng et al., 2010; Brown et al., 2011) already showed that calculating the wind stress with a wave-dependant parameterization amplified the storm surge by 10–20%. In order to explain the stronger-than-normal wave dependence of the storm surge during Xynthia, the friction velocity U_{*} and wave age W_a are plotted on Fig. 11B. A significant drop in W_a occurred during Xynthia, which resulted in a large increase in the friction velocity U_{*} . Such young waves can be related to the unusual storm track associated with Xynthia, which crosses the Bay of Biscay from SW to NE, thereby resulting in a restricted fetch that produced very steep ($H_s = 7$ m vs $T_p = 7–10$ s) and young waves.

Other wave-related processes can have a significant impact on the storm surge at the coast. Thus, several studies showed that the onshore component of wave radiation stress gradients (Longuet-Higgins and Stewart, 1964) produce a wave setup that can contribute significantly to the whole storm surge (Xie et al., 2008; Nicolle et al., 2009; Wolf, 2009; Liu and Xie, 2009; Sheng et al., 2010; Dietrich et al., 2011). The adequate representation of wind-waves in surf zones in WWIII and their radiation stress gradient in SELFE requires a spatial resolution finer than 50–100 m along the coast, which would result in a computational grid for SELFE with over a million nodes in the case of the whole Bay of Biscay. Although it was shown recently that such computations were possible using massive parallel techniques (Dietrich et al., 2010, 2011;

26

X. Bertin et al./Ocean Modelling 42 (2012) 16–30

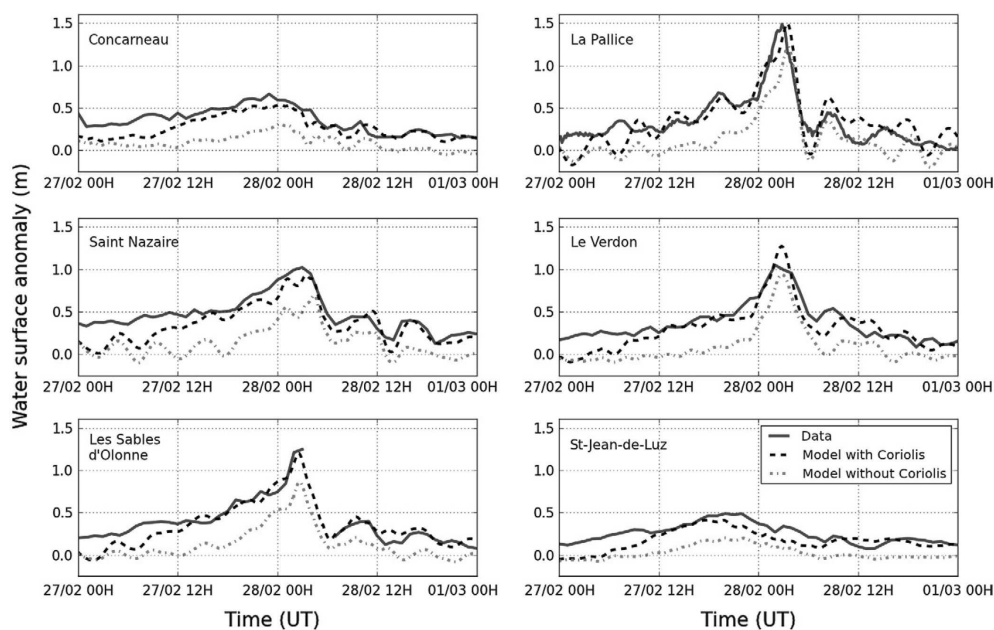


Fig. 10. Time series of measured (solid blue line) and computed water level anomalies with (dashed black line) and without Coriolis effect (dashed-dotted red line), which shows that at most stations, the wind direction and the Coriolis-induced Ekman transport are responsible for a large part of the storm surge. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

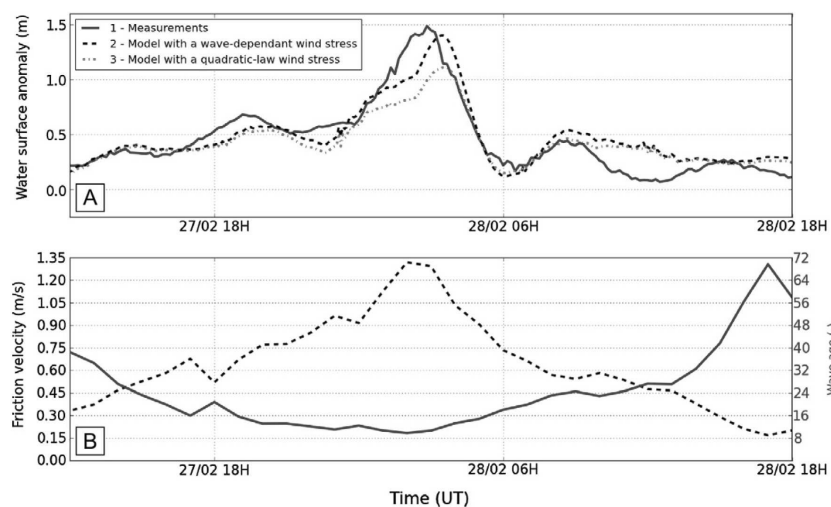


Fig. 11. (A) Time series of measured (1 – solid blue curve) and computed water level anomalies with a wave-dependant (2 – dashed black line) and a quadratic (3 – dashed dotted red line) parameterization to compute wind stress. (B) Time series of wave age W_a (solid blue line) and friction velocity U_* (dashed black line) at the Oléron wave rider, showing a drop of W_a and a peak of U_* during Xynthia. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Bunya et al., 2010), this would fall outside the scope of the present study. Nevertheless, the application of a well-validated 2DH morphodynamic modeling system fully coupling waves and currents in the Pertuis Charentais area (Bertin et al., 2009a; Poirier et al., 2010) revealed that wave radiation stresses during Xynthia increased water levels in La Pallice by 0.05–0.08 m (not presented here). Other studies suggested that wave-induced bottom stress can slightly decrease storm surge magnitude (Xie et al., 2008; Nicolle et al., 2009; Sheng et al., 2010). In the Pertuis Charentais area, this effect was shown to be more significant in very shallow areas (Nicolle et al., 2009). Sensitivity tests on the bottom drag coefficient C_d of the circulation model confirmed that bottom stress has only a limited impact on storm surge magnitude at the stations considered in this study (not presented here). These stations are all closely connected to channels with water depths of over 20 m, which explains this weak impact of bottom stress. The impact of wave-induced bottom stress will have to be further investigated in very shallow areas and inner estuaries.

6.3. Storm surge resonance on the continental shelf

Both modeled and measured storm surges display the development of oscillations after landfall with heights ranging from 0.20 m to 0.40 m in the central part of the Bay of Biscay (Verdon, La Pallice, Sables d'Olonne and Saint-Nazaire; Figs. 3 and 5). These oscillations may suggest tide-surge interactions, a phenomenon which has long been known in shallow areas with large tidal ranges (Proudman, 1957; Wolf, 2009; Rego and Li, 2010; Zhang et al., 2010). Nevertheless, the period of these oscillations is of the order of 6 h while the local tide is dominated by M2, with a period of 12.42 h. In order to definitely discard the hypothesis of tide-surge interactions, a simulation was launched without tidal forcing. This simulation resulted in a surge matching very closely that of our baseline simulation, which indicates that non-linear tide-surge interactions are very weak. Pineau-Guillou et al.

(2010) performed a preliminary simulation of Xynthia surge with the HYCOM model forced by winds only and their results also display similar oscillations.

An alternative explanation for the development of such oscillations would be a resonance phenomenon, since this oscillation period of around 6 h matches the resonance period of the shelf in the central part of the Bay of Biscay (Le Cann, 1990). In order to determine the resonant mode along the Bay of Biscay, series of runs were performed forcing SELFE along the entrance of the Bay of Biscay with single tidal constituents of amplitude of 0.1 m and angular frequency varying from $0.0001 \text{ rad s}^{-1}$ to 0.001 rad s^{-1} (1.7 to 17 h period). A strong amplification (up to a factor 20) occurs in the central part of the Bay of Biscay for angular frequencies ranging from $0.00030 \text{ rad s}^{-1}$ to $0.00032 \text{ rad s}^{-1}$ (5.8–5.5 h, Fig. 12A).

As an additional verification of the role of resonance, we used the model of Clarke and Battisti (1981). Linearizing Laplace tidal equations and neglecting bottom friction, these authors proposed a simple analytical model, which suggests that resonance occurs when the following criterion is met:

$$L \approx \frac{g \cdot \alpha}{\omega^2 - f^2}, \quad (11)$$

where L is the shelf width, g is the gravity acceleration, α is the mean shelf gradient, ω is the angular frequency and f is the Coriolis parameter. The theoretical frequencies at which resonance would occur in the Bay of Biscay are shown in Fig. 12B. In the central part of the Bay of Biscay, the 140–170 km wide shelf would theoretically imply resonance for frequencies of the order of $0.0003 \text{ rad s}^{-1}$, which corroborates our numerical experiments presented in Fig. 12A. Minor discrepancies may be explained by the baseline hypotheses of Clarke and Battisti (1981), who neglected advection and bottom friction, while these two terms may be significant in the presence of islands and estuaries.

Once the resonant angular frequency ω_r is known for the central part of the Bay of Biscay, the amplitudes A_r and phases ϕ_r of

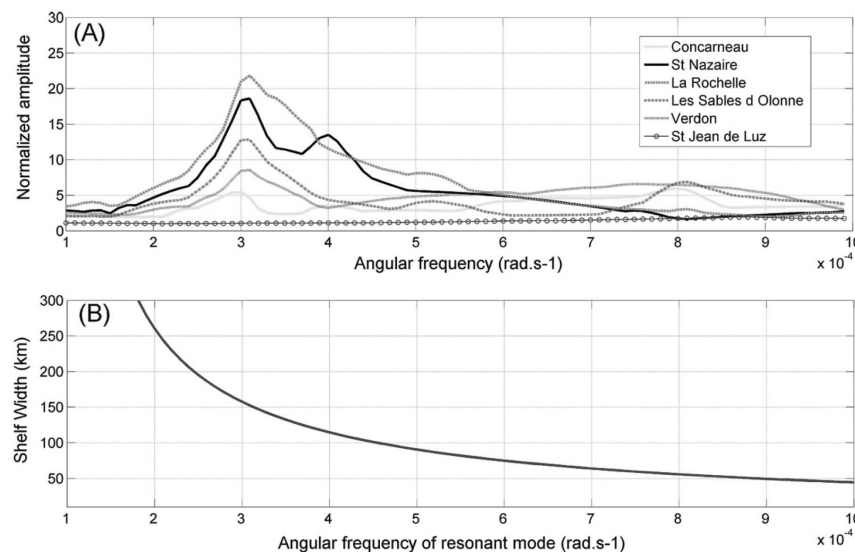


Fig. 12. A – Amplification as a function of angular frequency, showing a strong amplification in the central part of the Bay of Biscay (St Nazaire, Les Sables d'Olonne, La Pallice and Verdon) for frequencies around $0.00031 \text{ rad s}^{-1}$ (around 5.63 h). B – Shelf width at which resonance occurs as a function of angular frequency, according to the analytical model of Clarke and Battisti (1981).

28

X. Bertin et al./Ocean Modelling 42 (2012) 16–30

the oscillations that developed in the storm surge after landfall could be estimated for each station by a least squares fit of the following equation:

$$\xi(t) = A_r \cos(\omega_r t + \varphi_r) \quad (12)$$

Predicted A_r and φ_r are compared against the values computed from observed surges (Table 3) for a 12 h period and this comparison yields an overall good agreement, with amplitude and phase discrepancies ranging from 0.02 to 0.06 m and 1–26°, respectively.

In order to illustrate the spatial repartition of this resonance phenomenon, a harmonic analysis was performed on our baseline simulation at the resonance angular frequency ω_r and over a 12 h period immediately after landfall. A contour map of the resonance oscillation amplitude is shown on Fig. 13 and reveals that the largest resonance occurred immediately to the South of landfall, where amplitudes exceed 0.2 m (0.4 m height). Resonance decreases further southward, although amplitudes increase locally in the Pertuis

Charentais and reach 0.17 m at La Pallice (Fig. 13). Depending on the station considered, this resonance oscillation represents between 10% and 25% of the total measured surge.

Several studies investigate theoretically resonance phenomena associated with storm surges, usually starting from the linearized SWE (Proudman, 1953; Nielsen et al., 2008; Vennell, 2010). In particular, Proudman (1953) showed that resonance would occur if the atmospheric disturbance travels at the same speed as the surge wave, that is \sqrt{gh} . Since Xynthia travelled the continental shelf of the Bay of Biscay at a speed of the order of $V_{x0} = 17 \text{ m s}^{-1}$, this criterion would only be met in depths of the order of 30 m. In order to investigate in further details the possible contribution of a Proudman resonance in the storm surge associated with Xynthia, numerical experiments were performed turning off tides and varying the forward speed of Xynthia from 11 to 25 m s^{-1} ($V_{x0}/1.5$ and $V_{x0} \times 1.5$, respectively), through the distortion of the time in the atmospheric forcing. The results of these tests are synthesized in Table 4 and show that a slower storm drives a similar maximum surge while a faster storm drives a 10–15% larger surge peak. Such results are in agreement with those obtained in the Gulf of Mexico (Irish et al., 2008; Rego and Li, 2009) and suggest that Proudman resonance has a limited contribution in the whole storm surge.

For the three tests performed, ~6 h oscillations develop at the coast and their amplitude was computed using Eq. (12). Surprisingly, increasing the forward speed of Xynthia increases spectacularly the amplitude of the oscillations A_r that develop after landfall. To explain this phenomenon, spectral analyses were carried out on time-series of elevation at a point located on the track of Xynthia at the shelf break (4.20°W; 46.30°N). The analyses were performed on a 12 h window centered on the surge peak at this site, which avoids analyzing possible reflected resonant waves. This analysis shows that for the case $V_x = 25 \text{ m s}^{-1}$, about two to three times more spectral energy is found around the resonant frequency ω_r than for the baseline case, while for the case $V_x = 11 \text{ m s}^{-1}$, slightly less energy is found at this frequency. Thus, a good agreement is observed between the energy at the shelf break around the resonant frequency ω_r and the amplitude of the oscillations at the coast. This agreement demonstrates that the oscillations observed at the coast originate from the amplification of the incident storm surge energy spectrum for frequencies corresponding to the resonant mode of the shelf.

A few studies already investigated similar resonant phenomena (Moon et al., 2003), as water level anomalies published in several studies display similar oscillations. For instance, in Kennedy et al. (2011), the water level anomaly at the border between Louisiana and Texas (Gulf of Mexico) displays ~12 h oscillations while the wide shelf in this region causes the resonance frequency to be close to that of M2 (Reid and Whitaker, 1981). As a consequence, interactions between storm surge and continental shelf is a phenomenon expected to be relevant at other places along the world's coastlines.

7. Conclusions and future works

A new storm surge modeling system coupling the unstructured-grid circulation model SELFE (Zhang and Baptista, 2008) and the

Table 3

Amplitude A_r (m) and phases φ_r (°) of the resonant oscillation observed after landfall computed by means of a least square fit procedure applied to observed and modeled surge.

		Saint-Nazaire	Les Sables d'Olonne	La Pallice	Verdon
Data	A_r (m)	0.18	/	0.23	0.12
	φ_r (°)	322	/	23	8
Model	A_r (m)	0.16	0.11	0.17	0.10
	φ_r (°)	298	345	357	9

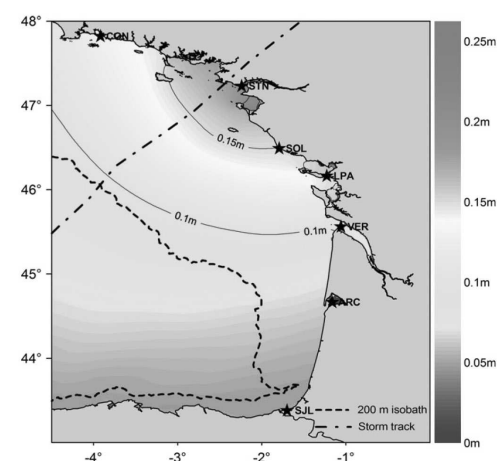


Fig. 13. Contour map of the amplitude of resonance oscillations computed at the angular frequency $\omega_r = 0.00031 \text{ rad s}^{-1}$. The dashed line indicates the 200-m isobath line and corresponds to the border of the continental shelf.

Table 4

Peak surge and amplitude of the resonant oscillation as a function of the forward speed of Xynthia at Saint-Nazaire, Les Sables d'Olonne, La Pallice and Verdon.

	Saint-Nazaire		Les Sables d'Olonne		La Pallice		Verdon	
	Peak surge (m)	A_r (m)	Peak surge (m)	A_r (m)	Peak surge (m)	A_r (m)	Peak surge (m)	A_r (m)
$v_k = 25 \text{ m/s}$ ($V_{x0} \times 1.5$)	1.07	0.24	1.39	0.15	1.77	0.40	0.144	0.11
$v_k = 17 \text{ m/s}$ (V_{x0})	0.99	0.13	1.21	0.11	1.52	0.16	1.30	0.10
$v_k = 11 \text{ m/s}$ ($V_{x0}/1.5$)	1.02	0.11	1.23	0.10	1.50	0.12	1.33	0.10

spectral wave model WaveWatch III (Tolman, 2009) was developed to hindcast and analyze the storm surge associated with Xynthia. This modeling system was implemented over the North East Atlantic Ocean and resulted in tidal and wave predictions with scatter indexes in the Bay of Biscay of the order of 3% and 15%, respectively. The storm surge associated with Xynthia was also well predicted along the Bay of Biscay, with only a slight underestimation of the surge peak by 3–8%. Numerical experiments were then performed to screen the physical processes responsible for the storm surge development and revealed firstly that the wind drove the main part of water level anomaly through an Ekman setup process related to the S–SW orientation of storm winds. The comparison between a wave-dependant and a quadratic parameterization to compute wind stress showed that the storm surge was strongly amplified by the presence of very steep ($H_s = 7$ m vs $T_p = 7–10$ s) and young wind-waves, related to their rapid development in a restricted fetch. This restricted fetch resulted from the unusual track of Xynthia that crossed the Bay of Biscay from SW to NE. This result highlights the necessity of storm surge modeling systems to include a wave-dependant drag parameterization and to be able to predict accurately young sea-states, which are more challenging to model. The development of ~ 6 h oscillations observed in water level anomalies after landfall was explained by a resonant process, caused by interactions between the incident sea-level anomaly and the continental shelf in the central part of the Bay of Biscay. Such oscillations are commonly visible in previously published studies so that this resonant process is expected to be relevant at other places along the world's coastlines.

This study corresponds to the first step of an integrated research project, which aims to hindcast and analyze the storm surge and coastal flooding associated with Xynthia. Further development of our modeling system will concern the inclusion of wave radiation stress gradients, wave-induced bottom stress and the effect of currents on wave propagation and a much finer resolution will be employed to represent these processes adequately. These future improvements are expected to suppress the slight negative bias in our storm surge predictions. The numerical simulation of coastal flooding will imply using a spatial resolution locally reaching 10 m or less to represent adequately natural barrier and seawalls. Such a fine resolution would result in a computational grid with more than 10^6 nodes and the subsequent very large computational cost will be outweighed using massive parallel techniques. The representation of flooded areas will benefit from a high resolution survey, carried out a few months after Xynthia and under processing in our team. These future works are expected to allow for a deeper analysis of the flooding associated with Xynthia and a better anticipation of future risks in a context of sea-level rise and increase in storminess.

Acknowledgments

Elevation data used for model validation and storm surge characterization originated from the data bases of SONEL (www.sonel.org) and BODC (www.bodc.ac.uk/). The authors greatly thank the developing teams of the models SELFE and WaveWatchIII for making their source codes available. Wave data Offshore Oléron Island were provided by the French Oceanographic and Hydrographic Institute (SHOM) and this data was acquired during the projects MOUTON (funded by DGA PEA 012401) and EPIGRAM (funded by LEFE/IDAO and ANR, agreement ANR-08-BLAN-0330-01). Atmospheric forcing in the Bay of Biscay and the English Channel were provided by Meteo France. Coarser atmospheric forcing for the whole modeled domain originated from GFS model, developed at the US National Center for Environmental Predictions. Nicolas Bruneau benefited from an invited researcher grant funded by Région Poitou-Charente. This work was partially funded by a

post-doctoral research grant to the second author from the Fundação para a Ciência (SFRH/BPD/67041/2009). The development of the modeling system was partially funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology, throughout the projects “3D - MOWADI” (PTDC/ECM/103801/2008) and T “AdaptaRia” (PTDC/AAC-CLI/100953/2008). Tidal boundary conditions were kindly provided by UMR 5566 LEGOS. Finally, the comments of three anonymous reviewers improved this paper greatly.

References

- Ardhuin, F., Raschle, N., Belibassakis, K.A., 2008. Explicit wave averaged primitive equations using a generalized Lagrangian mean. *Ocean Modelling* 20, 35–60.
- Ardhuin, F., Chapron, B., Collard, F., 2009. Observation of swell dissipation across oceans. *Geophysical Research Letter* 36, L06607. doi:10.1029/2008GL037030.
- Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A.V., Filipot, J.-F., Magne, R., Roland, A., van der Westhuysen, A., Queffelecoul, P., Lefevre, J.-M., Aouf, L., Collard, F., 2010. Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: definition, calibration, and validation. *Journal of Physical Oceanography* 40, 1917–1941.
- Bardet, L., Duluc, C.-L., Rebour, V., L'Her, J., 2011. Regional frequency analysis of extreme storm surges along the French coast. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, 1627–1639.
- Bénard, P., 2004. ALADIN-NH/AROME dynamical core: status and possible extension to IFS. In: *Proceedings of the ECMWF Seminar*, pp. 27–40.
- Bernardara, P., Andreewsky, M., Benoit, M., 2011. Application of regional frequency analysis to the estimation of extreme storm surges. *Journal of Geophysical Research* 116, C02008. doi:10.1029/2010JC006229.
- Bertin, X., Dodet, G., 2010. Variabilité du climat de houle dans le Golfe de Gascogne au cours des six dernières décennies. In: *Proceedings of XIème Journées Nationales Génie Côtiers – Génie Civile*, 22–24 June 2010, Les Sables d'Olonne, France.
- Bertin, X., Chaumillon, E., Sottolichio, A., Pedreros, R., 2005. Tidal inlet response to sediment infilling of the associated bay and possible implications of human activities: the Marennes–Oléron Bay and Maumusson Inlet, France. *Continental Shelf Research* 25, 115–1131.
- Bertin, X., Oliveira, A., Fortunato, A.B., 2009a. Simulating morphodynamics with unstructured grids: description and validation of a modeling system for coastal applications. *Ocean Modelling* 28 (1–3), 75–87.
- Bertin, X., Fortunato, A.B., Oliveira, A., 2009b. A modeling-based analysis of processes driving wave-dominated inlets. *Continental Shelf Research* 29, 819–834.
- Bidlot, J.-R., 2008. Intercomparison of operational wave forecasting systems against buoys: data from ECMWF, MetOffice, FNMOC, NCEP, DWD, BoM, SHOM and JMA, September 2008–November 2008. In: *Joint WMO–IOC Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology*.
- Blake, E.S., 2007. The deadliest, costliest and most intense United States tropical cyclones from 1851 to 2006 (and other frequently requested hurricane facts). NOAA Technical Memorandum NWS TPC 5, 43 pp.
- Brown, J.M., Wolf, J., 2009. Coupled wave and surge modelling for the eastern Irish Sea and implications for model wind-stress. *Continental Shelf Research* 29 (10), 1329–1342.
- Brown, J.M., Souza, A.J., Wolf, J., 2010. An 11-year validation of wave-surge modelling in the Irish Sea, using a nested POLCOMS–WAM modelling system. *Ocean Modelling* 33 (1–2), 118–128.
- Brown, J., Bolanos-Sanchez, M., Rodolfo, X.X., Wolf, J., 2011. Impact assessment of advanced coupling features in a tide–surge–wave model, POLCOMS–WAM, in a shallow water application. *Journal of Marine Systems* 87 (1), 13–24.
- Bruneau, N., Dodet, G., Bertin, X. and Fortunato, A. B., 2011. Development of a three-dimensional coupled wave-current model for coastal environments. *Journal of Coastal Research*, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), pp. 986–990. Szczecin, Poland, ISSN 0749-0208.
- Bunya, S., Dietrich, J.C., Westerink, J.J., Ebersole, B.A., Smith, J.M., Atkinson, J.H., et al., 2010. A high resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave and storm surge model for southern Louisiana and Mississippi: Part I – model development and validation. *Monthly Weather Review* 138, 345–377.
- Butel, R., Dupuis, H., Bonneton, P., 2002. Spatial variability of wave conditions on the French Atlantic coast using in situ data. *Journal of Coastal Research* 36 (SI), 96–108.
- Chalikov, D.V., 1995. The parameterization of the wave boundary layer. *Journal of Physical Oceanography* 25, 1333–1349.
- Chalikov, D.V., Belevich, M.Yu., 1993. One-dimensional theory of the wave boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology* 63 (1–2), 65–96. doi:10.1007/BF00705377.
- Clarke, A.J., Battisti, D.S., 1981. The effect of continental shelves on tides. *Deep-Sea Research* 28, 665–682.
- Comblen, R., Legendre, S., Deleersnijder, E., Legat, V., 2009. A finite element method for solving the shallow water equations on the sphere. *Ocean Modelling* 28 (1–3), 12–23.
- Das, P.K., 1972. A prediction model for storm surges in the Bay of Bengal. *Nature* 239, 211–213.
- Dietrich, J.C., Bunya, S., Westerink, J.J., Ebersole, B.A., Smith, J.M., Atkinson, J.H., et al., 2010. A high resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave and storm surge model for southern Louisiana and Mississippi: part II – synoptic

- description and analyses of Hurricanes Katrina and Rita. *Monthly Weather Review* 138, 378–404.
- Dietrich, J.C., Zijlema, M., Westerink, J.J., Holthuijsen, L.H., Dawson, C., Luetich Jr., R.A., Jensen, R., Smith, J.M., Stelling, G.S., Stone, G.W., 2011. Modeling hurricane wave and storm surge using integrally coupled, scalable computations. *Coastal Engineering* 58, 45–65.
- Dodet, G., Bertin, X., Taborda, R., 2010. Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling* 31 (3–4), 120–131.
- Doodson, A.T., 1924. Meteorological perturbations of sea-level and tides. *Geophysical Journal International* 1, 124–147.
- Dupuis, H., Michel, D., Sottolichio, A., 2006. Wave climate evolution in the Bay of Biscay over two decades. *Journal of Marine Systems* 63, 105–114.
- Environmental Modeling Center, 2003. The GFS atmospheric model. NCEP Office Note 442.
- Flather, R.A., 2001. Storm surges. In: Steele, J., Thorpe, S., Turekian, K. (Eds.), *Encyclopaedia of Ocean Sciences*. Academic, San Diego, California, pp. 2882–2892.
- Fortunato, A.B., Bruneau, N., Azevedo, A., Araújo, M.A.V.C. and Oliveira, A., 2011. Automatic improvement of unstructured grids for coastal simulations. *Journal of Coastal Research*, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), pp. 1028–1032. Szczecin, Poland, ISSN 0749-0208.
- Gerritsen, H., 2005. What happened in 1953? The big flood in the Netherlands in retrospect. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 363, 1271–1291.
- Hasselmann, K., 1974. On the spectral dissipation of ocean waves due to Whitecapping. *Boundary-Layer Meteorology* 6 (1–2), 107–127.
- IPCC, 2007. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability, Working Group I Report, The Physical Science Basis, Chapter 10, Global Climate projection, World Meteorological Organization, Genève, 2007, pp. 812–822.
- Irish, J.L., Resio, D.T., Ratcliff, J.J., 2008. The influence of storm size on hurricane surge. *Journal of Physical Oceanography* 38, 2003–2013.
- Janssen, P.A.E.M., 1989. Wind-induced stress and the drag of air flow over sea waves. *Journal of Physical Oceanography* 19, 745–754.
- Jelesnianski, C.P., 1965. Numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf. *Monthly Weather Review* 93, 343–358.
- Jelesnianski, C.P., 1966. Numerical computations of storm surges without bottom stress. *Monthly Weather Review* 94 (6), 379–394.
- Jones, J.E., Davies, A.M., 2007. Influence of non-linear effects upon surge elevations along the west coast of Britain. *Ocean Dynamics* 57 (4–5), 401–416.
- Kennedy, A.B., Gravois, U., Zachry, B.C., Westerink, J.J., Hope, M.E., Dietrich, J.C., Powell, M.D., Cox, A.T., Luetich Jr., R.A., Dean, R.G., 2011. Origin of the Hurricane Ike forerunner surge. *Geophysical Research Letter* 28 (8), L08608.
- Le Cann, B., 1990. Barotropic tidal dynamics of the Bay of Biscay shelf: observations, numerical modelling and physical interpretation. *Continental Shelf Research* 10 (8), 723–758.
- Leffler, K.E., Jay, D.A., 2009. Enhancing tidal harmonic analysis: Robust (hybrid L1/L2) solutions. *Continental Shelf Research* 29 (1), 78–88.
- Liu, H., Xie, L., 2009. A numerical study on the effects of wave-current-surge interactions on the height and propagation of sea surface waves in Charleston Harbor during Hurricane Hugo 1989. *Continental Shelf Research* 29, 1454–1463.
- Liu, W.-C., Chen, W.-R., Hsu, M.-H., 2011. Using a three-dimensional particle-tracking model to estimate the residence time and age of water in a tidal estuary. *Computers and Geosciences* 37 (8), 1148–1161.
- Longuet-Higgins, M.S., Stewart, R.W., 1964. Radiation stresses in water waves; physical discussion, with applications. *Deep-Sea Research* 11, 529–562.
- Mastenbroek, C., Burgers, G., Janssen, P.A.E.M., 1993. The dynamical coupling of a wave model and a storm surge model through the Atmospheric Boundary Layer. *Journal of physical Oceanography* 23, 1856–1866.
- Mellor, G.L., 2008. The depth-dependent current and wave interaction equations: a revision. *Journal of Physical Oceanography* 38, 2587–2596.
- Miyazaki, M., 1965. A numerical computation of the storm surge of Hurricane Carla, 1961, in the Gulf of Mexico. *Oceanography Magazine* 17 (1–2), 109–140.
- Miyazaki, M., Okada, M., 1975. Numerical simulation of storm surges in tosa bay. *Papers in Meteorology and Geophysics* 26, 55–62.
- Moon, I.J., 2005. Impact of a coupled ocean wave-tide-circulation system on coastal modelling. *Ocean Modelling* 8, 203–236.
- Moon, I.J., Oh, I.S., Murphy, T., Youn, Y.H., 2003. Causes of the unusual coastal flooding generated by typhoon winnie on the West Coast of Korea. *Natural Hazard* 29, 485–500.
- Nicolle, A., Karpytchev, M., Benoit M., 2009. Amplification of the storm surges in shallow waters of the Pertuis Charentais (Bay of Biscay, France). *Ocean Dynamics*. doi:10.1007/s10236-009-0219-0.
- Nielsen, P., de Brye, S., Callaghan, D.P., Guard, P.A., 2008. Transient dynamics of storm surges and other forced long waves. *Coastal Engineering* 55, 499–505.
- Pairaud, I.L., Lyard, F., Auclair, F., Letellier, T., Marsaleix, P., 2008. Dynamics of the semi-diurnal and quarter-diurnal internal tides in the Bay of Biscay. Part 1: barotropic tides. *Continental shelf Research* 28, 1294–1315. doi:10.1016/j.csr.2008.03.004.
- Pineau-Guillou, L., Lathuillière, C., Magne, R., Louazel, S., Corman, D. and Perherin, C., 2010. Caractérisation des niveaux marins et modélisation des surcotes pendant la tempête Xynthia. In: *Proceedings of the Xth Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil*, Paralia ed., Les Sables d'Olonne, 22–25th of June 2010. pp. 625–634.
- Poirier, C., Sauriau, P.G., Chaumillon, E., Bertin, X., 2010. Influence of sediment dynamics on mollusc death assemblages in a temperate tide-and-wave dominated coastal environment: implications for the fossil record. *Continental Shelf Research* 30 (17), 1876–1890.
- Proudman, J., 1953. *Dynamical Oceanography*. J. Wiley, New York, p. 409.
- Proudman, J., 1957. Oscillations of tides and surge in an estuary of finite length. *Journal of Fluid Mechanics* 2, 371–382.
- Rego, J.L., Li, C., 2009. On the importance of the forward speed of hurricanes in storm surge forecasting: a numerical study. *Geophysical Research Letter* 36, L07609.
- Rego, J.L., Li, C., 2010. Nonlinear terms in storm surge predictions: effect of tide and shelf geometry with case study from Hurricane Rita. *Journal of Geophysical Research* 115, C06020.
- Reid, R.O., Whitaker, R.E., 1981. Numerical Model for Astronomical Tides in the Gulf of Mexico, Theory and Application, vol. 1. Coastal Eng. Res. Cent., U.S. Army Eng., Vicksburg, Miss., USA.
- Rodrigues, M., Oliveira, A., Guerreiro, M., Fortunato, A.B., Menaia, J., David, L.M., Cravo, A., 2011. Modeling fecal contamination in the Aljezur coastal stream (Portugal). *Ocean Dynamics* 61 (6), 841–856.
- Shen, J., Gong, W., 2009. Influence of model domain size, wind directions and Ekman transport on storm surge development inside the Chesapeake Bay: a case study of extratropical cyclone Ernesto. *Journal of Marine Systems* 75, 198–215.
- Sheng, Y.P., Zhang, Y., Paramygin, V.A., 2010. Simulation of storm surge, wave, and coastal inundation in the Northeastern Gulf of Mexico region during Hurricane Ivan in 2004. *Ocean Modelling* 35 (4), 314–331.
- Simmons, A., Uppala, S., Dee, D., Kobayashi, S., 2006. ERAInterim: new ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter* 110, 25–35.
- Simon, B., 2008. Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer en Manche et Atlantique. CD-Rom, edited by SHOM and CETMEF (in French).
- Tolman, H.L., 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 194 p.
- Tolman, H.L., Chalikov, D., 1996. Source terms in a third-generation wind wave model. *Journal of Physical Oceanography* 26 (11), 2497–2518.
- Vennell, R., 2010. Resonance and trapping of topographic transient ocean waves generated by a moving atmospheric disturbance. *Journal of Fluid Mechanics* 650, 427–442.
- Weisberg, R.H., Zheng, L., 2006. A simulation of the Hurricane Charley storm surge and its breach of North Captiva Island. *Florida Scientist* 69, 152–165.
- Wolf, J., 1981. Surge-tide interaction in the North Sea and River Thames. In: Peregrine, D.H. (Ed.), *Floods Due to High Winds and Tides*. Academic press, London, pp. 75–94.
- Wolf, J., 2009. Coastal flooding: impacts of coupled wave-surge-tide models. *Natural Hazards* 49, 241–260.
- Wolf, J., Flather, R.A., 2005. Modelling waves and surges during the 1953 storm. *Philosophical transactions of the royal society A: mathematical. Physical and Engineering Sciences* 363, 1359–1375.
- Xie, L., Liu, H., Peng, M., 2008. The effect of wave-current interactions on the storm surge and inundation in Charleston Harbor during Hurricane Hugo 1989. *Ocean Modelling* 20 (3), 252–269.
- Zeng, X., Zhao, M., Dickinson, R.E., 1998. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data. *Journal of Climate* 11, 2628–2644.
- Zhang, Y.L., Baptista, A.M., 2008. SELF: a semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modelling* 21 (3–4), 71–96.
- Zhang, M.Y., Li, Y.S., 1996. The synchronous coupling of a third-generation wave model and a two-dimensional storm surge model.
- Zhang, W.Z., Shi, F., Hong, H.S., Shang, S.-P., Kirby, J.T., 2010. Tide surge interaction intensified by the Taiwan strait. *Journal of Geophysical Research* 115, C06012. doi:10.1029/2009JC005762.
- Zhang, Y., Witter, R.W., Priest, G.P., 2011. Nonlinear tsunami-tide interaction in 1964 prince william sound tsunami. *Ocean Modelling* 40 (3–4), 246–259.

ANNEXE 4 – ESTIMATION DES DOMMAGES

ANNEXE 4A

HABITAT

Deux fonctions de dommages sont retenues, selon la nature du phénomène d'inondations.

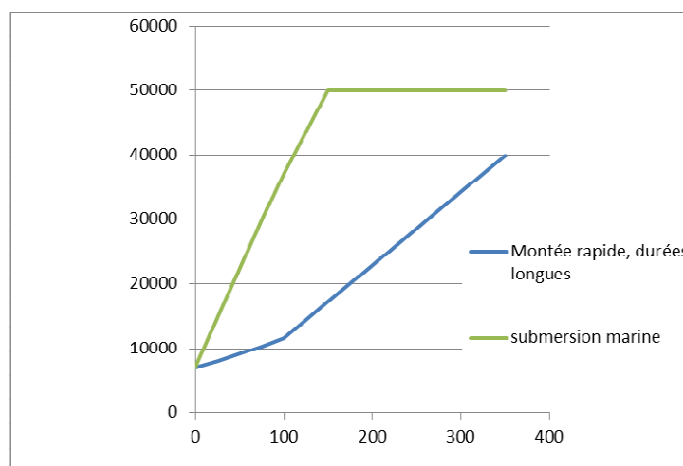
- Dans les secteurs soumis à des inondations par débordement de cours d'eau, la fonction de dommages « Torterotot » sans sous-sol sera retenue. En effet, les reconnaissances de terrain ont fait apparaître que seul ce type d'habitation est présent sur le territoire d'étude.

Afin de prendre en compte les spécificités hydrauliques du territoire, la fonction de dommages élaborée prendra en compte une montée rapide et un temps de submersion long.

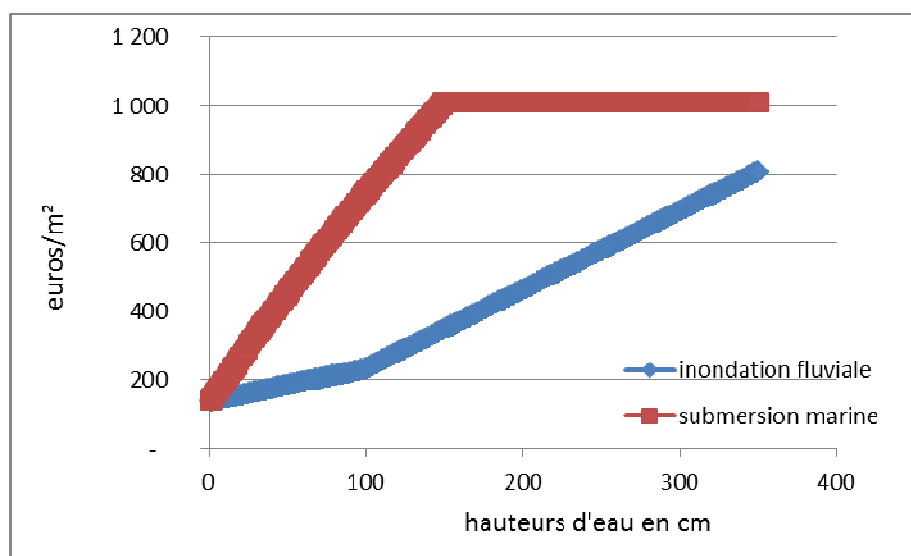
- Dans les secteurs soumis au risque submersion marine, afin de prendre en compte les dommages associés à ce type de phénomène violent et aux dommages associés à la salinité, les valeurs préconisées par les DREAL Pays de Loire et Poitou Charentes sont exploitées.

Le tableau suivant indique en valeur moyenne les dommages associés à un logement en euros pour différentes hauteurs d'eau.

h en cm	Montée rapide, durées longues	submersion marine
0	7000	7000
25	7 949	15000
50	9 119	22500
75	10 289	30000
100	11 509	37000
150	17 188	50000
200	22 867	50000
250	28 546	50000
300	34 225	50000
350	39 904	50000



Dommages en euros/logement



Ces deux fonctions de dommages en euros/logement sont transformées en fonctions surfaciques afin de permettre leur application sur les bases de données géographiques des bâtiments exploités (BDparcellaire/BDTopo).

Ces fonctions de dommages surfaciques seront appliquées aux bâtiments d'habitation.

La hauteur d'eau prise en compte correspond à la hauteur de l'aléa issue des modélisations hydrauliques, corrigée des hauteurs de seuil des planchers, observées lors des reconnaissances de terrain.

ACTIVITE ECONOMIQUE - HORS ACTIVITES AGRICOLES

Nous avons exploité les courbes décrites dans l'annexe technique, mises au point à l'occasion des études conduites sous maîtrise d'ouvrage de l'Equipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature à la fin des années 90 dans le cadre de l'évaluation des enjeux et des dommages potentiels liés aux inondations en Loire moyenne et actualisée dans la cadre de la mise au point de la méthode standard ACB du plan Rhône en 2010.

Les 65 matrices de dommages de cette méthode permettent de déterminer les dommages directs et les pertes d'exploitation par établissement ou par salarié en fonction de la nature de l'activité (relevée par reconnaissance de terrain).

H	D	T	DT/ept.	DT/sal.	H : hauteur de submersion (cm)	
<=80 cm	<=24 h	<=48 h	82 890 €	13 756 €	D : durée de submersion (heures)	
		>=48 h	241 191 €	40 026 €	T : temps d'intervention (heures)	
	>24 h	<=48 h	290 671 €	48 237 €	DT/ept. : dommage total moyen par entreprise (€)	
		>=48 h	480 633 €	79 762 €	DT/sal. : dommage total moyen par salarié (€)	
>80 cm	<=24 h	<=48 h	175 564 €	29 135 €		
		>=48 h	302 205 €	50 151 €		
	>24 h	<=48 h	353 992 €	58 745 €		
		>=48 h	512 293 €	85 016 €		
Calcul de la perte d'exploitation (PE)					CA : chiffre d'affaire (€)	
dommages faibles		Taux d'endommagement < 40 %	temps de remise en état = 1 mois		PE = CA/200 x (D+16,6) x 0,5	
dommages graves		Taux d'endommagement >= 40 %	temps de remise en état = 3 mois		PE = CA/200 x (D+50) x 0,5	
D = durée de submersion, exprimée en jours						
CA / entreprise		1 032 127 €				
CA / salarié		171 282 €				

Exemple de fonction de dommage

Ces fonctions prennent en compte la hauteur d'eau impactant chaque établissement, mais également une hypothèse de durée de submersion et de temps d'intervention pour les travaux de remise en service.

Nous avons fixé ces deux paramètres :

Durées de submersion inférieures à 24h, temps d'intervention inférieurs à 48h.

BATIMENTS PUBLICS

Pour l'estimation des dommages, le Guide national propose un coût surfacique (100 euros/m²), sans distinction de la nature ou l'usage du bâtiment ni de la hauteur d'eau.

Cette valeur a été retenue.

AGRICULTURE

La nomenclature des enjeux agricoles s'appuie sur celle préconisée dans les annexes techniques ACB PAPI.

- Vignes
- vergers
- grandes cultures
- cultures à forte valeur ajoutée (hors serres)
- serres tunnels
- serres en verre
- Sièges d'exploitation

Deux sources de données ont été exploitées afin de déterminer les fonctions de dommages qui ont été retenues :

- les fonctions de dommage du Plan Rhône
- ou le retour d'expérience locale, selon les préconisations de la DREAL (rapport des assureurs après Xynthia et synthèse des DREAL sur le chiffrage des dégâts dans le cas de submersions récentes).

L'hypothèse de vitesses inférieures à 1m/s a été retenue.

Les fonctions de dommages du Plan Rhône ont été actualisées à partir de l'indice des prix, soit sur la période 2009 -2013, une augmentation de 6%.

Pour chaque type de culture et classe de hauteur d'eau, 3 valeurs surfaciques (euros/ha) sont présentées afin de prendre en compte la saisonnalité dans les tests de sensibilité.

Le tableau suivant présente la matrice des dommages exploitée :

culture	hauteur d'eau	valeur minimum	valeur	valeur maximale	source	unité
VIGNE	<0,5m	597	1 075	2 747	RHONE selon saison	euros/ha
	0,5-1,5m	836	1 672	5 494	RHONE selon saison	euros/ha
	>1,5m	836	1 672	5 494	RHONE selon saison	euros/ha
VERGER	<0,5m	-	7 286	14 571	RHONE selon saison	euros/ha
	0,5-1,5m	2 150	7 286	14 571	RHONE selon saison	euros/ha
	>1,5m	3 225	7 286	14 571	RHONE selon saison	euros/ha
GRANDES CULTURES	<0,5m	3 350	3 350	3 350	DREAL	euros/ha
	0,5-1,5m	3 350	3 350	3 350	DREAL	euros/ha
	>1,5m	3 350	3 350	3 350	DREAL	euros/ha
GRANDES CULTURES À HAUTE VALEUR AJOUTÉE HORS SERRE	<0,5m	1924	9101	10558	RHONE selon saison	euros/ha
	0,5-1,5m	1924	9101	10558	RHONE selon saison	euros/ha
	>1,5m	1924	9101	10558	RHONE selon saison	euros/ha
SERRE	<0,5m	9101	30587	50987	RHONE selon saison	euros/ha
	0,5-1,5m	9101	30587	50987	RHONE selon saison	euros/ha
	>1,5m	227596	249083	269470	RHONE selon saison	euros/ha
PRAIRIE	<0,5m	1 150	1 150	1 150	DREAL	euros/ha
	0,5-1,5m	1 150	1 150	1 150	DREAL	euros/ha
	>1,5m	1 150	1 150	1 150	DREAL	euros/ha
OSTREICULTURE	<0,5m	3 000	3 000	3 000	DREAL	euros/ha
	0,5-1,5m	3 000	3 000	3 000	DREAL	euros/ha
	>1,5m	3 000	3 000	3 000	DREAL	euros/ha
SALICULTURE	<0,5m	1 000	1 000	1 000	DREAL	euros/ha
	0,5-1,5m	1 000	1 000	1 000	DREAL	euros/ha
	>1,5m	1 000	1 000	1 000	DREAL	euros/ha
SIEGE d'EXPLOITATION	<0,5m	0 €	0 €	0 €	RHONE	euros/siège
	0,5-1,5m	15 462 €	15 462 €	15 462 €	RHONE	euros/siège
	>1,5m	22 337 €	22 337 €	22 337 €	RHONE	euros/siège

CAMPINGS

Selon les préconisations de l'Etat :

Domages de 5euros/m² + dommages spécifiques aux mobil homes selon le retour d'expérience.

Retour d'expériences ORB 2006 :

Dans le cadre de l'étude ACB sur L'Orb, réalisée avec le CEMAGREF en 2006, nous avons effectué une enquête auprès des gestionnaires des campings concernés par le risque inondation. Le questionnaire était destiné à bien comprendre la situation des campings et les dommages potentiels qu'ils pourraient subir. Nous avons ainsi recueilli des informations sur l'entreprise (nombre de personnes travaillant dans l'entreprise, chiffre d'affaire etc.). Un volet séparé du questionnaire était adressé aux comptables des campings, afin de disposer d'un certain nombre de données financières. L'ensemble des informations obtenues nous a servi à la construction des courbes de dommages prenant en compte les enjeux structurels des campings, et les pertes d'exploitations.

Il en ressort les dommages directs suivant par emplacement :

h min	h max	Mobil-home
0	50	0 €
50	100	8'000 €
100		12'000 €

Annexe 4B

DOMMAGES PAR TYPE D'ENJEUX, SUBMERSION MARINE

	Xynthia	Xynthia+20cm et crue décennale du Lay
Agriculture	2 192 497	4 487 225
Batiments	18 434 207	41 365 930
Entreprises	1 038 804	1 352 032
Campings	2 956 711	5 268 455
Total	24 622 219	52 473 642

Sensibilité à -20cm et saisonnalité basse pour les cultures

	Xynthia	Xynthia+20cm et crue décennale du Lay
Agriculture	2 192 497	4 487 225
Batiments	29 943 567	61 133 382
Entreprises	1 294 767	1 352 032
Campings	4 524 585	8 463 127
Total	37 955 416	75 435 766

Valeurs de référence

	Xynthia	Xynthia+20cm et crue décennale du Lay
Agriculture	2 192 497	4 487 225
Batiments	46 204 637	87 986 724
Entreprises	1 331 978	1 854 960
Campings	6 275 025	12 359 350
Total	56 004 137	106 688 259

Sensibilité à +20 cm et saisonnalité haute pour les cultures

Annexe 4C

DOMMAGES PAR TYPE D'ENJEUX, ALEA FLUVIAL

	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	500 ans
Agriculture	2 720 836	3 919 239	4 417 078	4 786 398	8 320 943
Batiments	23 604	128 739	284 648	616 927	1 548 754
Entreprises	37 211	75 656	75 656	75 656	75 656
Campings	90 381	251 065	401 378	511 724	1 758 525
TOTAL	2 872 032	4 374 699	5 178 760	5 990 705	11 703 878
Sensibilité à -20cm et saisonnalité basse pour les cultures					
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	500 ans
Agriculture	2 728 524	3 927 560	4 425 505	4 794 868	8 330 002
Batiments	46 400	183 215	370 911	880 808	2 243 512
Entreprises	37 211	75 656	75 656	75 656	75 656
Campings	232 742	435 294	551 428	675 790	3 076 644
TOTAL	3 044 877	4 621 725	5 423 500	6 427 122	13 725 814
Valeurs de référence					
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	500 ans
Agriculture	2 733 975	3 933 163	4 431 259	4 800 695	8 336 588
Batiments	78 348	225 034	465 738	1 092 105	2 785 760
Entreprises	37 211	75 656	75 656	75 656	75 656
Campings	387 895	569 600	708 427	818 693	5 918 956
TOTAL	3 237 429	4 803 453	5 681 080	6 787 149	17 116 960
Sensibilité à + 20cm et saisonnalité haute pour les cultures					

ANNEXE 5 – ANALYSE FONCIERE DES BOUCLES DU LAY

