



HAL
open science

Élaboration d'un plan de prévention des risques littoraux des communes de Saint-Jean-le-Thomas, Dragey-Ronthon et Genêts

Louise Valet

► **To cite this version:**

Louise Valet. Élaboration d'un plan de prévention des risques littoraux des communes de Saint-Jean-le-Thomas, Dragey-Ronthon et Genêts. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2018. dumas-03547156

HAL Id: dumas-03547156

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03547156v1>

Submitted on 28 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Elaboration d'un plan de prévention des risques littoraux (PPRL) sur les communes de Saint-Jean-le-Thomas, Dragey-Ronthon et Genêts



Louise VALET

Promotion ENGEES Paris 2014/2018

Master génie côtier et portuaire, Université de Cantabrie, Espagne, 2017/2018

Mémoire pour l'obtention du double diplôme d'ingénieur de l'ENGEES
et du master de l'Université de Cantabrie

Stage réalisé à SETEC Hydratec Angers du 2 juillet au 28 décembre 2018

Maître de stage : Pierre PETEERS

Référent école : Robert MOSE

REMERCIEMENT

La réalisation de ce travail de fin de master n'aurait pas été possible sans Hydratec Angers. En particulier un grand merci pour m'avoir proposé ce stage, leurs soutiens et des conditions de travail si agréables. Dédicace spéciale à mon tuteur Pierre et mon collègue de bureau et « guide » technique, Antoine. Merci pour ses pointeurs et la confiance qu'il m'a offerte dès mon arrivée.

Et parce que ce mémoire couronne presque six ans d'études supérieur, depuis Tours jusqu'à Santander en passant par Strasbourg, Sydney ou Lima, en français, anglais ou espagnol un grand merci à tous les professeur(e)s et professionnel(le)s, que j'ai rencontré, dont l'envie de partager et la passion pour leurs domaines mon conduite à ce moment.

Péruvien, chilien, espagnol, galicien et engessien... une petite pensée à toutes les âmes charitables qui ont relus ce document ou sa version castillane.

Merci à mon collègue panamien, voisin de liste, camarade de TD, ami du grand Est... pour cette opportunité.

Plus particulièrement, je souhaite remercier les professeurs du master ICP de l'université de Cantabrie et de l'IHCantabria. Ce fut une année très riche, formatrice et durant laquelle j'ai trouvé ma voie. Merci à l'ENGEES et au directeur du master Mauricio Gonzalez Rodriguez pour cette incroyable opportunité.

Elaboration d'un plan de prévention des risques littoraux pour les communes de Saint-Jean-le-Thomas, Dragey-Ronthon et Genêts

Louise VALET

Tuteur: Pierre Peeters

Session: décembre 2018

Résumé

Le lendemain de la tempête Xynthia, en 2010, le gouvernement français a décidé de traiter de façon prioritaire les mesures de prévention de ses côtes en réalisant plus de Plan de Prévention de Risques Littoraux (PPRL). Début 2018, Saint-Jean-le-Thomas, Dragey-Ronthon et Genêts, trois communes situées au Nord-Est de la baie du Mont-Saint-Michel, furent violemment impactés par la tempête Eleanor causant la destruction d'engrochement et le recul de près de 7 mètres de dunes. L'année précédente, SETEC Hydratec remportait l'appel d'offre d'élaboration du PPRL.

La phase 1 de l'étude vise à mieux comprendre le fonctionnement du système afin d'identifier et d'évaluer les sources possibles d'aléas. Les houles dominantes, de type Swell, originaire du secteur Ouest-Nord-Ouest, génèrent une forte érosion des plages et du cordon dunaire à Saint-Jean-le-Thomas. Les sédiments sont transportés jusqu'au Bec d'Andaine où ils s'accumulent, formant une flèche sableuse. Le littoral du PPRL est situé dans un environnement dominé par le régime des houles, et influencé par la dynamique mégatidal de la baie. L'analyse historique a montré qu'aucun événement tempétueux majeur n'a provoqué de submersion ou de franchissement. La concomitance avec des crues des cours d'eau, l'augmentation du niveau des aquifères et de pire conditions océanique pourrait provoquer des inondations en particulier dans les zones dépressionnaire comme le marais de la Claire Douve.

La seconde phase a pour objectif de quantifier les aléas et de délimiter les zones qui y sont exposées, aujourd'hui et dans 100 ans. Il s'agit de quantifier le taux d'érosion moyen actuel afin d'extrapoler la future position du trait de côte ; et d'identifier les zones submergées par un événement marin centennal composé de la marée prédite, la surcote, l'augmentation liée au changement climatique et d'une estimation du set-up. La modélisation de l'aléa submersion est réalisée avec Hydra, un modèle numérique bidimensionnel d'inondation.

Mots clés

Submersion – Erosion – PPRL – Baie du Mont Saint-Michel - Modèle numérique

ABSTRACT

A Coastal Risk Assessment for the municipalities Saint-Jean-le-Thomas, Dragey-Ronthon, and Genêts

Louise VALET

Director: Pierre Peeters

Session: december 2018

Abstract

In the days that followed the wind-storm Xynthia, in 2010, the French government made his priority to keep implementing and improving coastal risk management through a local assessment plan: the PPRL (*Plan de Prévention des Risques Littoraux*). Early 2018, *Saint-Jean-le-Thomas, Dragey-Ronthon, and Genêts*, three municipalities located in the North-East coast of the Mont-Saint-Michel Bay in Normandie, France, were strongly impacted by the storm Eleanor causing a breakwater collapse and an almost seven-meters dune step back. The year before, SETEC Hydratec, an engineering French company, won the tender on the PPRL of this area.

The first stage of this study consists in a better understanding of the system to identify and assess the different sources of hazards that may affect the plan area.

The hydrodynamic, predominant wave (Swells) from the W to NW, generates severe sand beach and dune erosion in *Saint-Jean-le-Thomas*, sediments are drifted until *Bec d'Andaine* localities where they are fixed as sandpits. The PPRL littoral is a wave dominated environment but also influenced by the tidal dynamic of the Bay. An analysis of the past storm events has shown large waves and elevated water associated with severe storms and the peak of the high tide have impacted the PPRL area without submersion or overtopping so far. Combined with important flood discharge, level rising groundwater and stronger oceanic condition, constructions in the shoreline and lower areas as the *Claire Douve* wetland could be threatened by a coastal and fluvial inundation

The second stage consists in quantifying the hazards and estimating the extent of land that could be impacted by these coastal hazards, now and over longer-term planning horizon. This document aims to quantify the erosion by computing the future shoreline position; and to identify areas submerged by the hundred-year return period sea water level, composed of tide, storm surge, global sea level rise and a set-up estimation. The proposed flooding approach uses a numerical bidimensional model, *Hydra*.

Keywords

Coastal Flooding – Erosion – Coastal risk assessment – Mont-Saint-Michel Bay – Numerical model

Elaboración de un plan de prevención de riesgos costeros de los municipios Saint-Jean-le-Thomas, Dragey-Ronthon, y Genêts

Louise V. L. VALET DUBARRY

Director: Pierre Peeters

Convocatoria: diciembre 2018

Resumen

En los días siguientes después del temporal Xynthia ocurrido en 2010, el gobierno francés decide priorizar el desarrollo y la mejora de la evaluación de riesgos a través de los planes de prevención de riesgos costeros PPRL (Plan de Prévention des Risques Littoraux). Al principio del año 2018, Saint-Jean-le-Thomas, Dragey-Ronthon, and Genêts, tres municipios ubicados en la costa Noreste de la bahía del Mont Saint-Michel en Normandía, Francia, fueron muy impactados por la tormenta Eleanor causando el el derrumbe de piezas de las escolleras, y el retroceso de casi siete metros de dunas. La consultoría de ingeniería francesa SETEC Hydratec ganó la licitación para el proyecto.

La primera fase de este estudio consiste en un mejor entendimiento del funcionamiento del sistema para identificar y evaluar las diferentes fuentes de amenaza que podrían impactar en el área del plan. La hidrodinámica de la zona, oleaje (tipo Swells) predominante de Oeste a Noroeste, genera una grave erosión de la arena de las playas y dunas en Saint-Jean-le-Thomas, que produce un transporte de sedimentos hasta la localidad de Bec d'Andaine donde se fijan, como flecha arenosa. La costa del PPRL está dominada por el régimen de oleaje, pero también por la dinámica marco-mareal de la bahía. El análisis de eventos pasados ha demostrado que los grandes oleajes junto con un alto nivel asociado a tormenta durante una pleamar máxima vivan equinocciales impactaron en el área del PPRL sin ningún tipo de sumersión o rebase. La concomitancia con importantes caudales de avenida, un aumento de los niveles de los acuíferos y peores condiciones metoceanico podría suponer la inundación y sumersión de los edificios costeros y las zonas en depresión como la marisma de la Claire Douve.

La segunda fase consiste en la cuantificación de la amenaza y la estimación del área impactada para estos riesgos costeros, ahora y a largo plazo. Los objetivos de este documento son calcular la posición de la futura línea de costa para cuantificar la erosión a largo plazo y determinar áreas sumergida por el nivel marino, asociado a un retorno 100 años, compuesto por la marea astronómica, meteorológica, el aumento del nivel medio debido al cambio climático y de una estimación del set-up . El cálculo propuesto de zona inundada se hace con un modelo numérico bidimensional, Hydra.

Palabras claves

Inundación costera – Erosión – Plan de prevención de riesgos – Mont-Saint-Michel Bahía – Modelo numérico

TABLE DES MATIERES

Remerciement	3
Résumé	4
Abstract	5
Resumen	6
Table des matières	7
Table des illustrations	9
Tables des tableaux	10
Tables des annexes	10
Abréviation	11
Glossaire	11
0 Introduction	12
0.1 Contexte	12
0.2 Déroulement général de l'étude	13
0.3 Inscription du Travail de Fin d'Etudes	14
0.4 Présentation de l'entreprise	15
1 Phase 1 - Analyse du site	16
1.1 Localisation et contexte	16
1.2 Contexte topographique et géologique	17
1.3 Recueil des phénomènes météo-marins	18
1.3.1 Températures et précipitations	18
1.3.2 Vents	18
1.3.3 Houles	19
1.3.4 de la totalité du fetch. Variations du niveau des eaux : marées et surcotes	23
1.3.5 Courantologie	28
1.4 Hydrogéologie	30
1.4.1 Contexte	30
1.4.2 Remontée de nappe a Bréville-sur-mer	30
1.4.3 Dans la zone d'étude	31
1.5 Hydrologie	32
1.5.1 Le Ru du moulin	32
1.5.2 Marais de la claire douve	33
1.5.3 Le Lerre	36

1.6	Analyse du transit sédimentaire _____	36
1.7	Analyse historique _____	39
1.7.1	Analyse du littoral _____	39
1.7.2	Analyse du trait de cote _____	40
1.7.3	Débordements des cours d'eau _____	43
1.7.4	Chronologie des évènements tempétueux _____	45
1.8	Conclusion phase 1 _____	46
2	Phase 2 – Caractérisation des aléas _____	47
2.1	Qualification du recul du trait de cote _____	47
2.1.1	Méthodologie _____	47
2.1.1	Résultats _____	48
2.2	Qualification de l'aléa submersion marine _____	49
2.2.1	Définition de l'évènement de référence _____	49
2.2.2	Qualification de l'aléa de submersion marine _____	55
2.2.3	Scénarios étudiés _____	58
2.2.4	Caractérisation de l'aléa _____	59
2.2.5	Résultats _____	59
3	Conclusions et perspectives _____	61
3.1	Conclusion _____	61
3.2	Perspectives _____	62
	Bibliographie _____	63
	ANNEXES _____	65

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Dégâts à Saint-Jean-le-Thomas suite à la tempête Eleanor 03/01/2018 (source: Hydratec)	13
Figure 2 : Chronogramme du PPRL	14
Figure 3 : Localisation de la zone d'étude du PPRL	16
Figure 4 Périmètre de la zone d'étude	17
Figure 5 : Schéma géologique de la partie continentale de la baie du Mont Saint-Michel et de la vallée de la Rance (COURTOIS, CALINE, L'HOMER, & VOT, 2002)	17
Figure 6 : Rose de vent annuel, en mer, par 49°N et 3°5W (MétéoFrance, 2007)	19
Figure 7: Résultats de l'analyse statistiques des hauteurs significatives des houles extrêmes à la bouée « Les Minquiers 2 » (Source : CANDHIS)	20
Figure 8 : Localisation des points de données ANEMOC - COAST 2464 et CANDHIS – Les Minquiers 2	21
Figure 9 : Calibration du modèle de propagation pour la tempête Martin (1999)	22
Figure 10 : Distribution empirique des hauteurs de pleine mer prédites (SHOM) au Mont-Saint-Michel	25
Figure 11 : Carte de niveaux extrêmes de pleines mer (période de retour 100 ans) (CETMEF/SHOM, Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique), 2012)	27
Figure 12 : Circulation moyenne en Manche (SHOM & IFREMER, Courantologie Manche - Mer du Nord, juin 2012)	29
Figure 13 : Trajectoire, intensité et orientation des courants de marée en baie du Mont-Saint Michel. Les trajectoires correspondent aux courants de flot 3 heures après la basse mer par coefficient de 102. Les roses de courant sont issues principalement d'études réalisées dans la baie par EDF (1953) et le LCHF (1978). Modifié d'après L'Homer et al. (1999) et Bonnot-Courtois et al. (2002).	30
Figure 14 : Profondeur de la nappe phréatique en période de très hautes eaux à Saint-Jean-le-Thomas	31
Figure 15 : Ouvrages hydrauliques le long des cours d'eau (sources : visite de terrain et SMBCG, 2018)	32
Figure 16 : Porte à flot en aval du Pont Neuf (Source: visite terrain 09/02/2018)	35
Figure 17 : Carte géologique simplifiée et distribution des sédiments superficiels de la baie du Mont Saint-Michel. Modifié d'après Tessier et al. (2006)	37
Figure 18: Divagation de la Sée-Sélune [1947-1970] (Manche, 2002)	38
Figure 19 : Fonctionnement hydrosédimentaire de la zone d'étude	39
Figure 20 : Carte postale de 1950 : Le trait de côte est naturel, pas d'ouvrage longitudinale ou transversal, et peu d'urbanisation. Les plages sont occupées par de nombreux touristes et chargées en sable. Des cabines de plages se situent au niveau de la plage du Pignochet et du camping.	40
Figure 21 : Photo prise lors de la visite de terrain en février 2018 : Le trait de côte fixé au nord de Saint-Jean-le-Thomas et naturel à partir des enrochements de la plage du Pignochet	41
Figure 22 : Station de mesures du CREC de l'université de Caen (UNICAEN, 2018)	41
Figure 23 : Marais de la Bunelle à Saint-Jean-le-Thomas en janvier 2018 (source SMBCG)	43
Figure 24 : Vu aérienne du marais de la claire douve inondée depuis le Bec d'Andaine (Source : SMBCG, 2015)	44
Figure 25 : Exutoire du Lerre à Genêts (SMBCG, février 2015)	45
Figure 26 : Schéma explicatif des conséquences d'un ouvrage longitudinal sur la dynamique sédimentaire	48
Figure 27 : Localisation du point de mesure de la Chapelle Saint-Aubert	50
Figure 28: Courbe d'ajustement selon une loi de Frechet des surcotes de pleine mer avec un seuil de tempête défini à 0,5 m et une durée de tempête de 72h et en traitant la valeur de 1,81 comme un horsain (point bleu)	51
Figure 29: Plan des vagues de secteur Ouest en baie du Mont Saint-Michel (BONNOT, 2012)	53
Figure 30 : Chronique de [a]niveau marin reconstitué (m IGN69) et [b] hydrogrammes des rivières principales	57
Figure 31: Bande de sécurité forfaitaire derrière un ouvrage	58
Figure 32 : Exemple de la modélisation d'une brèche (t = 9h)	59
Figure 33 : Comparaison des aires inondées par niveau d'aléa et scénarii modélisés	60

TABLES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Occurrence des houles au point ANEMOC 2646.....	21
Tableau 2 : Statistiques de calibration du modèle de propagation de houle D-WAVE	22
Tableau 3 : Niveaux caractéristiques des marées à Granville, Saint-Malo et au Mont Saint-Michel(en m) (SHOM, 2017)	24
Tableau 4 : Estimation des surcotes extrêmes au port de Saint-Malo	26
Tableau 5 : Niveaux extrêmes issus de l'étude de 2012 en m IGN 69 pour différentes périodes de retour	27
Tableau 6 : Niveaux extrêmes de pleine mer (en m IGN 69) pour différentes périodes de retour à la suite de l'étude du SHOM-CETMEF de 2012 (CETMEF/SHOM, Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique), 2012)	27
Tableau 7 : Apports hydrologiques des STEU (source : SATESE de la Manche, SMBCG)	34
Tableau 8 : Caractéristiques des tempêtes majeurs ayant impactées la zone d'étude	46
Tableau 9 : Surcotes de pleine mer maximales annuelles observées à Saint Malo et estimées au Mont Saint Michel (calculé par comparaison du niveau maximum mesuré au niveau prédit par le SHOM)	51
Tableau 10: Niveaux extrêmes en m IGN69 et m CM d'un évènement de période de retour 100 ans en Baie du Mont Saint-Michel issus de la convolution marée prédite (SHOM) et surcote de pleine mer	52
Tableau 11 : Facteur de dépendance recommandée pour la Manche	53
Tableau 12 : Coefficients de rugosité (Strickler) testés	58
Tableau 13 : Qualification de l'aléa submersion marine	59

TABLES DES ANNEXES

Annexe 1: Diagnostic du site d'étude	66
Annexe 2 : Modèle de propagation de houle - hauteur de houle significative - Eleanor 03/01/2018 à 7h.....	67
Annexe 3 : Exemple de Fiche ouvrage – Porte à flot	68
Annexe 4 : Ouvrages côtiers et structure du trait de côte du domaine d'étude (source : visite de terrain 2018 et SMBCG)	69
Annexe 4 : Exemple de fiche tempête – LOTHAR et MARTIN (1999).....	70
Annexe 5 : Recul moyen annuel et prédiction du trait de côte à l'horizon 2100	71
Annexe 6 : Modèle numérique de submersion marine HYDRA.....	72
Annexe 7 : Zones sous le niveau marin centennal de référence	73
Annexe 8 : Analyse de sensibilité du coefficient de rugosité du maillage 2D du modèle HYDRA en différent point	74
Annexe 9 : Scenario 1 - Niveau centennale de référence + faille vanne + débordement	75
Annexe 10 : Scenario 2 – Niveau centennal de référence + débordement + brèche + faille vanne	76
Annexe 11 : Scenario 3 – Niveau à l'horizon 2100 + débordement + faille vanne.....	77
Annexe 12 : Scenario 4 – Niveau à l'horizon 2100 + débordement + faille vanne + brèche	78

ABREVIATION

ANEMOC : Atlas Numérique d'Etats de mer Océaniques et Côtiers

CANDHIS : Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ

CETMEF : Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales

DGPR : Direction générale de la prévention des risques.

DDTM : Direction Départementale des Territoires et de la Mer

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

RAM : Références altimétriques maritimes

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

SMBCG : Syndicat Mixte des Bassins versants des Côtiers Granvillais

GLOSSAIRE

Courant de flot : le courant portant entre une basse mer et une pleine mer successive, lors du montant des eaux.

Courant de jusant : le courant portant entre une pleine mer et une basse mer successive, lors du perdant des eaux.

Estran : Bande côtière comprise entre les niveaux atteints par les plus hautes mers et les plus basses mers.

Houle : agitation de la surface de l'eau, comportant une crête régulière qui se propage à peu près dans la même direction que les autres.

Marée semi-diurne : deux pleines mers et deux basses mers par jour ; les composantes diurnes sont négligeables.

Saros : période de 6585,3211 jours, au terme de cette période, la Lune, le Soleil, le noeud de l'orbite lunaire et le périgée lunaire se trouvent à peu près dans la même situation relative.

Set-up : Après le déferlement des vagues, il y a diminution de la quantité de mouvement (variation de la contrainte de radiation) des vagues compensée par une augmentation du niveau d'eau. Le niveau d'eau peut alors passer au-dessus de son niveau de départ (wave set-up).

Zéro carte marine ou CM : encore appelé zéro hydrographique référence commune aux cartes marines et aux annuaires de marée à l'usage des navigateurs.

0 INTRODUCTION

0.1 CONTEXTE

Lieu de développement économique, urbanistique ou encore récréatif, le littoral concentre les pressions sur un territoire restreint. Parallèlement, il est soumis à des phénomènes naturels tels que le recul du trait de côte, la submersion marine ou l'érosion des dunes qui en font un espace en mouvements constants générant dangers et fragilités. Etendues sur près de 7500 km, les côtes françaises, ultramarines et métropolitaines, sont particulièrement exposées aux risques littoraux. En 2017, 1,4 millions de personnes et plus de 800 000 emplois étaient exposés au risque de submersion en France métropolitaine.

Afin de limiter la vulnérabilité des biens et des personnes, des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) sont élaborés. Les effets de la tempête Xynthia de février 2010, l'évènement climatique le plus destructeur depuis des décennies en France métropolitaine, ont révélé l'importance de poursuivre et de développer la mise en œuvre d'une politique de prévention des risques littoraux.

En 2011, 303 communes ont été identifiées comme nécessitant un plan de prévention des risques littoraux, justifiant la mise en place en priorité d'un PPRL sur leurs territoires. En 2017, 138 étaient approuvés, 132 en élaboration et 33 étaient encore à mettre en place.

Les plans de préventions des risques naturels prévisibles sont régis par les articles L 562-1 à L562-9 du Code de l'environnement. Le décret n°95 1089, modifié par les décrets n°2005-3 du 4 janvier 2005, n°2007-1467 du 16 octobre 2007 et la loi n°2010-788 du 12 juillet 2010, précise les procédures et dispositions relatives à l'élaboration des plans de préventions des risques naturels prévisibles

Le PPRL se focalise par définition sur les risques NATURELS et LITTORAUX, soient les risques d'érosion, de migration dunaire, de submersion ou d'inondation.

Les objectifs d'un PPRL sont, entre autres, les suivants :

- Délimiter les zones exposées aux risques, en prenant en compte la nature et l'intensité du risque encouru, d'y interdire ou prescrire les conditions de constructions/exploitation de tout type de construction, d'ouvrage, d'aménagement ou d'exploitation ;
- Délimiter les zones qui ne sont pas directement exposées aux risques mais où des ouvrages pourraient aggraver des risques ou en provoquer de nouveaux ;
- Etablir les mesures de prévention, de protection ou de sauvegarde à prendre par les collectivités territoriales ou les particuliers ;
- Etablir des mesures relatives à l'aménagement ou à l'usage des structures préexistantes à la date de probation du PPRL.

0.2 DEROULEMENT GENERAL DE L'ETUDE

Le 14 février 2017, un décret de l'administration prescrivant l'élaboration d'un PPRL pour les communes de Saint-Jean-de-Thomas, Dragey-Ronthon et de Genêts est adopté. Bien que n'étant pas considéré comme des communes présentant des risques côtiers prioritaires (Ministère de l'environnement, 2017), ces trois communes nécessitaient un PPRL comme le démontre les conséquences de la tempête Eleanor du début janvier 2018 (Figure 1).



Figure 1 : Dégâts à Saint-Jean-le-Thomas suite à la tempête Eleanor 03/01/2018 (source: Hydratec)
[1][3] Effondrement des murs de soutènements de la Villa des Dunes ; [2] Recul de la dune ; [4]
Destruction de l'énrochement de la plage Saint-Michel.

SETEC Hydratec remporte l'appel d'offre d'élaboration d'un « Plan de Prévention des Risques Littoraux pour les communes de Saint-Jean-le-Thomas, Dragey-Ronthon et Genêts » en groupement avec SEPIA Conseils et l'Atelier de l'Ile.

La figure suivante présente le calendrier prévisionnel de l'élaboration du PPRL du début de l'étude en mai 2018 jusqu'à sa finalisation à l'été 2020. La durée de l'étude pourra se voir prolonger jusqu'à six mois si les tranches optionnelles sont activées. Hydratec se charge des deux premières phases du projet, soient l'analyse du site et la caractérisation de l'aléa, les autres phases sont prises en charge par SEPIA Conseils et l'Atelier de l'Ile.

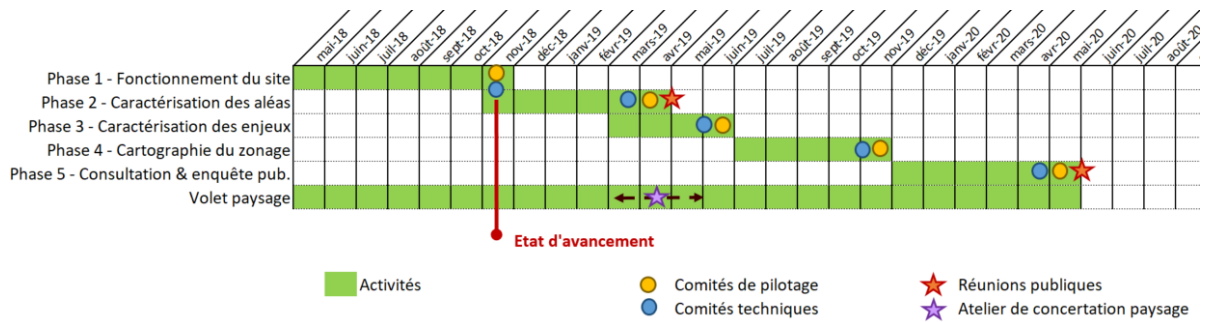


Figure 2 : Chronogramme du PPRL

0.3 INSCRIPTION DU TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES

Dans le cadre du travail de fin d'étude, ce mémoire va se concentrer sur les tronçons fermes du projet mené par le bureau d'études SETEC Hydratec, dans lequel j'effectue mon stage, en accord avec le calendrier prévisionnel du PPRL. Soit :

- Phase 1 : Analyse du fonctionnement du site à travers une synthèse bibliographique, des données mise à disposition par le maître d'ouvrage, des visites de terrains et des rencontres avec les interlocuteurs locaux. Cette étape préalable permet de connaître :
 - Les phénomènes naturels intervenant dans le périmètre de la zone d'étude ;
 - Les événements historiques et leurs éventuelles conséquences ;
 - La description du trait de côte et des ouvrages de protection contre les inondations ;
 - L'analyse hydraulique du site.

Une meilleure compréhension du système permettra de choisir les hypothèses et la méthode de travail les plus adaptées pour la suite de l'étude.

- Phase 2 : Caractérisation des aléas selon le guide méthodologique du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, et du Cahier des Clauses Techniques Particulières. La phase 2 consiste à :
 - Définir l'évènement de référence ;
 - Caractériser l'aléa du recul du trait de côte et de la migration dunaire ;
 - Caractériser l'aléa inondation par submersion marine.

La phase 2 venant juste de commencer, des premiers éléments seront présentés dans ce rapport, cependant ceux-ci n'ont pas encore été présentés, ni validés, par le comité technique.

La méthodologie suivie pour l'élaboration d'un PPRL repose sur les recommandations et directives décrites dans la circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux, sur le guide méthodologique relatif au plan de prévention des risques littoraux réalisé sous maîtrise d'ouvrage de la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) (DGPR, mai 2014) et sur le guide Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisible (Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR), 2016).

0.4 PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

SETEC, groupe d'ingénierie pluridisciplinaire française fondée en 1957, présente en France et à l'étranger, dans lequel plus de 2400 employés réalisent des projets de construction dans le monde entier. Complètement indépendant, son capital est détenu par ses dirigeants et ses ingénieurs depuis sa création. Le groupe est organisé en filiale thématique et répartie sur le territoire, dont SETEC Hydratec. Spécialisée dans le domaine de l'hydraulique, elle réunit plus de 150 collaborateurs intervenant sur l'ensemble des sujets attrayant à l'ingénierie de l'eau et des milieux aquatiques : fluvial, urbain, assainissement, traitement, côtier ...

L'agence d'Angers, réunissant 15 collaborateurs, propose une expertise dans le domaine du maritime et du côtier. Elle dispose des compétences dans l'évaluation des risques côtiers, la gestion du trait de côte, le transport sédimentaire, et la conception des ouvrages de protection.

SETEC Hydratec en tant que maître d'œuvre d'ouvrages de protection et de lutte contre les inondations est autorisé, par l'Etat à travers le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, à mener des missions de diagnostic, d'étude, de maîtrise d'œuvre de digues ou de barrage de n'importe quelle hauteur.

1 PHASE 1 - ANALYSE DU SITE

1.1 LOCALISATION ET CONTEXTE

Le domaine d'étude se situe au Nord-Est de la Baie du Mont-Saint-Michel et au Sud-Ouest du département de la Manche, Normandie, entre les villes de Granville, au Nord, et d'Avranches, au Sud.



Figure 3 : Localisation de la zone d'étude du PPRL

Il s'étend sur les communes de Saint-Jean-le-Thomas, Dragey-Ronthon et Genêts. Toutes trois sont intégrées à la Communauté d'Agglomération Mont-Saint-Michel-Normandie depuis le 1er janvier 2017, au sein du Pôle territorial d'Avranches, et adhèrent au Syndicat Mixte des Bassins versants des Côtiers Granvillais (SMBCG).

Ces communes sont situées dans la baie du Mont-Saint-Michel, classée au Patrimoine mondial de l'UNESCO. Le domaine d'étude s'étend sur 6,8 kilomètres de linéaire côtier dont 2 km appartenant à la commune de Saint-Jean-le-Thomas, 3 km à Dragey-Ronthon et 4,8 km à la commune de Genêts.

Le domaine d'étude comprend le système dunaire entre les falaises rocheuses de Champeaux, au Nord de Saint-Jean-le-Thomas, jusqu'au Bec d'Andaine sur la commune de Genêts, à la limite du domaine estuarien de la Baie du Mont-Saint-Michel. Il se prolonge plus au Sud, jusqu'en limite de commune de Genêts. Le cordon dunaire protège une zone dépressionnaire occupée par le marais arrière littoral de la Claire Douve.

L'Annexe 1 présente et situe les différents éléments caractéristiques du territoire d'étude.

La population est en augmentation à l'échelle du territoire du PPRL notamment grâce au dynamisme démographique de Dragey-Ronthon (+ 15% entre 1998 et 2015, INSEE). La population en 2015 sur l'ensemble du territoire était de 1671 habitants (INSEE) sur une superficie de 2444 ha environ (Géoportail). Il s'agit d'un territoire balnéaire dont l'économie repose principalement sur l'activité saisonnière touristique et l'élevage de chevaux.



Figure 4 Périmètre de la zone d'étude

1.2 CONTEXTE TOPOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

La figure ci-après présente le Schéma géologique de la partie continentale de la baie du Mont Saint-Michel et de la vallée de la Rance.

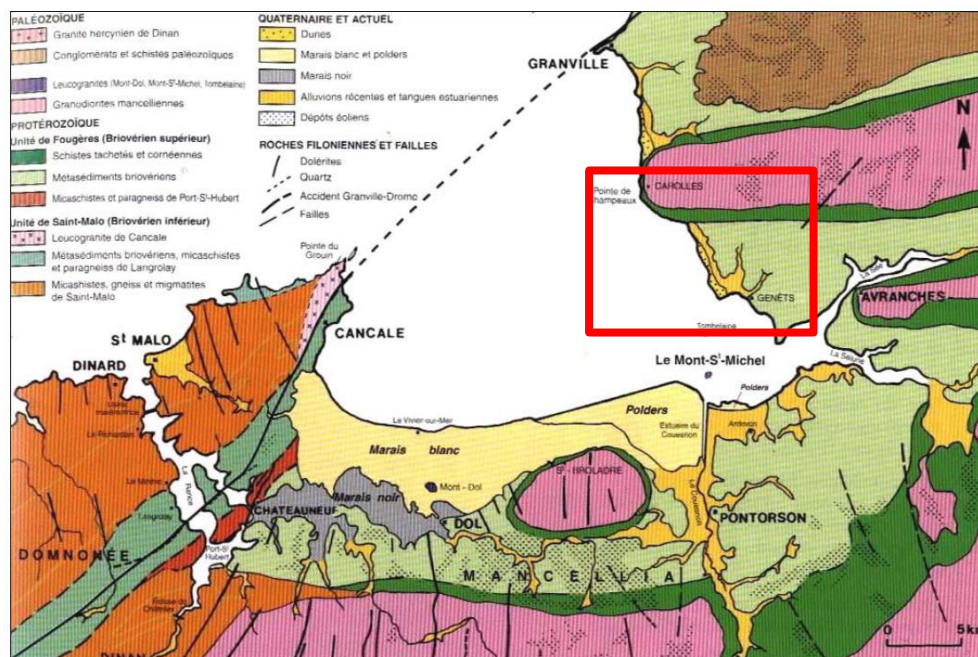


Figure 5 : Schéma géologique de la partie continentale de la baie du Mont Saint-Michel et de la vallée de la Rance (COURTOIS, CALINE, L'HOMER, & VOT, 2002)

Le domaine d'étude est limité au Nord par Saint-Jean-le-Thomas et les falaises rocheuses de Champeaux (+90m IGN69) du massif de Carolles qui sont constitués de granodiorites ceinturés par une auréole de métamorphisme (Tessier, 2003 d'après Larsonneur, 1989 ; L'Homer et al., 1999).

Au sud, le sol est principalement constitué de sables biolithoclastiques sur des plages et dunes à faciès de houle, reposant sur des vestiges de tangles à faciès de schorre et slikke (-1050 AA) et sur un ancien niveau marécageux avec arbustes (L'HOMER, 1999), daté à environ -1700 AA. Les dunes de la zone sont principalement composées de sables à 60% détritiques. Ils sont essentiellement éoliens et la construction des dunes pourrait avoir débuté dès le XIIIe siècle.

L'entre deux se situe dans un contexte de plaine littorale bordée à l'Ouest par un cordon dunaire plus ou moins développé. Ce système protège une zone de marais rétro-littoral traversé par le Ru du Moulin au Nord et la Claire Douve du Nord au Sud. La zone est en dépression (point bas situé à +5 m IGN 69) puis la topographie augmente en direction de l'Est. Ce vaste espace de zone humide est artificiellement isolé des intrusions marines par la présence d'une digue (crête altimétrique comprise entre 8 et 9 m IGN69) et d'une vanne à crémaillère au Sud du marais, au lieu-dit « Les-Corvées ».

Les faciès littoraux rencontrés sont de type plage avec des sables moyens à débris coquillers, et des dunes constituées de sables fin à moyens. L'estran est fait de sables, de graviers parfois, de vases et de tangles, sillonné par les chenaux de marée qui prolongent vers le large les chenaux des rivières (ELHAI, 1967).

1.3 RECUEIL DES PHENOMENES METEO-MARINS

1.3.1 Températures et précipitations

Le littoral entre Saint-Jean-le-Thomas et Genêts est caractérisé par un climat océanique, tempéré humide sans grande variation thermique. La température moyenne annuelle est de 11,5°C. Elle varie de 17,9°C en août à une température moyenne de 5,6°C en janvier, mois le plus froid de l'année.

Les précipitations annuelles varient entre 700 et 800 mm par an, avec une moyenne de 742 mm/an. La pluviométrie est répartie tout le long de l'année avec des maximums mensuels d'octobre à décembre. La variation des précipitations entre le mois le plus sec, août, et le mois le plus humide, octobre, est de 40mm. Le nombre de jours de pluie est de l'ordre de 130 à 136 jours par an, supérieur à la moyenne nationale.

1.3.2 Vents

Le vent influe notamment dans la génération des houles et des courants, la création de surcotes et de décotes marégraphiques, le transport éolien des sédiments sur l'estran et dans les dunes.

Le vent est un facteur d'agitation non négligeable dans le secteur occidental de la baie relativement abritée des houles du large, principalement lors des tempêtes hivernales. Les vents de secteur Nord-Est à Nord-Ouest sont les plus efficaces pour générer une forte agitation dans la baie.

La circulation des centres dépressionnaires du nord de l'Atlantique à la mer du Nord génère sur la Baie du Mont-Saint-Michel un régime de vent dominant de secteur sud-ouest à ouest.

Des brises côtières se déclenchent du printemps au début de l'automne. Elles renforcent temporairement le vent.

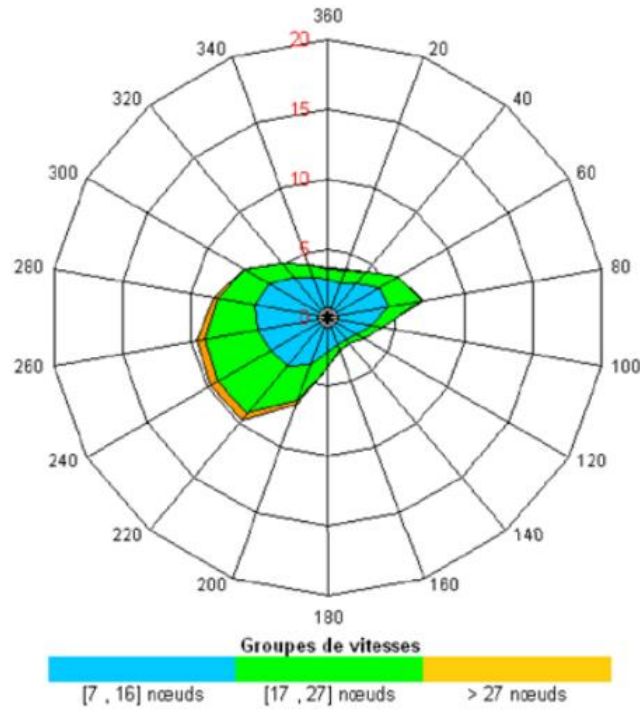


Figure 6 : Rose de vent annuel, en mer, par 49°N et 3°5W (MétéoFrance, 2007)

Au large, où les vents génèrent les houles, les vents de 7 B (28 à 33 nœuds) se rencontrent le plus souvent en hiver avec des fréquences souvent supérieures à 10 %. La fréquence chute en dessous de 5 % l'été.

Dans sa thèse (WEILL, 2010), Weill a extrait le nombre de tempêtes par an en conjonction avec des coefficients de marée supérieurs à 90. Entre 1950 et 2000, le nombre de tempêtes par an a augmenté. La répartition de ces événements montre une périodicité, sûrement corrélée aux indices de la NAO (Oscillation Nord Atlantique) qui joue un rôle majeur dans la fréquence des vents d'Ouest.

1.3.3 Houles

Les houles, par l'énergie qu'elles dissipent à l'approche des côtes, sont responsables des processus de transit sédimentaire. Elles provoquent dans la zone de déferlement des courants parallèles à la côte dont l'intensité dépend de leurs obliquités vis à vis de l'orientation du rivage. Elles sont à l'origine des évolutions des profils de plage et des fonds pouvant entraîner l'érosion du littoral.

Houles aux larges

Il existe deux types de houles que sont les houles du large (ou *swell* en anglais) créées par des dépressions à plusieurs milliers de kilomètres de la côte avec des périodes longues et qui se propagent ensuite sous forme d'onde, et le clapot ou mer de vent aux périodes plus courtes généré par le vent localement. Leurs caractéristiques (longueur d'onde, hauteur, période, célérité)

dépendent de la vitesse du vent, de la durée pendant laquelle il souffle et de l'étendue d'eau qu'il affecte.

Les hauteurs moyennes des vagues les plus élevées s'observent en entrée de Manche en janvier (3,2 à 3,4 mètres) et en juillet (1 à 1,20 mètre). La direction privilégiée de la houle est l'ouest avec des hauteurs moyennes de 0,50 à 1,25 mètre, les hauteurs moyennes de houle augmentent en allant vers l'océan Atlantique. L'hiver de grandes houles d'ouest venues de l'Atlantique dépassent fréquemment les 3 mètres. (Météo France, 2012)

A l'approche des côtes normandes, l'agitation est fortement freinée, malgré la force du vent, par la diffraction sur les bancs et les hauts-fonds et par la protection des côtes du cotentin à l'Est et des îles Anglo- Normandes au Nord et Nord-Ouest, et des côtes bretonnes à l'Ouest.

Les deux points de données suivants sont disponibles :

- Bouée « Les Minquiers2 » CANDHIS :

Au large de Saint-Malo, la bouée 02202 « Les Minquiers2 », de CANDHIS, a mesuré des houles du 20/08/1997 au 16/05/2009. L'ajustement statistique des extrêmes donnent les résultats suivants

Niveaux de retour

Période de retour	$H_{1/3}$ (mètres)		Int. de Conf. 70% (mètres)	
	GPD	Loi Exp.	GPD	Loi Exp.
5 ans	5,25	5,32	4,87 à 5,51	5,05 à 5,62
10 ans	5,57	5,69	5,05 à 5,93	5,37 à 6,04
20 ans	5,87	6,06	5,19 à 6,37	5,68 à 6,46

Figure 7: Résultats de l'analyse statistiques des hauteurs significatives des houles extrêmes à la bouée « Les Minquiers 2 » (Source : CANDHIS)

- Point Hindcast COAST_2646 ANEMOC :

Le point de la base de données ANEMOC le plus proche de la zone d'étude est le point COAST_2646. Il est situé au large de Saint-Malo (48°47,10'N ; 2°9,72'W) à une hauteur d'eau de 28,60m.

Les résultats obtenus au point COAST-2646 sont issus de simulations numériques rétrospectives (Hindcast) sur une période de 23 ans et 8 mois, du 01/01/1979 au 31/08/2002, avec un pas de temps de 6h, pour la façade Atlantique, Manche, Mer du Nord.

Au large de Saint Malo, les houles dominantes sont de secteur Nord-Ouest avec des hauteurs significatives inférieures à 2 mètres dans 90 % des cas et en moyenne une période de pic de 9/10 secondes. (Source : ANEMOC, point 2646).

L'ajustement statistique des pics de tempête suit une loi de Pareto et donne les résultats suivants :

Tableau 1 : Occurrence des houles au point ANEMOC 2646

Niveaux de retour			
Périodes de retour	Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 70% de Hm0 (en m)	Estimation ponctuelle de Hm0 (en m)	Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70% de Hm0 (en m)
1 an	3,94	4,04	4,14
10 ans	4,84	5,04	5,23
30 ans	5,11	5,40	5,69
50 ans	5,20	5,55	5,89
100 ans	5,30	5,73	6,16

La localisation des deux points, cf *Annexe 2*, n'étant pas exactement les mêmes, les estimations des hauteurs significatives diffèrent mais reste du même ordre de grandeur.



Figure 8 : Localisation des points de données ANEMOC - COAST 2646 et CANDHIS – Les Minquiers 2

Bien que plus proche de la zone d'étude (48°53,550'N ; 2°26,580'W), les résultats obtenus à la bouée des Minquiers 2 ne seront pas utilisés. Les résultats de l'analyse statique reposent sur trop peu de données, les mesures se font de manière discontinue et représente moins de sept ans de données.

Les conditions de houle au point ANEMOC COAST_2646 seront considérées comme celles au large du site d'étude.

Houle à proximité des côtes

En se propageant des eaux profondes jusqu'à la côte, la houle est soumise aux phénomènes de réfraction, diffraction, déferlement et dissipation d'énergie au contact des hauts fonds marins. Pour caractériser correctement la houle dans la zone d'étude, une étude de propagation est nécessaire. La construction d'un modèle houle ne faisant pas partie d'une tranche ferme du marché, seules les quatre événements tempétueux ayant entraîné des dégâts sur le territoire d'étude sont modélisés (cf. chapitre 1.7.4).

Le logiciel DELFT3D-Wave, développé par l'université de Delft (TU Delft, Pays-Bas) permet de propager la houle jusqu'à la côte en prenant en compte les principaux phénomènes physiques

mentionnés précédemment. Il utilise le code de calcul SWAN (SimulationWaves Nearshore), modèle de houle spectrale de troisième génération, avec lequel sont calculées les caractéristiques de la houle en eau peu profonde, ainsi que l'élévation du niveau marin provoqué par le déferlement de la houle en milieu côtier (wave-setup). Le wave-setup est un facteur de risque supplémentaire pour la submersion des zones arrière-littorale.

Le modèle est représenté par trois niveaux de grilles emboîtées : une grille générale de 221x232 mailles de résolution 500 m, d'une grille intermédiaire de 435x195 maille de 100 mètres de côté et une grille fine de 176x248 maille de 25 m de côté centrée sur la zone d'étude. La bathymétrie est extrapolée du Modèle Numérique de Terrain (MNT) en eaux profonde (fournie par le SHOM) à une résolution 100m et du lidar pour les zones côtières. Les points de forçage du modèles sont situés aux frontières Nord et Ouest du domaine (N-W20N5000, N-W25N5000, N-W30N5000, N-W30N4950, et N-W30N4050) et sont fournis par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) et générés par le modèle numérique WWIII (WaveWatch III).

Le domaine étant très grand, le vent joue un rôle non négligeable dans la propagation de la houle. Le vent est ainsi considéré homogène dans la baie et est caractérisé par les vitesses et directions mesurés à Ploumac'h (22). Les niveaux marins sont issus de la base de données Marc IFREMER, issue du modèle MARS2D.

Le modèle de houle est calibré (**Tableau 2**) avec les hauteurs de houles mesurées à la bouée des Minquiers2 dont les séries temporelles sont disponibles (au contraire de la bouée ANEMOC mentionnée précédemment) pour plusieurs événements tempétueux (exemple de la tempête Martin (1999) en **Figure 9**) avec les résultats suivants :

Tableau 2 : Statistiques de calibration du modèle de propagation de houle D-WAVE

Paramètre	Déviaton moyenne	RSE	R ²
Hauteur significative Hs	6,2 %	0,346 m	0,89
Direction principale θ	3,9 %	5,221 °	X
Période de pic Tp	6,0 %	1,211 s	X

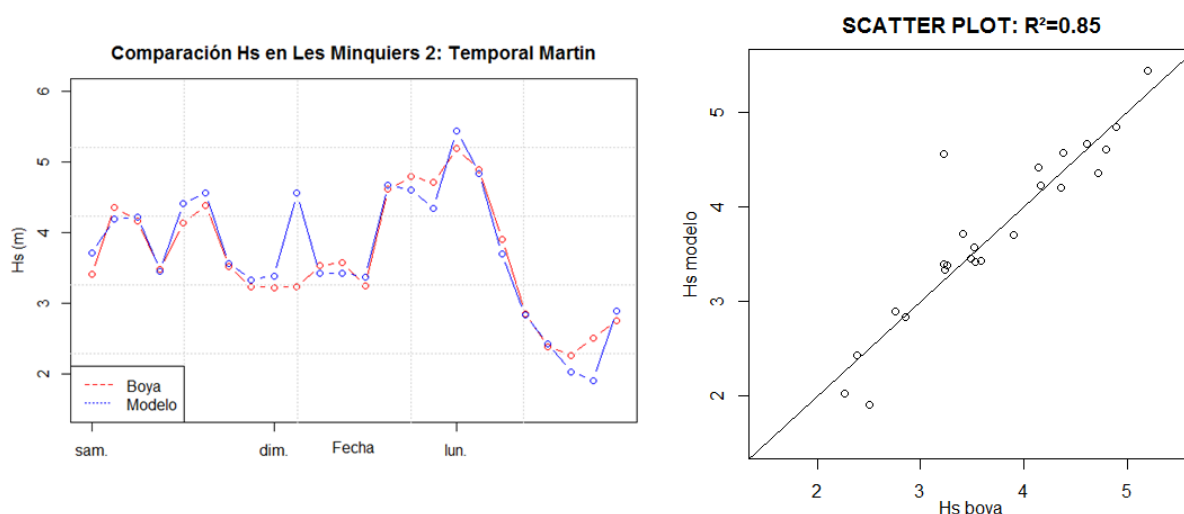


Figure 9 : Calibration du modèle de propagation pour la tempête Martin (1999)

Le modèle calibré permet d'examiner les résultats au niveau du domaine d'étude. L'ordre de grandeur des résultats modélisés est validé avec les résultats de la base de données Marc IFREMER qui présente une résolution de 25 centimètres sur la hauteur significative et du km en résolution spatiale.

La tempête Eleanor ayant entraîné le plus de dégâts et présentant les hauteurs de houle les plus importantes, ce sont les résultats (cf *Annexe 2*) correspondant au pic de la tempête associé qui sont présentés, lorsque les hauteurs de houles sont les plus importantes, i.e. le 03/01/2018 à 7h00.

Au droit de Saint-Jean-le-Thomas, la houle provient de l'Ouest (265°) avec une hauteur significative de 1,96 m à 2,02 m au droit de la villa des Dunes (cf. les dégâts en *Figure 1*) avant de déferler. Au niveau du Bec d'Andaine, la houle vient du Nord-Ouest (300°), avec un angle d'incidence presque parallèle à la plage, avec une hauteur significative de 1,50m. L'angle d'incidence de la houle participe à la dérive littorale, du Nord-Ouest vers le Sud-Est. A Genêts, les hauteurs sont très faibles, inférieures à 0,5 m. Ces résultats sont présentés dans l'*Annexe 2*.

Les endroits les plus impactés sont donc le Nord de Saint-Jean-le-Thomas, au Nord des enrochements Pignochet, le cordon dunaire au niveau de Dragey-Ronthon et la pointe sableuse du Bec d'Andaine, soient les endroits les plus sensibles à l'érosion.

L'utilisation d'un modèle aussi large est adaptée pour la propagation d'un événement donné, mais pas pour la propagation des extrêmes à cause de l'importance du vent. Les points de forçages sont au minimum à 115 km de la zone d'étude, le fetch n'est pas négligeable. Il faudrait dans l'idéal, un point à l'entrée de la baie du Mont Saint Michel afin que les statistiques tiennent compte de l'influence :

- des caps (côte Nord Bretagne) ;
- des îles (Jersey, Guernsey et Chausey) ;

1.3.4 de la totalité du fetch. Variations du niveau des eaux : marées et surcotes

Les fluctuations du niveau de la mer sont liées aux facteurs astronomiques (Soleil, Lune..) et climatiques (pression..). Elles constituent un élément essentiel de la dynamique littorale car :

- elles créent des courants de marée qui peuvent transporter des matériaux, notamment lorsque ces variations de hauteur d'eau sont combinées avec d'autres facteurs tels que la houle et le vent ;
- elles tendent à amplifier les effets des tempêtes lors des forts coefficients de marée.

Les marées

La marée prédite est un mouvement oscillatoire du niveau de la mer dû aux effets de l'attraction de la Lune et du Soleil sur les particules liquides. Dans la Manche, elle est essentiellement de type semi diurne, deux cycles tidaux de période 12h25 environ. Dans le golf Normand-Breton, les marnages peuvent atteindre 15 mètres en vives eaux d'équinoxe dans la baie du Mont-Saint-Michel.

En pénétrant dans la Manche, l'onde de marée est amplifiée vers l'Est et réfléchi par la presqu'île du Cotentin, provoquant un effet de stationnarité qui accroît fortement l'amplitude de la marée. L'onde

de marée en baie du Mont-Saint-Michel est asymétrique : le flot est plus court et plus puissant que le jusant, et les vitesses maximales sont enregistrées au milieu du flot et du jusant.

Les courants de marées (SHOM & IFREMER, Courantologie Manche - Mer du Nord, juin 2012) y sont très forts, les plus importants des côtes françaises. En vive-eau moyenne (coefficient de 95), ils peuvent atteindre les 1,5 m/s dans la baie.

Les hauteurs d'eau associées à la marée sont exprimées en mètres par rapport au zéro hydrographique ou zéro Carte Marine (CM). Elles sont calculées au port de Saint-Malo, de Granville et au Mont Saint-Michel. Les niveaux suivants sont présentés dans le tableau ci-dessous :

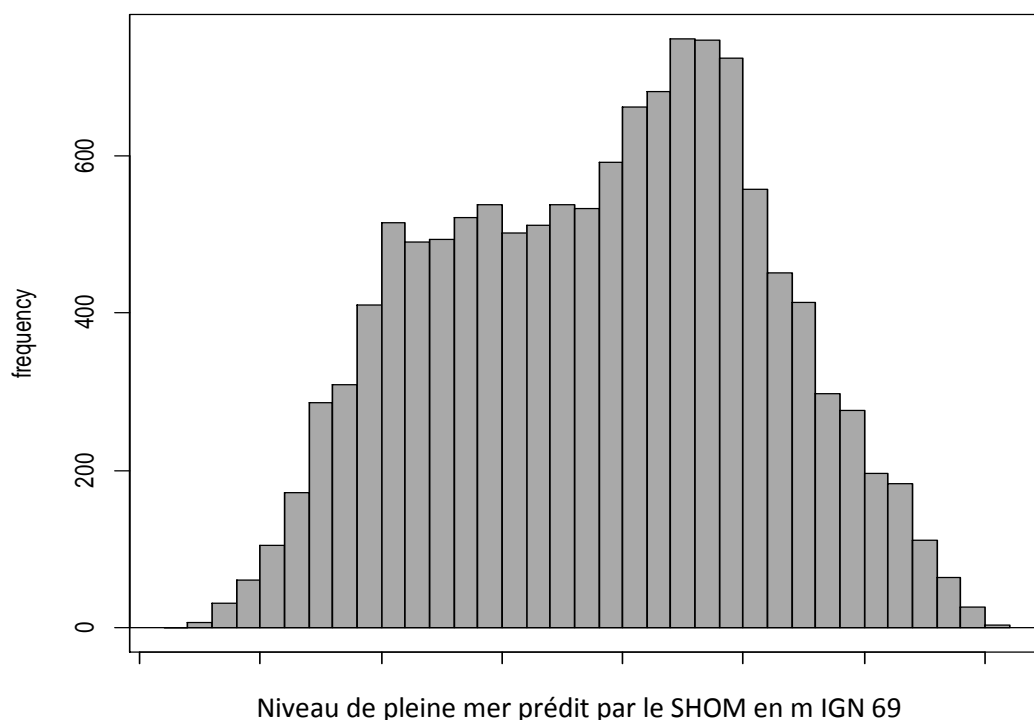
- le niveau des plus hautes mers astronomiques (PHMA) ;
- le niveau des pleines mers de vives-eaux (PMVE) ;
- le niveau des pleines mers de mortes-eaux (PMME) ;
- le niveau moyen (NM) ;
- le niveau des basses mers de mortes-eaux (BMME) ;
- le niveau des basses mers de vives-eaux (BMVE) ;
- le niveau des plus basses mers astronomiques (PBMA).

Tableau 3 : Niveaux caractéristiques des marées à Granville, Saint-Malo et au Mont Saint-Michel(en m) (SHOM, 2017)

Nom		PHMA	PMVE	PMME	NM	BMME	BMVE	PBMA
Granville	CM	14,26	12,85	9,8	7,1	4,55	1,5	-0,13
	IGN69	7,64	6,23	3,18	0,48	-2,07	-5,12	-6,75
Saint-Malo	CM	13,59	12,2	9,3	6,78	4,3	1,5	0,01
	IGN69	7,301	5,911	3,011	0,491	-1,989	-4,789	-6,279
Mont Saint-Michel	CM	14,86	13,20	-	7,19	-	-	-
	IGN69	8,22	6,56	-	0,45	-	-	-

A Granville, le zéro IGN69 est situé 6,62 mètres au-dessus du zéro hydrographique alors qu'à Saint-Malo il est à 6,289 mètre au-dessus.

Les données de marée prédites au Mont Saint Michel ont été fournies par le service prestation du SHOM. Ces données ont été livrées en côte marine (-6,74 m IGN69) à un pas de temps de 10 minutes sur la période de janvier 1993 à juin 2012. A partir de ces données, la fonction de distribution des hauteurs de pleine mer prédites a été calculée sur la période de Saros (6 585,3211 jours, soit environ 18 ans).



% de dépassement	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
Hauteur (m IGN 69)	1,39	2,96	3,47	3,96	4,46	4,92	5,32	5,66	6,02	6,55	8,03

Figure 10 : Distribution empirique des hauteurs de pleine mer prédites (SHOM) au Mont-Saint-Michel

La valeur maximale du niveau de marée sur cette période est évaluée à 14,77 m CM, soit 8,03 m IGN69, le 30/03/2002 à 7h20 (UT) pour un coefficient de 118.

N.B. : Le SHOM estime que l'incertitude sur les prédictions fournies en ce point est de l'ordre de 10 cm.

Surcote

Le phénomène de surcote est une surélévation du niveau marin par rapport aux prédictions astronomiques. Il peut être d'origine barométrique, lié au passage d'une dépression atmosphérique ou à des vents d'afflux (vents forts se dirigeant vers la côte) voire à la combinaison des deux phénomènes.

Il existe deux approches distinctes pour la caractérisation des surcotes:

- la surcote de pleine mer (au sens du SHOM) qui est définie comme la différence de cote entre le maximum du niveau d'eau observé et le maximum de la marée prédite même s'il existe un déphasage entre les deux ;
- la surcote instantanée qui est définie comme le résidu ou l'écart entre le niveau d'eau observé et la marée prédite à une heure donnée.

Différents travaux ont permis de dresser une carte des surcotes sur le littoral français selon plusieurs périodes de retour. Ces travaux sont essentiellement basés sur l'analyse des enregistrements marégraphiques des ports et des données satellites. Il faut préciser ici que, à l'extérieur des ports, le niveau marin peut être différent de la mesure en raison de la forme de la côte (effet d'accumulation dans les pertuis par exemple), des phénomènes de seiches (vague stationnaire observée dans les lacs, les étendues d'eau semi-fermées, et qui est due à un fort vent, à des changements de pression atmosphérique ou à une perturbation sismique) ou encore du déferlement de la houle à la côte (*wave set-up*).

Le rapport « Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines » (CETMEF, 2013) fournit une analyse statistique des surcotes de pleine mer pour le port de Saint-Malo en utilisant 17,9 années de mesures de surcotes horaires (1986-2012). Les surcotes de périodes de retour comprises entre 5 et 1000 ans sont estimées avec un intervalle de confiance de 70%. L'estimation est testée avec plusieurs lois statistiques (GPD et Exponentiel) et plusieurs valeurs seuils de surcote permettant de retenir 2 à 8 événements extrêmes par an. Les surcotes estimées au Port de Saint-Malo pour les périodes de retour 5, 10, 20, 50, 100 et 1000 ans sont les suivantes :

Tableau 4 : Estimation des surcotes extrêmes au port de Saint-Malo

Loi exponentielle – Seuil : 42 cm						
Période de retour (années)	5	10	20	50	100	1000
Surcote de Pleine mer (cm)	74	84	93	105	115	146
Intervalle de confiance à 70% (cm)	68 - 80	76 - 91	84 - 102	95 - 116	102 - 127	128 - 163
Loi GPD – Seuil : 40 cm						
Période de retour (années)	5	10	20	50	100	1000
Surcote de Pleine mer (cm)	73	83	94	109	122	170
Intervalle de confiance à 70% (cm)	67 - 79	74 - 92	79 - 108	85 - 133	89 - 155	88 - 253

Les estimations obtenues avec la loi GPD paraissent plus sécuritaires (surcote millénaire plus élevée) et sont cohérentes avec la présence d'une surcote observée de 110 cm le 30/10/2000.

Les différences de résultats entre les estimations des surcotes centennales du produit statistique des niveaux marins extrêmes des côtes de France (CETMEF/SHOM, Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique), 2012) et celles issues de l'analyse du rapport des surcotes extrêmes de 2013 (CETMEF, 2013) s'expliquent principalement par : une prise en compte différente des incertitudes d'échantillonnage et du modèle statistique choisi ainsi que des durées d'observation différentes. Les résultats restent cohérents. Les surcotes extrêmes de 2012 sont comprises dans l'intervalle de confiance de l'étude de 2013 : respectivement 98 cm et 122cm selon l'étude de 2013 avec un intervalle de confiance (*Tableau 4*) compris entre 89 et 155 cm de surcote pour un événement centennal.

Niveaux marins extrêmes

En ce qui concerne les niveaux extrêmes, les travaux (CETMEF-SHOM, 2008, réactualisé en 2012) de B. Simon sur les « statistiques des niveaux marins extrême le long des côtes de France » fournit les courbes des hauteurs d'eau pour les périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans en Bretagne Nord (*Figure 11*).

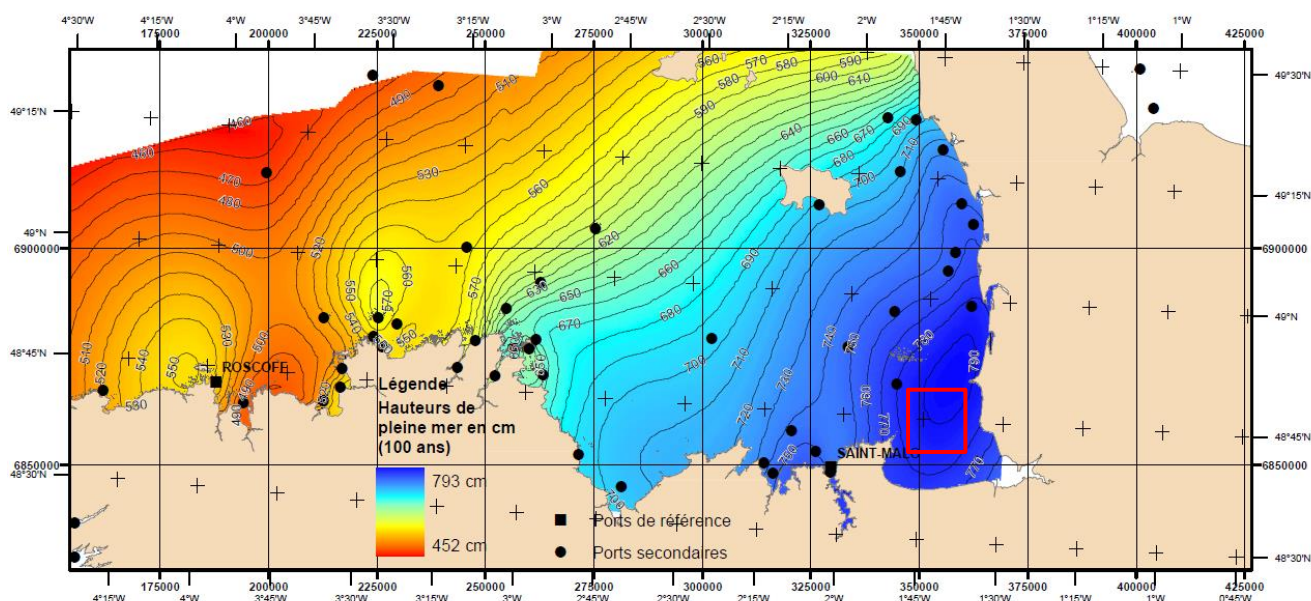


Figure 11 : Carte de niveaux extrêmes de pleines mer (période de retour 100 ans) (CETMEF/SHOM, Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique), 2012)

A partir des courbes il est possible d'interpoler graphiquement ces valeurs pour obtenir les niveaux extrêmes de basse mer (BM) et pleine mer (PM) dans la zone du PPRL. En s'appuyant sur l'étude de 2012, les résultats suivants, en m IGN69, sont obtenus :

Tableau 5 : Niveaux extrêmes issus de l'étude de 2012 en m IGN 69 pour différentes périodes de retour

Localisation	Période de retour							
	10 ans		20 ans		50 ans		100 ans	
	BM	PM	BM	PM	BM	PM	BM	PM
Cale Saint-Michel	-6,38	7,43	-6,43	7,51	-6,52	7,62	-6,58	7,71
Bec d'Andaine	-6,30	7,32	-6,38	7,41	-6,46	7,51	-6,50	7,60

Des différences importantes sont notables, de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres, entre les niveaux marins centennaux de pleine mer des études de 2008 et de 2012 à distance du port principal de Saint-Malo.

Tableau 6 : Niveaux extrêmes de pleine mer (en m IGN 69) pour différentes périodes de retour à la suite de l'étude du SHOM-CETMEF de 2012 (CETMEF/SHOM, Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique), 2012)

Nom	Réf. IGN69 /m	Période de retour			
		10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Granville	-6,62	7,60 (7,85)	7,70 (7,90)	7,80 (8,00)	7,90 (8,10)
Saint Malo	-6,289	7,35 (7,38)	7,45 (7,45)	7,55 (7,55)	7,60 (7,60)

Cette variation reflète l'évolution de la méthode d'interpolation des données appliquées pour la cartographie des niveaux marins extrêmes. L'absence de point secondaire dans la baie du Mont-Saint-Michel pour l'interpolation de ces cartes implique que les résultats dans la baie ne sont pas fiables et ne peuvent être directement exploités. Seuls les résultats à Saint-Malo, port de référence, le peuvent. (CETMEF/SHOM, Note méthodologique relative au produit « Niveaux marins extrêmes », 2012)

Ainsi, le 3 janvier 2018, lors de la tempête Eleanor, le marégraphe de Saint-Malo a mesuré un niveau marin de 7,01 m IGN69, soit un niveau de période de retour inférieur à 10 ans.

1.3.5 Courantologie

Le principal processus physique dans la Manche est la marée qui produit de forts courants. Sur le long terme ces courants ont un rôle important dans le transport des masses d'eaux et le mélange vertical. A long terme, ils ont une composante permanente : le courant résiduel de marée, lié à la propagation de la marée et à l'effet de frottement. Ce courant est beaucoup plus faible que le courant instantané, mais son influence sur le transport à long terme des masses d'eau est déterminante car ce courant est permanent, sa force dépend des cycles vives-eaux / mortes-eaux.

Le vent est le second processus d'importance dans la Manche. Il peut modifier voire rendre nuls les courants induits par la marée.

Les fleuves ont très peu d'influence sur la courantologie, les volumes d'apport en eau douce de la Sée, la Sélune et le Couesnon sont très faible pour créer des différences de courants significatives entre la surface et le fond. Ils ont respectivement un débit moyen de $8\text{m}^3/\text{s}$, 15 à $20\text{m}^3/\text{s}$ et $11,3\text{m}^3/\text{s}$.

Circulation générale

Les courants résiduels moyens sont dirigés de l'Atlantique vers la mer du Nord (*Figure 12*). Après avoir passé le Finistère, une partie des courants longe les côtes bretonnes et entre dans la Manche alors qu'une autre se dirige vers l'Angleterre et les Cornouailles.

Dans le golf normand-breton, la circulation des courants résiduels se caractérise par de grandes structures tourbillonnaires autour des îles anglo-normandes et des archipels de Chausey et des Minquiers. Dans ces tourbillons la magnitude des courants est d'environ une dizaine de cm/s alors qu'à proximité des côtes les courants résiduels sont très faibles.

Le vent a un impact considérable sur le schéma de circulation des courants. Les vents de sud-ouest auront tendance à augmenter le transit moyen vers l'est. À l'inverse, les vents de nord-ouest à nord-est vont diminuer cette circulation et sont même susceptibles de l'inverser. Les vents les plus efficaces pour créer des inversions sont les vents de nord.

Les courants moyens induits par le vent et/ou la circulation à grande échelle ont une variabilité saisonnière alors que ceux de marée ne varient pas d'une saison à l'autre.

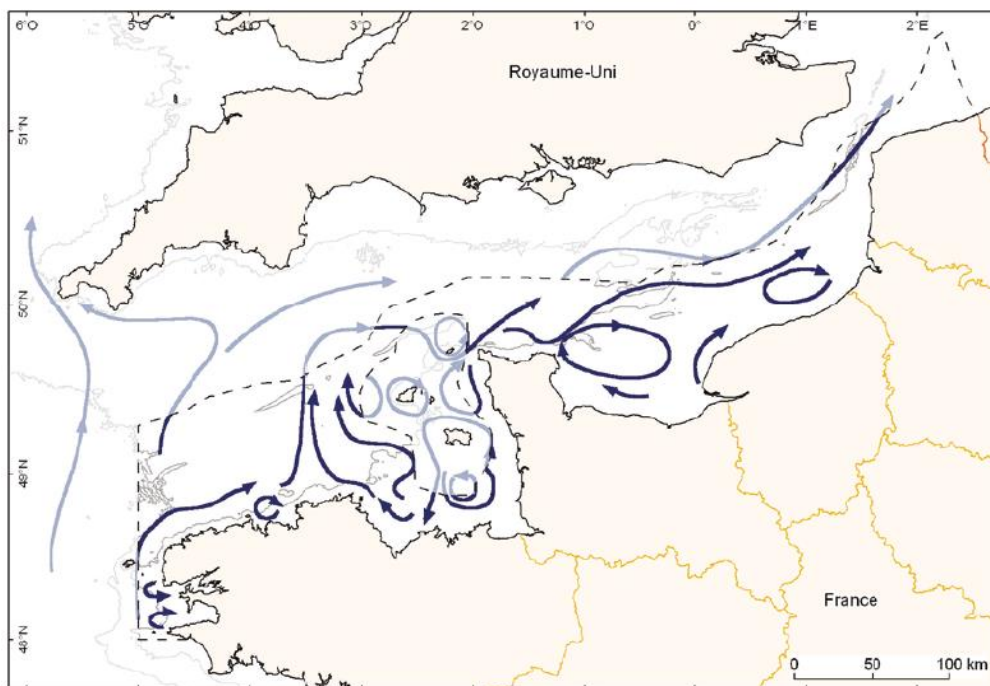


Figure 12 : Circulation moyenne en Manche (SHOM & IFREMER, Courantologie Manche - Mer du Nord, juin 2012)

Les courants de marée

La variabilité spatiale des courants est fortement influencée par la bathymétrie, et certaines configurations morphologiques de la côte sont à l'origine de phénomènes particuliers : l'augmentation de la vitesse des courants dans les goulets et au niveau des caps, les phénomènes de remplissage et vidage des baies, l'asymétrie du flot et du jusant à l'embouchure des estuaires, l'apparition de mouvements cycloniques (aux abords des îles du golfe Normand-Breton).

Les courants de marées sont responsables du mélange de la colonne d'eau et permettent d'expliquer la quasi-homogénéité verticale des eaux dans la Manche. Les effets de frottement sur le fond peuvent affecter l'intensité et la direction des courants au fond.

Deux types de courants coexistent dans la baie du Mont-Saint-Michel : les courants de type giratoire qui apparaissent près des côtes, dans la partie occidentale de la baie; et les courants alternatifs de direction Nord-Ouest / Sud-Est qui agissent du large à la côte, dans l'axe de l'estuaire. La zone d'étude se caractérise par ces derniers.

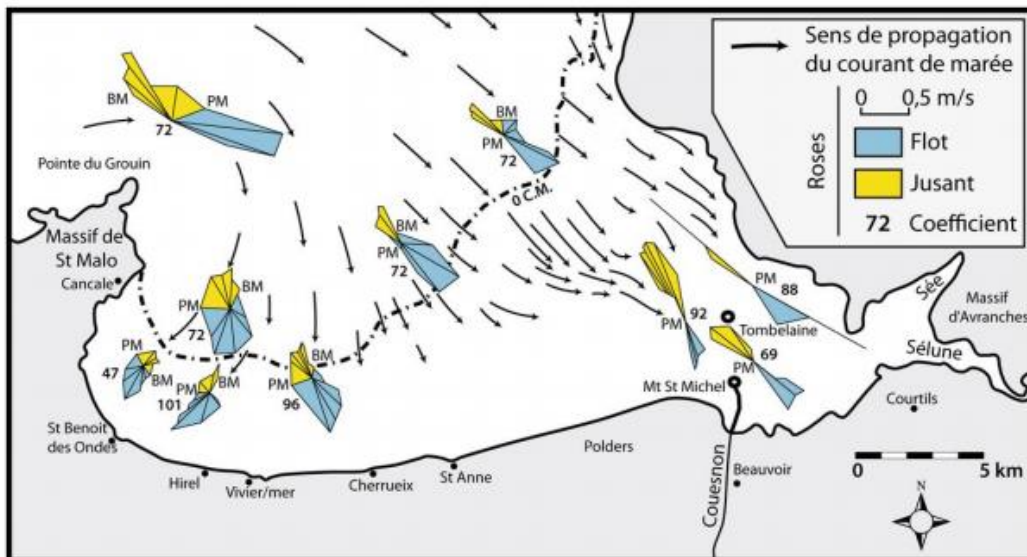


Figure 13 : Trajectoire, intensité et orientation des courants de marée en baie du Mont-Saint Michel. Les trajectoires correspondent aux courants de flot 3 heures après la basse mer par coefficient de 102. Les roses de courant sont issues principalement d'études réalisées dans la baie par EDF (1953) et le LCHF (1978). Modifié d'après L'Homer et al. (1999) et Bonnot-Courtois et al. (2002).

1.4 HYDROGEOLOGIE

1.4.1 Contexte

Les inondations survenant le long des côtes de l'Ouest de la France ont différentes causes : la submersion marine, le débordement des fleuves côtiers et le débordement des nappes phréatiques.

Pour les nappes phréatiques, les risques associés sont contrôlés par différents facteurs météorologiques, marins, géologiques et hydrologiques où la saturation et la capacité de désaturation des milieux jouent un rôle important. Sur le littoral, cette saturation vient de l'évacuation des eaux qui se sont infiltrées dans les nappes et des variations du niveau marin. Une saturation importante limite la capacité d'infiltration et augmente la vulnérabilité face aux événements pluvieux et spécialement dans les périodes de grandes marées ou d'augmentation du niveau marin. (GAUVAIN, BABEY, AQUILINA, DREUZY, GRESSELIN, & LOUF, 2017)

1.4.2 Remontée de nappe a Bréville-sur-mer

Une étude (GAUVAIN, BABEY, AQUILINA, DREUZY, GRESSELIN, & LOUF, 2017) réalisée à 17 km au Nord de Saint-Jean-Le-Thomas, à Bréville-sur-Mer, dans un milieu similaire (cordon dunaire, côte Est de la baie du Mont-Saint-Michel, marais arrière littoral), montre que les variations du niveau de la nappe phréatique dues à la marée ne se propagent pas au-delà de quelques centaines de mètres depuis la côte. Elle a donc très peu d'impact sur les parties continentales post-dunaires. En revanche, une augmentation du niveau marin moyen, pourrait se traduire par une augmentation globale du niveau de la nappe côtière se propageant à plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres.

La présence de drains arrières-littoraux limite cette propagation et protège les territoires continentaux à l'amont hydrologique (à condition que ces drains ne soient pas mis en charge par une connexion maritime). Ces drains, qui correspondent à des points d'intersection entre le toit de la nappe phréatique et la topographie, constituent des points d'arrêt à la propagation de l'influence marine mais constituent aussi des zones de vulnérabilité élevée, puisque sous la double influence de la mer et de la décharge des nappes.

La diffusivité du milieu souterrain contrôle la propagation des variations maritimes dans l'aquifère et sa capacité à se vidanger, c'est le paramètre de contrôle critique. Une diffusivité faible limite les effets de la marée et l'impact des variations maritimes mais limite également la capacité de vidange de l'aquifère.

1.4.3 Dans la zone d'étude

Dans la zone d'étude, le cours d'eau, les nappes phréatiques et le biseau d'eau salée forment un système hydrologique et hydrogéologique complexe dont les interconnexions sont mal connues.

Au Sud de Saint-Jean-le-Thomas (DREAL Normandie, 2014), comme le montre la carte ci-dessous, les habitations situées à proximité du marais de la Bunelle sont régulièrement affectées par la proximité des nappes. En effet, la nappe dans la zone d'étude est le plus souvent située à une profondeur inférieure à un mètre, ce qui peut causer un risque d'inondation des réseaux et sous-sols. C'est le cas de l'ensemble du marais de la Claire Douve.

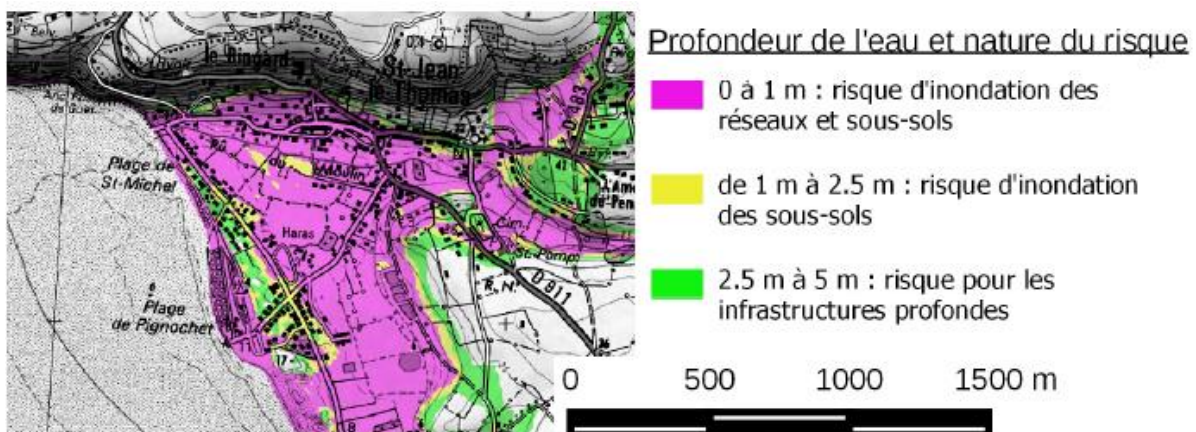


Figure 14 : Profondeur de la nappe phréatique en période de très hautes eaux à Saint-Jean-le-Thomas

Aucune étude piézométrique n'a été réalisée dans le périmètre de la zone d'étude. Sans mesures, il n'est pas possible de connaître la diffusivité du milieu souterrain, de quantifier les interactions des nappes phréatiques avec le domaine maritime et donc leurs impacts sur de potentielles inondations. Un puits est localisé dans le périmètre du marais de la Claire Douve mais il n'est pas équipé.

1.5 HYDROLOGIE

De nombreux cours d'eau, représentés sur la figure ci-dessous, sont présents sur le territoire d'étude. Différents ouvrages de gestion hydraulique sont positionnés le long de ces cours d'eau. Ceux-ci font l'objet de fiche ouvrages pour le Ru du Moulin et la Bunelle ; la Claire Douve ; le bief du Moulin et le Lerre.

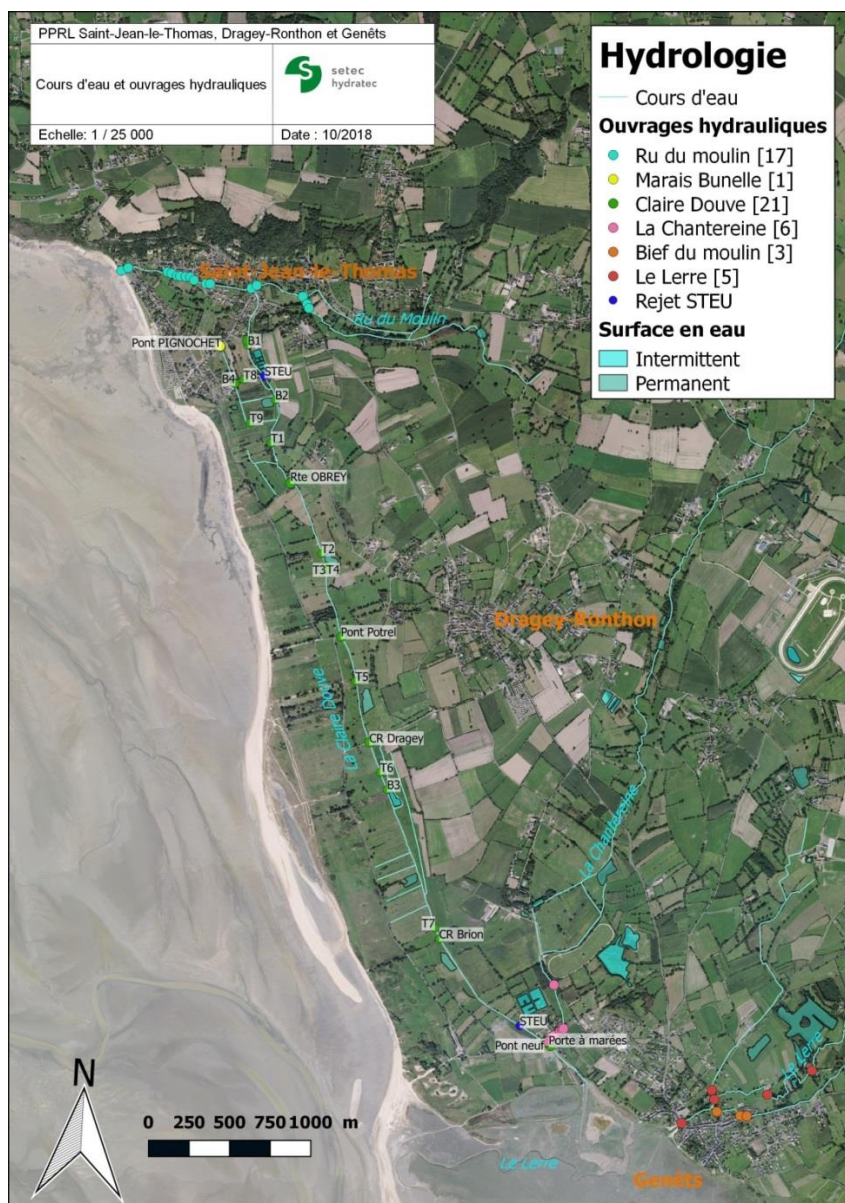


Figure 15 : Ouvrages hydrauliques le long des cours d'eau (sources : visite de terrain et SMBCG, 2018)

1.5.1 Le Ru du moulin

Situation

L'exutoire du bassin versant du ruisseau Le Ru du Moulin, d'une superficie de 793 hectares dont 22% imperméabilisés, se trouve à Saint-Jean-Le-Thomas. Entre 1777 et 1791, il a été détourné pour traverser la commune. Il reprend les eaux des sous-bassins-versants en amont et draine les eaux ruisselées des versants du ruisseau du Ru du Moulin.

Le réseau pluvial de la commune récupère la totalité des eaux pluviales générées sur le territoire de Saint-Jean-Le-Thomas, ainsi que celles générées sur les routes départementales RD241 et RD483 depuis le hameau de Bonneville grâce à un réseau enterré.

Les eaux drainées d'un petit sous-bassin-versant cultivé en amont et boisé dans le fond du thalweg sont également reprises par le réseau pluvial et se jettent dans le Ru du Moulin par l'intermédiaire d'un exutoire sous la route départementale RD214.

Débit

Le débit de pointe décennal est évalué à 3,59 m³/s à Saint-Jean-le-Thomas. Cette valeur est la seule donnée débitométrique disponible et résulte de l'analyse hydraulique pour une pluie décennale de type orage printanier effectué sur le bassin versant du Ru du Moulin (SOGETI, 2005).

1.5.2 Marais de la Claire Douve

Le marais de la Claire Douve, d'une superficie de 175 hectares, est situé sur le territoire de trois communes : Saint-Jean-Le-Thomas, Dragey-Ronthon et Genêts. Il est traversé du Nord au Sud par le ruisseau de la Claire Douve, qui lui donne son nom, et se rejette dans le Lerre dans la baie. C'est le dernier marais arrière littoral de la baie du Mont-Saint-Michel.

Présentation du site

L'ensemble dune-marais constitue une entité naturelle cohérente et présente un patrimoine naturel remarquable tant du point de vue paysager qu'environnemental. De nombreuses mesures réglementaires et d'inventaires ont été mises en place pour préserver les habitats et espèces d'intérêts (NATURA 2000) : Zone de Protection Spéciale (Directive Oiseaux – 1979) – Arrêté en date du 05/01/2006, Zone Spéciale de Conservation (Directive Habitat, Faune, Flore 1992) – Désignation en SIC le 07/11/2013, convention de RAMSAR (1971) – Inscription en 1990, loi littoral (loi de 1986), site classé (loi de 1930) ; et Zone Naturelle d'Intérêt Faunistique et Floristique (ZNIEFF de type 1 et 2) – Marais ZNIEFF de type.

Le marais de la Claire Douve est de grande importance pour l'avifaune, il constitue actuellement la dernière zone humide périphérique de la Baie.

Les usages du territoire du marais de la Claire Douve sont les suivants :

- Agriculture : élevage et pâturage ;
- Activités équestres : entraînements des chevaux en bas de plage et randonnée dans le marais ;
- Activité cynégétique ;
- Urbanisation aux extrémités septentrionale et méridionale, et présence de deux stations d'épuration (STEU) (Saint-Jean-Le-Thomas et Genêts).

Contexte topographique

Le marais occupe une dépression parallèle à la dune en formant une frange plate, entre +5 et +9 m IGN69, et étroite de 500 à 600m de largeur entre la voie communale des dunes et le pied de la falaise morte.

A l'intérieur du bassin versant de la Claire Douve, la topographie plutôt plane (pente 1 :1000) a favorisé la constitution de ce milieu de marais.

Contexte géologique

Les limites du marais sont formées au nord par les falaises de Carolles – Champeaux (massif granitique cadomien), à l'est par la falaise morte (schiste du briovérien supérieur) et, à l'ouest et au sud par le cordon dunaire.

Avec la remontée du niveau de la mer il y a près de 7000ans, le trait de côte a fortement reculé. Un havre s'est créé en arrière du cordon littoral s'appuyant sur le cap de Champeaux. Les ruptures et reconstitutions successives du cordon dunaire, limitant à l'Ouest le havre, ont provoqué des intrusions marines qui ont engendré un colmatage, avec alternance de tourbes, de sables et de tangues. Le colmatage s'est prolongé pour aboutir à un marais continentalisé, la fermeture au Sud ayant été accélérée par des travaux de poldérisation. Ainsi le marais est formé de sables éoliens, de tange limoneuse à argileuse, et de dépôts sableux.

Contexte hydrologique

La Claire Douve s'écoule à travers tout le marais depuis son extrémité Nord jusqu'à l'exutoire au Sud, au droit du Pont Neuf. D'un linéaire de 5 km environ, ce cours d'eau suit globalement les points bas du marais.

Son alimentation se fait exclusivement par précipitations directes sur le marais ou indirectes sur le bassin versant. Deux stations d'épuration des eaux usées (STEU) se déversent dans la Claire Douve.

Les collectivités sont soumises à d'importantes fluctuations saisonnières des charges hydrauliques aux niveaux des stations de Saint-Jean-le-Thomas et Genêt, comme le montre le tableau suivant :

Tableau 7 : Apports hydrologiques des STEU (source : SATESE de la Manche, SMBCG)

Apports hydrologique			
Précipitations	STEU de SJLT	STEU de Genêts	Total
Moyenne : 800 mm/ans Surface : 175 ha	Hiver (2 mois)		
	300 EH	400 EH	3150 m ³ /mois
	Mi- saison (8 mois)		
	900EH	600EH	6750 m ³ /mois
	Eté (2 mois)		
	1500 EH	1000 EH	11 250 m ³ /mois
1.400.000 m³/ans	48 600 m³/ans	34 200 m³/ans	1 482 800 m³/ans

La station de Genêts est de type lagunage naturel et a été mise en service en 1988. Elle a une capacité nominale de 1800 équivalent-habitants(EH). (SATESE Manche)

A Saint-Jean-le-Thomas, la STEU est de type lagunage aéré (1984) associé à des filtres plantés de roseaux suite aux travaux de modernisation terminé en octobre 2018. Elle a une capacité nominale de 2000 E.H. et un débit de référence de 300 m³/jour. Elle collecte les effluents en provenance des

communes de Saint-Jean-le-Thomas et de Champeaux grâce à un réseau d'eaux usées de type séparatif et ne présente aucun déversoir ou trop plein. (DDTM50, 14/02/2017)

Écoulements

Entre la Falaise morte et le cordon dunaire, il existe un goulet d'étranglement naturel au niveau de Dragey-Ronthon.

En 2014, sur le linéaire du cours d'eau principal de la Claire Douve, 21 ouvrages (cf. *Figure 15*) étaient répertoriés dont 80 % présentaient une inéquation de leur largeur ou un mauvais calage, provoquant d'importants dysfonctionnements hydrauliques. L'écoulement était également perturbé par les élargissements significatifs du cours d'eau (2 à 10 fois la largeur du lit mineur pour un écoulement naturel), la prolifération des roseaux dans son lit mineur ainsi que des approfondissements, conséquences d'anciens curages.

Par conséquent, de nombreuses contre-pentes favorisées par le faible dénivelé naturel se sont créées entraînant l'inversement des sens d'écoulements et des difficultés d'évacuation en deçà d'une certaine hauteur d'eau. Le profil en long a complètement été modifié : l'épaisseur de la lame d'eau a diminué et sa largeur a augmenté. Un chenal d'écoulement d'étiage a également disparu.



Figure 16 : Porte à flot en aval du Pont Neuf (Source: visite terrain 09/02/2018)

Au Sud, après le passage du Pont Neuf, la Claire Douve conflue avec la Chanteraine. Puis elle traverse une porte à flot de section 1,5 x 0,4 m, actionnée manuellement pour empêcher les intrusions marines, puis s'écoule dans son lit mineur de 0.8 m de large jusqu'à sa confluence avec le Lerre située 600 m plus au Sud. Sa fiche ouvrage se trouve en *Annexe 3*.

Débit caractéristique

La Claire Douve à Genêts présente un débit de pointe de crue pour une période de retour de 10 ans de 2,79 m³/s (DREAL Normandie, 2014).

1.5.3 Le Lerre

Situation

Genêts se situe à l'exutoire du bassin versant du Lerre, d'une superficie de 3456 ha, générateur d'importants ruissellements de la lame d'eau lors d'épisodes pluvieux intenses. Des fossés de drainage alimentent le ruisseau et l'écoulement se fait à travers plusieurs passages busés de différentes sections.

Depuis les années 1990, le comblement et le manque d'entretien des mares et fossés, l'augmentation des surfaces imperméabilisées, la disparition des obstacles naturels du paysage (haies) et l'augmentation de la taille des parcelles cultivées ont été des facteurs aggravants ayant favorisé le ruissellement, et les inondations en aval du bassin versant, au détriment de l'infiltration de l'eau.

En amont immédiat de Genêts, l'ensemble du lit majeur du Lerre, constitué de parcelles agricoles, est fréquemment inondé jusqu'au village, lors d'épisodes pluvieux intenses sur le bassin versant.

Avant de se jeter en mer, le Lerre reçoit un dernier affluent : le ruisseau de la Lande qui débute en amont du bourg de Cavron (commune de Dragey) et se poursuit au travers de prairies puis longe la route communale avant de se jeter dans le Lerre. D'après les riverains, en période de crue, le débit du ruisseau augmente fortement.

Les nombreux ouvrages hydrauliques (cf. *Figure 15*) permettent l'évacuation de l'eau vers l'aval, limitant ainsi les problèmes en amont (érosion des sols, inondations ponctuelles de parcelles agricoles, voiries et habitations), mais augmentant les dépôts de crues et donc les inondations à l'aval. Les ouvrages hydrauliques et les capacités d'écoulement du ruisseau ne permettent pas l'évacuation de la crue dans la mer.

Débit caractéristique

Selon la fiche de synthèse de débits caractéristiques, le Lerre à Genêts présente un débit de pointe de crue, pour une période de retour de 10 ans, de 6,482 m³/s. (DREAL Normandie, 2014).

1.6 ANALYSE DU TRANSIT SEDIMENTAIRE

A l'échelle de la baie du Mont-Saint-Michel

Dans la baie du Mont-Saint-Michel, depuis près de 8000 ans, les fleuves, n'apportent plus qu'une quantité négligeable de sédiments. Les sédiments fluviaux, déposés il y a près de 20 000 ans alors que le niveau marin était plus bas et que le domaine de la Manche était un vaste système fluvial, sont depuis les seules sources sédimentaires disponibles pour la construction des littoraux, hormis les sédiments issus de l'érosion du littoral. (TESSIER, Morphodynamique Continentale et Cotière, 2009)

Le déficit sédimentaire du domaine de la Manche implique une sous-alimentation de ces littoraux. Cependant la baie n'est dans son ensemble pas concernée par le problème de déficit sédimentaire. En effet comme tout domaine de baie, elle piège les sédiments dans l'estuaire qui se comble inexorablement. D'autre part, le golfe normand breton était un milieu hautement productif en mollusque, les sédiments formés par les débris de leurs coquilles s'ajoutent à la source sédimentaire

fluviale ancienne. La distribution des sédiments dans la baie du Mont Saint-Michel est explicité dans la *Figure 17*.

La dynamique morpho-sédimentaire de la baie du Mont Saint-Michel est contrôlée par le régime de marée mégatidal (jusqu'à 15 mètres de marnage) de la Manche, la houle et la dynamique fluviale des cours d'eau se jetant dans la baie.

Plusieurs rivières se jettent dans la Baie du Mont Saint-Michel dont les trois plus importantes, le Couesnon, la Sée et la Sélune se déversent à l'est et définissent la zone estuarienne. Leurs apports sédimentaires sont quasiment négligeables, leurs débits moyens sont inférieurs à 20m³/s (respectivement de 8 m³/s, 15 à 20 m³/s et 11,3m³/s) et atteignent en période de crue 140 m³/s pour le Couesnon et pour l'ensemble Sée-Sélune.

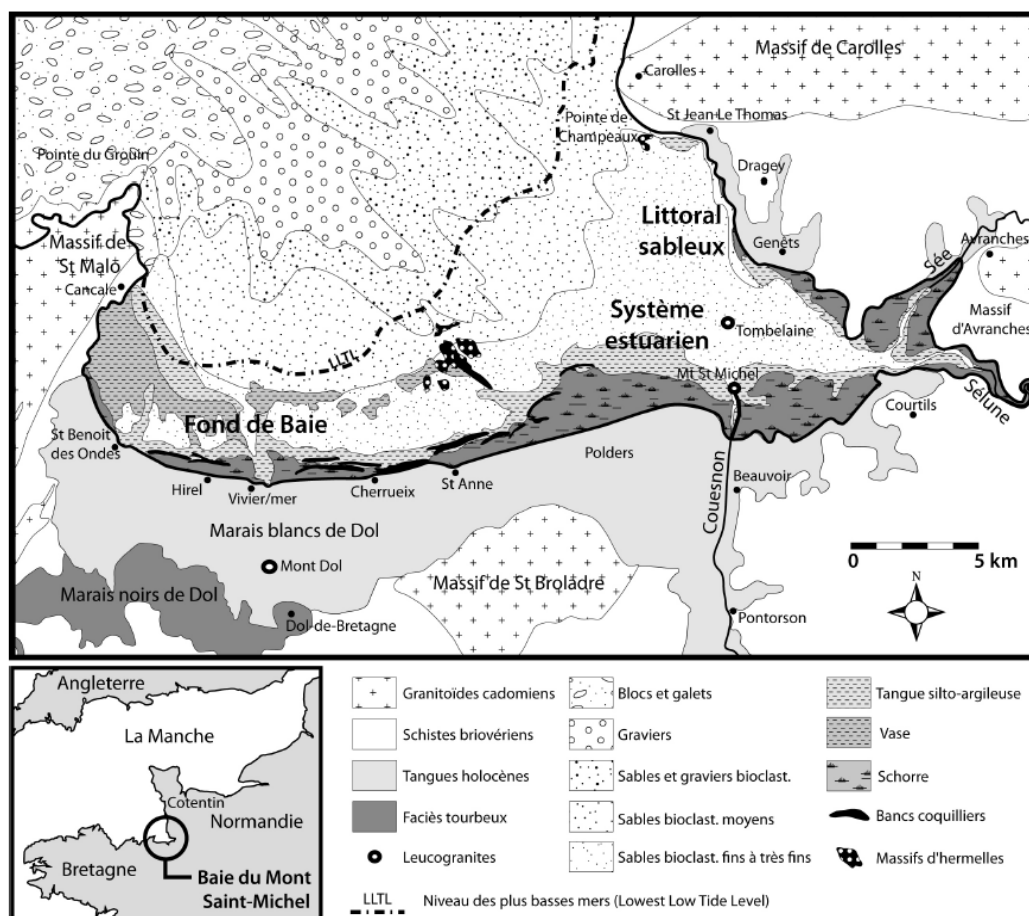


Figure 17 : Carte géologique simplifiée et distribution des sédiments superficiels de la baie du Mont Saint-Michel. Modifié d'après Tessier et al. (2006)

Un vaste système de bancs et chenaux estuariens fonctionne et migre en avant des plages. Le chenal de la Sée-Sélune migre du Nord au Sud, alors que celui du Couesnon oscille d'Ouest en Est, sous l'influence du cycle lunaire avec une période de 18,6 années (cf. *Figure 18*). Les divagations des chenaux impactent la position et la forme des flèches sableuses du Bec d'Andaine notamment.

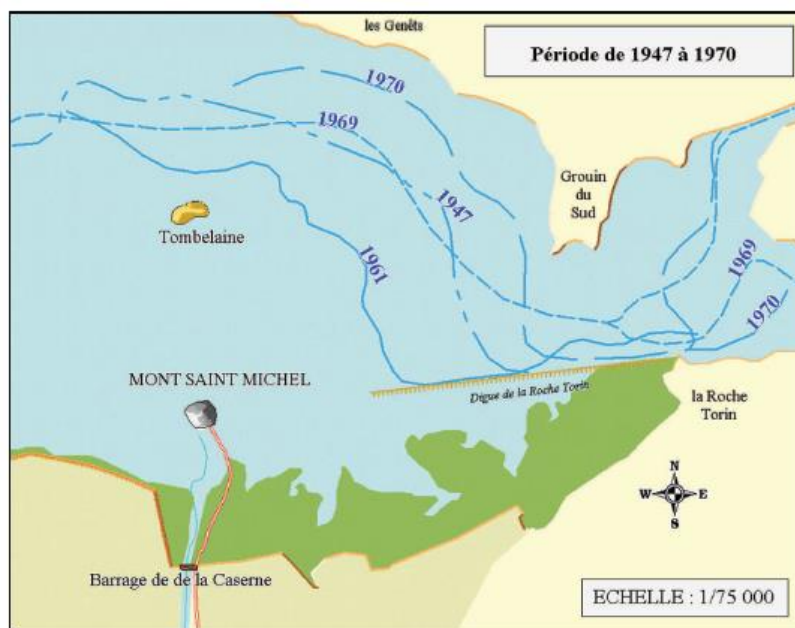


Figure 18: Divagation de la Sée-Sélune [1947-1970] (Manche, 2002)

Le chenal (LEVOY F. , 2013) est localisé au Nord de l'axe centrale en 1947, 1969-1970, 1991-1992, 2007-2010, et au Sud en 1960-1966, 1977-1980, 1996-2000 et 2012-2015. Les positions des traits de côte ne semblent pas suivre ce cycle de 18,6 années. Le chenal est localisé au Nord de l'axe central en 1947, 1969-1970, 1991-1992, 2007-2010, et au Sud en 1960-1966, 1977-1980, 1996-2000 et 2012-2015. Les positions des traits de côte ne permettent pas de conclure à une influence du cycle lunaire de 18,6 années sur le transit sédimentaire et l'évolution du trait de côte du périmètre d'étude.

A l'échelle du littoral de Saint-Jean-le-Thomas à Genêts

L'organisation morphosédimentaire est principalement liée à l'action des vagues (érosion et sédimentation). Le secteur Nord-Est de la baie, où se situe Saint-Jean-de-Thomas, est largement ouvert sur le domaine de la Manche (TESSIER, 2006) comme le montre la **Figure 19**.

La dynamique de houle y est trop énergétique par rapport à la quantité de sédiments disponible. Les falaises au Nord de la commune, de par leur constitution rocheuse, n'apporte que très peu de sédiment et donc le littoral ne parvient pas à trouver une position d'équilibre, il recule. L'augmentation du niveau marin aggrave ce phénomène d'érosion.

Au Nord la combinaison des faibles apports sédimentaires avec une hydrodynamique forte en énergie provoque : une rétrogradation avec un recul des dunes qui constitue aujourd'hui une barrière naturelle, la mise à l'affleurement et l'érosion des dépôts arrière barrière (tourbe), ainsi que le pavage de galets de cornéennes issus du démantèlement de la falaise de Champeau plus au Nord.

Au Sud, les forts apports sédimentaires liés à la dérive littorale et la dynamique de houle permettent la construction et progradation de flèches sableuses, créent des dépressions d'arrière barrières et des passes tidales.

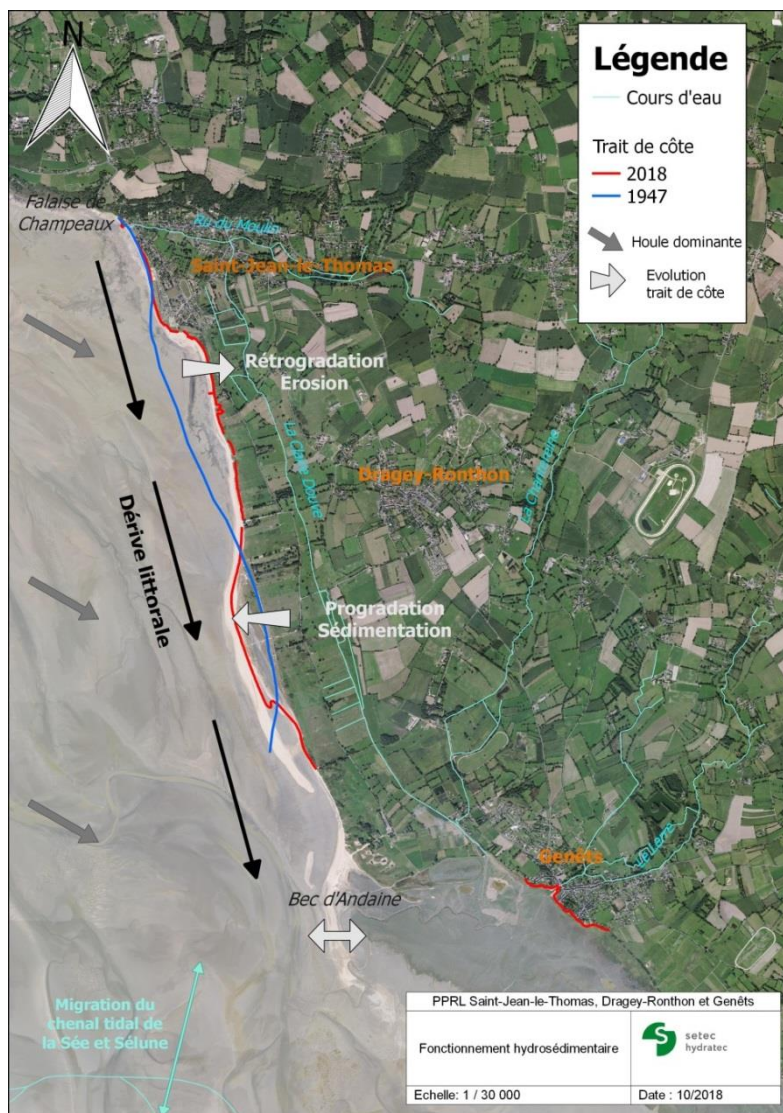


Figure 19 : Fonctionnement hydrosédimentaire de la zone d'étude

Le bilan sédimentaire est de l'ordre de 1 million de m³. Il ne s'agit pas d'un simple transfert de sédiment du Nord vers le Sud. Il faut également prendre en compte l'apport de matériel depuis le large en direction du domaine estuarien. Le transit nord-sud (AUFFRET, 1989) est actuellement de l'ordre de 50.000 m³/ans.

1.7 ANALYSE HISTORIQUE

1.7.1 Analyse du littoral

Les vestiges en bois d'un barrage (L'HOMER, 1999) à poissons, datés à plus de 3450 ans BP (fin de l'âge du Bronze) ont été découverts à Saint-Jean-le-Thomas lors d'une phase d'érosion importante ayant entraînée le démaigrissement de l'estran.

Entre le X^{ème} et le XII^{ème} puis au cours des siècles suivants, la baie estuarienne voit l'implantation des salines s'accélérer.

L'analyse de carte postale datant de 1870 à la fin des années 70, a permis d'analyser l'évolution récente du littoral à Saint-Jean-le-Thomas. Le trait de côte au XIX^{ème} siècle était encore à l'état

naturel. Depuis les années 40, le territoire c'est fortement urbanisé. Cette dynamique est en partie liée à l'attrait balnéaire de ce territoire. Le taux de résidence secondaire était de 68% en 1968 (53% en 2015) à Saint-Jean-le-Thomas. L'augmentation de la population et du nombre de logements disponibles se traduit par un développement urbain, en premier lieu autour des centres urbains historiques des trois communes. Ainsi le trait de côte à SJLT et Genêts est antropisé.

1.7.2 Analyse du trait de cote

Structure du trait de cote

Le trait de côte est majoritairement naturel (cf. *Annexe 1*) mais il est fixé au nord du secteur, sur un linéaire total de 970 m, par des ouvrages en enrochements et des murs de propriétés au niveau des plages de St Michel et de Pignochet. Ces défenses contre la mer anti-érosion protègent le bas de la falaise de Champeaux, quelques maisons en première ligne et les cabanes de plages du camping de Saint-Jean-Le-Thomas.

Au sud de la ligne d'enrochements de la plage de Pignochet, le trait de côte est composé d'un système de plages et d'un massif dunaire sur environ 5,8 km. Le trait de côte est alors représenté par une limite de végétation ou une microfalaise d'érosion taillée dans le cordon dunaire.

Evolution du trait de côte

En moyenne entre 1947 et 2012, l'évolution du trait de côte est de -4,9m/an soit un recul de 320 mètres sur toute la période (*Annexe 6*). Cette évolution est irrégulière dans le temps et l'espace. Les taux d'érosion décroissent en se dirigeant vers le Sud. Des périodes de fortes érosions alternent avec des périodes de quasi stabilité du trait de côte, ainsi entre septembre 1971 et mars 1973 il a été mesuré un recul de 33m, et 20m entre juin et novembre 1977. Cette irrégularité résulte de la résistance variable du cordon dunaire et des évènements météorologiques sur la période. (UNICAEN, 2018)



Figure 20 : Carte postale de 1950 : Le trait de côte est naturel, pas d'ouvrage longitudinale ou transversal, et peu d'urbanisation. Les plages sont occupées par de nombreux touristes et chargées en sable. Des cabines de plages se situent au niveau de la plage du Pignochet et du camping.



Figure 21 : Photo prise lors de la visite de terrain en février 2018 : Le trait de côte fixé au nord de Saint-Jean-le-Thomas et naturel à partir des enrochements de la plage du Pignochet

L'érosion est importante au nord de la zone d'étude alors qu'en droit du Bec d'Andaine, c'est formé une zone d'accrétion sur la flèche ; création d'une nouvelle flèche sableuse d'accrétion entre Saint-Jean-le-Thomas et le Bec d'Andaine au lieu-dit « La Dune ». La position et la forme de ces flèches sont impactées par les divagations de la Sée et de la Sélune.

Le Centre de Recherche en Environnement Côtier (CREC) de l'Université de Caen suit l'évolution du trait de côte, depuis 1992, du département de la Manche entre Saint-Jean-le-Thomas et le lieu-dit du Bec d'Andaine à Genêts grâce à 7 stations de mesure et des campagnes de mesures ponctuels.



Figure 22 : Station de mesures du CREC de l'université de Caen (UNICAEN, 2018)

Au Nord de la cale d'accès à la plage Saint-Michel (point SW102), le trait de côte correspond à une falaise d'érosion taillée dans le limon, dont la base est protégée par un cordon d'enrochements. La plage a perdu beaucoup de sable entre 1992 et 1994 et depuis continue à s'éroder principalement au niveau du moyen estran, provoquant la disparition de banc de sable. Aujourd'hui la majeure partie du profil est représentée par des cailloux. En 2016, le déficit par rapport à 1991 était de près de 120 m³/ml, dont seulement une dizaine de mètres-cubes sur la haute plage.

Environ 650 m au Sud de la cale d'accès à la plage Saint-Michel (point SW103), le trait de côte est fixé par un ouvrage longitudinal en enrochements. Le haut de plage est principalement touché par l'érosion avec depuis 1992 une diminution de 1 mètre de la hauteur de plage. La perte de sable a été marquée dès le début du suivi entre 1992 et 1993 (- 35 m³/ml). Après un retour du sable entre 1997 et 1999, l'érosion a repris, portant le déficit en 2016 à un peu plus de 30 m³/ml, sur la haute plage quasi exclusivement.

Au Nord de l'accès à la plage en provenance du chemin du hameau d'Obrey (point SW104) et au Nord de l'accès à la plage du lieu-dit de « La Dune » (point SW05), le trait de côte correspond à une microfalaise d'érosion taillée dans le cordon dunaire étroit. L'érosion menace la route littorale en contrebas du cordon dunaire.

En droit du bourrelet dunaire (point SW06), au Sud de l'accès de la plage au lieu-dit « La Dune », après une période d'érosion, entre 2000 et 2016 le trait de côte a avancé sans pour autant atteindre sa position originelle. Une érosion de la plage est principalement constatée devant le cordon dunaire au niveau du moyen estran, en relation avec la fluctuation de la position des chenaux de vidange de la baie du Mont-Saint-Michel. Un chenal séparait la haute de la moyenne plage en 1992. Il s'est progressivement comblé et éloigné vers l'Ouest entre 1993 et 1995. En arrière, la dune s'est développée jusqu'en 1995 puis s'est fortement érodée, notamment entre 1996 et 1998. Elle a réellement commencé à se reconstituer en 2003. Sur le profil complet, le bilan sédimentaire est positif entre 2014 et 2016.

Encore plus au Sud, à environ 1800 m de l'accès à la plage en provenance du lieu-dit « la Dune » (point SW107), le trait de côte correspond désormais à une limite de végétation en avant d'un cordon dunaire bas. Il a reculé jusqu'à environ 100 m entre 1992 et 2002. Année à partir de laquelle, le trait de côte a commencé à progressivement avancer sur la mer, sans toutefois atteindre sa position originelle.

Au niveau du Bec d'Andaine (point SW108), le trait de côte correspond alternativement à une limite de végétation et à une microfalaise d'érosion taillée dans le cordon dunaire. Entre 1994 et 2010, après une période d'accrétion, le trait de côte a reculé de près de 300 m entraînant une forte perte de sable. La perte de sable a été considérable atteignant les 1800 m³/ml entre 1992 et 2010. Entre 2010 et 2015, la position du trait de côte s'est relativement stabilisée. L'érosion constatée est liée à la divagation de chenaux secondaires des fleuves Sée et Sélune qui tendent à se rapprocher plus ou moins du trait de côte selon les périodes. La disparition de deux cordons dunaires a provoqué la submersion de deux pannes (zones basses) situées en arrière.

Cause du recul du trait de côte

Ainsi, le recul du trait de côte est lié :

- à des phénomènes naturels à grande échelle :
 - o énergie érosive des houles dominantes Ouest-Nord-ouest et force très érosive du vent de secteur Sud-Est ;
 - o la direction des houles Ouest-Nord-ouest est à l'origine de courants de houles et qui associés aux courants de marées du flot sont à l'origine de la dérive sédimentaire NNO à SSE ;
 - o la divagation des chenaux secondaires des fleuves Sée et Sélune ;
 - o l'augmentation du niveau marin ;
 - o la sous-alimentation des systèmes dunaires ;
- à l'action anthropique :
 - o la fixation du trait de côte par une ligne d'enrochement longitudinale au droit de la plage de Pignochet qui augmente l'érosion immédiatement en aval de l'ouvrage ;
 - o le surpâturage de certains champs et les chemins à travers les dunes ;

- la surfréquentation de la plage et des dunes.

1.7.3 Débordements des cours d'eau

Ru du Moulin

Le problème d'inondation viendrait de l'amont, d'une part en raison d'une faible pente du cours d'eau rendant l'écoulement difficile vers l'aval et occasionnant ainsi des débordements et surtout des crues du ruisseau.

La diminution des surfaces de prairies, la suppression des obstacles naturels paysagers, et l'augmentation de la taille des parcelles sont des facteurs aggravants ayant favorisé l'augmentation du ruissellement et donc des risques d'inondation.

Un batardeau a été installé au niveau du marais de « La Bunelle » pour éviter les inondations de la cale. Si le marais est plein, l'ouverture du batardeau pourrait inonder les habitations en zones basses.



Figure 23 : Marais de la Bunelle à Saint-Jean-le-Thomas en janvier 2018 (source SMBCG)

Lors d'événements de fortes précipitations, l'inondation se propage à l'ensemble du marais de la Claire Douve, situé au Sud de Saint-Jean-le-Thomas. Un réseau de fossé de drainage permet l'évacuation des eaux vers le ruisseau de la Claire Douve, mais la pente très faible rend difficile l'évacuation des eaux. Le marais de la Bunelle peut alors rester inondé plusieurs jours.

Les remontées de nappes phréatiques viennent se superposer et amplifient les inondations. Cependant, aucun problème d'inondation n'a été signalé, jusqu'à maintenant, en lien avec les phénomènes de marées.

Marais de la Claire Douve

Le marais est régulièrement inondé en période hivernale et au printemps. Ces inondations chroniques concernent plus particulièrement la partie nord entre la route du Pignochet et le pont de Potrel, ce secteur étant topographiquement le plus bas de la zone. La faible pente du marais rend difficile l'évacuation des eaux. La présence d'une contrepente en amont du pont du pont de Potrel et l'état de colmatage de certains tronçons du lit de la Claire Douve accentuent le risque d'inondation du Nord du marais.



Figure 24 : Vu aérienne du marais de la Claire Douve inondée depuis le Bec d'Andaine (Source : SMBCG, 2015)

De plus, au niveau de la route du Bec d'Andaine, à Genêts, la porte à flot n'a pas un fonctionnement opérationnel : la porte n'est pas étanche et, des sédiments bloquent l'écoulement en se déposant en amont (lié à la confluence des deux ruisseaux) et en aval (sous l'effet de la fermeture de la porte).

La Chantereine déborde sur la route départementale en amont de la propriété privée à travers laquelle chemine le cours d'eau (observation faite à l'hiver 2018).

Les remontées de nappes phréatiques peuvent se superposer et amplifier les inondations.

Le Lerre

Le 12 novembre 2000, environ 70 habitations ont été inondées dans le bourg de Genêts, avec au plus fort de la crue 1,20m d'eau à l'intérieur des maisons (SOGETI, 2005).

Les causes de cette inondation sont multiples. Les jours précédents la crue et le jour de l'évènement de fortes précipitations sont tombées sur le bassin versant, près de 130 mm en 8 jours. Ces pluies ont saturé le sol et donc augmenté les coefficients de ruissellement de la lame d'eau. Ainsi, les ouvrages hydrauliques et les capacités d'écoulement du ruisseau n'ont pas permis l'évacuation de la crue dans la mer, notamment à cause de la partie canalisée la plus aval et du pont d'évacuation à la mer. Le Lerre a débordé dans les prairies inondables en amont du bourg puis a emprunté la rue du Prieuré en direction de la RD 911 puis du bourg où il a inondé les habitations.

D'autres éléments ont aggravé la crue. La capacité hydraulique et l'écoulement du Lerre ont été entravés par des embâcles causés par des branchages laissés en pied de berge. L'élévation des fonds de la baie du Mont-Saint-Michel et le manque d'entretien du ruisseau sur le domaine maritime ont compliqué son évacuation dans la mer. L'augmentation anormale des apports latéraux due au colmatage du réseau d'évacuation de ces fossés de drainage a également empiré la crue en augmentant sensiblement les volumes d'eau à évacuer. En effet, les eaux de ruissellement des parcelles notamment situées au sud de la RD911 auraient dû être drainées et être directement rejetées à la mer.



Figure 25 : Exutoire du Lerre à Genêts (SMBCG, février 2015)

Parallèlement à ces inondations par débordements du Lerre, la commune de Genêts connaît des inondations par la mer lors des grandes marées et par remontée de nappe lors des années humides.

Les phénomènes de marée ont pour conséquence des difficultés d'évacuation des eaux du Lerre dans la mer lors des grands coefficients. La superposition d'une crue du Lerre et de ces phénomènes causerait ainsi d'importantes inondations dans le bourg.

1.7.4 Chronologie des événements tempétueux

A partir des données bibliographiques, il s'agit de recenser et de réaliser une fiche récapitulative, exemple en *Annexe 4*, des événements tempétueux et les coups de vent qui ont impacté le littoral de Saint-Jean-le-Thomas à Genêts.

Ce recensement s'appuie notamment sur les données issues de l'étude Vimiers des événements de tempête en Bretagne (CEREMA & France, 2013), le rapport du BRGM sur les submersions historiques en Normandie (BRGM, 2013), la presse régionale (Reveil Maritime, Ouest Eclair, Ouest France) et des visites de terrains.

27 événements ont été sélectionnés entre 1820 et 2018. La littérature étant très pauvre sur le périmètre du PPRL, la plupart des événements sont caractérisés à l'échelle départementale voire régionale.

Les informations recueillies ont permis d'identifier 4 événements tempétueux ayant occasionné des dommages sur la frange côtière de Saint-Jean-le-Thomas à Genêts : 02/01/2018, (Eléonor) 12/01/2017 (Egon), 10/03/2008 (Johanna) et entre le 24 et le 30/12/1999 (Lothar & Martin). Le **Tableau 8** récapitule leurs principales caractéristiques.

Sous l'influence des vents, les centres dépressionnaires passant au Nord de la zone d'étude, par les îles britanniques, affectent le plus les trois communes. En effet, les quatre événements majeurs partagent une trajectoire similaire de leurs centres dépressionnaires venant du nord-ouest au large des côtes bretonnes ou britanniques et se propageant jusqu'à la mer du Nord.

Tableau 8 : Caractéristiques des tempêtes majeurs ayant impactées la zone d'étude

Tempête	LOTHAR-MARTIN	JOHANNA	EGON	ELEANOR
Date	24-30/12/1999	10/03/2008	12-13/01/2017	2-3/01/2018
Trajectoire centre dépressionnaire	Proche Atlantique → Mont Saint-Michel → Nord de la France	Sud-ouest de l'Irlande → Angleterre → Mer du Nord	Large Bretagne → Belgique → Nord de l'Allemagne	Irlande → Ile Britannique → Mer du Nord
Pression centre dépressionnaire zone d'étude	970 hPa	~ 980 hPa	~ 990 hPa	969 hPa
Vent zone d'étude	~ 150 km/h	~ 110 km/h	134 km/h	> 100 km/h
Niveau marégraphe Saint Malo	12,75 m CM	13,64 m CM	X	13,30 m CM
Coefficients de marée	102 – 54	107- 96	101	106
Surcote à Saint Malo (m)	0,88 (BM) / 0,14 (PM)	1,00 (BM) / 0,76 (PM)	0,30	X
Hauteur significative de houle (m)	4,20 m Minquiers (large)	X	0,75 – 1,00 (zone d'étude)	2,00 – 2,75 (zone d'étude)

Si les submersions marines se produisent dans des conditions météorologiques et océaniques défavorables (basses pressions atmosphériques et fort vent d'afflux agissant lors d'une pleine mer de vive eau), nous n'avons cependant retrouvé aucune trace de submersion dans le périmètre d'étude.

1.8 CONCLUSION PHASE 1

La première phase du PPRL a permis une meilleure compréhension du fonctionnement du littoral de la zone d'étude et des phénomènes naturels les plus impactant dans le cadre d'un plan de prévention des risques littoraux. Elle a apporté les éléments nécessaires aux choix des aléas à caractériser, de la méthode de caractérisation et des hypothèses à prendre.

Le site d'étude étant à l'interface de plusieurs domaines : fluvial, marais, maritime et phréatique dont les interconnexions ne sont pas toujours bien connues ; l'analyse bibliographique a été la plus exhaustive possible. En l'absence de données météo-marins à proximité de la zone d'étude, les informations utilisées sont d'origine, de durée et de source très variées.

La phase suivante a pour objectif de déterminer les aléas du recul du trait de côte et de la submersion marine.

2 PHASE 2 – CARACTERISATION DES ALEAS

2.1 QUALIFICATION DU REcul DU TRAIT DE COTE

Le recul du trait de côte est le déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et continental sous l'action d'une perte de matériaux due à l'érosion générée par des forces marines ou l'action humaine. L'évolution du trait de côte est variable dans le temps et peut résulter d'une succession de phase d'accrétion (avancé) et de régression (recul).

L'aléa recul du trait de côte est étudié à long terme, plusieurs décennies, et ne possède qu'un niveau d'aléa : fort. En effet, l'érosion entraîne la disparition totale du terrain. La carte présentant le trait de côte à échéance 100 ans se trouve en **Annexe 6**.

2.1.1 Méthodologie

Relevé de terrain

Lors de notre visite du site en juillet 2018, la position du trait de côte actuel a été relevée en utilisant la tablette Cartolander®. La connexion GPS permet de directement géoréférencé les mesures (positions, hauteurs, largeurs..) et de les exporter sous QGIS. Le relevé de terrain a également permis d'identifier la nature du trait de côte et les ouvrages présents (carte en *Annexe 4*)

Trait de cote

A partir des douze photos aériennes, au préalable géoréférencées, des deux orthophotos et du relevé effectué lors de la visite de terrain, quinze traits de côte ont été positionnés en se basant sur la limite de l'estran supérieur de la plage et de la végétation (**Annexe 6**).

Sur les photos les plus anciennes, la résolution de l'image et l'absence de couleur rendent difficile l'identification du trait de côte, l'incertitude diminue avec l'âge des photos. Une première sélection avait été effectuée afin de conserver les photos de meilleure qualité et répartie homogènement dans le temps.

Recul annuel

L'analyse des positions successives permet de déterminer un taux moyen annuel de recul par secteur de comportement homogène.

L'évolution de la position du trait de côte est déterminée en appliquant une loi statistique aux distances entre les différents traits de côte successifs sur un même transect (segment globalement perpendiculaire au trait de côte et espacé longitudinalement de manière régulière, 20 mètres). En faisant l'hypothèse d'une évolution linéaire, une des méthodes d'ajustement les plus utilisées est la régression linéaire aux moindres carrés (GENZ et al, 2007). C'est la méthode DSAS ou *Digital Shoreline Analysis System*, développée par l'USGS et recommandée par le « Guide méthodologique : PPRL ».

Aléa de référence

L'aléa de référence, L_R , est défini comme la somme de la projection à l'horizon cent ans du recul du trait de côte annuel, T_x , issu des tendances passées observées et du recul susceptible d'intervenir lors d'un évènement tempétueux majeur, L_{max} .

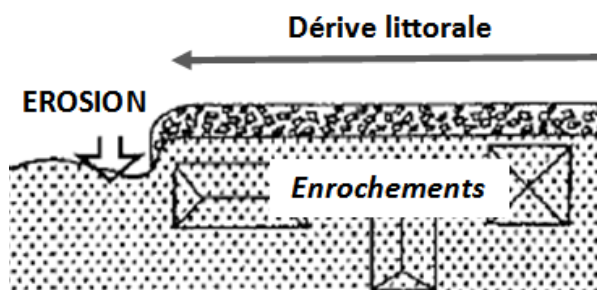
$$L_R = 100 * T_x + L_{max}$$

Lors de la tempête Eleanor, la dune a reculé de 7 mètres au Sud des enrochements de Pignochet. En l'absence d'autres données, le recul associé à cet évènement sera considéré comme L_{max} sur l'ensemble du trait de côte.

N.B : L'aléa intégrant le changement climatique n'est pas quantifiable, il ne sera pas calculé. En effet, la composante principale de l'aléa recul du trait de côte, la direction des houles, ne présente pas une évolution prévisible dans le temps. La simulation de la propagation de la houle du large vers la côte sur une longue chronique (1 année de référence), intégrant les vents et une élévation globale du niveau de la mer aurait été nécessaire. La fiabilité des résultats aurait été à nuancer, car les systèmes météorologiques générant ces houles et vents sont aussi susceptibles d'évoluer.

2.1.1 Résultats

Ces résultats sont comparés avec ceux obtenus lors d'une étude réalisée par l'université de Caen par analyse DSAS en utilisant le plugin ArcGIS (GLATRE & MEUNIER, 2013) et les résultats mentionnés précédemment obtenus par le Centre de Recherches en Environnement Côtier de l'université de Caen (CREC). Les tendances générales sont similaires : trait de côte relativement stabilisé à Saint-Jean-le-Thomas, forte érosion au Sud des enrochements Pignochet, suivi d'une zone d'accrétion et d'une nouvelle zone d'érosion en arrivant au Bec d'Andaine.



Le recul moyen annuel maximal est obtenu au Sud de Saint-Jean-le-Thomas, après les enrochements de Pignochet. En effet, la fixation du trait de côte en amont par un ouvrage longitudinal a modifié la dynamique sédimentaire et a entraîné une augmentation de l'érosion en aval immédiat de l'ouvrage

Figure 26 : Schéma explicatif des conséquences d'un ouvrage longitudinal sur la dynamique sédimentaire

Le recul maximum annuel calculé est ainsi de 7,4 m/an entre 1947 et 2018 sur un linéaire de côte de plus de 100m. L'université de Caen l'a estimé à 4,9 m/an entre 1947 et 2012. Le point le plus proche du CREC, SW04, voire **Annexe 6**, indique un recul moyen de -2,1 m/an [1992-2016] et de -3,51 m/an [mai 2014 – mars 2016].

Au nord du Bec d'Andaine, le recul moyen annuel calculé est de -3,61 m/an entre 1947 et 2018. Le point de mesure du CREC SW07, voire **Annexe 6**, indique un recul de -4,44 m entre 1992 et 2016 suivi d'une période d'accrétion entre mai 2014 et mars 2016, +0,88 m. Au niveau du Bec d'Andaine, le secteur semble protégé par la flèche sableuse.

Les différences, en particulier pour les taux ayant des valeurs extrêmes, peuvent s'expliquer par la méthode de régression statistique utilisée ainsi que par le nombre et la date des traits de côte disponibles. En effet la dynamique du trait de côte est irrégulière dans le temps et se fait par à-coups, en fonction de la résistance plus ou moins importante du cordon dunaire. Les variations saisonnières, bien que naturelles, ainsi que les évolutions ponctuelles dues à des tempêtes peuvent ne pas être négligeable

La prédiction du trait de côte centennale est présentée dans l'**Annexe 6**. Les incertitudes étant importantes sur le taux de recul moyen annuel, l'erreur associée à la prédiction centennale l'est encore plus. L'érosion au sud de Saint-Jean-le-Thomas créerait à terme une brèche et menacerait les zones habitées au Sud du bourg, et la route littorale en contrebas de l'actuelle dune.

2.2 QUALIFICATION DE L'ALEA SUBMERSION MARINE

La submersion marine se différencie des inondations fluviales par le caractère brutal du phénomène. La caractérisation de l'aléa de submersion marine consiste à déterminer les hauteurs d'eau et la dynamique de submersion dans le territoire du PPRL.

La caractérisation de l'aléa de submersion marine se base sur l'analyse des conséquences d'un événement de référence. Cet événement correspond soit à l'évènement centennal ou l'évènement historique de plus fort connu dès lors que celui-ci est supérieur à l'évènement centennal. En l'absence d'évènement historique de submersion, l'évènement de référence sera le centennal.

La caractérisation de l'aléa se décompose en trois étapes : déterminations des scénarios étudiés et de leurs caractéristiques, choix de la méthode de caractérisation et qualification de l'aléa submersion marine.

2.2.1 Définition de l'évènement de référence

Comme l'explique le guide méthodologique de la DPGR, le niveau marin de référence centennal de référence comprendra les paramètres suivants :

- le niveau marin Z intégrant la surcote liée à la houle (set-up) ;
- une marge de sécurité permettant de prendre en compte les incertitudes ;
- une augmentation du niveau marin de 20 cm correspondant à une première prise en compte immédiate de l'élévation du niveau moyen de la mer liée au changement climatique (Circulaire du 27 juillet 2011).

Pour définir les conditions océano-météorologiques combinées caractérisant un événement d'occurrence centennal, il sera nécessaire d'appliquer une analyse statistique des paramètres croisés. Les méthodes simplifiées d'analyse des concomitances permettent de définir les caractéristiques de l'évènement centennal combinant un niveau d'eau extrême et une hauteur de houle exceptionnelle au large. La définition de l'évènement centennal revient donc à définir un couple de niveau de mer / houle du large.

Disposant de mesures au niveau du Mont-Saint-Michel, à la chapelle Saint-Aubert, une approche indirecte de la détermination du niveau d'eau centennal a été réalisée en combinant les résultats de l'analyse de la marée et de la surcote de pleine mer.

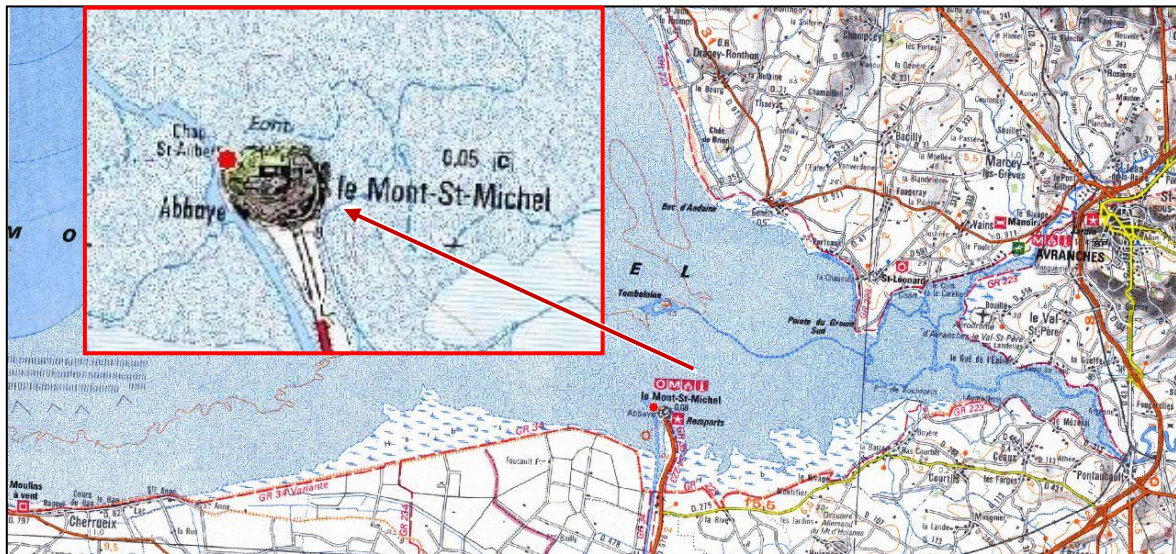


Figure 27 : Localisation du point de mesure de la Chapelle Saint-Aubert

Un capteur-enregistreur limnimétrique a été installé à la chapelle Saint-Aubert en décembre 1996. Il mesure les niveaux marins supérieurs à 5,5 m IGN 69. Suite à des problèmes de blocage de flotteur dans le tube par la tangué ou le développement de coquillage, le marégraphe a été remplacé en 2000 par un appareil de type piézomètre qui mesure automatiquement le niveau de la marée en NGF toutes les cinq minutes.

Le Mont Saint-Michel se situe à une référence carte marine de -6,74 m IGN69.

Surcote de pleine mer

Afin de s'affranchir des dérives temporelles du signal mesuré et donc du déphasage entre les hauteurs prédites et observées, la surcote utilisé est celle de pleine mer (différente de l'instantannée), qui correspond à la différence entre le niveau d'eau maximum observé au voisinage de la pleine mer et le niveau de pleine mer prédit. Compte tenu de la position du dispositif de mesure, ces surcotes n'ont été évaluées que pour des niveaux marins supérieurs à 5,5 m IGN 69.

Dans un premier temps, les données d'observation disponibles de décembre 1996 à juin 2012 ont été exploitées pour réaliser des statistiques de niveau sur les maximas annuels.

Le tableau suivant présente les valeurs maximales annuelles observées. Certaines années étant incomplètes, la détermination de ces niveaux est accompagnée d'une certaine incertitude.

Tableau 9 : Surcotes de pleine mer maximales annuelles observées à Saint Malo et estimées au Mont Saint Michel (calculé par comparaison du niveau maximum mesuré au niveau prédit par le SHOM)

Date (UT)	Surcote de PM estimée au Mont-Saint-Michel (marée SHOM)	Surcote observée à Saint-Malo
13/02/1997 10:00	82 cm	20 cm
24/02/1997 19h30	76 cm	41 cm
02/01/1998 08h20	93 cm	62 cm
02/01/1999 18h20	65 cm	29 cm
30/10/2000 07h30	181 cm	110 cm
08/02/2001 06h10	71 cm	31 cm
26/01/2001 19h30	80 cm	35 cm
26/02/2002 05h20	75 cm	56 cm
17/06/2011 19h10	68 cm	39 cm
24/01/2012 19h10	53 cm	12 cm
09/04/2012 20h10	45 cm	26 cm

Comme préconisé par le CETMEF, les valeurs extrêmes de surcotes sont ajustées à une loi de probabilité paramétrique par la méthode POT (Peak Over Threshold).

L'analyse POT sur les surcotes a donc portée sur les mesures de 1997 à 2002 puis de 2011 à 2012. Soit 1286 pleine mer de plus de 5,5 m IGN, c'est-à-dire $1286/245 = 5,25$ ans d'observation, 245 étant le nombre de pleine mer par an supérieur à 5,5 m IGN au Mont-Saint-Michel.

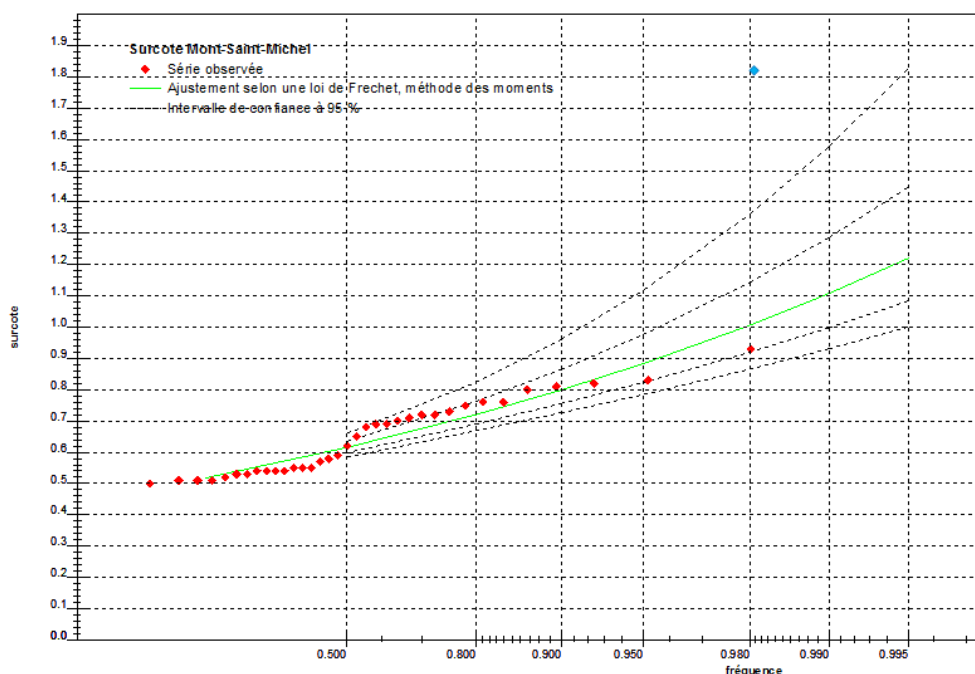


Figure 28: Courbe d'ajustement selon une loi de Frechet des surcotes de pleine mer avec un seuil de tempête défini à 0,5 m et une durée de tempête de 72h et en traitant la valeur de 1,81 comme un horsain (point bleu)

Ainsi pour un ajustement selon une loi de Fréchet des surcotes de pleine mer (prédiction SHOM) avec un seuil de tempête défini à 0,5 m et une durée de tempête de 72h, la surcote de période de retour centennale à une valeur de 1,44 m avec un intervalle de confiance à 95% de - 0,31 m en borne inférieure et + 0,90 m en borne supérieure et de respectivement - 0,19 m et + 0,32 m pour un intervalle de confiance à 70%.

Convolution surcote de pleine mer et marée

A partir de la densité de probabilité des hauteurs de marée de pleine mer et de la fonction de répartition des surcotes de pleine mer, on utilise la méthode dite de « convolution » pour obtenir la période de retour d'un niveau centennial.

Seuls les événements de tempêtes, correspondant à un pic de surcote et pour lesquels le niveau de 5.5m IGN69 est dépassé, sont conservés.

La probabilité de dépasser un niveau d'eau donnée est égale à la somme des probabilités de dépasser ce même niveau d'eau avec des couples différents de hauteurs de marée de pleine mer et surcote de pleine mer.

Les surcotes étant caractérisées seulement au-dessus du seuil de tempête s_0 , la convolution ne peut pas reproduire les niveaux inférieurs à la somme du maximum de marée prédite et du seuil de tempête. Soit un niveau minimum égal à 8,53 m IGN69 (0,5 + 8,03).

Tableau 10: Niveaux extrêmes en m IGN69 et m CM d'un événement de période de retour 100 ans en Baie du Mont Saint-Michel issus de la convolution marée prédite (SHOM) et surcote de pleine mer

Référence (m)	IGN	CM
Niveau extrême (m)	8,55	15,29
Intervalle de confiance à 95 % (m)	8,31	15,05
	8,79	15,53
Intervalle de confiance à 70 % (m)	8,33	15,07
	8,77	15,51

En conclusion, compte tenu des différentes sources d'information disponible, l'hypothèse d'un niveau marin extrême centennial au repos de 8,55 m IGN69, soit 15,29 m CM au Mont Saint-Michel, est retenue.

N.B. : Le nombre de données retenu pour l'ajustement statistiques étant assez faible, seulement 5,25 années de données brutes auquel sont enlevées les marées dont le niveau est inférieur à 5,5 m IGN69, l'ajustement statistique est peu fiable pour des extrapolations à cent ans.

Houle au large

Pour définir les conditions océano-météorologiques combinées caractérisant un événement d'occurrence centennial, il est nécessaire d'appliquer une analyse statistique des paramètres croisés. Selon le guide de la DPGR « Premiers éléments méthodologiques pour l'élaboration des PPRL », la valeur de facteur de dépendance recommandée pour la Mer du Nord, la Manche et l'Atlantique est de 25 (faible dépendance), soient les couples de période de retour niveau d'eau / vague suivants :

Tableau 11 : Facteur de dépendance recommandée pour la Manche

$T_c = 100$ ans - Facteur de dépendance : 25 – Faible dépendance (706 valeurs par an)

Tn	100	50	20	10	5	3,5	2	1,8	1	0,7	0,4	0,2	0,07	0,04
Tv	0,04	0,07	0,2	0,4	0,7	1	1,8	2	3,5	5	10	20	50	100

Avec Tn la période de retour du niveau d'eau et Tv la période de retour des vagues.

Ainsi pour un niveau marin de période de retour centennale, la houle associée à une période de retour de 0,04 ans. Selon la méthode préconisée, si pour les périodes de retour très faibles (inférieures à 0,5 an), les valeurs ne sont pas connues, la première valeur connue supérieure est retenue. Ainsi, en se référant aux niveaux extrêmes estimés au Mont-Saint-Michel et le diagramme de niveau de retour au point ANEMOC COAST_2646 (localisation en Annexe 2) le couple niveau d'eau / vague $N_{\text{marin}} = 8,55$ m / $H_{m0} = 3,25$ m sera vraisemblablement la valeur la plus critique pour le site.

Set-up lié à la houle

Après le déferlement des vagues, le niveau d'eau augmente localement, c'est le wave set-up.

Comme expliqué dans le paragraphe 1.3.3, la configuration du golfe et de la baie, la présence des îles anglo-normandes, font que la force et les hauteurs des houles (LEVOY, 1994) s'atténuent à près de 69 %.

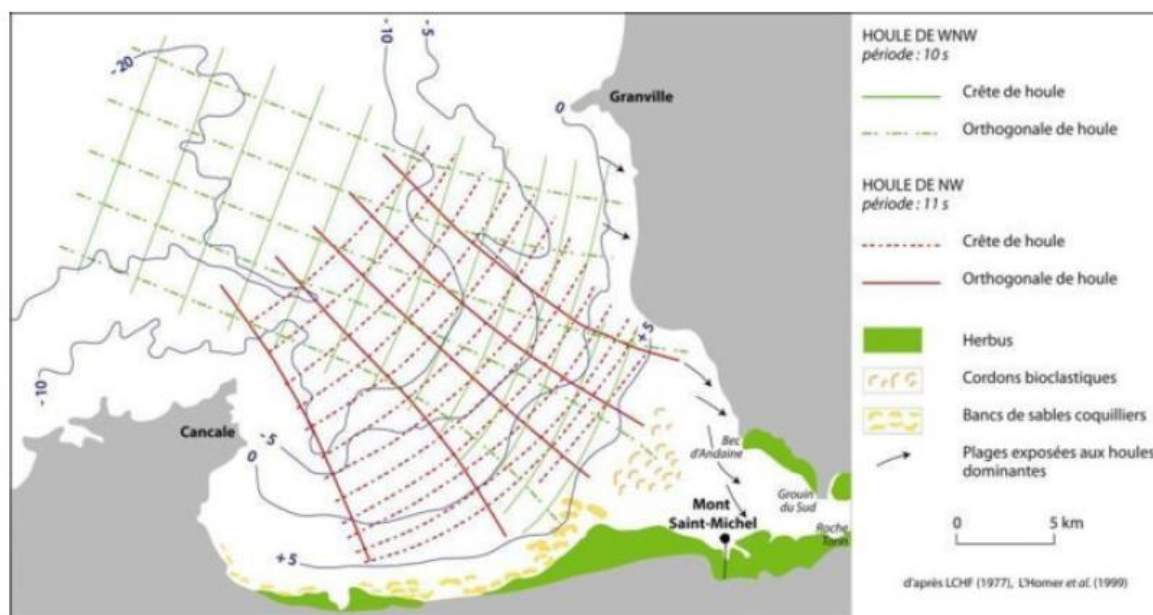


Figure 29: Plan des vagues de secteur Ouest en baie du Mont Saint-Michel (BONNOT, 2012)

Dans le cadre du projet de « rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel », une étude de propagation a été menée par le CETMEF (octobre 1999). Cette étude ne couvre pas directement le secteur d'étude mais l'ensemble de la baie, cependant le coefficient d'amortissement, entre l'entrée et de la grande baie et le nord du Mont-Saint-Michel, est estimé à 70-80% entre l'entrée de la grande baie et le nord du Mont-Saint-Michel. C'est pourquoi le coefficient de propagation K retenu est 0,3.

Par ailleurs, les pentes de l'estran étant faible, les vagues ont un déferlement de type « glissant » ou « déversant ». L'énergie est dissipée graduellement à l'approche de la plage.

La formule empirique de Stockdon et al. (2006) permet d'estimer le *set-up* pour les plages dissipatives (nombre d'Iribaren inférieur à 0,3) avec la formule suivante :

$$Setup = 0,016\sqrt{H_s L_s}$$

Le site d'étude présente les caractéristiques suivantes :

- Pente moyenne avant la plage : 0,67% ;
- Correction de propagation des vagues du large à la côte de 0,3 ;
- χ coefficient de cambrure des vagues, valeur par défaut au large, égale à 0,05 ;
- Houle au large : $H_m0 = 3,25$ m ;
- Longueur d'onde significative de houle, $L_s = H_s / \chi$, égale à 65 m ;
- Nombre d'Iribaren de 0,055 ;

La valeur de setup calculée est de 0,13 mètres. Le niveau marin le plus haut est donc obtenu avec un set-up de 13 cm pour une houle au large de 3,25 m et un niveau au repos de 8,55 m, soit un niveau marin comprenant la surcote liée à la houle de 8,68 m IGN, 15,42 m CM.

Mouvements verticaux terrestres (surrection/subsidence)

Aucun élément sur les mouvements verticaux terrestres au niveau de la zone d'étude n'a été identifié. La surrection/subsidence sera considérée comme nulle.

Prise en compte des incertitudes

Conformément au guide de la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR), 2016), les phénomènes non pris en compte dans la méthode retenue et les incertitudes liées à la mise en œuvre de cette méthode seront à prendre en compte dans l'estimation du niveau marin de référence. Comme le recommande le guide, une marge forfaitaire de 25 cm sera rajoutée au niveau marin de référence.

Prise en compte du changement climatique

Une augmentation du niveau marin de 20 cm correspondant à une première prise en compte immédiate de l'élévation du niveau moyen de la mer liée au changement climatique sera rajoutée, en plus de la marge de prise en compte des incertitudes, au niveau marin de référence. (Circulaire du 27 juillet 2011). A l'horizon 2100, cette marge sera majorée de 40 cm supplémentaire afin de prendre en compte l'évolution future du niveau moyen marin.

Proposition de niveau marin pour définir l'événement de référence

Le niveau marin de référence retenu pour la caractérisation de l'aléa submersion marine se décompose de la manière suivante :

- Niveau marin Z de 8,68m (IGN69) intégrant la surcote liée à la houle ;
- Aucuns mouvements verticaux terrestres : surrection/subsidence nulle ;
- Une marge de sécurité de 25 cm permettant de prendre en compte les incertitudes ;

- Une augmentation du niveau marin de 20 cm correspondant à une première prise en compte immédiate de l'élévation du niveau moyen de la mer liée au changement climatique, puis de 40 cm supplémentaire à l'horizon 2100.

Le niveau marin de référence retenu est de 9,13 m IGN69, soit 15,87 m CM. A l'horizon 2100, il sera de 9,43 m IGN69, soit 16,27 m CM.

2.2.2 Qualification de l'aléa de submersion marine

a) Logiciel

L'étude de submersion et débordement de cours d'eau s'appuie sur une modélisation des écoulements mise en œuvre avec le logiciel Hydra, développé et commercialisé par Hydratec.

Hydra est une plateforme de modélisation hydrologique et hydraulique bidimensionnel adaptée aux cours d'eau et estuaires ainsi qu'aux vallées et plaines inondables. Elle est conçue pour intégrer dans un même modèle des schémas de représentation contrastés, tels que la schématisation filaire, les casiers et les maillages bidimensionnels. Cette souplesse permet d'adapter au mieux la modélisation à la spécificité des configurations rencontrées dans les zones littorales situées à l'interface de plusieurs domaines hydrauliques et aux objectifs de modélisation poursuivis.

La formulation sous-jacente du moteur de calcul Hydra est fondée sur le concept de discrétisation des équations en volumes finis avec fondamentalement deux familles de termes : des termes de volumes et d'inertie attachés aux nœuds de calcul élargis aux objets de stockage et des termes d'échanges de flux (débits, quantités de mouvements) entre les nœuds.

Le logiciel intègre trois types de schématisation qui peut coexister au sein d'un même modèle :

- Le domaine filaire ou unidimensionnel : l'écoulement le long d'un bief de rivière ou de vallée inondable, est caractérisé par une direction privilégiée suivant son axe longitudinal ; la vallée est décrite par des sections en travers, distinguant le lit mineur, le lit majeur actif participant à l'écoulement de crue, et les zones d'expansion. Ce domaine peut aussi inclure des sections fermées, représentant des tronçons de cours d'eau canalisé en souterrain ou des collecteurs ;
- Le domaine du casier : il correspond à la zone d'accumulation dans le lit majeur où la vitesse moyenne est faible et les transferts de débits conditionnés par des lois d'échange aux frontières, ses contours s'appuient sur la topographie naturelle ou sur des obstacles artificiels à l'écoulement des eaux ;
- Le domaine bidimensionnel : il s'applique aux zones avec écoulement fortement bidimensionnel, décrites par une topographie détaillée qui permet de restituer notamment la carte des vitesses locales ;
- Les rue : elles sont des axes privilégiés des écoulements et assimilées à un système filaire ;

Les schématisations filaires et multifilaires sont régies par les équations de St Venant généralisées et bidimensionnelles respectivement, ce qui permet de modéliser l'impact de n'importe quel ouvrage et aménagement hydraulique.

b) Caractéristiques du modèle

Un modèle d'écoulement bidimensionnel a été mis en œuvre sur l'ensemble de la zone d'étude. Il est défini par les éléments suivants :

- Les données topographiques issues du LIDAR (2012) à une résolution de 1 m ;
- Les profils en travers le long de la Claire Douve ;
- Les mesures de terrain ;
- Les conditions aux limites maritimes définies par les conditions en mer sous formes de loi côte en fonction du temps,
- Les conditions aux limites en amont définies par des débits d'injection sous forme de hydrogramme pour les principaux cours d'eau ;
- Une distribution du coefficient de rugosité définie en fonction de l'occupation des sols.

L'ensemble du domaine d'étude (prairies, champs cultivé, zone urbaine, ...) est défini par un maillage 2D dont la précision est fonction de la topographie. Le maillage s'appuie sur les singularités formées par les remblais, les routes et les chenaux.

L'architecture du modèle et de ces différents éléments est présentée dans l'**Annexe 7**.

c) Définition des conditions aux limites et initiales

Une chronique de niveaux marins à la côte a été reconstituée sur 48h à partir de la marée théorique prédite par le SHOM à Granville le 08/04/2016 correspondant à une marée d'équinoxe de coefficient 117. A partir des données du guide de Référence Altimétriques Maritimes du SHOM, il est possible de déterminer un coefficient de similitude entre le signal de marée à Granville et au Mont Saint-Michel à partir des valeurs de PMVE (niveau des pleines mers de vive-eau). En effet, le Mont Saint-Michel est plus à l'intérieur de la baie, le niveau marin y est légèrement plus élevé, d'environ 2%.

Le premier cycle de marée correspond au niveau de référence centennal calculé précédemment et les deux cycles suivants à la marée théorique, rehausser de 20 cm pour la prise en compte du changement climatique et de 60 cm pour le signal à l'horizon 2100.

Le graphique [a] ci-dessous illustre les courbes de marée reconstituées donnant les côtes d'eau en fonction du temps imposées en condition limite maritime du modèle.

Les débits, *Figure 30.b*, sont injectés afin que les pics de crue des hydrogrammes coïncident avec le plus haut niveau marin.

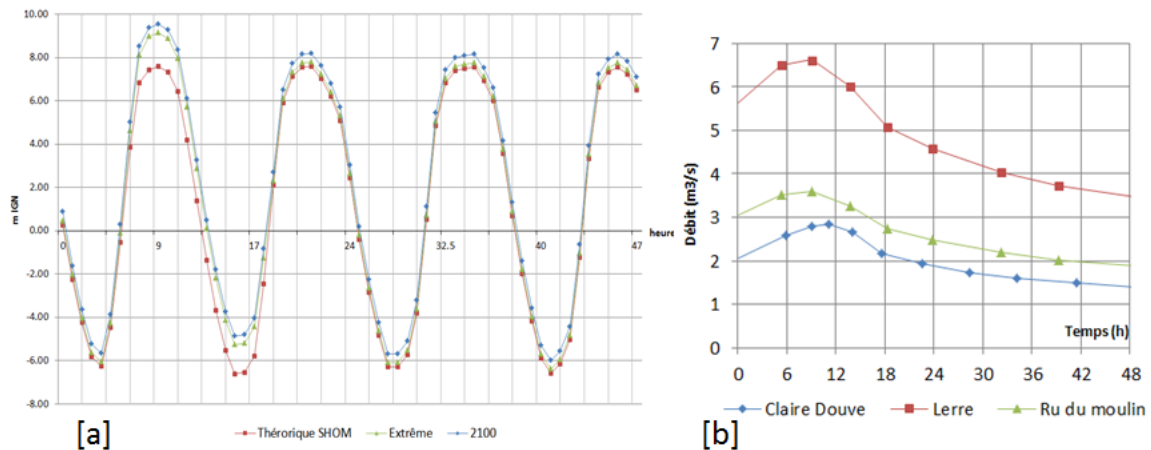


Figure 30 : Chronique de [a] niveau marin reconstitué (m IGN69) et [b] hydrogrammes des rivières principales

Le marais de la Claire Douve est mis en eau au début de la simulation. En effet en hiver, avec les remontées de nappe et les apports par ruissellement, le marais est dit « blanc ». Les autres cours d'eau dispose de 20 cm d'eau au début de la simulation dans leur lit mineur. Les linéaires des cours d'eau modélisés étant faibles, maximum de 5,6 km pour la Claire Douve, la mise en eau est rapide.

d) Calage

Modèle 1D

Comme il n'existe pas de limnimétries des cours d'eau modélisés, il n'est pas possible d'ajuster les valeurs de rugosité à une courbe débit/hauteur d'eau historiques. Les valeurs par défaut du modèle sont utilisées pour le lit majeur ($K_s=35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$), et pour le lit mineur ($K_s = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour Le Lerre et Le Ru du Moulin, $K_s = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ pour la Claire Douve).

Modèle 2D

Les variations de l'occupation du sol ont un impact sur l'écoulement. Il convient donc d'adapter le modèle en conséquence. D'une part en délimitant des domaines de zones urbaines inondables où le flux ne circule pas afin de ne pas surestimer l'extension totale de l'inondation et d'autre part en assignant un coefficient de frottement au maillage 2D différent en fonction de l'occupation du sol.

Une étape de calage consisterait en l'ajustement des paramètres du modèle, en particulier les coefficients de Strickler, de sorte à retrouver par le calcul les niveaux de submersion observés. Ici l'absence d'événement observé et quantifié a conduit à retenir des valeurs usuelles.

Cependant, à défaut de calage, un test de sensibilité sur les coefficients de frottement appliqués dans le modèle a été réalisé. Les valeurs par défaut ont été augmentées puis diminuées de 20 %. Les figures en dans l'Annexe 9 présentent les évolutions temporelles de la hauteur d'eau en différents points du modèle pour la situation de référence dans les trois configurations de rugosité du modèle présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 12 : Coefficients de rugosité (Strickler) testés

Coefficient de Strickler ($m^{1/3}/s$)	Ks	Ks +20%	Ks - 20%
Surface agricole (prairie)	15	18	12
Surface urbanisée (hors ZUI et route)	7	8.4	5.6
Plage	35	42	28
Route	40	40	40

Le zonage des coefficients est visible dans l'**Annexe 7**.

Lorsque les coefficients de rugosité augmentent, les hauteurs d'eau maximales calculées augmentent de quelques millimètres à 5 cm en fonction des endroits du modèle considérés. Ces résultats permettent d'observer le faible impact de ces coefficients de rugosité et de valider les coefficients de Strickler fixés pour la modélisation.

2.2.3 Scénarios étudiés

Les 4 scénarios suivant sont étudiés :

- Scénario 1 : Événement de référence actuel avec débordement des cours d'eau;
- Scénario 2 : Événement de référence actuel avec débordement des cours d'eau et avec les hypothèses de brèche du cordon dunaire au Sud de Saint-Jean-le-Thomas ;
- Scénario 3 : Événement de référence à horizon 2100 avec débordement des cours d'eau et avec les hypothèses de brèche du cordon dunaire ;
- Scénario 4 : Événement de référence à horizon 2100 avec débordement des cours d'eau et avec les hypothèses de brèche du cordon dunaire au Sud de Saint-Jean-le-Thomas ;

La défaillance d'un ouvrage ou d'un cordon naturel peut être de deux types :

- Ruine généralisée si l'ouvrage est surversé (d'au moins 20cm pour un ouvrage hydraulique) ;
- Brèche(s) forfaitaire(s) en droit des points de faiblesses de l'ouvrage.

Dans le cas d'une brèche du cordon dunaire, la largeur par défaut en l'absence de brèches historiques, est de 100 m. La cote au lieu de la brèche est celle du terrain naturel à l'arrière de la dune. Lors d'une rupture ou surverse brutal, les vitesses d'écoulement peuvent être très importantes en arrière du cordon, comme le montre la *Figure 32* avec des vitesses supérieures à 1 m/s en droit de la brèche. Il est préconisé d'identifier une bande de précaution afin de rendre compte des fortes dynamiques de submersion (*Figure ci-dessous*).

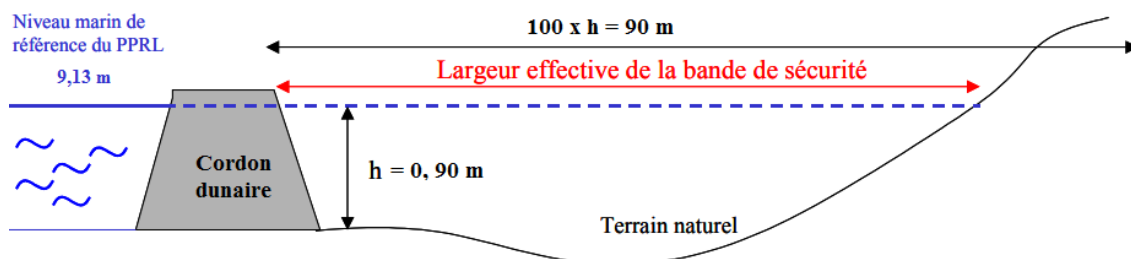


Figure 31: Bande de sécurité forfaitaire derrière un ouvrage

La brèche sera modélisée où l'érosion est la plus importante, soit au Sud des enrochements de Saint-Jean-le-Thomas, et où la route est la plus proche du trait de côte.

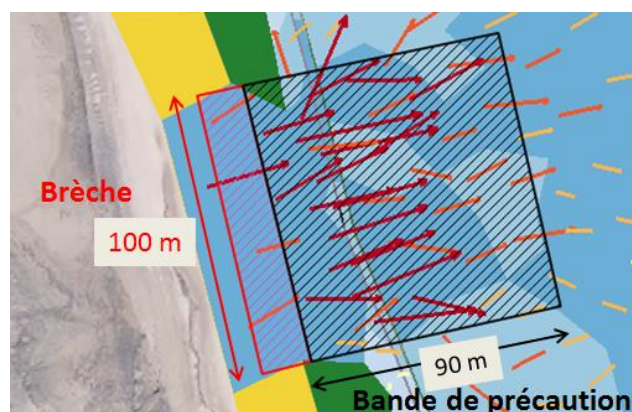


Figure 32 : Exemple de la modélisation d'une brèche ($t = 9h$)

NB : La défaillance de la porte à flot au Sud de la Claire Douve fut un temps envisagée, cependant la côte de l'ouvrage étant inférieure au niveau centennal de référence, l'ouvrage n'a que très peu d'effet sur les hauteurs maximales résultantes.

2.2.4 Caractérisation de l'aléa

Selon le guide de la DGPR, l'aléa submersion marine peut être caractérisé de la manière suivante en fonction des couples hauteur d'eau maximale produite et vitesse d'écoulement de l'eau associée :

Tableau 13 : Qualification de l'aléa submersion marine

Aléa submersion marine			Vitesse (m/s)			
			LENTE	MOYENNE	RAPIDE	TRES RAPIDE
			$V < 0.2$	$0.2 \leq V < 0.5$	$0.5 \leq V < 1.25$	$V \geq 1.25$
Hauteur (m)	FAIBLE	< 0.5	Faible	Modéré	Fort	Très fort
	MOYENNE	$0.5 \leq H < 1$	Modéré	Modéré	Fort	Très fort
	FORTE	$1 \leq H < 2$	Fort	Fort	Très fort	Très fort
	TRES FORTE	$H \geq 2$	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort

2.2.5 Résultats

Préliminaire

La méthode consistant à superposer le niveau marin de référence centennal au relevé topographique (guide méthodologique du PPRL de 1997) reste d'actualité pour appréhender de façon simple les zones potentiellement soumises à la submersion marine.

Le calcul des hauteurs d'eau à terre est le résultat de la différence du plan d'eau statique défini par le niveau marin centennale de référence et du MNT. A partir de cette grille des hauteurs d'eau, sont définis trois types de tranches d'eau homogènes présentant des côtes d'eau équivalentes : de 0 à 0,5 m, de 0,5 à 1m et supérieure à 1m. La carte de résultat est présentée dans l'Annexe 8.

Les principales conclusions retenues sont les suivantes :

- L'ensemble du marais de la Claire Douve constitue une dépression parallèle au trait de côte ;
- La porte à flot est effacée et ne peut empêcher l'intrusion marine, elle constitue un point d'entrée de la submersion dans le marais;
- La commune de Saint-Jean-le-Thomas et en particulier le marais de la Bunelle sont sous l'eau. Les zones sous le niveau de référence sont déconnectées du domaine marin et protégées par les enrochements et le cordon dunaire. Cependant en cas de détérioration ou de rupture des ouvrages, la zone en arrière (nombreuses habitations) se retrouverait menacée par les intrusions marines.

Scénarios

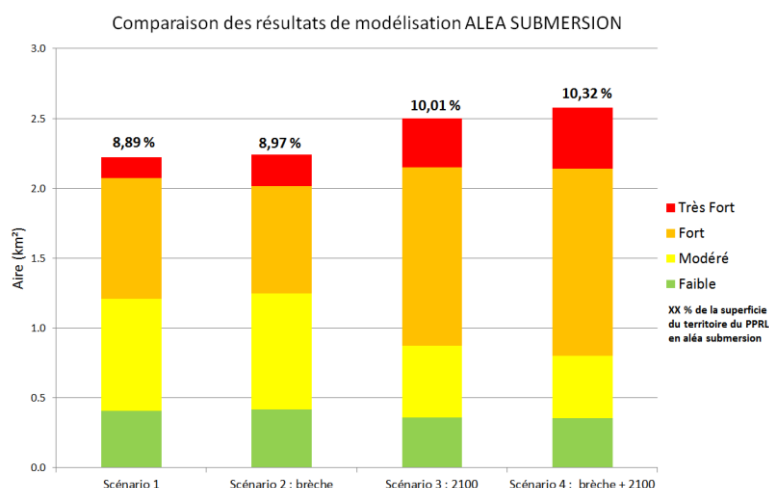


Figure 33 : Comparaison des aires inondées par niveau d'aléa et scénarii modélisés

Les résultats des différentes simulations sont présentés en annexe. Les zones inondées représentent jusqu'à plus de 10% de la superficie de l'ensemble du territoire d'application du PPRL lors du scénario le plus pessimiste (scénario 4).

Au niveau de Saint-Jean-le-Thomas, l'effet du niveau marin de référence se répercute sur le Ru du Moulin, c'est le point d'entrée de la mer. Le marais de la Bunelle est inondé par le ruisseau, avec ou sans batardeau. Par endroit les hauteurs d'eau surpassent les deux mètres.

La rupture du cordon dunaire au Sud de Saint-Jean-le-Thomas implique une augmentation des vitesses d'écoulement en arrière immédiat de l'ouvrage. La superficie caractérisée par un aléa très fort s'accroît et la zone inondée s'agrandit. La brèche, telle qu'elle a été modélisée, n'augmente pas l'aléa des constructions avoisinantes, localisées au Sud de Saint-Jean-le-Thomas, voire la carte des aléas du scénario 2 en **Annexe 11**.

L'ensemble du marais de la Claire Douve présente un aléa compris entre faible et très fort. Au lieu-dit « Les Corvées », où se trouve la porte à flot, le risque est compris entre modéré et fort dès le scénario 1. La mer submerge les routes, entre dans la Claire Douve et se déverse dans la Chantereine.

A Genêts, la route D911 qui traverse le bourg est un axe privilégié de la propagation des inondations avec des vitesses supérieures au m/s et des hauteurs d'eau supérieures au mètre. L'impact des apports des rivières est non négligeable, en particulier en amont des communes de Saint-Jean-le-Thomas et Genêts.

3 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

3.1 CONCLUSION

Phase 1 :

L'analyse générale du fonctionnement du littoral de Saint-Jean-le-Thomas, Dragey-Ronthon et Genêts a permis de décrire les phénomènes existants, de comprendre l'évolution du site dans le temps et l'espace et ainsi de connaître les événements historiques majeurs et leurs impacts sur la zone d'étude.

Ainsi, les houles dominantes venant du secteur Ouest-Nord-Ouest de la baie, très énergétiques, sont les principales responsables de l'organisation morphosédimentaire du littoral. Les courants de houle associés aux courants de marées du flot sont à l'origine de la dérive. Au Nord, combinées aux faibles apports sédimentaires, elles provoquent une rétrogradation du trait de côte avec un recul des dunes, amplifié en certain point par l'anthropisation du trait de côte. Au Sud, les forts apports sédimentaires liés à la dérive littorale, NNO à SSE, et la dynamique de houle permettent la construction et progradation de flèches sableuses mobiles au droit du Bec d'Andaine. Le recul du trait de côte est également lié à l'augmentation du niveau marin et à l'action anthropique telle que la fréquentation des plages et des dunes, les ouvrages de fixation du trait de côte à Saint-Jean-le-Thomas, le surpâturage de certains champs, ou les chemins à travers les dunes.

L'analyse du trait de côte montre qu'à terme l'érosion pourrait créer une brèche au Sud des enrochements de Pignochet à Saint-Jean-le-Thomas, et donc menacer le fonctionnement et la gestion actuelle du marais de la Claire Douve.

Les informations recueillies ont permis d'identifier 4 événements tempétueux ayant occasionné des dommages sur la frange côtière du PPRL, dont le plus important Eleanor en janvier 2018 causa de graves dégâts notamment à Saint-Jean-le-Thomas. Aucun ne provoqua de franchissements significatifs par paquets de vague, de rupture d'ouvrage ou de structure naturelle ou de débordement, ni de submersion marine.

D'un point de vue hydrologique, la concomitance d'évènement de crue avec des conditions océaniques violentes risque d'augmenter les caractéristiques de l'aléa submersion (hauteur, vitesse d'écoulement, ...). Le Lerre a ainsi plusieurs fois débordé et inondé des habitations à Genêts que ce soit à cause de fortes pluies ou par la mer. Tout comme le Lerre, les ouvrages hydrauliques et les capacités d'écoulement de la Claire Douve ne permettent pas l'évacuation rapide de la crue et augmentent le risque d'inondation à l'aval.

Phase 2 :

L'étude de l'évolution de la position du trait de côte a permis d'analyser l'évolution de la côte à long terme, depuis 1947, et de prédire sa future position, à l'horizon 2118. Les taux d'érosion/accrétion obtenus sont du même d'ordre grandeur que les résultats obtenus par l'université de Caen et suivent la même tendance, soit une érosion décroissante vers le Sud avec une zone d'accrétion en droit du Bec d'Andaine. Le Sud immédiat de l'enrochement longitudinal de Pignochet au Sud de Saint-Jean-le-

Thomas présente le taux d'érosion maximum, -7,4 m/an, et fait de cet endroit une zone privilégiée pour une future brèche.

En l'absence d'évènement historique de submersion dans le périmètre du PPRL, l'évènement naturel de référence centennal est retenu. Le niveau marin associé se compose de phénomène physique quantifiable : la marée prédite ; la surcote liée au vent, à la pression atmosphérique et au wave set-up ; d'une surélévation du niveau marin sous l'effet du changement climatique ; et de marges de sécurités liées aux incertitudes des analyses statistiques des phénomènes marins et de la prise en compte de l'augmentation du niveau moyen marin lié au changement climatique.

Le niveau marin de référence s'élève à 9,13 mètres et 9,53 mètres à l'horizon 2100 (m IGN69).

L'aléa submersion est déterminé en appliquant à un modèle d'inondation bidimensionnel, Hydra, un signal de marée reconstitué pour l'évènement de référence et les phénomènes naturels concomitant mis en évidence lors de la phase 1 ; soient des débits décennaux pour les trois principales rivières (Lerre, Claire Douve et Ru du Moulin), et l'affleurement des nappes phréatiques. L'aléa submersion est qualifié selon 4 niveaux : faible, modéré, fort et très fort selon la hauteur d'eau maximum possible, et la vitesse d'écoulement associée ; et déterminé pour plusieurs scénarios.

L'intrusion marine se fait principalement par le Sud de la Claire Douve et se propage dans l'ensemble du marais. Le marais de la Bunelle est qualifié par un aléa faible à modéré, et jusqu'à fort à l'horizon 2100. La modélisation d'une brèche au Sud des enrochements Pignochets, génère une augmentation locale de la vitesse, sans augmenter l'aléa des habitations avoisinantes.

3.2 PERSPECTIVES

Pour des côtes basses sableuses, un évènement tempétueux extrême peut modifier le profil morphologique d'une dune. Dans le cadre de ce rapport, l'estimation du recul maximal (Lmax) provient d'une observation ponctuelle à la suite de la tempête Eleanor. Pour une meilleure estimation du recul dunaire, l'application de formules empiriques est à privilégier. La méthode de Kriebel et Dean (1936) par exemple se base sur l'étude des profils de plage avant et après un évènement tempétueux.

En l'absence de données quantifiées d'évènement de submersion ou d'inondation (hauteur, débit), le modèle n'a pas été pu être calé. Un test de sensibilité du coefficient de rugosité, Strickler, a été effectué. D'autres tests de sensibilité pourront être effectués sur les paramètres suivants : les débits de crue injectés, l'utilisation de ZUI pour les bâtiments, ou l'impact des ouvrages hydrauliques sur l'écoulement.

Les cartes d'aléas produites fournissent un niveau d'eau à l'échelle d'une maille du modèle, dont l'ordre de grandeur est de 10 m² à plus de 2000 m². Ce ne sont pas des résultats utilisables en l'état actuel pour les riverains. Le MNT fourni possédant une résolution de l'ordre du mètre, il est possible de calculer une hauteur à cette échelle.


La phase suivante du PPRL consistera à déterminer les enjeux du territoire, c'est-à-dire l'ensemble des biens, des personnes, et des activités susceptibles d'être affectées ou endommagées par les aléas considérés dans la phase 2 ; puis à croiser aléa et enjeu pour obtenir une carte des risques littoraux, l'objectif final du PPRL.

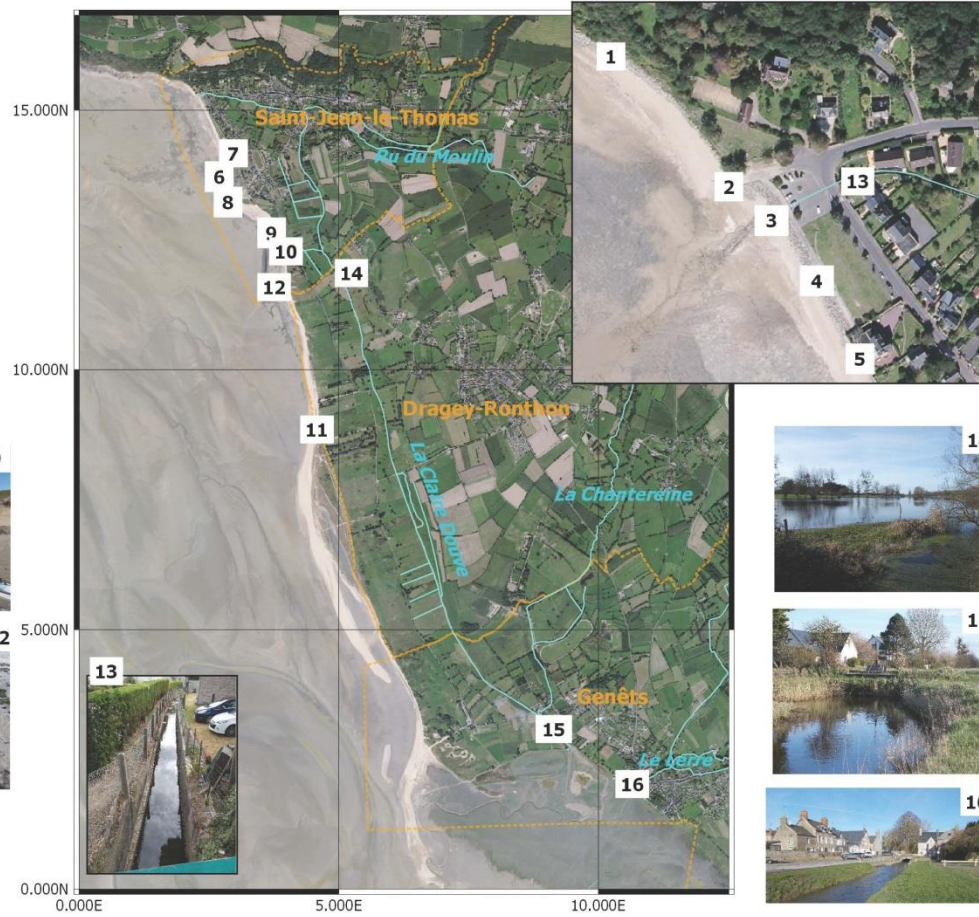
BIBLIOGRAPHIE

- AUFFRET, J. (1989). *Géométrie de la couverture sédimentaire meubles dans le domaine intertidal et sous-marin*.
- BONNOT. (2012). *Dynamique sédimentaire intertidale en baie du Mont-Saint-Michel entre évolution naturelle et aménagements*. Conférence: Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil.
- CEREMA, METEO France, CETMEF, EDF, SHOM (2013). *Etude Vimers des événements de tempête en Bretagne. 160 fiches descriptives*.
- CETMEF. (2013). *Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes - Environnements maritimes et estuariens*.p.182.
- CETMEF/SHOM. (2012). *Note méthodologique relative au produit « Niveaux marins extrêmes »*.
- CETMEF/SHOM. (2012). *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)*.
- COURTOIS, B., CALINE, L'HOMER, & VOT, L. (2002). *La Baie du Mont Saint-Michel et l'estuaire de la Rance. Environnements sédimentaires, aménagements et évolution récente*. Publ. ELF-EHEP.
- CREC, U. d. (s.d.). *Suivi du littoral du département de la Manche*. Récupéré sur <http://crec.unicaen.fr/suivi50>: http://crec.unicaen.fr/suivi50/sl50_st.php?css=1
- DDTM50. (14/02/2017). *Dossier de déclaration construction STEU Saint-Jean-le-Thomas*.
- DGPR. (mai 2014). *Guide méthodologique - plan de prévention des risques littoraux*. MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ENERGIE (MEDDE) : DGPR/ SRNH. Edition mai 2014. p. 169.
- Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR). (2016). *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN) - Guide général*.
- DREAL Normandie. (2014). *Carte des profondeurs de nappe phréatique en période de très hautes eaux*. 3 cartes.
- DREAL Normandie. (2014). *Débits caractéristiques des cours d'eau Claire Douve et Le Lerre à Genêt*. 2p.
- ELHÁÏ H. (1967) - *Le Mont-Saint-Michel, le cadre naturel et les vicissitudes du site jusqu'au VIIIe siècle*. Millén. monastique Mont-SaintMichel, t. 2, p. 13-29.
- GAUVAIN, BABEY, AQUILINA, DREUZY, GRESSELIN, & LOUF. (2017). *Impact des variations climatiques sur la vulnérabilité aux débordements de nappe côtières du Cotentin*. Rapport final Observatoire des Sciences de l'Université de Rennes 1.55p..

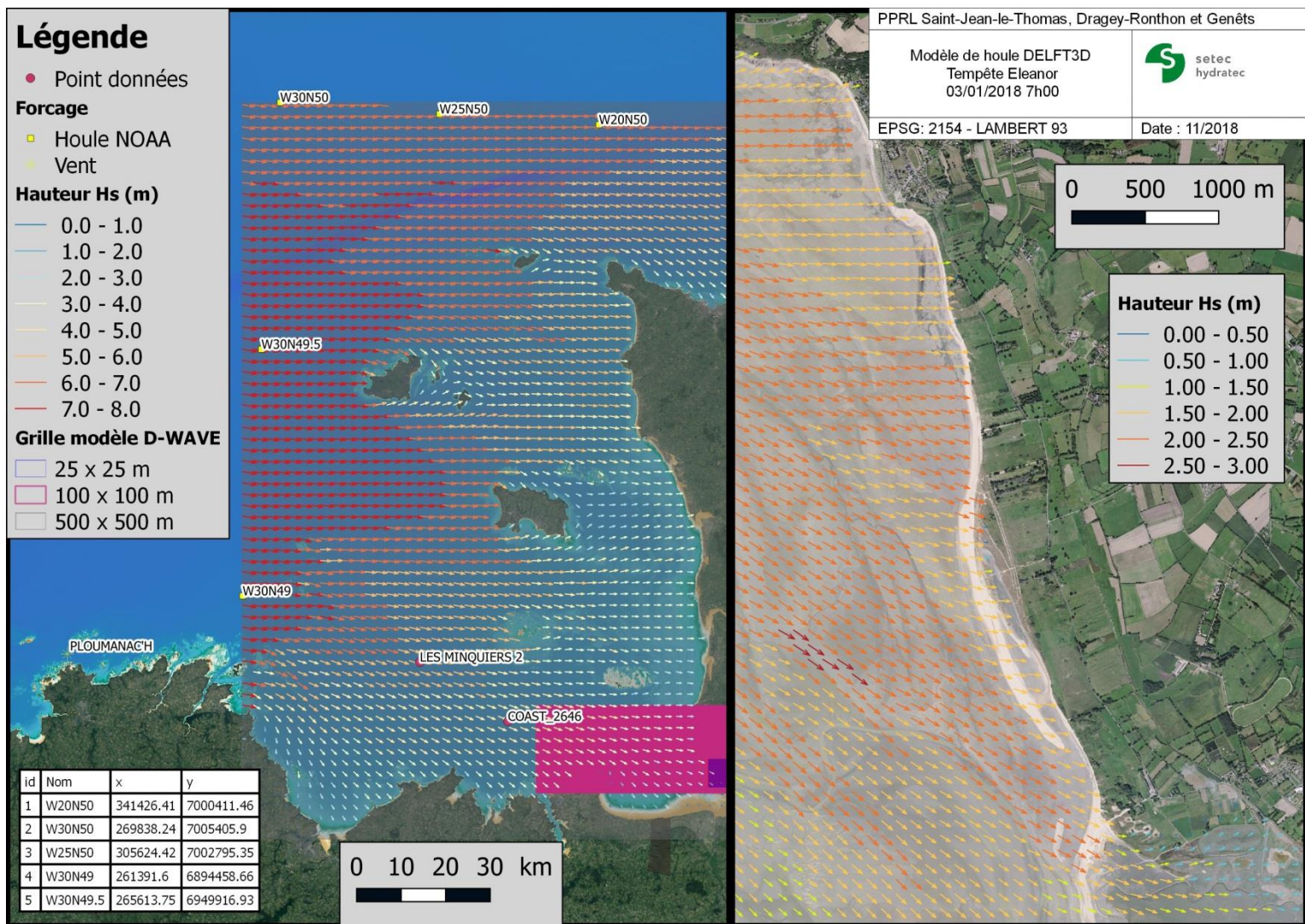
- GENZ et al. (2007). *The predictive accuracy of shoreline change rate methods alongshore beach variance on Maui, Hawaii*. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208: Journal of Coastal Research.
- GLATRE, & MEUNIER. (2013). *Projet d'Ingénierie du Littoral : Lutte contre le recul du trait de côte et l'aléa submersion. Exemple de Saint-Jean-le-Thomas (50)*. Rapport de M2, Université de Caen.
- J. LAMBERT, M.GARCIN (2013). *Submersions marines historique. Rapport BRGM-RP62644FR, 99p., 74 ill., 11 tabl., 1 ann..*
- LEVOY. (1994). *Évolution et fonctionnement hydrosédimentaire des plages macrotidales : l'exemple de la côte Ouest du Cotentin*.
- LEVOY, F. (2013). *L'influence du cycle lunaire de marées de 18,6 années sur les zones intertidales: la Baie du Mont-Saint-Michel, France. Géologie Marine. p.8.*
- L'HOMER. (1999). *Carte géologique de la France à 1/50000. Baie du Mont-Saint-Michel. Notice explicative (éd. 208)*. (BRGM, Éd.). p. 186.
- Manche, DDE. (2002). *Projet de "Retablissement du caractère maritime du Mont Saint-Michel"*.
- Météo France. (2012). *Caractéristiques et état écologique Manche - Mer du Nord*. Rennes. Rapport.
- Ministère de l'environnement, d. l. (2017). *Actions menées par l'Etat à la suite de la tempête Xynthia*.
- SHOM. (2017). *Références Altimétriques Maritimes - Port de France métropolitaine et d'outre-mer*.
- SHOM, & IFREMER. (juin 2012). *Courantologie Manche - Mer du Nord*.
- SOGETI. (2005). *Etude préalable à la gestion des risques d'inondation et d'érosion sur les bassins du Ru et du Lerre*.
- TESSIER, B. (2006). The Bay of Mont-Saint-Michel northeastern littoral: an illustrative case of coastal sedimentary body evolution and stratigraphic organization in a transgressive/highstand context. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 177, 71-78.
- TESSIER, B. (2009). *Morphodynamique Continentale et Cotière (Vol. 37)*. FRANCE: Université de CAEN.
- UNICAEN, C. (2018). *Suivi 50*. Récupéré sur http://crec.unicaen.fr/suivi50/sl50_st.php?css=1
- WEILL, P. (2010). *Formation et évolution de cheniers en contexte macrotidal. Approches expérimentales et in-situ*. Minéralogie. Université de Caen, 2010. Français. <tel-00535545>. p 282

ANNEXES

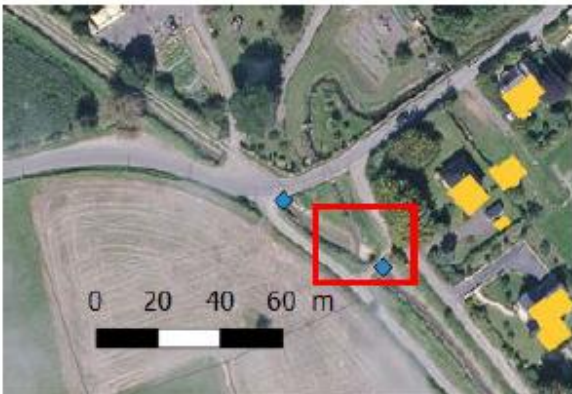



PPRL Saint-Jean-le-Thomas, Dragey-Ronthon et Genêts	
Diagnostic	
Echelle: 1 / 40 000	Date : 10/2018



Annexe 1: Diagnostic du site d'étude



Annexe 2 : Modèle de propagation de houle - hauteur de houle significative - Eleanor 03/01/2018 à 7h

FICHE n°21 / 22	TYPE D'OUVRAGE : CONTINENTAUX		Fonction : Porte à flots															
Commune : Genêts	Position mesure : Aval		Cours d'eau : La Claire Douve	Date : 18/07/2018														
Plans de localisation			 <table border="1" data-bbox="981 763 1481 831"> <tr> <td data-bbox="981 763 1230 831">Coordonnées (EPSG : 2154)</td> <td data-bbox="1230 763 1481 831">X : 369702,074 Y : 6852520,875</td> </tr> </table>		Coordonnées (EPSG : 2154)	X : 369702,074 Y : 6852520,875												
Coordonnées (EPSG : 2154)	X : 369702,074 Y : 6852520,875																	
Photo de l'ouvrage																		
Source	Visite Terrain SETEC Hydratec + Données SMBCG SIG et relevé topographique 2015 (IGN69)																	
Observation	<ul style="list-style-type: none"> - Cadre béton - A l'amont confluence des deux cours d'eaux - Bourlet en aval - Photo N°129, 130 et 131 - Relevé topographique : 4 points 		<table border="1" data-bbox="943 1619 1484 1852"> <thead> <tr> <th colspan="2" data-bbox="943 1619 1484 1648">Dimensions de l'ouvrage (m) : Amont</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="943 1648 1214 1680">Hauteur route</td> <td data-bbox="1214 1648 1484 1680">3,10 (7,676)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="943 1680 1214 1711">Hauteur sous voute</td> <td data-bbox="1214 1680 1484 1711">1,35/1.50</td> </tr> <tr> <td data-bbox="943 1711 1214 1742">Hauteur muret</td> <td data-bbox="1214 1711 1484 1742">-</td> </tr> <tr> <td data-bbox="943 1742 1214 1774">Largeur</td> <td data-bbox="1214 1742 1484 1774">1,70</td> </tr> <tr> <td data-bbox="943 1774 1214 1805">Longueur</td> <td data-bbox="1214 1774 1484 1805">5,00</td> </tr> <tr> <td data-bbox="943 1805 1214 1852">Cote lit</td> <td data-bbox="1214 1805 1484 1852">5,329 (aval 5,417)</td> </tr> </tbody> </table>		Dimensions de l'ouvrage (m) : Amont		Hauteur route	3,10 (7,676)	Hauteur sous voute	1,35/1.50	Hauteur muret	-	Largeur	1,70	Longueur	5,00	Cote lit	5,329 (aval 5,417)
Dimensions de l'ouvrage (m) : Amont																		
Hauteur route	3,10 (7,676)																	
Hauteur sous voute	1,35/1.50																	
Hauteur muret	-																	
Largeur	1,70																	
Longueur	5,00																	
Cote lit	5,329 (aval 5,417)																	

Annexe 3 : Exemple de Fiche ouvrage – Porte à flot



Annexe 4 : Ouvrages côtiers et structure du trait de côte du domaine d'étude (source : visite de terrain 2018 et SMBCG)

Contexte : Le 25 décembre 1999 à 18 UTC apparaît une petite déformation des isobares au large de la pointe de Bretagne. Elle se transforme en un thalweg dans le fond duquel se forme un minimum qui se déplace rapidement vers l'Ouest de la Bretagne en se creusant puis vers le Nord de la France. A 03h UTC, la dépression se situe au Nord de la Bretagne, en Manche. A 06h UTC, elle est centrée sur la Basse-Normandie.

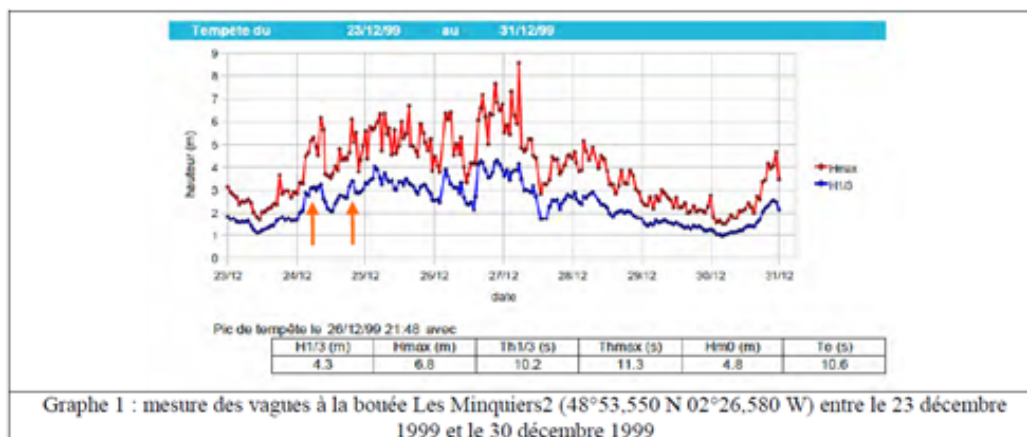


Trajectoire et estimation des rafales maximales du 26/12/1999 de 00UTC à 22 UTC (Météo France)

Caractéristiques : Au marégraphe de Saint Malo, la hauteur maximale est observée le 26/12 à 8h08. Elle est de 12,75m (inférieure au PHMA). La surcote de BM maximale observée est de 0,88m le 26/12 à 15h26. Le jour du maximum de surcote à la pleine mer, le 27/12/1999 à 21h24, la surcote de PM maximal à Saint-Malo est de 0,14m avec une hauteur maximale associée de 11,27m. Les coefficients de marée sur la période sont de 102 (25/12/1999) à 54 (le 29/12/1999).

La bouée des Minquiers2 mesure les houles suivantes :

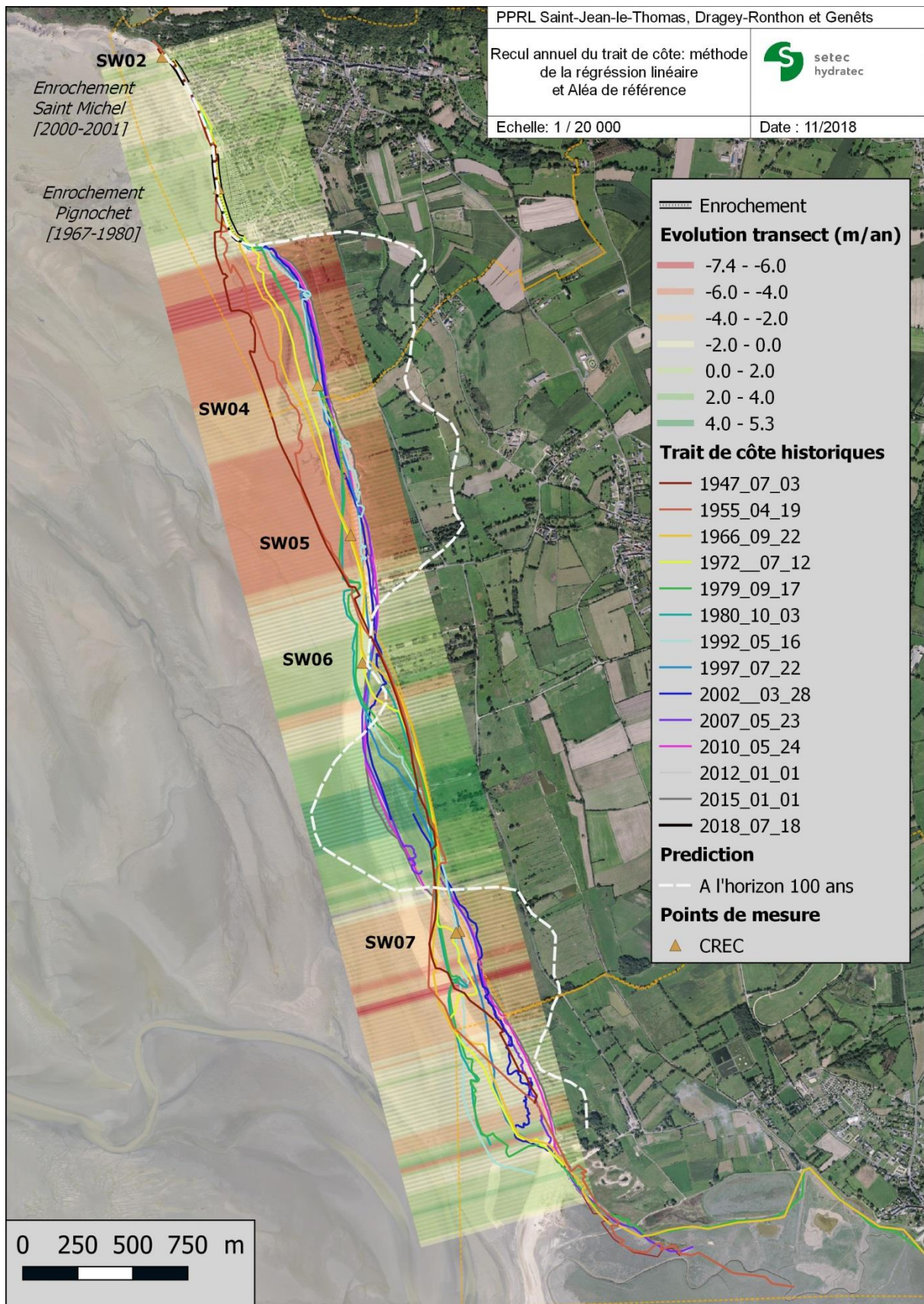
- Le 24/12, la hauteur significative maximale (H1/3) de 3,40m intervient en fin de journée. La hauteur maximale atteint les 6 mètres
- Le 26/12, la hauteur significative maximale (H1/3) de 4,20m intervient en fin de journée. La hauteur maximale atteint les 7 mètres.
- Le 27/12, la hauteur significative maximale (H1/3) de 4,20m intervient en début de journée. La hauteur maximale atteint les 8 mètres.



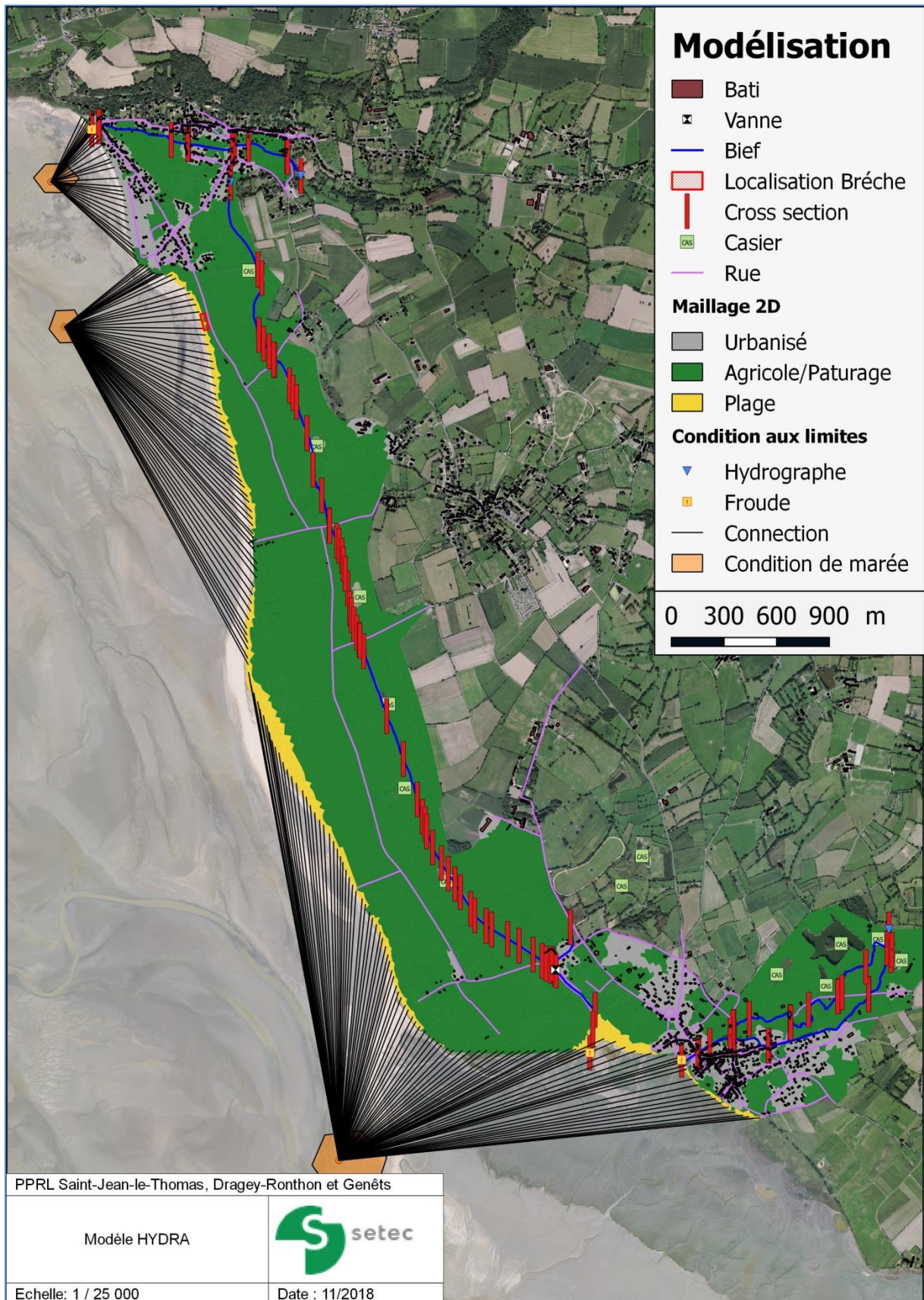
Graph 1 : mesure des vagues à la bouée Les Minquiers2 (48°53,550 N 02°26,580 W) entre le 23 décembre 1999 et le 30 décembre 1999

Dégâts : Arrêtés de catastrophes naturelles pour la ville de Saint-Jean-le-Thomas : Inondations, coulées de boue et mouvements de terrain : du 25/12/1999 au 29/12/1999.

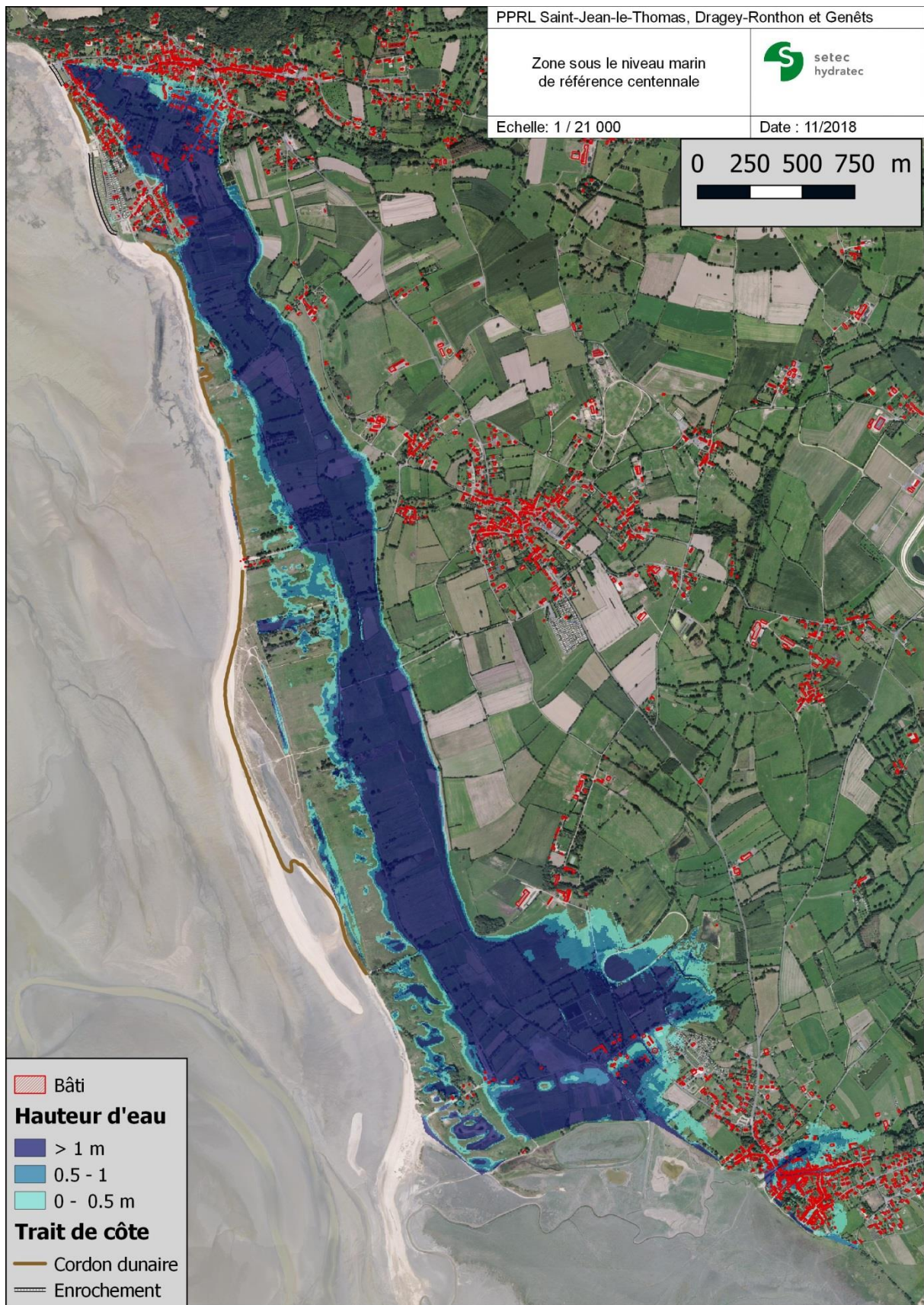
Annexe 5 : Exemple de fiche tempête – LOTHAR et MARTIN (1999)



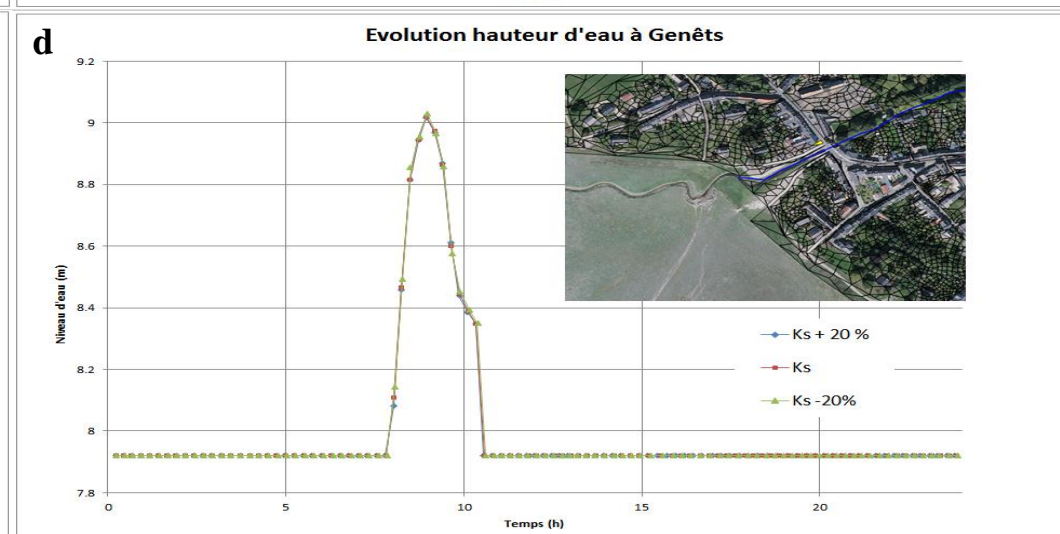
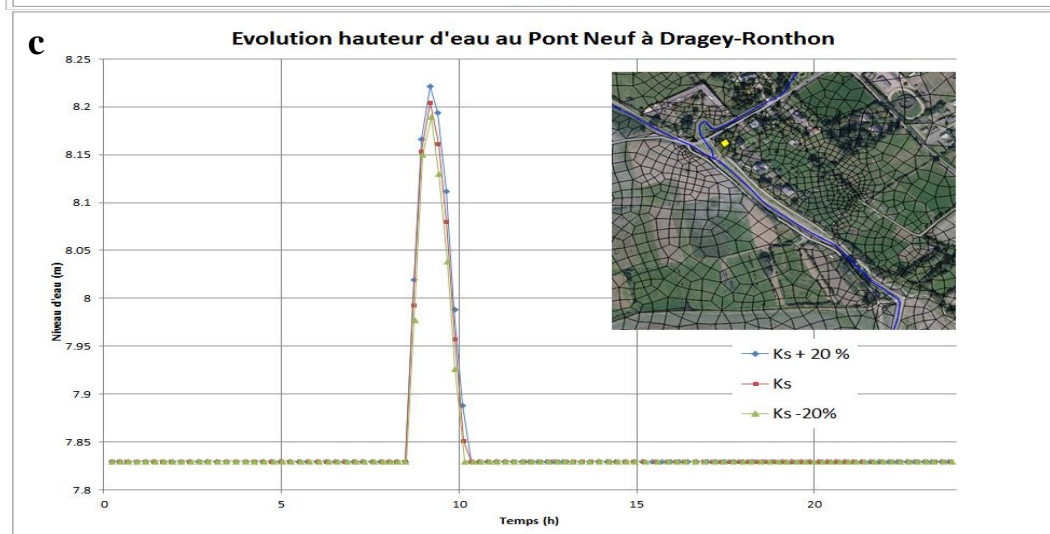
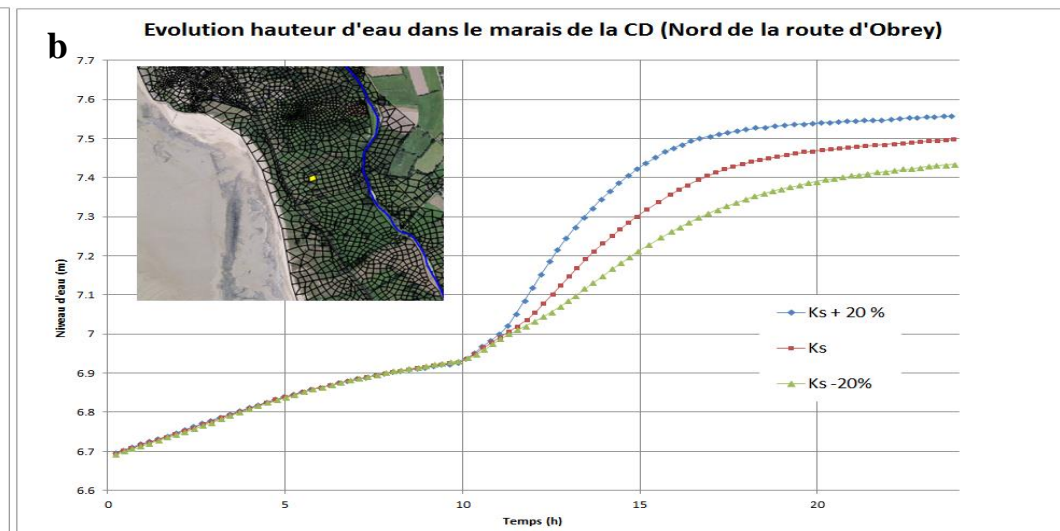
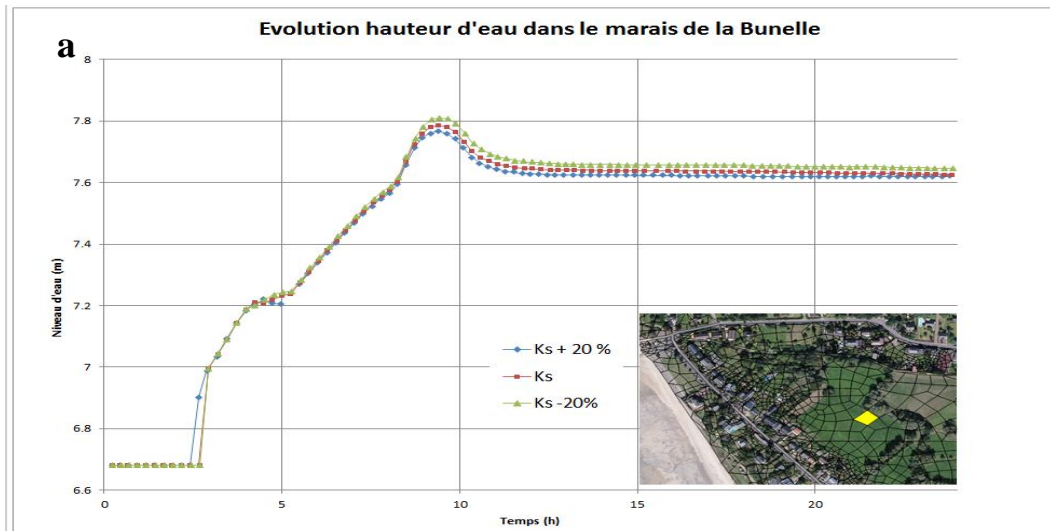
Annexe 6 : Recul moyen annuel et prédiction du trait de côte à l'horizon 2100



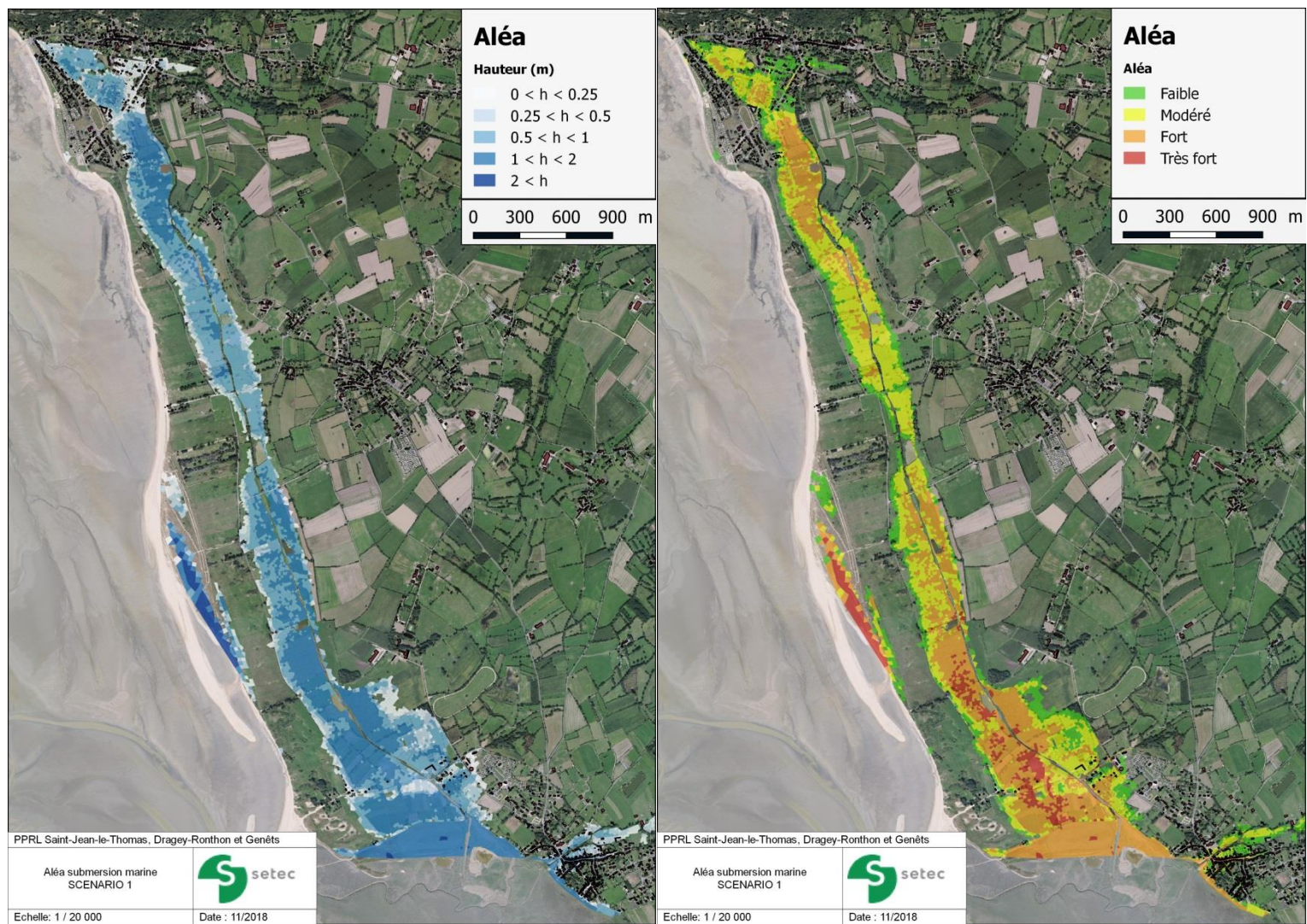
Annexe 7 : Modèle numérique de submersion marine HYDRA



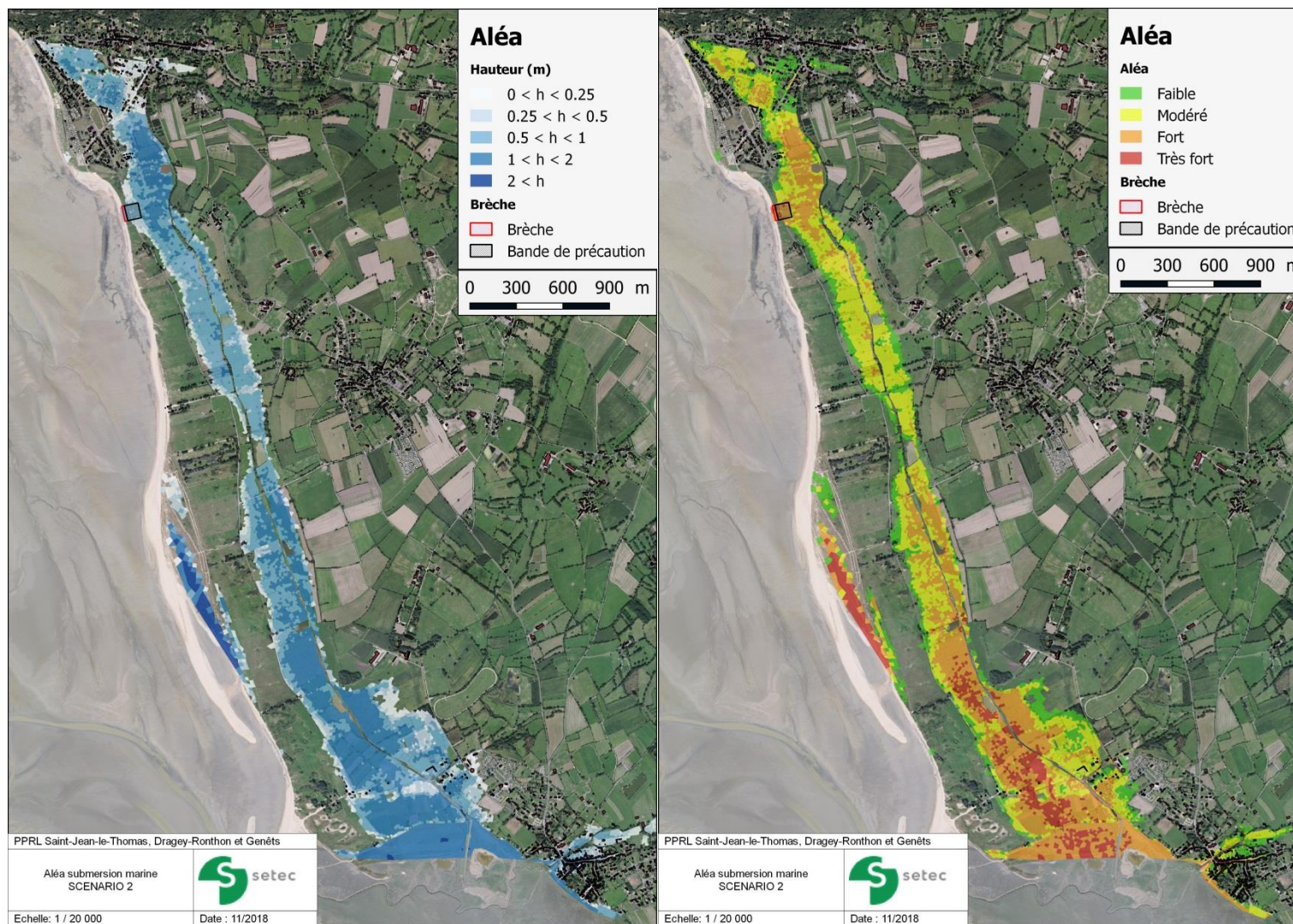
Annexe 8 : Zones sous le niveau marin centennal de référence



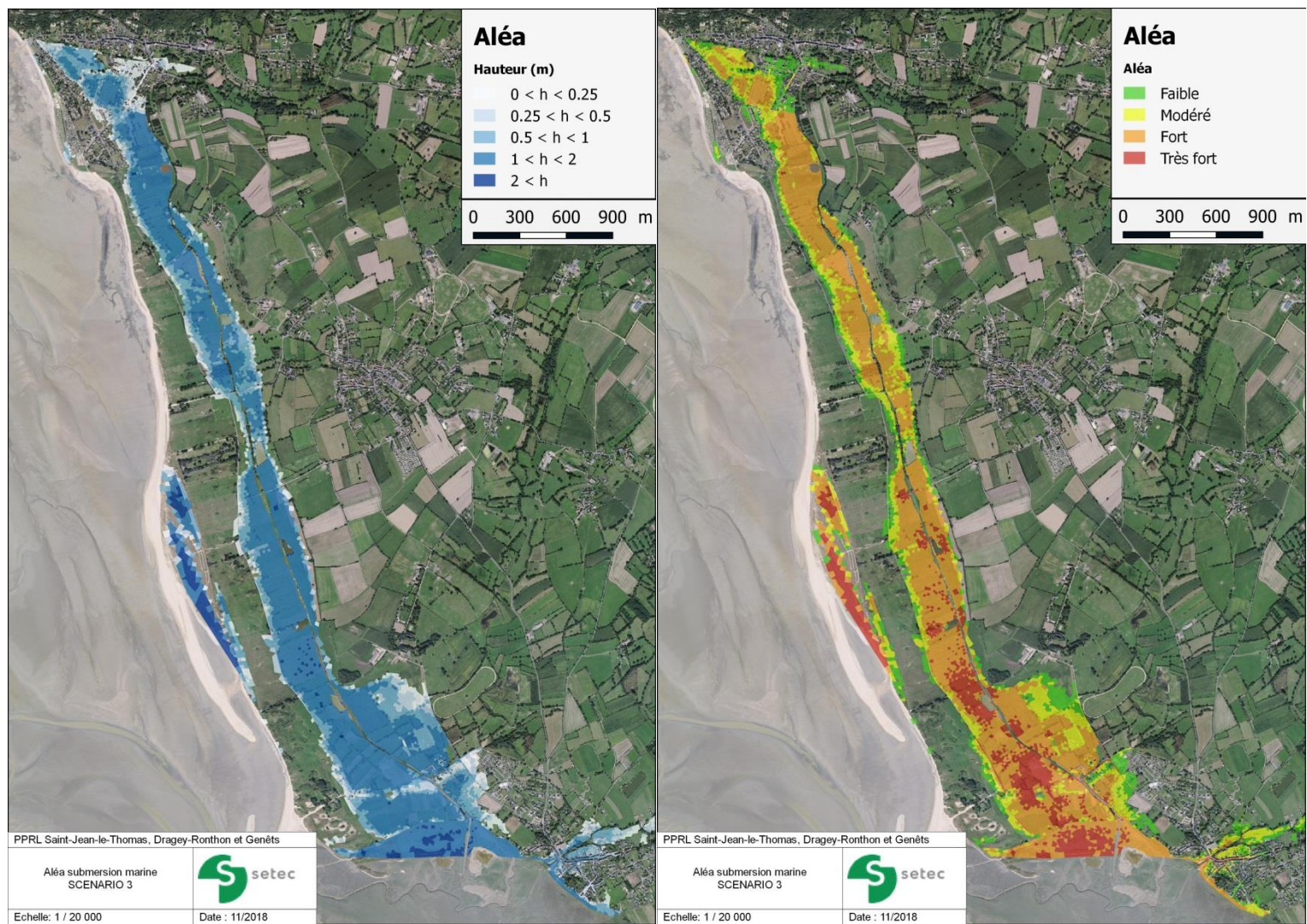
Annexe 9 : Analyse de sensibilité du coefficient de rugosité du maillage 2D du modèle HYDRA en différent point
 [a] : Marais de la Bunelle ; [b] : Marais de la Claire Douve ; [c] : Pont Neuf ; et [d] : Genêts



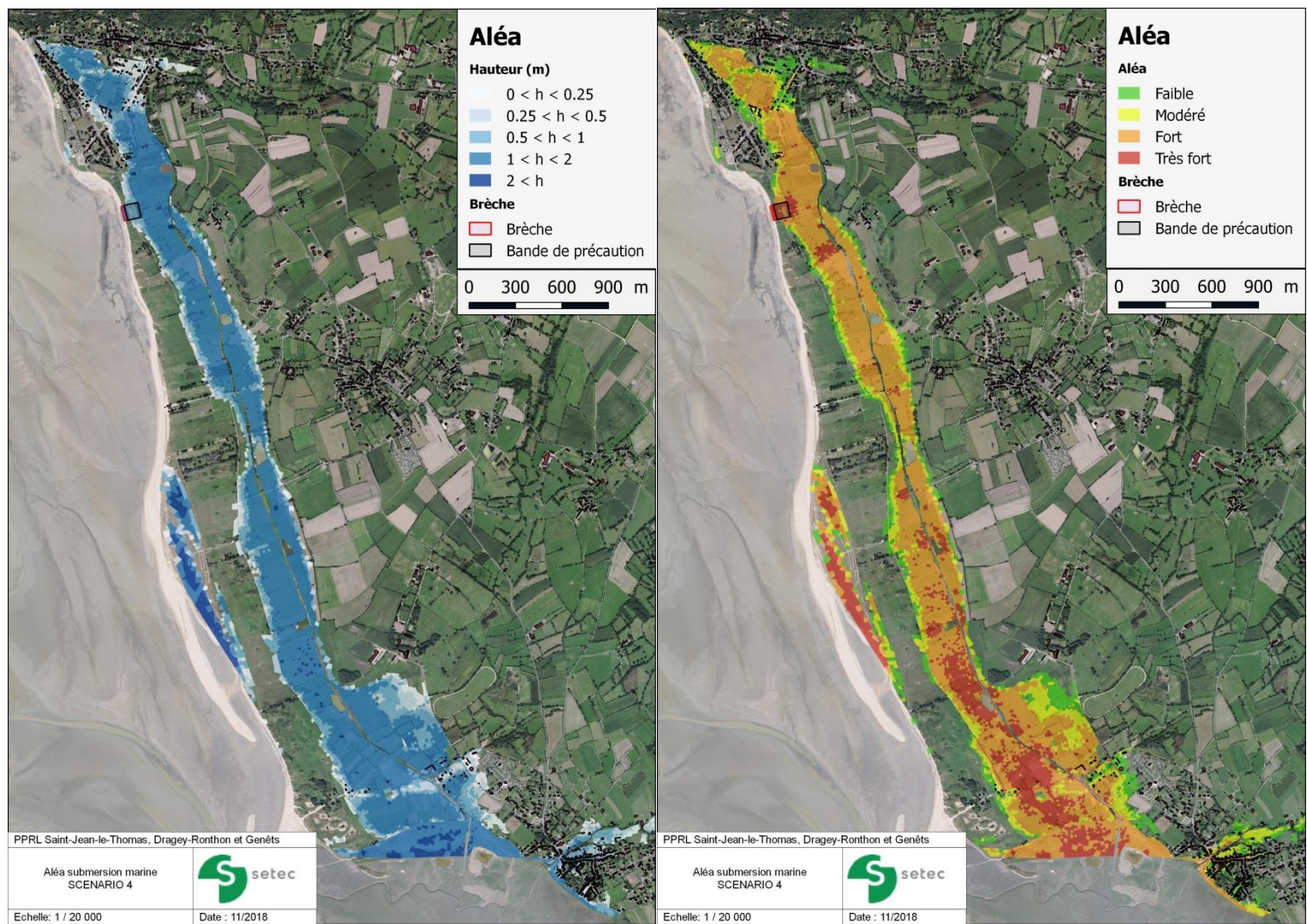
Annexe 10 : Scenario 1 - Niveau centennale de référence + débordement



Annexe 11 : Scenario 2 – Niveau centennal de référence + débordement + brèche



Annexe 12 : Scenario 3 – Niveau à l’horizon 2100 + débordement



Annexe 13 : Scenario 4 – Niveau à l’horizon 2100 + débordement + brèche