



projet
résilience
côtière



Modélisation de l'effet des tempêtes actuelles et futures sur les côtes basses meubles



Laboratoire de dynamique
et de gestion intégrée
des zones côtières

Université du Québec
à Rimouski

Septembre
2021



Projet Résilience côtière

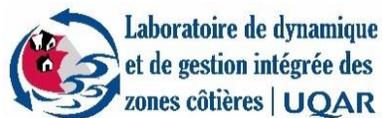
Modélisation de l'effet des tempêtes actuelles et futures sur les côtes basses meubles

Présenté au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques



Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph. D.

Septembre 2021



ÉQUIPE DE RÉALISATION

Direction scientifique

Pascal Bernatchez, Ph. D.

Université du Québec à Rimouski

Département de biologie, chimie et géographie

Chaire de recherche en géoscience côtière

Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC)

300, allée des Ursulines, case postale 3300

Rimouski (Québec) G5L 3A1

Téléphone : (418) 723-1986, poste 1257 (bureau) ou poste 1206 (laboratoire)

Télécopieur : (418) 724-1847

Courriel : pascal_bernatchez@uqar.ca

<https://ldgizc.uqar.ca>

Coordination

Susan Drejza, M. Sc. Géographie, professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR

Soutien scientifique, coordination du projet, rédaction

Christian Fraser, M. Sc. Géographie, professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR

Soutien scientifique, coordination du projet

Analyse et rédaction

Charles Caulet, Ph. D. Océanographie, post-doctorant, LDGIZC, UQAR.

Chargés de projet au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)

Guillaume Jeanmoye-Turcotte, Géomorphologue, M. Sc. Géogr., M. Sc. Eau, DEH

Sarah Aubé-Michaud, Géomorphologue, M. Sc. Géogr., DEH

Francis Bourret, Biologiste, M. Sc, DAEMH

Jean-Denis Bouchard, Géologue, M. Sc., DEH

RÉFÉRENCE COMPLÈTE

Calet, C., Drejza, S., Fraser, C., Marie, G. et P. Bernatchez (2021). Modélisation de l'effet des tempêtes actuelles et futures sur les côtes basses meubles. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, septembre 2021, 63 p.

REMERCIEMENTS

L'équipe de recherche tient à remercier le ministère de la Sécurité Publique (MSP) pour les financements du projet MODESCO, qui servent de base à la création de connaissances sur la submersion et à la modélisation des tempêtes au Québec, sur lequel ce chantier s'est appuyé.

Nous tenons à remercier le Gouvernement du Québec qui a financé ce projet via le PACC 2013-2020 - mesure 2.6



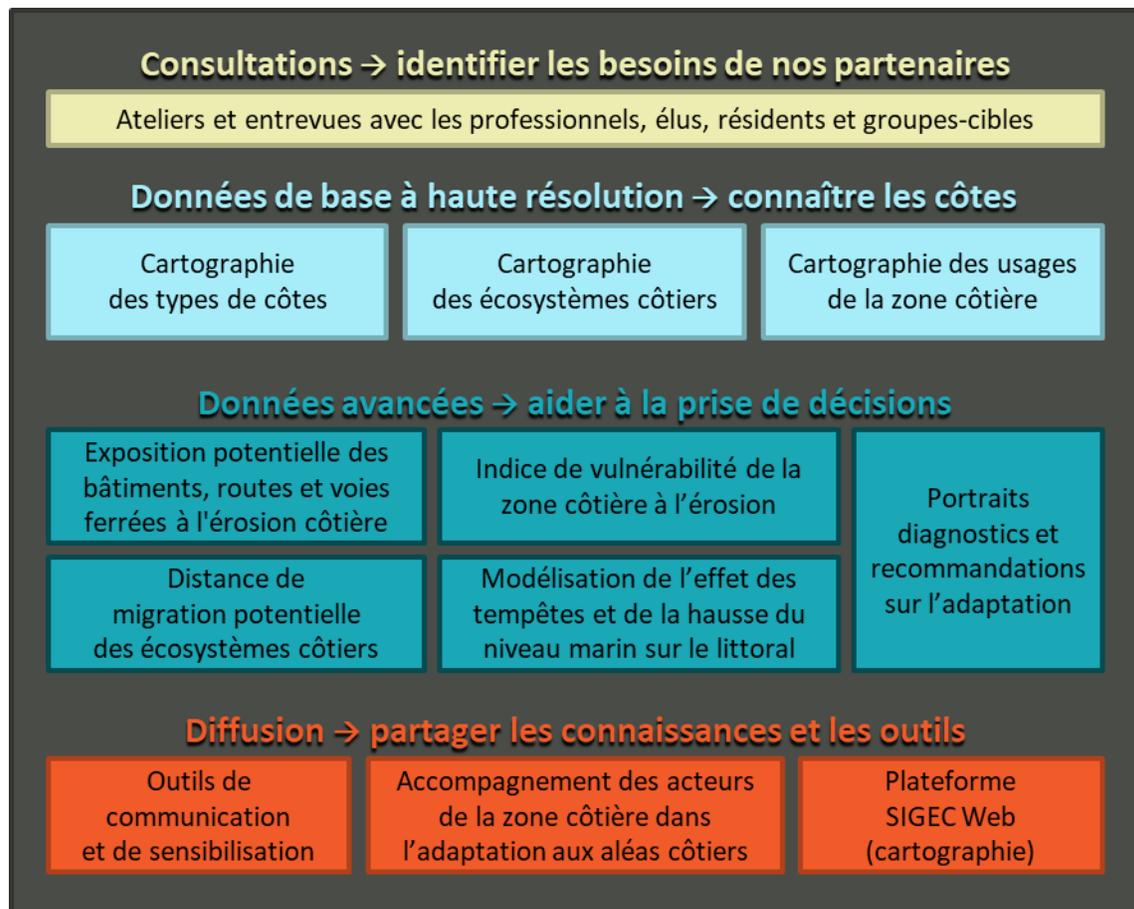
Photographies de la page de couverture

Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR, septembre 2017

AVANT-PROPOS

Le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski a mis en œuvre un projet de recherche-action intitulé « **Projet Résilience côtière : développement d'outils d'adaptation à l'érosion côtière pour les municipalités côtières du Québec maritime** ». Ce projet, financé par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, s'est déroulé de janvier 2017 à décembre 2021. Afin de répondre aux nombreux besoins exprimés lors d'une vaste consultation avec les acteurs de la zone côtière, douze chantiers ont été mis en œuvre dans quatre thématiques : consultations, données de base, données avancées et diffusion.

Les résultats globaux sont présentés dans le rapport synthèse du projet, disponible sur le site web du LDGIZC (<https://ldgizc.uqar.ca/Web/projets/projet-resilience-cotiere#realisations>).



Pour plus de renseignements, consulter la page web du projet Résilience côtière (<https://ldgizc.uqar.ca/Web/projets/projet-resilience-cotiere>).

AVERTISSEMENT

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), sous la responsabilité de la Direction de l'expertise hydrique. Elle a été financée par le Fonds vert dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques (PACC) 2013-2020 du gouvernement du Québec.

Le MELCC n'est pas responsable de l'exactitude, de l'actualité et de la fiabilité du contenu de ce rapport. Les points de vue exprimés dans ce rapport émanent des auteurs et ne coïncident pas nécessairement avec ceux du ministère mentionné ci-haut.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	3
AVANT-PROPOS	4
AVERTISSEMENT	5
LISTE DES FIGURES	8
LISTE DES TABLEAUX	12
LISTE DES ANNEXES	13
1. Introduction.....	14
1.1 Contexte de l'étude	14
1.2 Problématique	14
1.3 Objectifs.....	14
1.4 Territoire à l'étude (MRC)	15
2. Mise en place du modèle	17
2.1 Évènements de tempête	17
2.1.1 Tempête historique	17
2.1.2 Niveau marin relatif en 2070.....	19
2.2 Génération des grilles de calculs	20
2.3 Simulations numériques.....	23
2.4 Traitement des données.....	23
2.4.1 Submersion marine	23
2.4.2 Érosion et accrétion.....	24
3. Résultats	28
3.1 Modélisation de la submersion marine.....	28
3.1.1 Site de Sainte-Luce	29
3.1.2 Site de Maria.....	33
3.1.3 Site de Pointe-Lebel.....	36
3.1.4 Site de Pointe-aux-Loups.....	39
3.2 Modélisation des transferts sédimentaires (érosion-accrétion).....	42
3.2.1 Site de Sainte-Luce	42

3.2.2	Site de Maria.....	46
3.2.3	Site de Pointe-Lebel.....	49
3.2.4	Site de Pointe-aux-Loups.....	52
4.	Conclusion	56
5.	Références.....	57
6.	Annexes	59
6.1	Annexe 1 : Conditions météos-marines utilisées pour le forçage du modèle XBeach..	59
6.2	Annexe 2 : Génération des grilles de calcul.....	62
6.3	Annexe 3 : Calcul de la hausse du niveau marin relatif.....	63

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Répartition des sites d'études dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. 15

Figure 2 : Conditions météo-marine enregistrées sur nos sites d'étude lors des mois de décembre 2010 et novembre 2016. Les données météorologiques sont celles issues des stations de mesure les plus proches des sites d'étude opérées par Environnement Canada. Les hauteurs de vagues sont celles simulées par le modèle WaveWatch III®, au nœud de calcul correspondant à la position des déploiements de courantomètres AWAC, ou bien au large du site. Les périodes de tempête sélectionnés pour chacun des sites d'études sont mis en évidence par des encarts rouges. La zone grisée représente la différence entre la pression enregistrée et la pression normale atmosphérique ($P_0 = 101,325$ kPa). 18

Figure 3 : Grille de calcul pour le modèle XBeach, générée pour le site de Sainte-Luce. Les iso-contours sont indiqués (lignes noires). 21

Figure 4: Grille de calcul pour le modèle XBeach, générée pour le site de Maria. Les iso-contours sont indiqués (lignes noires)..... 21

Figure 5: Grille de calcul pour le modèle XBeach, générée pour le site de Pointe-Lebel. Les iso-contours sont indiqués (lignes noires). 22

Figure 6: Grille de calcul pour le modèle XBeach, générée pour le site de Pointe-aux-Loups. Les iso-contours sont indiqués (lignes noires)..... 22

Figure 7: Nappes de submersion modélisées pour le secteur de Maria, lors du pic de la tempête du 6 décembre 2010 et de celle du 6 décembre 2070 (20h00 UTC). Les deux nappes sont superposées avec une échelle de couleur différentes. 24

Figure 8: Illustration des résultats obtenus par modélisation numérique de la tempête du 6 décembre 2010 pour le secteur de Maria. L'échelle de couleur (bleu-rouge) correspond aux zones d'érosion et d'accrétion (bleu : érosion, rouge : accrétion, en mètre). Le courant est représenté par des flèche noires. 25

Figure 9: Exemple de profils d'étude pour le secteur de Maria. Ces profils sont tracés dans les zones vulnérables du secteur, identifié à partir des cartes d'érosion-accrétion précédemment réalisées (figure 8). 26

Figure 10 : Quantité de sédiments érodés-accrétés et hydrodynamique (niveau d'eau) observé le long des profils d'étude pour le secteur de Maria lors de la tempête hypothétique du 6 décembre 2070. 26

Figure 11: Illustration de la recherche automatique pour la position des éléments morphologiques de l'estran (trait de côte, flexure) sur les profils de plage modélisées par XBeach. Les traits de couleur sont les profils de plage du modèle, le trait gris est le gradient² altimétrique (d^2Zdx^2) du profil initial. La valeur minimale correspond à la position du trait de côte et la flexure est le premier point du gradient² qui excède un certain seuil défini arbitrairement..... 27

Figure 12: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Sainte-Luce lors de la tempête du 6 décembre 2010..... 29

Figure 13: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Sainte-Luce lors de la tempête hypothétique du 6 décembre 2070. 30

Figure 14: Quelques exemples de zones submergées dans la modélisation du 6 décembre 2010 à Sainte-Luce. La ligne rouge représente l'extension maximale de la nappe de submersion modélisée. a-b) Littoral ouest. c-d) Littoral est. 31

Figure 15: Zones submergées lors de l'évènement hypothétique du 6 décembre 2070 sur le littoral de Sainte-Luce. a) Littoral ouest (croisement de la Route du Fleuve Ouest avec la Rue des Villas). b) Littoral est (Route du Fleuve Est). 32

Figure 16: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Maria lors de la tempête du 6 décembre 2010. 33

Figure 17: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Maria lors de la tempête hypothétique du 6 décembre 2070. 34

Figure 18: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Pointe-Lebel lors de la tempête du 16 novembre 2016. 36

Figure 19: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Pointe-Lebel lors de la tempête hypothétique du 16 novembre 2076. 37

Figure 20: a) Observation de l'impact de la tempête du 16 novembre 2016 sur la côte de Pointe-Lebel par le système de caméra AXIS. Un franchissement est ici visible ainsi que plusieurs encoches d'érosion. Les résultats de la modélisation (b) sont en accord avec ces observations. 38

Figure 21: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Pointe-aux-Loups lors de la tempête du 21 décembre 2010. 39

Figure 22: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Pointe-aux-Loups lors de la tempête du 21 décembre 2070. 40

Figure 23: Cartographie des courants moyens, intégrés sur la colonne d'eau, lors du pic de la tempête de 2070 pour le site de Pointe-aux-Loups. Les franchissements observés lors de la tempête sont mis en évidence. 41

Figure 24: Choix des profils d'étude (1-2-3) pour le site de Sainte-Luce. Le profil 2 (centre plage) est situé au niveau du lit d'une évacuation d'eau. 42

Figure 25: Évolution des profils d'étude modélisés par XBeach pour le site de Sainte-Luce. En haut, évènement historique du 6 décembre 2010, en bas un évènement hypothétique pour l'année 2070. Le niveau d'eau est le niveau moyen (marée et surcote) atteint lors du pic de la tempête. Le profil final est indiqué par le trait marron foncé et les quantités de sédiments érodés sont indiquées en rouge et accrétés en bleu. 43

Figure 26: Dynamique sédimentaire observée par simulation numérique (échelle de couleur). Les profils d'étude sont indiqués par des lignes pointillées. Les isobathes (gris clair et noir ($z = -1, 1$ et 5 m)) sont indiqués. 45

Figure 27: Choix des profils d'étude (1-2-3) pour le site de Maria. Les profils d'étude ont été choisis dans la zone urbaine, aux endroits où la dynamique et la submersion était particulièrement importante. 46

Figure 28: Évolution des profils d'étude modélisés par XBeach pour le site de Maria. En haut, évènement historique du 6 décembre 2010, en bas un évènement hypothétique pour l'année 2070. Le niveau d'eau est le niveau moyen (marée et surcote) atteint lors du pic de la tempête. Le profil final est indiqué par le trait marron foncé et les quantités de sédiments érodés sont indiquées en rouge et accrétés en bleu. 47

Figure 29: Choix des profils d'étude (1-2-3) pour le site de Pointe-Lebel. Le profil n°2 est situé dans le lit d'une petite rivière. 49

Figure 30: Évolution des profils d'étude modélisés par XBeach pour le site de Pointe-Lebel. En haut, évènement historique du 16 novembre 2016, en bas un évènement hypothétique pour l'année 2076. Le niveau d'eau est le niveau moyen (marée et surcote) atteint lors du pic de la tempête. Le profil final est indiqué par le trait marron foncé et les quantités de sédiments érodés sont indiquées en rouge et accrétés en bleu. 50

Figure 31: Choix des profils d'étude (1-2-3) pour le site de Pointe-aux-Loups. 52

Figure 32: Dynamique sédimentaire modélisée lors de la tempête du 21 décembre 2010 pour le site de Pointe-aux-Loups. Les profils d'étude sont indiqués par des lignes pointillées. Les isobathes (gris clair et noir ($z = 3$ m)) sont indiqués. 53

Figure 33: Évolution des profils d'étude modélisés par XBeach pour le site de Pointe-aux-Loups. En haut, évènement historique du 21 décembre 2010, en bas un évènement hypothétique pour l'année 2070. Le niveau d'eau est le niveau moyen (marée et surcote) atteint lors du pic de la tempête. Le profil final est indiqué par le trait marron foncé et les quantités de sédiments érodés sont indiquées en rouge et accrétés en bleu. 54

Figure 35 : Conditions météo-marines observées à Sainte-Luce lors de la tempête du 6 décembre 2010. P_{atm} : Pression atmosphérique ; H_s : Hauteur significative des vagues. Les barres horizontales pointillées mettent en évidence la période reproduite dans les simulations numériques avec XBeach. L'étoile jaune représente le niveau de marée atteint lors de l'évènement (comprenant l'onde de tempête ici). 59

Figure 36: Conditions météo-marines observées à Maria lors de la tempête du 6 décembre 2010. P_{atm} : Pression atmosphérique ; H_s : Hauteur significative des vagues. Les barres horizontales pointillées mettent en évidence la période reproduite dans les simulations numériques avec XBeach. L'étoile jaune représente le niveau de marée atteint lors de l'évènement (comprenant l'onde de tempête ici). Il faut noter ici que le niveau prédit est issu du modèle Wavewatch III.. 60

Figure 37: Conditions météo-marines observées à Pointe-Lebel lors de la tempête du 6 décembre 2010. P_{atm} : Pression atmosphérique ; H_s : Hauteur significative des vagues. Les barres horizontales pointillées mettent en évidence la période reproduite dans les simulations numériques avec XBeach. L'étoile jaune représente le niveau de marée atteint lors de l'évènement (comprenant l'onde de tempête ici). 60

Figure 38: Conditions météo-marines observées à Pointe-aux-Loups lors de la tempête du 6 décembre 2010. P_{atm} : Pression atmosphérique ; H_s : Hauteur significative des vagues. Les barres horizontales pointillées mettent en évidence la période reproduite dans les simulations numériques avec XBeach. L'étoile jaune représente le niveau de marée atteint lors de l'évènement (comprenant l'onde de tempête ici). 61

Figure 39: Interface du module « Delft DashBoard » pour l'implémentation des modèles numériques XBeach sur les sites d'études (ici Sainte-Luce). Grâce à cette interface, les grilles de calculs 2D peuvent être générées à partir des surfaces topo-bathymétriques préalablement créées. De nombreux paramètres peuvent être modifiés lors de la génération des grilles de calculs. 62

Figure 40: Illustration de la correction appliquée aux données de Oppenheimer et al., 2019 pour le site de Maria (étoile noire). Les données de Oppenheimer et al., 2019 brutes sont extraites au point à 1° de résolution (étoile rouge). La correction isostatique appliquée (Peltier et al., 2015, haute résolution (0,2°)) est extraite au point illustré par l'étoile verte..... 63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Description et enjeux des différents sites d'étude. MR*: Marnage Relatif, permettant de déterminer la dominance entre le forçage de marée et celui des vagues. Régime dominé par la marée : $MR > 15$, par les vagues : $MR < 3$. Pour un MR compris entre 3 et 15 le régime est intermédiaire entre une dominance de la marée et des vagues (Masselink et Short 1993). 16

Tableau 2 : Période de tempête sélectionnée pour les simulations numériques et conditions météo-marines observées. L'heure du pic de tempête (i.e. marée haute) est indiquée sous chaque période (fuseau UTC)..... 19

Tableau 3 : Valeurs extraites et corrigées pour chacun de nos sites d'études du niveau marin relatif en 2055, 2100 et interpolées pour 2070 (Données issues de Oppenheimer et al., 2019 et Peltier et al., 2015). L'année de référence (0 m) pour le calcul des niveaux d'eau est 2015. 20

Tableau 4: Bilan sédimentaire et évolution des marqueurs morphologiques (trait de côte, flexure, pied de dune – microfalaise) pour les profils d'étude au cours des deux évènements modélisés pour le site de Sainte-Luce. 43

Tableau 5: Bilan sédimentaire et évolution des marqueurs morphologiques (trait de côte, flexure, pied de dune – microfalaise) pour les profils d'étude au cours des deux évènements modélisés pour le site de Maria. 48

Tableau 6: Bilan sédimentaire et évolution des marqueurs morphologiques (trait de côte, flexure, pied de dune – microfalaise) pour les profils d'étude au cours des deux évènements modélisés pour le site de Pointe-Lebel..... 50

Tableau 7: Bilan sédimentaire et évolution des marqueurs morphologiques (trait de côte, flexure, pied de dune – microfalaise) pour les profils d'étude au cours des deux évènements modélisés pour le site de Pointe-aux-Loups..... 54

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Conditions météo-marines utilisées pour le forçage du modèle XBeach

Annexe 2 : Génération des grilles de calcul

Annexe 3 : Calcul de la hausse du niveau marin relatif (correction à Oppenheimer et al., 2019)

1. Introduction

1.1 Contexte de l'étude

Ce rapport présente le chantier de **modélisation de l'effet des tempêtes actuelles et futures sur les côtes basses meubles** du projet Résilience côtière mené par le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR). Il fait partie intégrante de la série de rapports découlant de ce vaste projet ayant pour objectif le développement d'outils d'adaptation à l'érosion côtière répondant aux besoins des communautés côtières du Québec Maritime (voir la page web du projet : <https://ldgizc.uqar.ca/Web/projets/projet-resilience-cotiere>).

Ce rapport présente une modélisation et une analyse de l'impact des tempêtes hivernales sur différentes plages sableuses présentes sur le littoral québécois. La modélisation des marais maritimes face à la hausse du niveau marin anticipé a aussi été effectuée et est présentée dans un autre rapport (Savoie-Ferron *et al.*, 2021).

L'approche choisie est la simulation numérique : les tempêtes et leurs impacts sont reproduits à l'aide d'un modèle côtier à phase moyennée (XBeach, Roelvink *et al.*, 2009). Ce modèle résout l'équation d'action des vagues (propagation de l'énergie) et prend en compte les changements morphologiques induits (*i.e.* les transferts sédimentaires). Ainsi, une attention particulière est donnée aux quantités de sédiments érodés et accrétés lors de ces épisodes ainsi qu'aux niveaux d'eau et à l'aléa de submersion marine.

Pour différents sites sélectionnés, un épisode de tempête hivernale historique est analysé. De plus, pour prendre en compte l'impact du réchauffement climatique sur le littoral québécois, le même épisode est analysé, mais avec un niveau marin modifié, correspondant aux projections du scénario RCP 8.5 du GIEC (IPCC, 2014) pour l'année 2070.

1.2 Problématique

Les environnements côtiers répondent différemment aux forçages météo-marins selon leurs caractéristiques géomorphologiques. Durant les dernières décennies, les côtes du Québec maritime, ont globalement subi des dégradations importantes (par ex. une érosion côtière importante, une altération des écosystèmes côtiers). La tendance à la hausse du niveau marin (Slangen *et al.*, 2012, Barnett *et al.*, 2015) ainsi que la baisse progressive du nombre de jour avec une présence de glace côtière (Senneville *et al.*, 2014) indiquent que ces dégradations pourraient se renforcer à l'avenir. Une question importante est de savoir dans quelle proportion. Le choix a été fait d'utiliser des outils numériques permettant de reproduire certains aspects de la dynamique côtière. En alimentant ces modèles avec des données prédites mais réalistes, il est possible d'estimer du moins qualitativement l'impact de tempêtes futures sur le littoral québécois.

1.3 Objectifs

Ce volet du projet Résilience vise à compléter les travaux effectués sur l'identification et la caractérisation des zones côtières vulnérables. À l'aide d'outils numériques (modèle XBeach, Roelvink *et al.*, 2009), la dynamique hydro-sédimentaire de 4 sites choisis comme secteurs

d'intérêts est reproduite lors d'épisodes de tempête hivernale (historiques et futures). La simulation numérique permet d'apporter des éléments complémentaires aux analyses réalisées pour le projet Résilience.

1.4 Territoire à l'étude (MRC)

Du aux besoins en termes de données disponibles et de puissances de calculs, la modélisation ne peut pas être effectuée sur l'ensemble du Québec maritime. Ainsi 4 sites témoins ont été choisis pour appliquer la méthodologie. Ces derniers sont les sites de Sainte-Luce, Pointe-Lebel, Maria et Pointe-aux-Loups (figure 1).

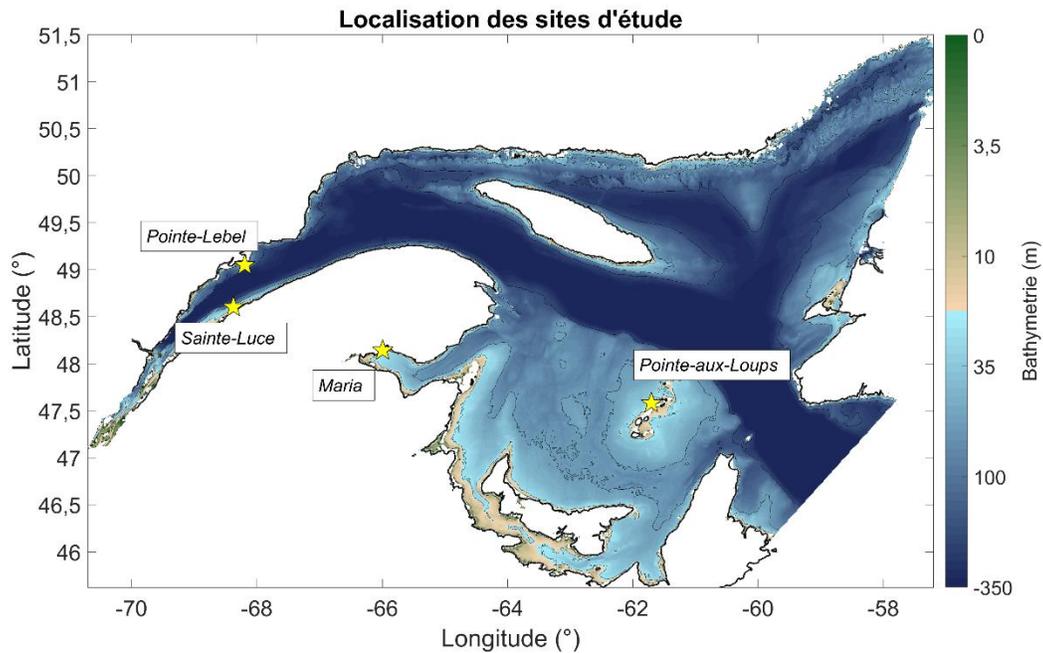


Figure 1: Répartition des sites d'études dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent.

Les sites présentent différentes caractéristiques environnementales en termes de forçages hydrodynamiques, de morphologies et de contextes géomorphologiques. Notre étude porte ainsi sur un spectre large des typologies de plage rencontrées sur le littoral du Québec maritime.

Ces 4 sites d'étude présentent des dynamiques et des enjeux spécifiques. Un récapitulatif de leurs caractéristiques est donné dans le tableau 1.

Tableau 1: Description et enjeux des différents sites d'étude. MR*: Marnage Relatif, permettant de déterminer la dominance entre le forçage de marée et celui des vagues. Régime dominé par la marée : $MR > 15$, par les vagues : $MR < 3$. Pour un MR compris entre 3 et 15 le régime est intermédiaire entre une dominance de la marée et des vagues (Masselink et Short 1993).

Site d'étude	Description	Spécificité
<p>Sainte-Luce</p>  <p>Crédit photo: UQAR 2017</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Plage sableuse avec présence éparse de plateforme rocheuse. • Régime de marée macrotidal, forçage modérément énergétique. • Dominance de la dynamique intermédiaire entre la marée et les vagues ($MR^* = 5,6$). 	<ul style="list-style-type: none"> • Plage fréquentée en été • Route touristique surplombant la plage (Rue du Fleuve, La Route Verte 1). • Haut de plage anthropisé (digue en béton protégeant la route)
<p>Maria</p>  <p>Crédit photo: UQAR 2006</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Plage mixte de sable et de gravier • Régime de marée mésotidale, forçage faiblement énergétique • En conséquence la dynamique est essentiellement dominée par la marée ($MR = 14$). 	<ul style="list-style-type: none"> • Municipalité de Maria, zone résidentielle et villégiature, système d'aqueduc et d'égouts, voies routières. • Site naturel du Parc de la Pointe-Verte
<p>Pointe-Lebel</p>  <p>Crédit photo: LDGIZC 2017</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Plage de sable bordée par des microfalaises en érosion. Delta présentant une large zone intertidale (batture sableuse) • Régime de marée mésotidal, forçage modérément énergétique, • Dominance de la dynamique intermédiaire entre la marée et les vagues ($MR = 5,7$). 	<ul style="list-style-type: none"> • Delta de Manicouagan • Quelques résidences

Site d'étude	Description	Spécificité
Pointe-aux-Loups  Crédit photo: LDGIZC 2017	<ul style="list-style-type: none"> • Plage de sable bordée par des dunes de sable végétalisées • Soumise à un régime de marée microtidale, forçage hautement énergétique • Dynamique dominée par les vagues (MR = 0.76) 	<ul style="list-style-type: none"> • Système dunaire végétalisé • Axe routier surplombant la plage (Route 199) • Site touristique et zone d'activité sportive

2. Mise en place du modèle

Dans cette partie, nous décrivons les différentes étapes nécessaires pour l'implémentation du modèle XBeach sur nos 4 différents sites d'études.

Le modèle XBeach est un modèle relativement complet. Il comporte de nombreux modules hydro-sédimentaires dédiés, ce qui en fait un outil très polyvalent (McCall *et al.*, 2014; Roelvink *et al.*, 2018; Vousdoukas *et al.*, 2011). Il est en effet capable de simuler la dynamique d'un grand nombre de systèmes différents. Dans certains cas, ces modules s'appuient sur la résolution d'une équation fondamentale (*e.g.* l'équation d'action des vagues) dans d'autres, sur une équation empirique (*e.g.* transport sédimentaire). Dans ces équations de nombreux paramètres interviennent et ont souvent une valeur empirique qui va donc dépendre du site en question et de ses caractéristiques environnementales. Ainsi, il est nécessaire de calibrer les paramètres du modèle pour chacun des sites. Cette étape peut être réalisée de différentes façons (Simmons *et al.*, 2017). Dans notre cas, nous avons optimisé les valeurs des paramètres libres du modèle par incrémentation des valeurs des paramètres, jusqu'à minimiser l'erreur entre l'évolution d'un profil de plage modélisé et celle mesurée in situ. Les calibrations du modèle XBeach ont été réalisées sur l'ensemble des sites lors de la phase 3 du projet MoDESCo (« Programme de mesure et de modélisation de la morphodynamique de l'érosion et de la submersion côtière dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent », Bandet *et al.*, 2020). À noter que pour Sainte-Luce, les données in situ ne nous permettaient pas de réaliser une calibration.

2.1 Évènements de tempête

2.1.1 Tempête historique

Au cours du mois de décembre 2010, plusieurs dépressions atmosphériques importantes ont été enregistrées sur le territoire du Québec (figure 2). Ces dépressions ont généré des vents violents à la côte et des surcotes du niveau d'eau importantes (figure 2, Quintin *et al.*, 2013). Le 6 décembre 2010, la dépression la plus importante de l'épisode hivernal est enregistrée. Ce système dépressionnaire a été généré au large de la côte est américaine (Cap Hatteras). Cette dépression

s'est propagée de la Nouvelle-Écosse vers le nord-nord-est. Les territoires du Bas-Saint-Laurent (Sainte-Luce) ainsi que de la Baie-des-Chaleurs (Maria) ont été particulièrement touchés (Quintin *et al.*, 2013).

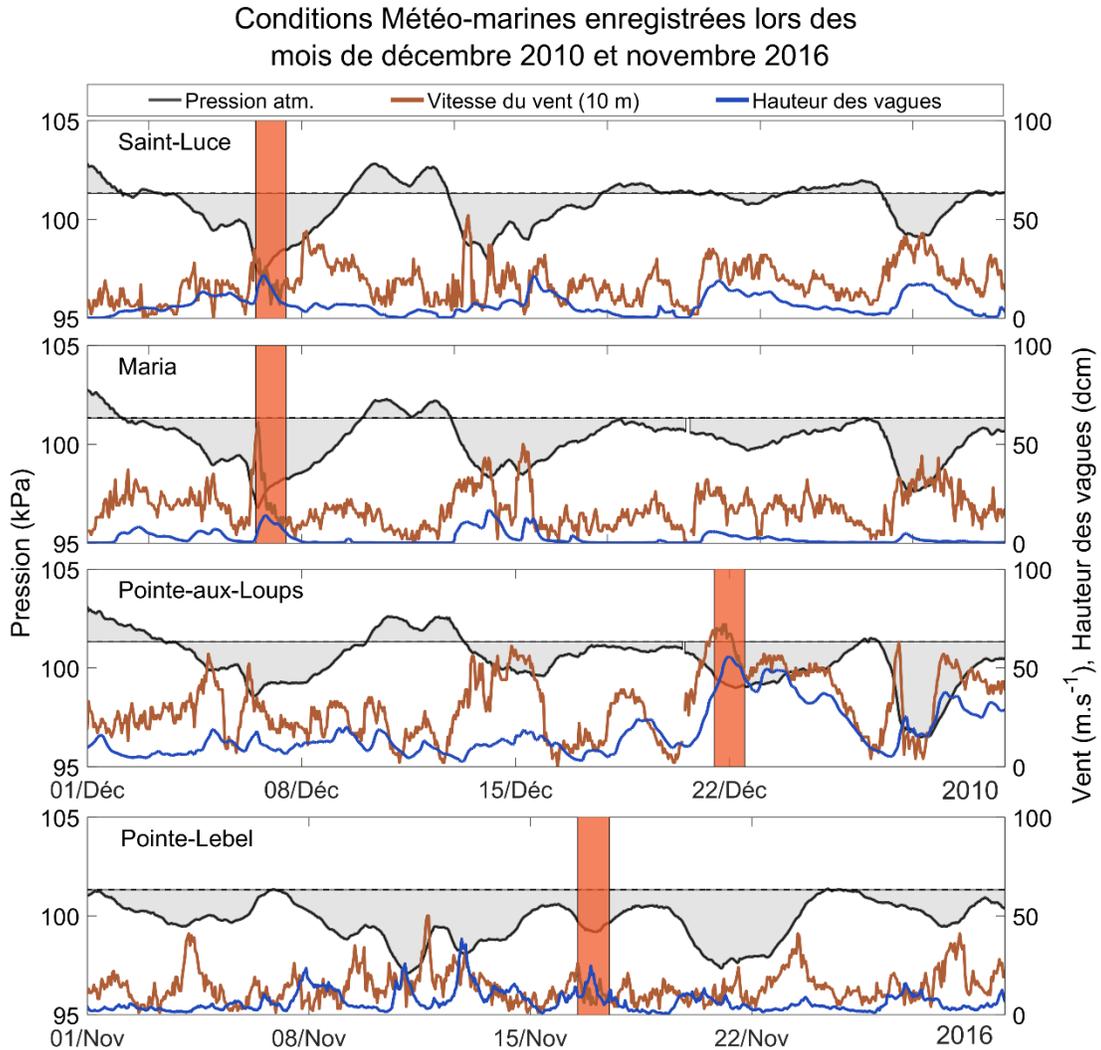


Figure 2 : Conditions météo-marine enregistrées sur nos sites d'étude lors des mois de décembre 2010 et novembre 2016. Les données météorologiques sont celles issues des stations de mesure les plus proches des sites d'étude opérées par Environnement Canada. Les hauteurs de vagues sont celles simulées par le modèle WaveWatch III[®], au nœud de calcul correspondant à la position des déploiements de courantomètres AWAC, ou bien au large du site. Les périodes de tempête sélectionnés pour chacun des sites d'études sont mis en évidence par des encarts rouges. La zone grisée représente la différence entre la pression enregistrée et la pression normale atmosphérique ($P_0 = 101,325$ kPa).

Les îles-de-la-Madeleine n'ont pas subi d'impact majeur lors du 6 décembre 2010 du fait de la trajectoire de la tempête, qui est passée au large de l'archipel. Un autre évènement ayant eu lieu le 21 décembre 2010 a eu plus d'impact sur les côtes des îles avec un épisode de vent violent accompagné de vagues particulièrement fortes (supérieures à 5 m au large, figure 2). Pour le territoire de Manicouagan (Pointe-Label), nous nous sommes intéressés à l'évènement du 16 novembre 2016 qui a causé des dommages importants, notamment en terme d'érosion côtière.

Les périodes sélectionnées pour la modélisation numériques ainsi que les conditions météorologiques observées pour chacun des sites d'études sont rassemblées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Période de tempête sélectionnée pour les simulations numériques et conditions météo-marines observées. L'heure du pic de tempête (i.e. marée haute) est indiquée sous chaque période (fuseau UTC).

Site d'étude et période de tempête	Pression atm. (kPa, max.)	Hauteur de marée / Surcote atm. (m)	Hauteur de vague (m, max.)	Période de vague (s, max.)	Vitesse du vent (m/s, max)
Sainte-Luce du 2010-12-06 au 2010-12-07 (19h00 UTC)	97,41	3,2 / + 0,39	2,18	6,6	22
Maria du 2010-12-06 au 2010-12-07 (20h00 UTC)	97,59	2,1 / +0,37	1,40	4,9	22
Pointe-Lebel du 2016-11-16 au 2016-11-17 (20h00 UTC)	99,28	2,8 / +0,20	2,45	6,0	8
Pointe-aux-Loups du 2010-12-21 au 2010-12-22 (02h00 UTC)	99,06	1,4 / +0,22	5,50	11	65

2.1.2 Niveau marin relatif en 2070

La méthodologie choisie pour calculer les niveaux marins relatif en 2070 est décrite dans le rapport Savoie-Ferron *et al.* (2021) traitant de la modélisation des marais maritimes. Ces données sont celles issues des travaux de Oppenheimer *et al.*, 2019 (hausse du niveau marin et déplacement isostatique de la croûte) et Peltier *et al.*, 2015 (déplacement isostatique de croûte) suivant le scénario RCP 8.5 du GIEC (IPCC, 2014). Ce scénario est le plus pessimiste envisagé par le GIEC mais semble devenir de plus en plus probable (Schwalm et Duffy, 2020). Suivant ce scénario les décisions politiques actuelles et prises au cours des prochaines décennies ne permettront pas d'imposer de régulations sur le rejet des différents gaz à effet de serre dans l'atmosphère (« Business as usual »). Ce scénario envisage aussi le développement de différentes boucles de rétroactions naturelles venant accélérer et renforcer les changements climatiques (ex. évolution de l'albédo).

Nous n'avons à notre disposition que les données pour les années 2055 et 2100. Les valeurs obtenues pour l'année 2070 ont donc été calculées par interpolation linéaire entre ces deux dates (tableau 3).

Ces variations du niveau marin relatif pour 2070 ont été ajoutées au niveau d'eau enregistré lors des événements de tempête en 2010. Ces conditions ont été ensuite utilisées pour alimenter le

modèle XBeach afin de reproduire l'impact d'une tempête hypothétique mais réaliste (suivant le scénario RCP 8.5 du GIEC) pouvant avoir lieu en 2070.

Tableau 3 : Valeurs extraites et corrigées pour chacun de nos sites d'études du niveau marin relatif en 2055, 2100 et interpolées pour 2070 (Données issues de Oppenheimer et al., 2019 et Peltier et al., 2015). L'année de référence (0 m) pour le calcul des niveaux d'eau est 2015.

Site	Projection en 2055 (m)	Projection en 2100 (m)	Projection pour 2070 (m)
Sainte-Luce	0,556	1,259	0,790
Maria	0,672	1,469	0,937
Pointe-Lebel	0,609	1,090	0,769
Pointe-aux-Loups	0,679	1,471	0,943

2.2 Génération des grilles de calculs

Les simulations numériques du modèle XBeach sont exécutées sur des grilles de calcul 2D. Les grilles sont définies par un couple de coordonnées x et y. Une coordonnée verticale est associée à chaque couple, mais la colonne d'eau n'est pas elle-même découpée en plusieurs couches (en fonction de densité de l'eau par exemple). Dans ce cas-ci on ne définit pas le modèle comme étant un modèle strictement 3D mais 2D car les sorties du modèle ne sont disponibles que selon les couples de coordonnées x et y. Les grilles sont générées à partir de surface topo-bathymétriques des zones étudiées. Ces surfaces ont été obtenues par la fusion de différentes observations de terrain (Lidar, Drone, relevé multifaisceaux) obtenues via d'autres projets (Bandet et al., 2020). Les grilles de calcul sont réalisées avec le module *DashBoard* codé dans l'environnement Matlab® et fourni par TU Delft (Van Ormondt et al., 2020). Grâce à ce module, différents paramètres sont modifiables afin de créer une grille de calcul adéquate et optimisée pour la simulation à réaliser. Nous avons généré des grilles rectangulaires de résolution irrégulière (de 2 à 20 m) afin d'optimiser le temps de calcul et de conserver une bonne résolution à la côte (cf. Annexe 6.2). Les figures ci-dessous présentent l'ensemble des grilles générées pour réalisées nos simulations numériques avec le modèle XBeach sur les 4 sites témoins.

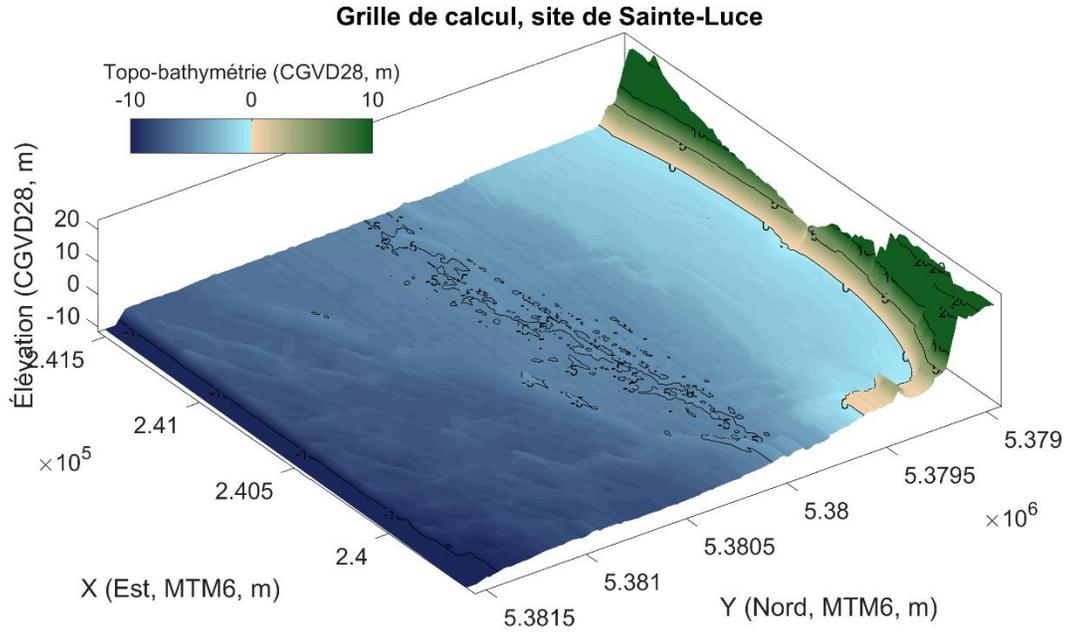


Figure 3 : Grille de calcul pour le modèle XBeach, générée pour le site de Sainte-Luce. Les iso-contours sont indiqués (lignes noires).

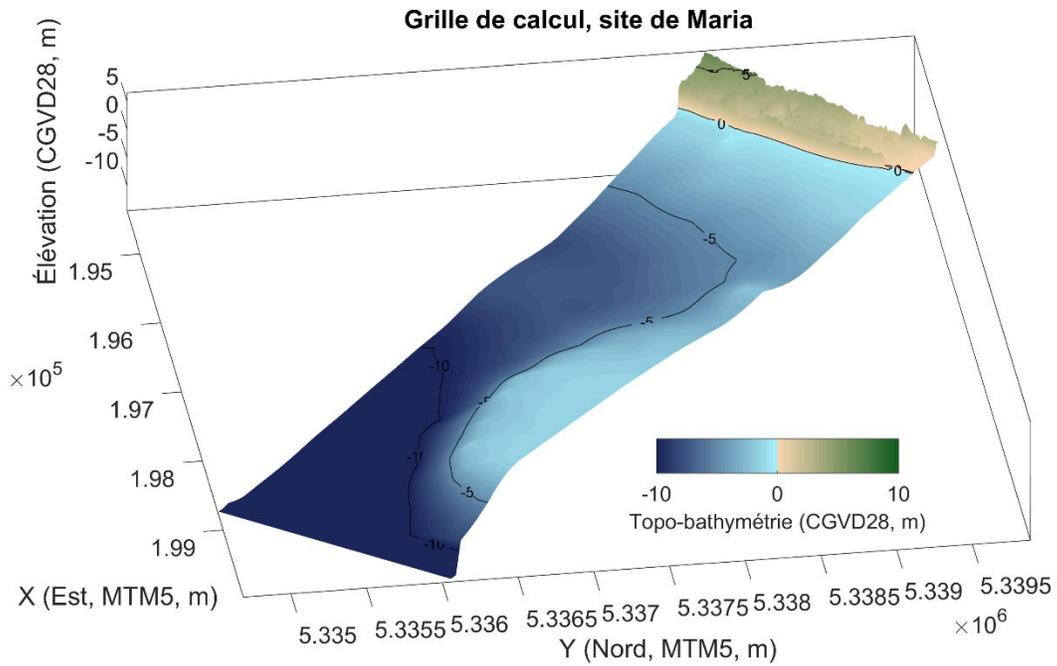


Figure 4 : Grille de calcul pour le modèle XBeach, générée pour le site de Maria. Les iso-contours sont indiqués (lignes noires).

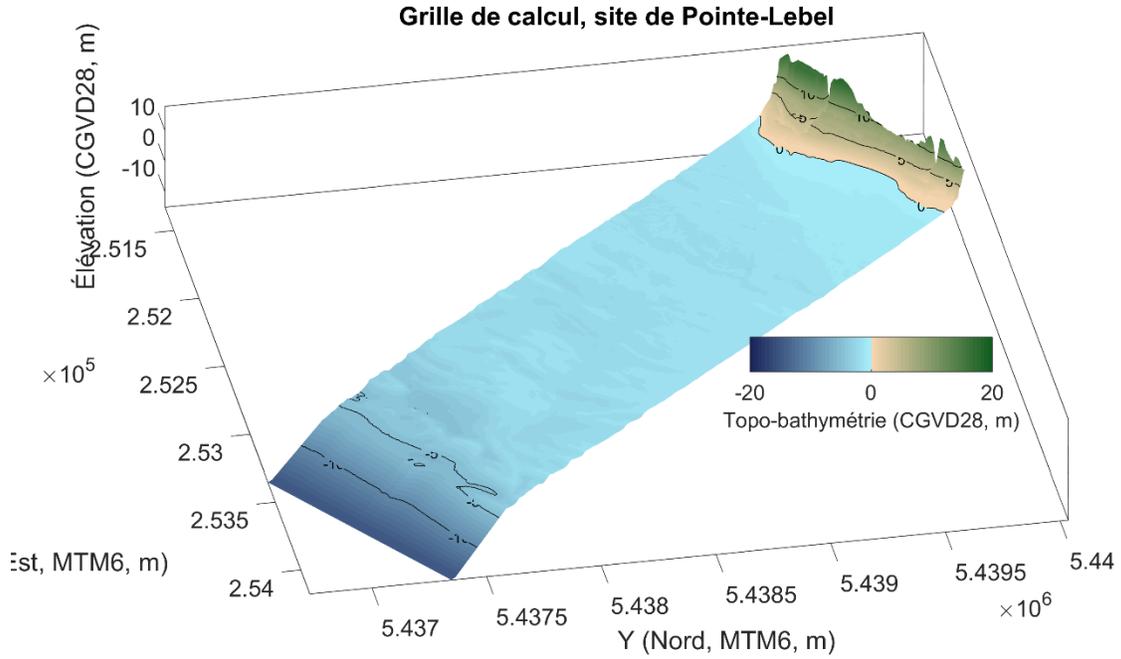


Figure 5: Grille de calcul pour le modèle XBeach, générée pour le site de Pointe-Lebel. Les iso-contours sont indiqués (lignes noires).

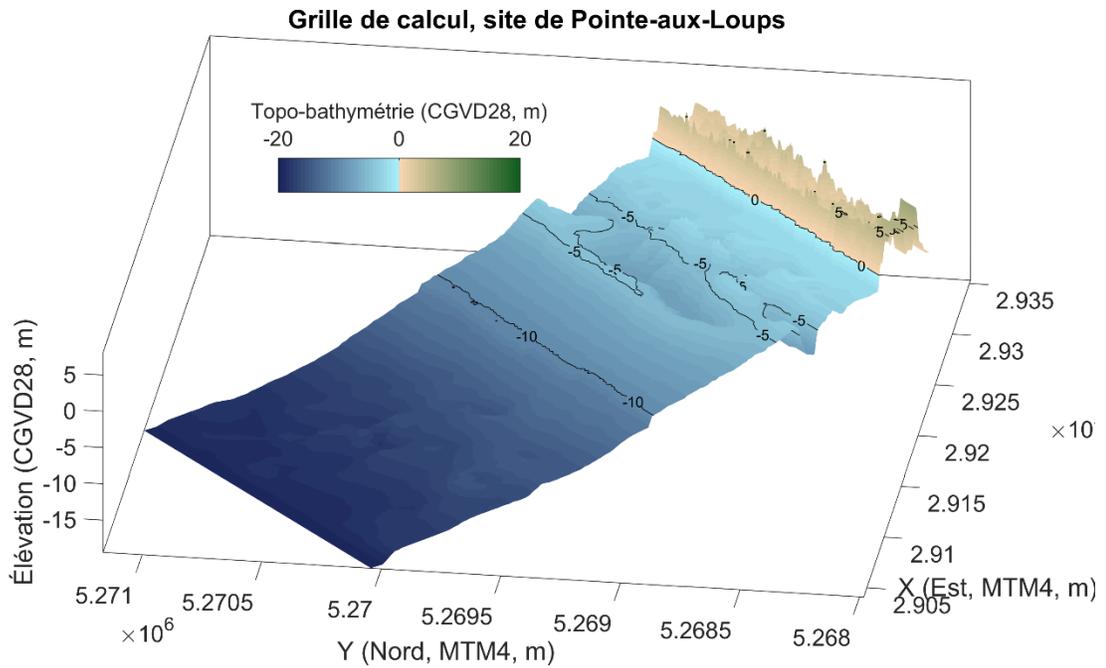


Figure 6: Grille de calcul pour le modèle XBeach, générée pour le site de Pointe-aux-Loups. Les iso-contours sont indiqués (lignes noires).

Une contrainte importante pour la génération de ces grilles de calcul est la taille finale (numérique) des matrices 2D (X, Y) définissant la répartition des nœuds de calcul. Celles-ci peuvent rapidement devenir importante et de ce fait devenir inutilisable car demandant trop de temps de lecture du disque (système), ou bien même ne pouvant être pris en charge par les logiciels. Nous avons choisi de ne pas dépasser une taille de plus de 30 Mo, ce qui semble être un bon compromis entre la couverture spatiale offerte par la grille, le temps de calcul du modèle la résolution et le nombre de nœud de calcul. Les couvertures spatiales de nos grilles vont de 2,5 km² pour la plus petite à 5,3 km² pour la plus grande.

2.3 Simulations numériques

Pour l'ensemble des sites, la période simulée est de 3,5 heures centrées sur le pic de la tempête. Le temps nécessaire pour simuler chaque évènement est compris entre 7,5 h et 35 h. Les données hydrodynamiques utilisées pour alimenter le modèle sont présentées à l'Annexe 6.1. Le mode de simulation choisi est le mode « surf beat », qui est un mode à phase moyennée, permettant notamment de reproduire fidèlement la dynamique des ondes infragravitaires et l'énergie transportée par les groupes de vagues. Néanmoins, dans ce type de configuration, les processus hautes fréquences (*e.g.* franchissement, jet de rive) ne sont pas modélisés. De ce fait, le niveau d'eau modélisé à la côte n'est pas le niveau maximal atteint mais plutôt le niveau moyen. Le module morphologique est activé ce qui permet de reproduire la dynamique des transferts sédimentaires (mise en suspension par les vagues, transport, érosion et accrétion, etc.).

Les sorties sont générées toutes les 30 minutes. Les données modélisées sont : la hauteur des vagues, l'évolution du niveau d'eau total, l'évolution de la topo-bathymétrie, les quantités cumulées de sédiments érodés ou accrétés, les courants perpendiculaires et parallèles à la côte ainsi que les cellules de la grille de calcul submergés. L'ensemble des données est enregistré dans un fichier unique au format NetCDF.

2.4 Traitement des données

Dans cette partie nous détaillons les différents traitements effectués sur les sorties du modèle XBeach. Ces traitements permettent d'obtenir une information claire sur les aléas de submersion marine et d'érosion côtière relevés sur nos différents sites d'études lors des tempêtes hivernales modélisées.

2.4.1 Submersion marine

Parmi les sorties du modèle XBeach, les variables « wet » (pour les directions u-v et z) nous permettent de savoir quelles cellules de la grille de calcul sont submergées, et ce à chaque instant. Les coordonnées de ces points sont donc récupérées puis une matrice contenant l'ensemble des informations utiles du modèle (vitesse des courants, hauteur des vagues, etc.) est créée. Une conversion de ces matrices sous la forme de surfaces géo-référencées (au format « .adf » et « .tiff ») est ensuite réalisée avec le logiciel ArcGis® et FME. Une superposition des photographies aériennes de la zone étudiée et des sorties du modèle XBeach nous apporte alors une information directe sur l'impact de la tempête à la côte.

Par exemple, sur la figure ci-dessous, la nappe de submersion (niveau d'eau total au pic de la tempête du 6 décembre 2010, figure 7) est représentée. Cela nous permet d'évaluer le nombre

d'infrastructure touchée ainsi que les zones du littoral vulnérables à la submersion. En chaque point la hauteur d'eau totale est connue ainsi que la valeur des autres variables sorties du modèle (érosion – accrétion, vitesse du courant, etc.).

La bande hachurée en bordure de la zone modélisée est dû à la résolution de la grille qui est irrégulière en variant de 2 m x 2 m près du trait de côte et jusqu'à 2 m x 20 m sur les bords et vers le large. La résolution de la grille est donc moins grande vers les bordures et les données moins fiables.

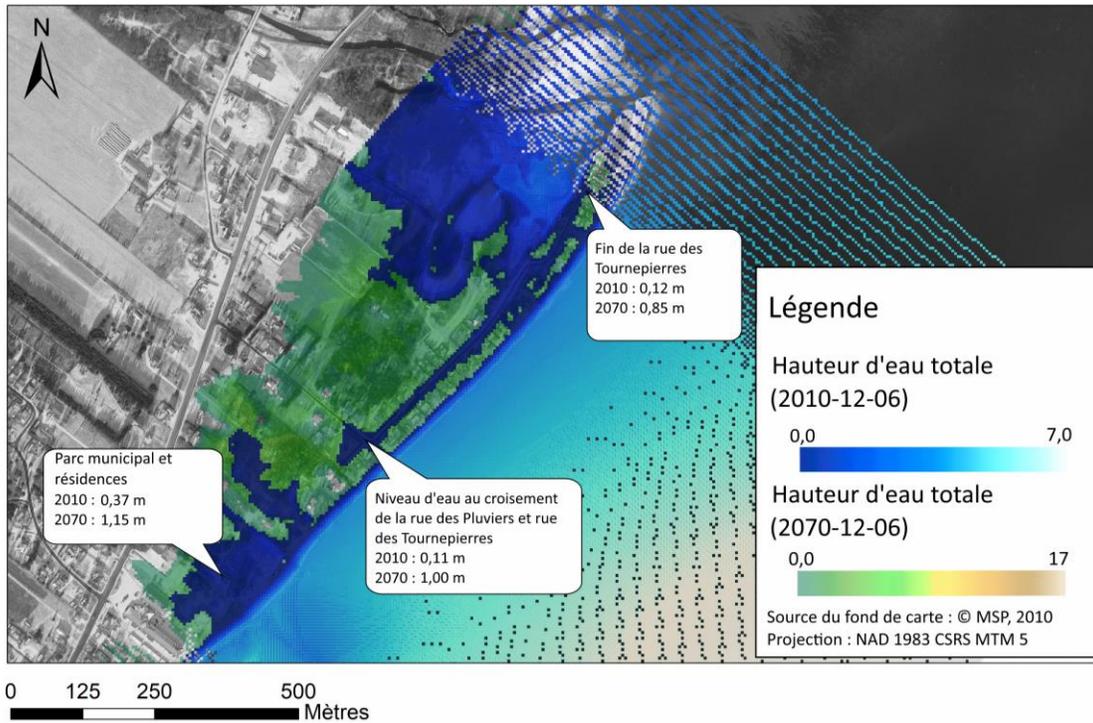


Figure 7: Nappes de submersion modélisées pour le secteur de Maria, lors du pic de la tempête du 6 décembre 2010 et de celle du 6 décembre 2070 (20h00 UTC). Les deux nappes sont superposées avec une échelle de couleur différentes.

2.4.2 Érosion et accrétion

Différents processus liés au transport sédimentaire sont pris en compte par le modèle. Ces processus sont : la mise en suspension des sédiments par les vagues (gravitaire / infragravitaire), la dynamique sédimentaire (sédimentation, advection-diffusion), les interactions flux-morphologie, le processus d'avalanche des sédiments, le transport, etc. Ainsi à chaque itération du modèle, la topo-bathymétrie est mise à jour ce qui permet de rendre compte de l'évolution morphodynamique du système. La plupart des équations gouvernant la dynamique sédimentaire sont des équations empiriques. Elles contiennent des paramètres environnementaux, dépendants des sites étudiés et souvent non connues, d'où l'importance de la phase de calibration du modèle.

Pour notre étude les quantités cumulées de sédiments érodés et accrétés sont enregistrées. Cela nous permet de déterminer au cours de l'évènement modélisé les endroits où la dynamique sédimentaire est particulièrement intense, notamment en ce qui concerne l'érosion (figure 8).

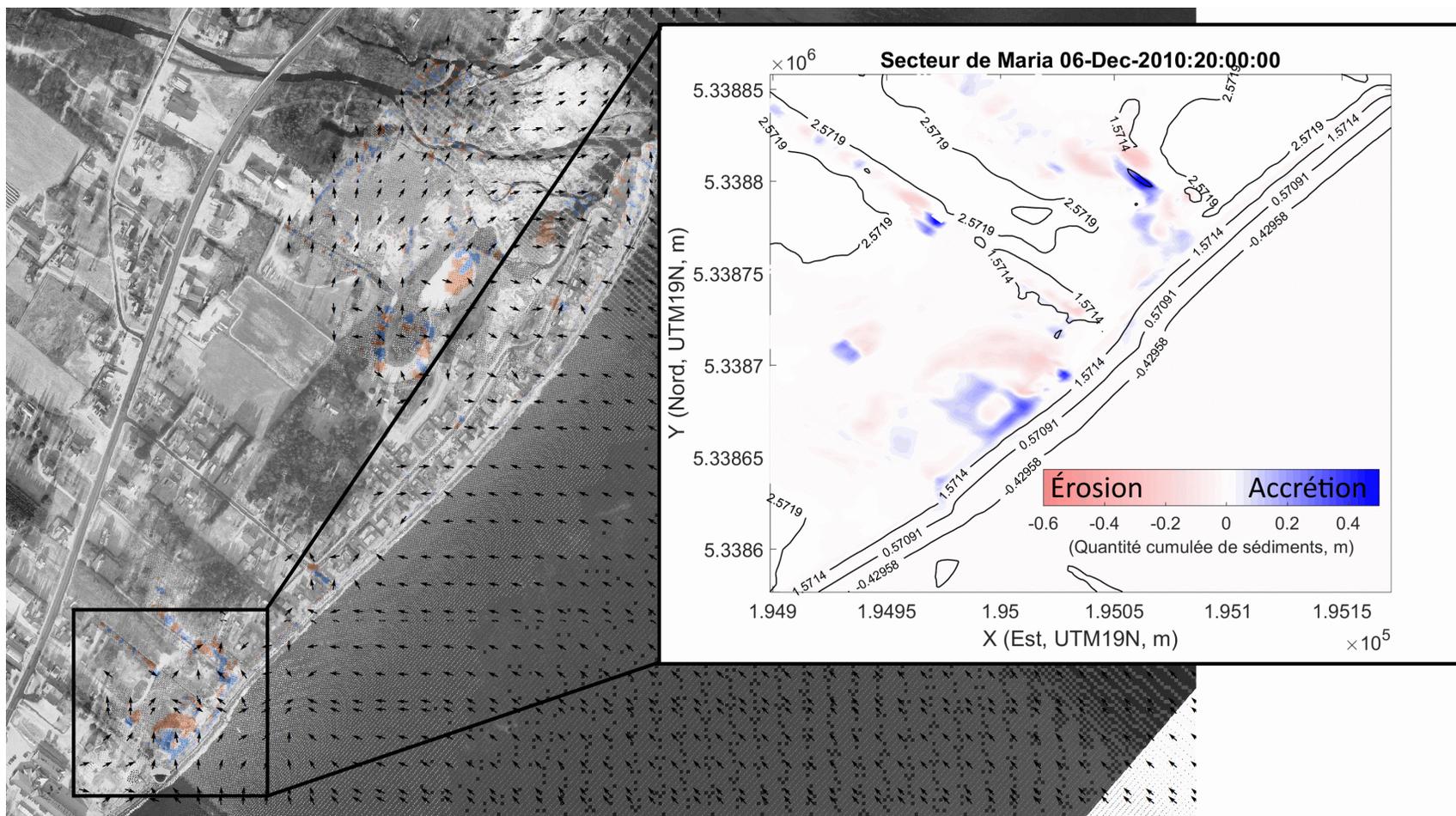


Figure 8: Illustration des résultats obtenus par modélisation numérique de la tempête du 6 décembre 2010 pour le secteur de Maria. L'échelle de couleur (bleu-rouge) correspond aux zones d'érosion et d'accrétion (bleu : érosion, rouge : accrétion, en mètre). Le courant est représenté par des flèche noire.

Ces cartes sont utiles pour obtenir une vue d'ensemble et pour l'interprétation. Néanmoins, en termes de quantification il est préférable de regarder la dynamique le long d'un profil perpendiculaire au trait de côte. Pour cela, on peut facilement récupérer les valeurs des grandeurs simulées le long de profils perpendiculaires au trait de côte (figure 9).

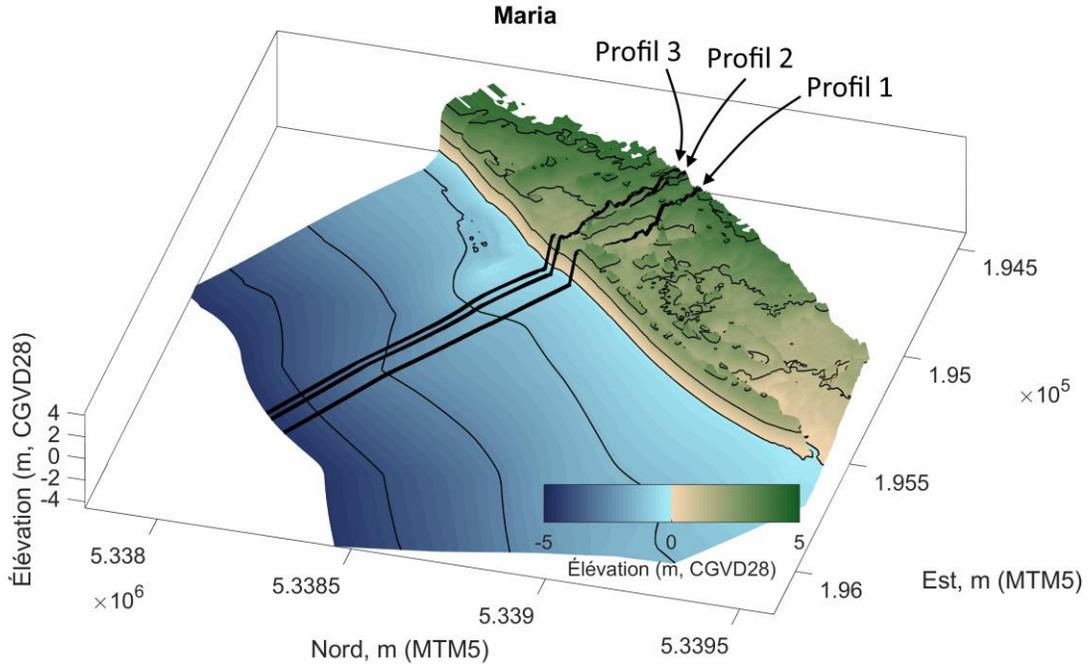


Figure 9: Exemple de profils d'étude pour le secteur de Maria. Ces profils sont tracés dans les zones vulnérables du secteur, identifié à partir des cartes d'érosion-accrétion précédemment réalisées (figure 8).

L'évolution de ces profils est ensuite suivie au cours de l'évènement. Les quantités de sédiments érodés et accrétés sont sauvegardées ainsi que l'ensemble des variables environnementales (hauteur de vague, niveau d'eau etc.) ce qui nous permet ensuite de mettre en lien l'érosion côtière avec le forçage hydrodynamique (figure 10).

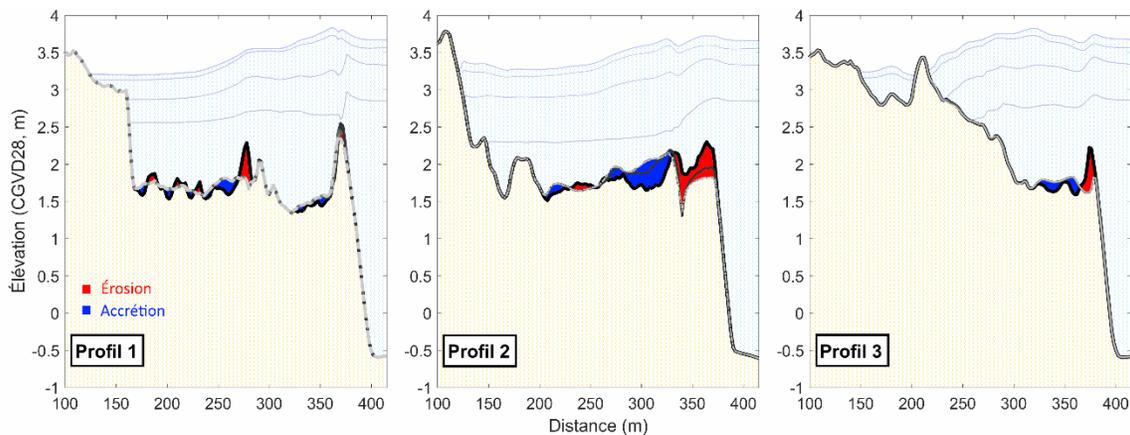


Figure 10 : Quantité de sédiments érodés-accrétés et hydrodynamique (niveau d'eau) observé le long des profils d'étude pour le secteur de Maria lors de la tempête hypothétique du 6 décembre 2070.

Un bilan sédimentaire le long de ces profils peut ainsi être effectué. Ces bilans sont obtenus en calculant les différences de surface (m^2) entre les profils avant et après tempête. De plus, une méthode de recherche automatique est mise en place afin de récupérer la position du trait de côte, de la flexure de l'estran ainsi que du pied de dune ou de la microfalaise (s'ils existent). Cette méthode est basée sur la mesure des variations altimétriques le long des profils (calcul du gradient et recherche des valeurs particulières, figure 11). La position du trait de côte est obtenue pour la valeur minimale du gradient², le pied de dune ou de microfalaise pour la valeur maximale et la flexure lorsque le gradient² dépasse une valeur seuil (variable suivant les sites).

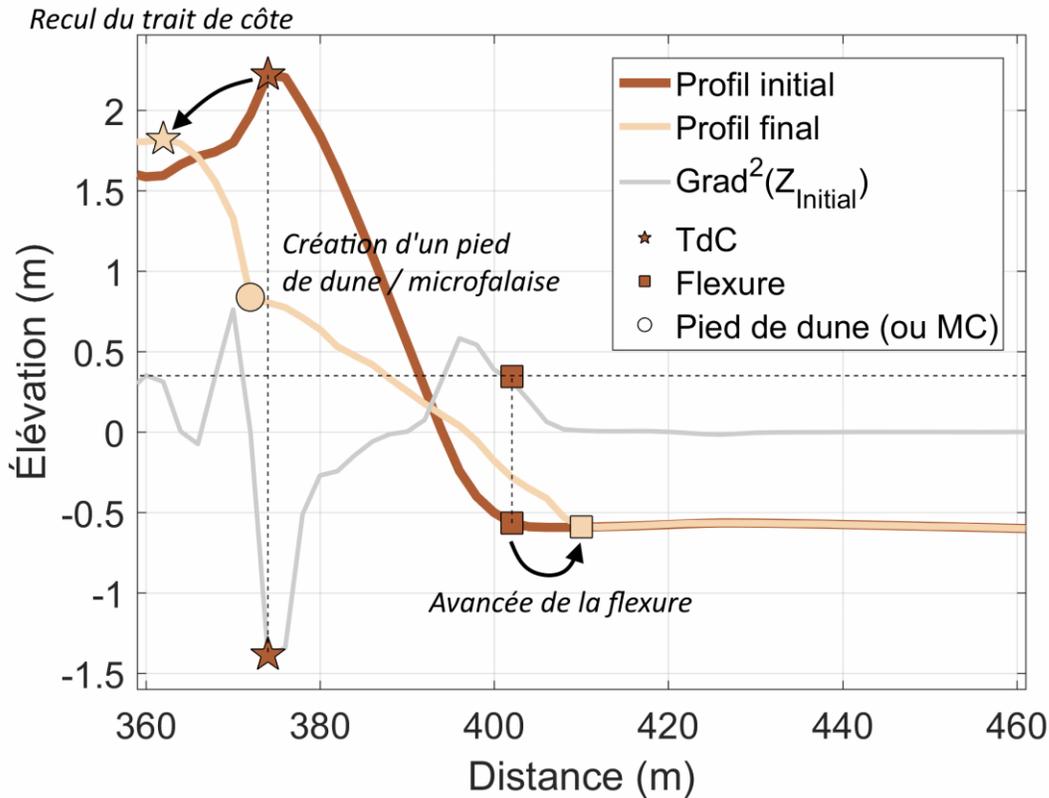


Figure 11: Illustration de la recherche automatique pour la position des éléments morphologiques de l'estran (trait de côte, flexure) sur les profils de plage modélisés par XBeach. Les traits de couleur sont les profils de plage du modèle, le trait gris est le gradient² altimétrique ($\frac{d^2Z}{dx^2}$) du profil initial. La valeur minimale correspond à la position du trait de côte et la flexure est le premier point du gradient² qui excède un certain seuil défini arbitrairement.

Les variations de la position de ces différents éléments morphologiques en termes de distance et d'élévation sont récupérées et enregistrées.

Enfin, les volumes sur l'ensemble de la zone des sédiments érodés et accrétés sont calculés en multipliant la variation altimétrique enregistrée par la surface de chacune des cellules correspondantes. On obtient ainsi le volume net de sédiments érodés et accrétés. La différence nous permet de connaître le bilan sédimentaire net pour l'ensemble de la zone modélisée.

3. Résultats

3.1 Modélisation de la submersion marine

Les cartes suivantes montrent le niveau d'eau modélisé au pic de la tempête historique (i.e. lors de la marée haute) ainsi que lors du pic de la tempête hypothétique en 2070 ainsi qu'en 2076 pour le site de Pointe-Lebel.

3.1.1 Site de Sainte-Luce



Figure 12: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Sainte-Luce lors de la tempête du 6 décembre 2010.



Figure 13: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Sainte-Luce lors de la tempête hypothétique du 6 décembre 2070.

Lors des deux évènements modélisés, des submersions marines sont observées le long du littoral de Sainte-Luce (figure 12, figure 13).

En 2010, on observe que la bande littorale entre 10 et 20 m est partiellement submergée (figure 14 a-b-c-d).



Figure 14: Quelques exemples de zones submergées dans la modélisation du 6 décembre 2010 à Sainte-Luce. La ligne rouge représente l'extension maximale de la nappe de submersion modélisée. a-b) Littoral ouest. c-d) Littoral est.

La nappe d'eau se rend à certains endroits jusqu'à la route (figure 14 a-b-c). Il faut noter que dans cette modélisation, le niveau d'eau est moyenné à l'échelle des groupes de vagues et donc que le niveau d'eau peut potentiellement se rendre plus loin encore. On peut donc envisager que l'axe routier surplombant la plage (Route du Fleuve Est/ Ouest) est probablement submergé par endroit ce qui peut rendre la route dangereuse lors de l'évènement. À l'ouest du site, ce sont principalement des zones de stationnements qui se retrouvent submergées (figure 14 a-b) mais à l'est ce sont essentiellement des résidences (figure 14 c-d). Au total on dénombre une quarantaine de bâtiments qui se retrouvent exposés à une submersion marine lors de l'évènement à un degré plus ou moins important : dans certains cas, seuls les premiers mètres de terrains semblent touchés, dans d'autres le bâtiment se retrouve complètement encerclé par l'eau (figure 14 c-d). En revanche dans le cas d'un évènement similaire impactant la côte en 2070, les dégâts seront bien plus importants (figure 15 a-b). On note en effet une forte submersion de

l'ensemble du littoral situé entre le trait de côte et la Route du Fleuve (Est-Ouest), soit entre 25 et 40 mètre à partir du trait de côte.

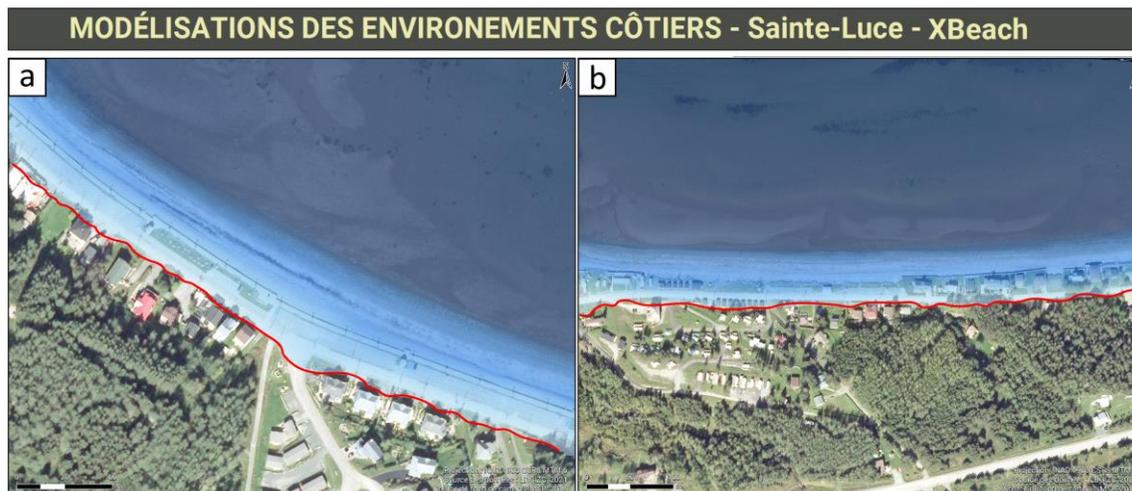


Figure 15: Zones submergées lors de l'évènement hypothétique du 6 décembre 2070 sur le littoral de Sainte-Luce. a) Littoral ouest (croisement de la Route du Fleuve Ouest avec la Rue des Villas). b) Littoral est (Route du Fleuve Est).

Ainsi toutes les infrastructures situées dans cette bande se retrouvent encerclées par l'eau ce qui peut provoquer des dégâts importants aux habitations et rend dangereuse cette zone pour les résidents. En effet les hauteurs d'eau sont importantes sur les parcelles donnant sur la mer : on relève environ 1 mètre d'eau sur les façades nord des habitations et entre 30 et 80 cm au niveau de la Route du Fleuve ce qui entrainera une coupure de l'utilisation de l'axe routier. Le courant en surface le long de la Route du Fleuve est aussi important (jusqu'à 1,5 m/s) dirigé principalement d'est en ouest sur la portion Est de l'axe.

3.1.2 Site de Maria

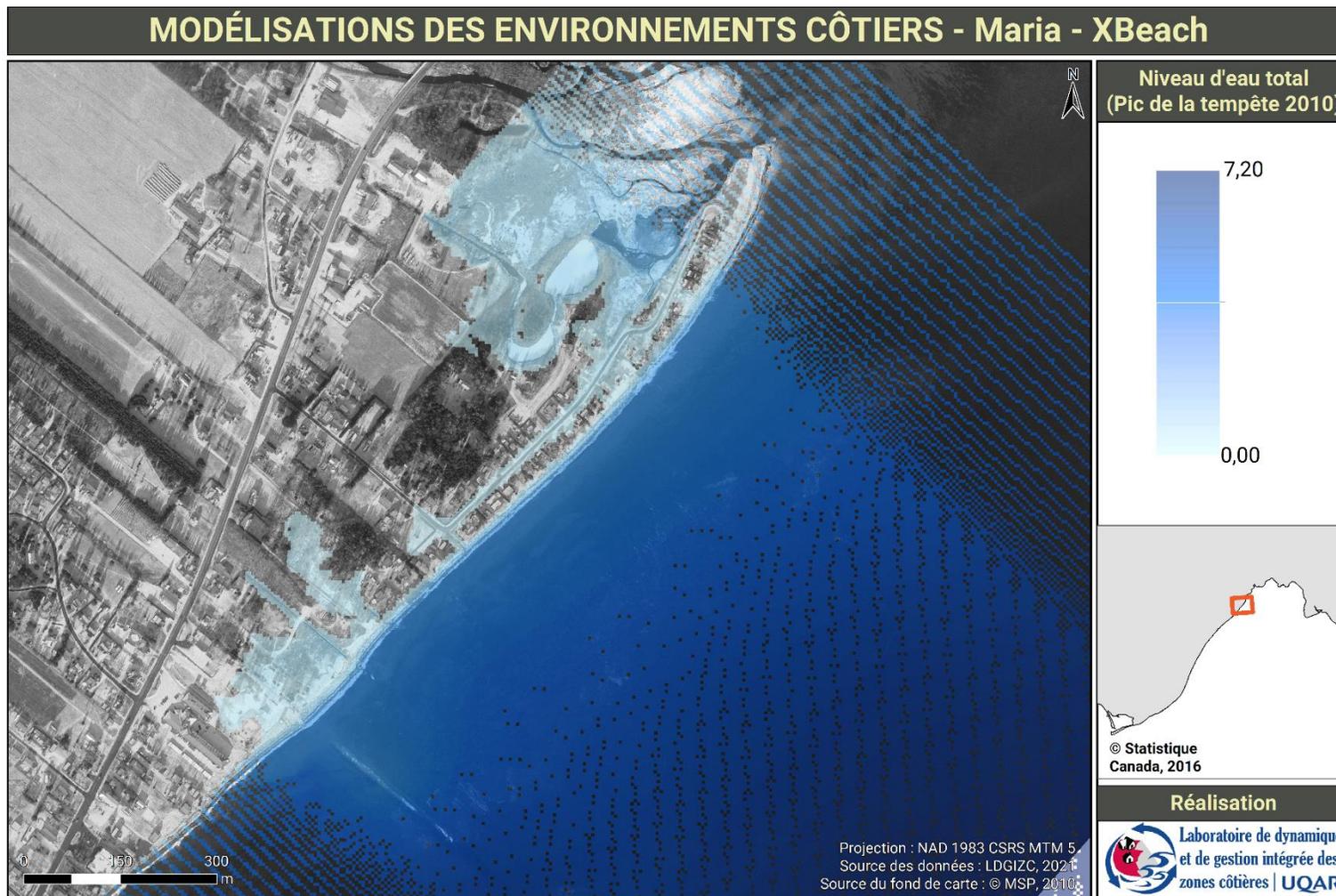


Figure 16: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Maria lors de la tempête du 6 décembre 2010.

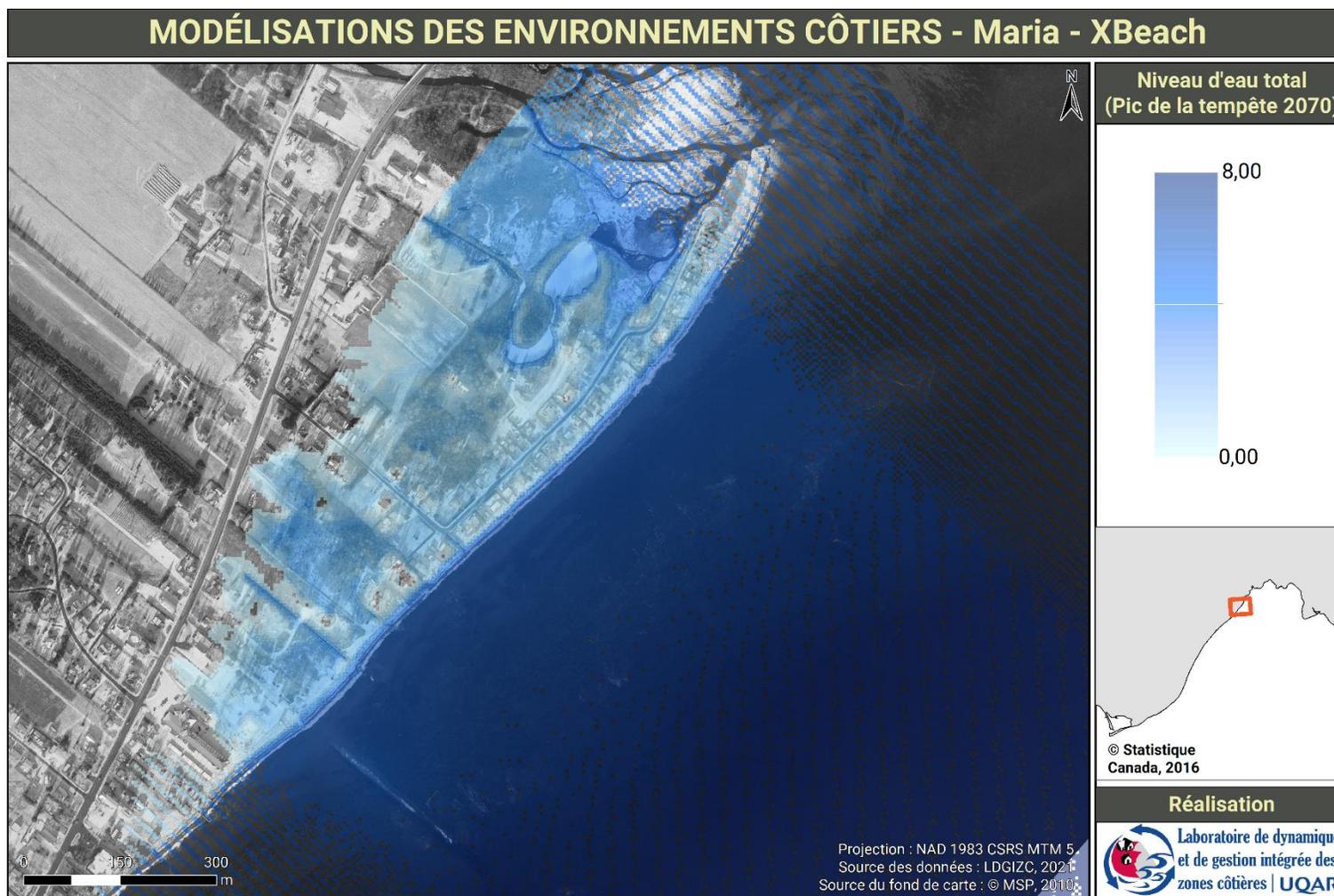


Figure 17: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Maria lors de la tempête hypothétique du 6 décembre 2070.

La tempête du 6 décembre 2010 a provoqué une importante submersion marine sur le secteur de Maria (figure 16). Plusieurs zones résidentielles et des voies de communications ont été inondées de façon importante. On note notamment une submersion complète de la rue des Tournepierres. Pour conséquence, l'ensemble des résidences situées entre cette rue et le front de mer, se retrouvent isolées. On dénombre ainsi une trentaine de bâtiments au total qui pourraient s'avérer problématiques. La hauteur d'eau moyenne le long de la rue est d'environ 30 cm (maximum de 60 cm), avec une augmentation progressive lorsque l'on se dirige vers le nord-est jusqu'à la courbe de la rue des Tournepierres, près du parc de la Pointe-Verte. L'ensemble du marais est submergé avec une hauteur d'eau importante (0,25 – 1,50 m). Le bas de la rue des Pluviers est aussi inondé (jusqu'à 20 cm d'eau). La bande littorale délimitée par la rue des Balbuzards au nord-est et le boulevard Perron au nord-est est particulièrement vulnérable avec la submersion de plusieurs zones, l'extension de la nappe dans les terres atteignant 200 m à partir du trait de côte. Plusieurs résidences ainsi que le Manoir Lady Maria sont menacées.

La prise en compte de la hausse du niveau marin (+ 0,94 m pour le secteur de Maria selon le scénario RCP 8.5) montre qu'une tempête similaire en 2070 aurait un impact catastrophique sur la municipalité de Maria. En effet, la submersion serait dans ce cas bien plus importante. La zone touchée serait en fait l'ensemble de la zone délimitée par la route 132 et la mer (figure 17). Cela représenterait une centaine de résidences privées ainsi que plusieurs commerces et lieux touristiques. À titre de comparaison, la hauteur d'eau serait en moyenne de 1,20 m dans la rue des Tournepierres (le maximum est de 1,50 m).

Ces submersions marines sont accompagnées de courants de surface pouvant s'avérer important. On enregistre en effet un courant au croisement de la rue des Pluviers et des Tournepierres dirigé vers la mer de près de 1 m/s^{-1} et de l'ordre de $0,5 \text{ m/s}^{-1}$ le long de la rue des Tournepierres dirigé vers le nord-est. À la côte, sur les parties submergées du littoral, là aussi les courants sont intenses (entre $0,5$ et 1 m/s^{-1}) et dirigés vers le large.

3.1.3 Site de Pointe-Label

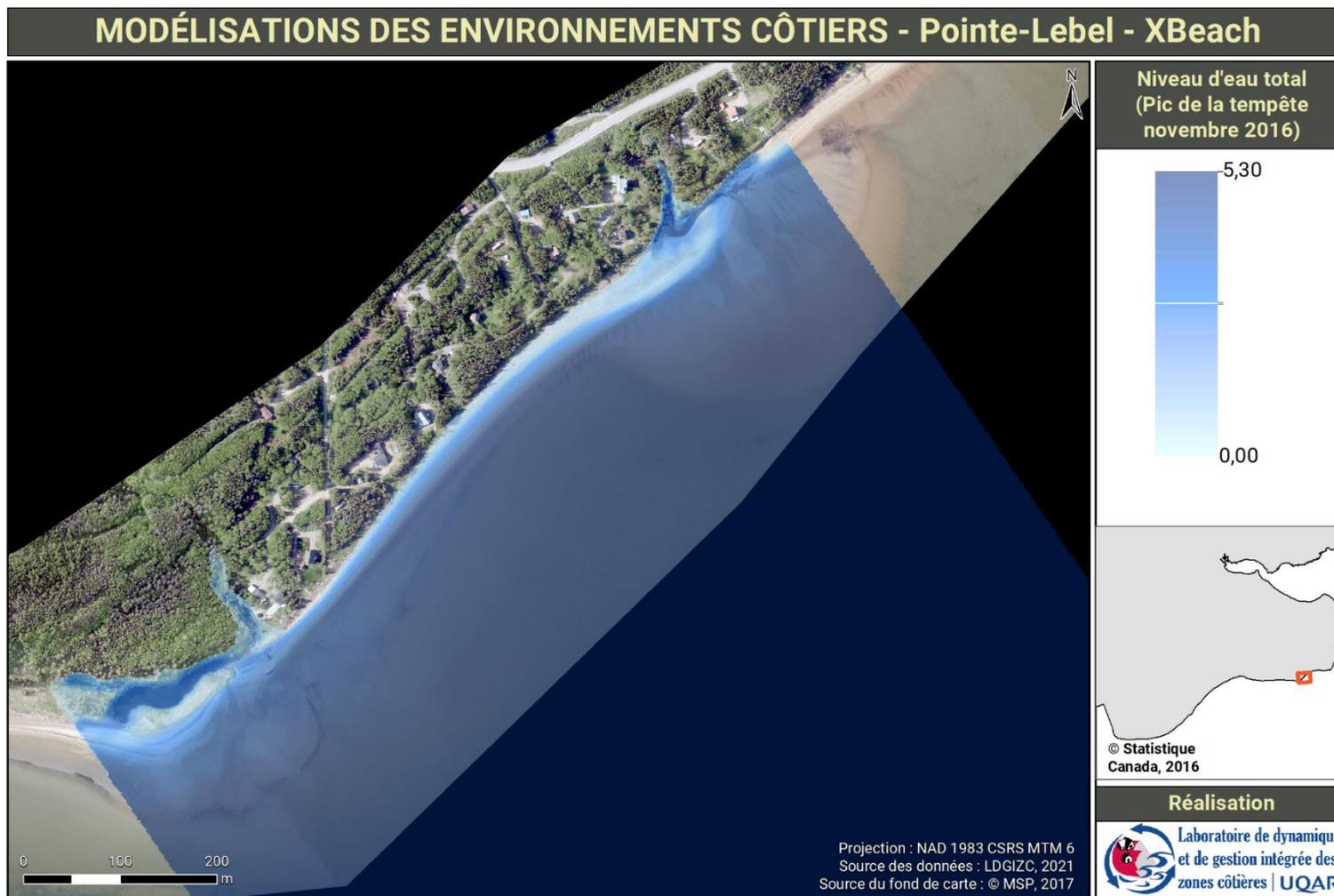


Figure 18: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Pointe-Label lors de la tempête du 16 novembre 2016.

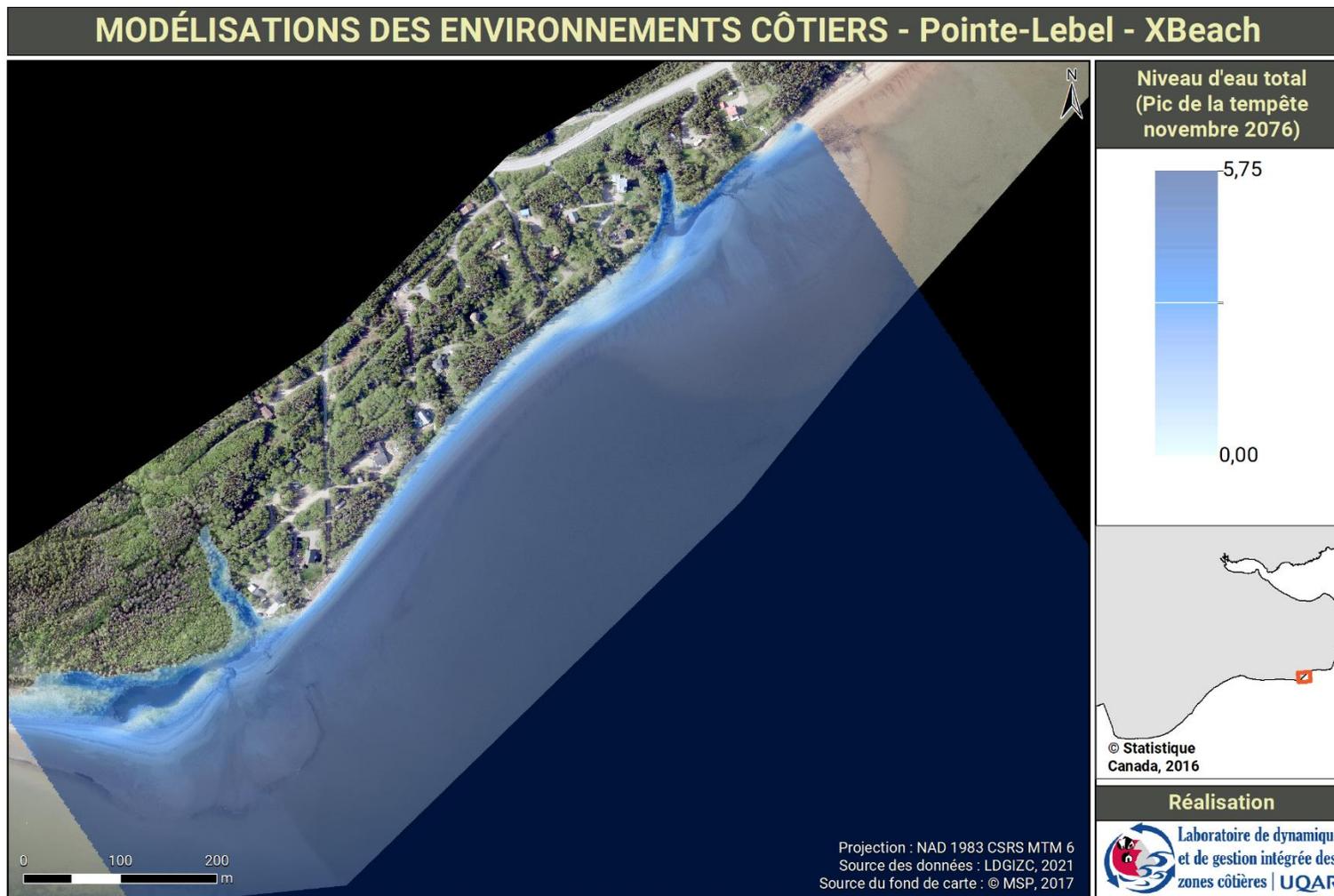


Figure 19: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Pointe-Lebel lors de la tempête hypothétique du 16 novembre 2016.

Sur le site de Pointe-Lebel, nous n'enregistrons pas de fortes submersions au cours des deux évènements modélisés (figure 18, figure 19). Le niveau d'eau reste important et des franchissements sur plusieurs portions de la côte sont observés. Ces derniers peuvent entraîner de faibles inondations des jardins privés donnant sur le littoral (figure 20 b). Ces résultats du modèle sont confirmés par des enregistrements vidéo. En effet, lors de la tempête du 16 novembre 2016 un système de caméra AXIS était déployé sur la côte. Celle-ci a effectivement enregistré quelques franchissements et une érosion importante de la côte (figure 20 a). L'érosion a provoqué un recul du trait de côte (limite de végétation en haut de la microfalaise) de près de 5 mètres en 1 heure, lors du pic de marée haute.

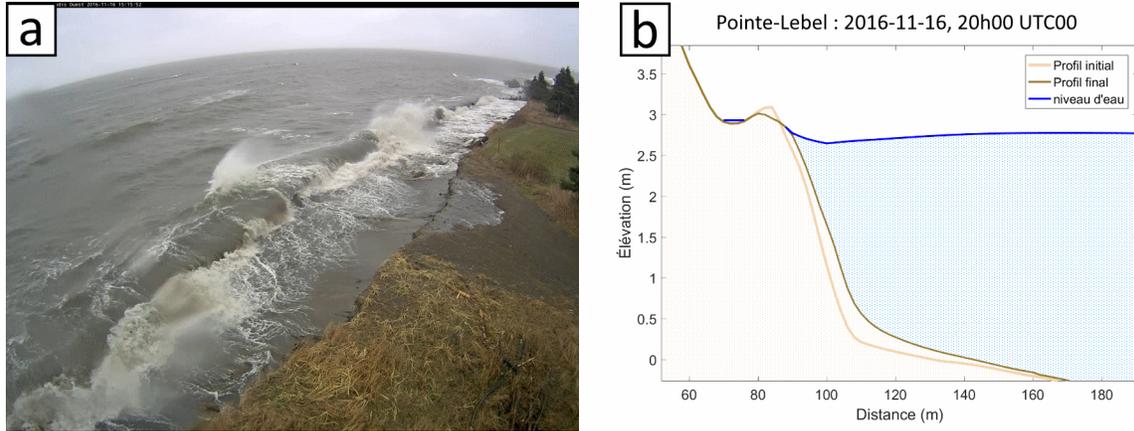


Figure 20: a) Observation de l'impact de la tempête du 16 novembre 2016 sur la côte de Pointe-Lebel par le système de caméra AXIS. Un franchissement est ici visible ainsi que plusieurs encoches d'érosion. Les résultats de la modélisation (b) sont en accord avec ces observations.

Le bord de la mer reste dangereux pendant les évènements avec un courant orienté vers la côte de l'ordre de 1 m/s en moyenne.

3.1.4 Site de Pointe-aux-Loups

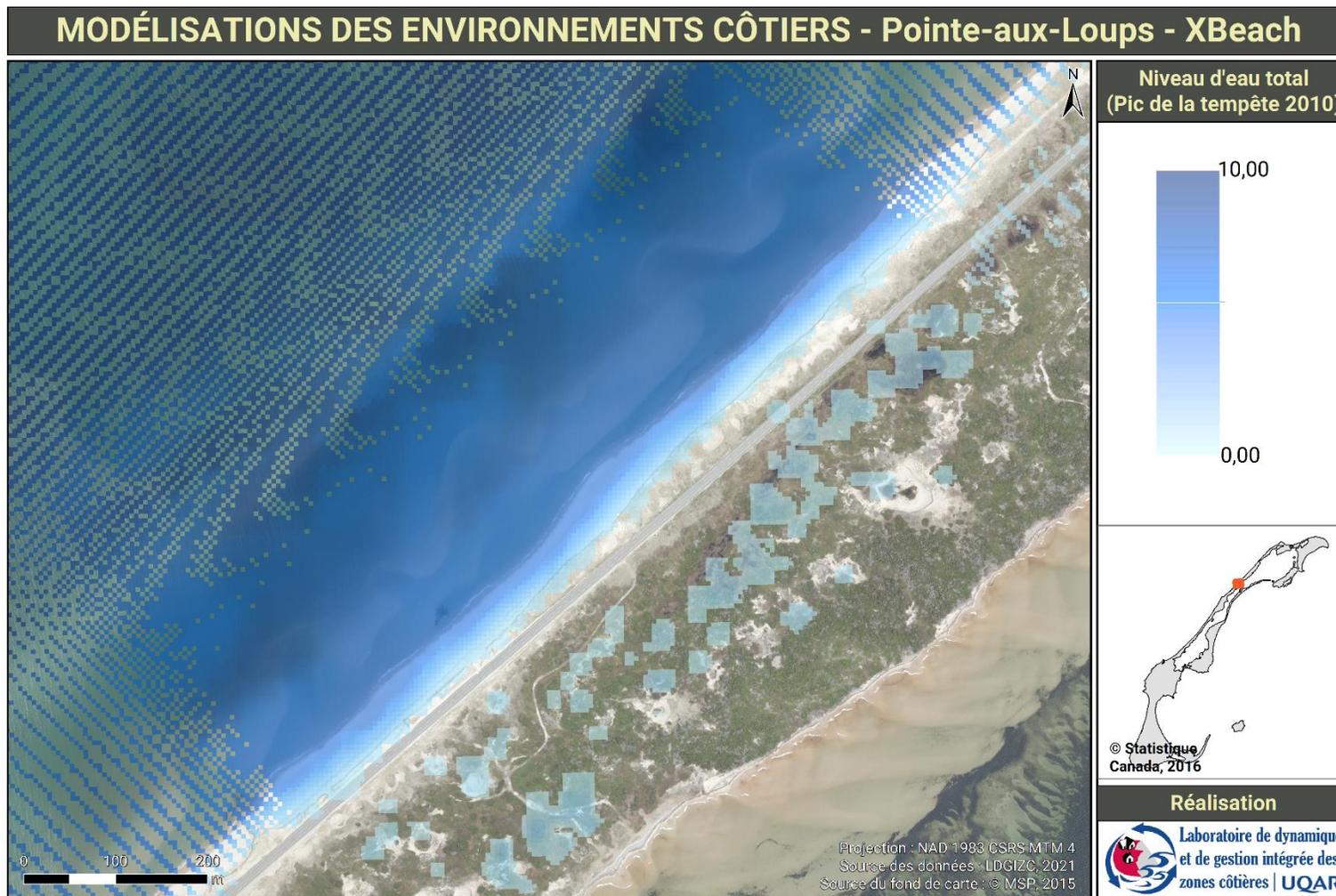


Figure 21: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Pointe-aux-Loups lors de la tempête du 21 décembre 2010.



Figure 22: Niveau d'eau total à la côte modélisé par XBeach pour le site de Pointe-aux-Loups lors de la tempête du 21 décembre 2070.

Lors des évènements de 2010 et 2070, on observe de nombreux franchissements occasionnant plusieurs poches d'eau sur la bande terrestre (figure 21, figure 22). Ces dernières sont peu profondes (entre 10 et 50 cm au maximum). Bien qu'il soit en effet possible que ce type d'inondations ait lieu, on peut se demander si certaines d'entre elles ne sont pas des artefacts issus du modèle. En effet, les plus éloignées dans les terres se trouvent à plus de 200 m. Néanmoins, lors des deux tempêtes les franchissements sont bien visibles (figure 23), des brèches dans le cordon dunaire sont aussi mis en évidence (voir plus loin les résultats traitant de l'érosion). Un épanchement d'eau donc est possible dans les terres avec une rétention d'eau là où une dépression topographique existe. Ces multiples franchissements peuvent contraindre l'utilisation de la route 199.

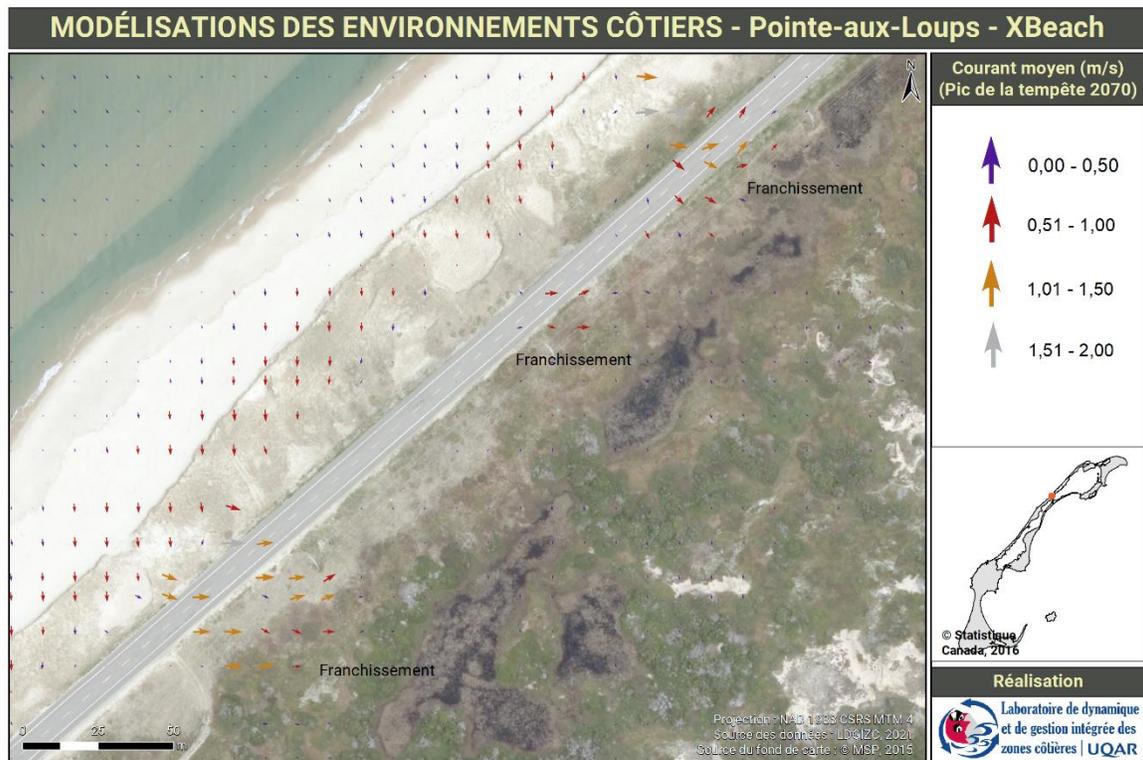


Figure 23: Cartographie des courants moyens, intégrés sur la colonne d'eau, lors du pic de la tempête de 2070 pour le site de Pointe-aux-Loups. Les franchissements observés lors de la tempête sont mis en évidence.

3.2 Modélisation des transferts sédimentaires (érosion-accrétion)

Pour chacun des sites nous avons déterminé trois profils perpendiculaires à la côte. La position de ces transects correspond aux trois points de la côte où la variabilité des transferts sédimentaires observées dans les modèles est la plus forte. Les variations du niveau d'eau ainsi que des quantités de sédiments érodés et accrétés lors des événements modélisés sont reportées le long de ces profils. Un bilan sédimentaire le long de ces trois profils est réalisé ainsi qu'un suivi de la position des marqueurs morphologiques lorsqu'ils sont présents.

3.2.1 Site de Sainte-Luce

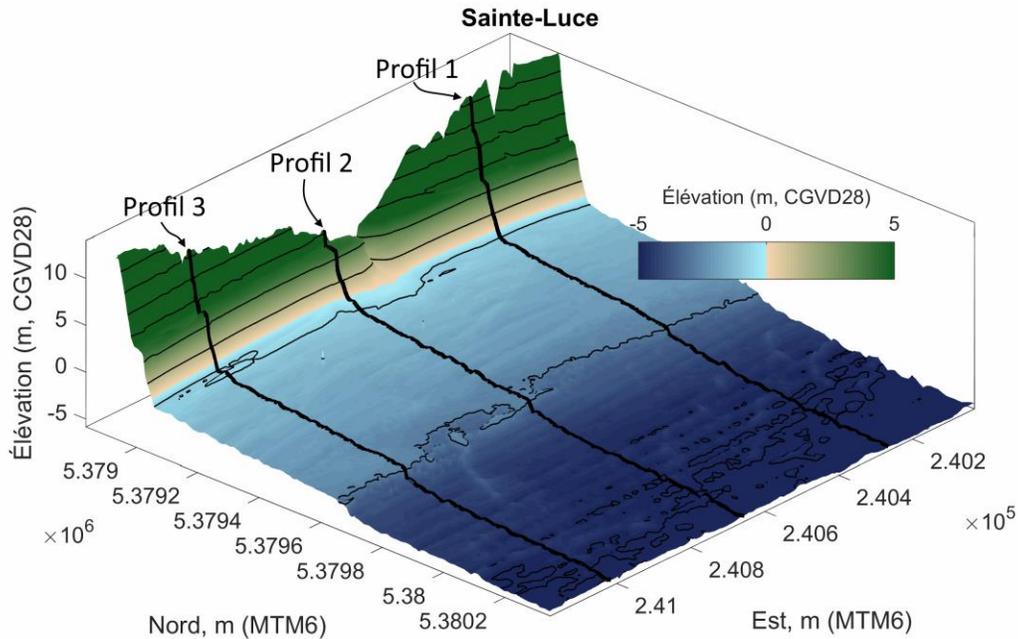


Figure 24: Choix des profils d'étude (1-2-3) pour le site de Sainte-Luce. Le profil 2 (centre plage) est situé au niveau du lit d'une évacuation d'eau.

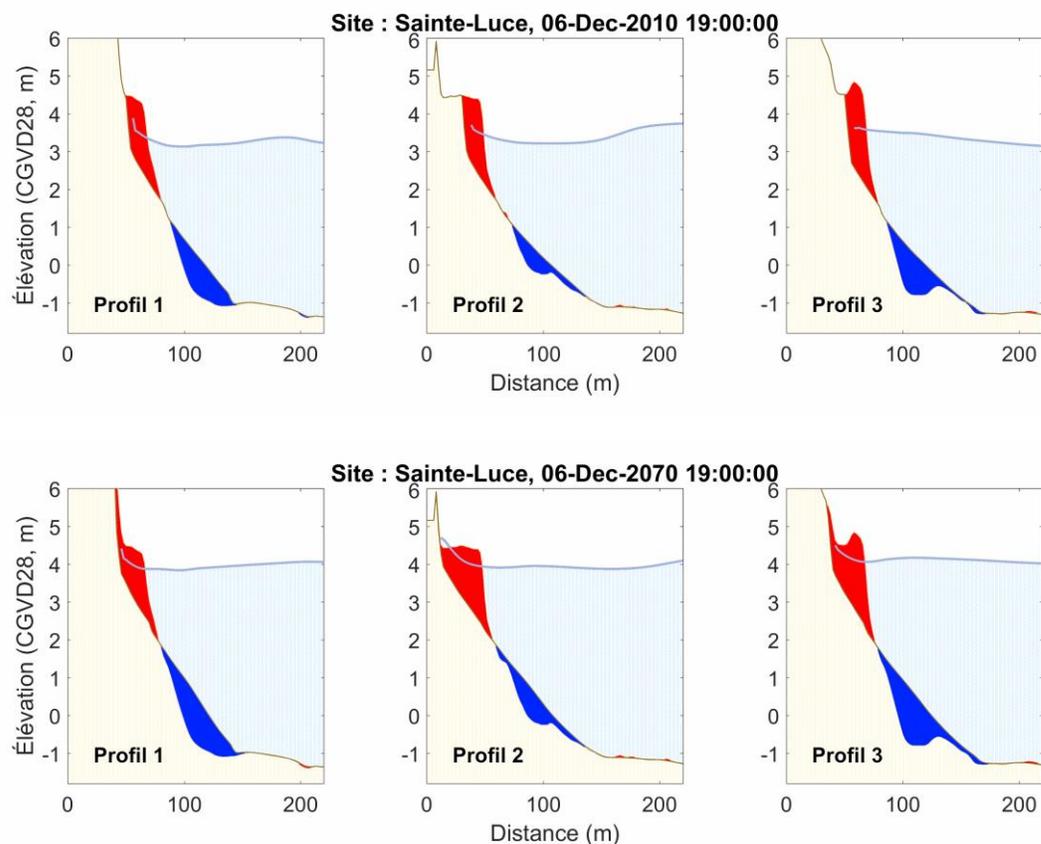


Figure 25: Évolution des profils d'étude modélisés par XBeach pour le site de Sainte-Luce. En haut, évènement historique du 6 décembre 2010, en bas un évènement hypothétique pour l'année 2070. Le niveau d'eau est le niveau moyen (marée et surcote) atteint lors du pic de la tempête. Le profil final est indiqué par le trait marron foncé et les quantités de sédiments érodés sont indiquées en rouge et accrétés en bleu.

Les bilans sédimentaires pour chacun des profils ainsi que des reculs constatés au niveau du trait de côte, de la flexure ou bien du pied de dune (si cela s'applique) sont rassemblés dans le tableau 4.

Tableau 4: Bilan sédimentaire et évolution des marqueurs morphologiques (trait de côte, flexure, pied de dune – microfalaise) pour les profils d'étude au cours des deux évènements modélisés pour le site de Sainte-Luce.

2010	Blain sédimentaire (m ²)			Dynamique de l'estran		
	Accrétion	Érosion	Bilan net	Position horizontale (m)		
				Trait de côte	Flexure	Pied de dune (microfalaise)
Profil 1	146,4	103,6	+42,7	-14,0	+38,0	-16,0
Profil 2	103,9	114,7	-10,8	-16,0	0,0	-18,0

Profil 3	125,9	137,1	-12,8	-16,0	+60,0	-16,0
----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

2070	Blain sédimentaire (m ²)			Dynamique de l'estran Position horizontale (m)		
	Accrétion	Érosion	Bilan net	Trait de côte	Flexure	Pied de dune (microfalaise)
Profil 1	179,8	114,1	+63,7	-26,0	+39,9	-24,0
Profil 2	119,3	146,0	-27,4	-38,0	+2,0	-38,0
Profil 3	165,8	161,1	+3,9	-32,0	+4,0	-32,0

Pour les deux évènements, on observe une très forte érosion en haut de plage et une forte accrétion en bas de plage (de l'ordre de 100 à 150 m³/m sur des portions de plage de quelques dizaines de mètres). Le sédiment est érodé puis redéposé rapidement au niveau de la zone de déferlement. L'impact successif des vagues en haut de plage crée d'importantes encoches d'érosion; les blocs de sédiments se détachent puis sont ensuite transportés par les vagues qui se réfléchissent à la côte. L'interaction entre les vagues incidentes et réfléchies au niveau de la zone de déferlement génère ensuite le dépôt de ces sédiments arrachés à la côte. En conséquence le haut de plage (la portion délimitée par le trait de côte et le pied de dune ou de microfalaise) recule fortement, autour de 15 m en 2010 et jusqu'à 40 m en 2070. La flexure en bas de plage prograde quant à elle de plusieurs dizaines de mètres. Ces observations sont généralisables à l'ensemble de la plage (figure 26).

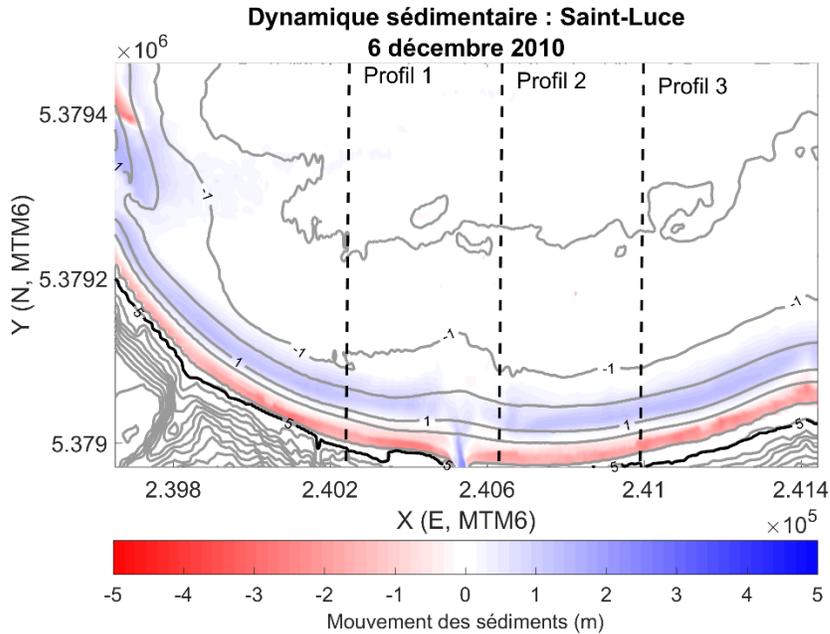


Figure 26: Dynamique sédimentaire observée par simulation numérique (échelle de couleur). Les profils d'étude sont indiqués par des lignes pointillées. Les isobathes (gris clair et noir ($z = -1, 1$ et 5 m)) sont indiqués.

On observe sur l'ensemble de la zone et pour l'évènement de 2010 un volume total de $13374,75\text{m}^3$ de sédiments accrétés, et de $12933,72\text{m}^3$ de sédiments érodés. On a donc au total un bilan net de $+441,02\text{m}^3$ ce qui est relativement faible pour l'ensemble de la zone étudié. Les transferts sédimentaires sont à l'équilibre entre les processus d'érosion et d'accrétion. Pour la tempête du 6 décembre 2070, on enregistre un volume total de $15610,48\text{m}^3$ de sédiments accrétés, et $12469,18\text{m}^3$ de sédiments érodés. On a donc au total un bilan net de $+3141,29\text{m}^3$. Lors de cet évènement, les processus d'accrétion dominent les processus d'érosion. Le haut de plage subit une forte érosion associée à un recul important mais à l'échelle de la cellule de la plage la quantité de sédiment est plus importante après l'évènement.

3.2.2 Site de Maria

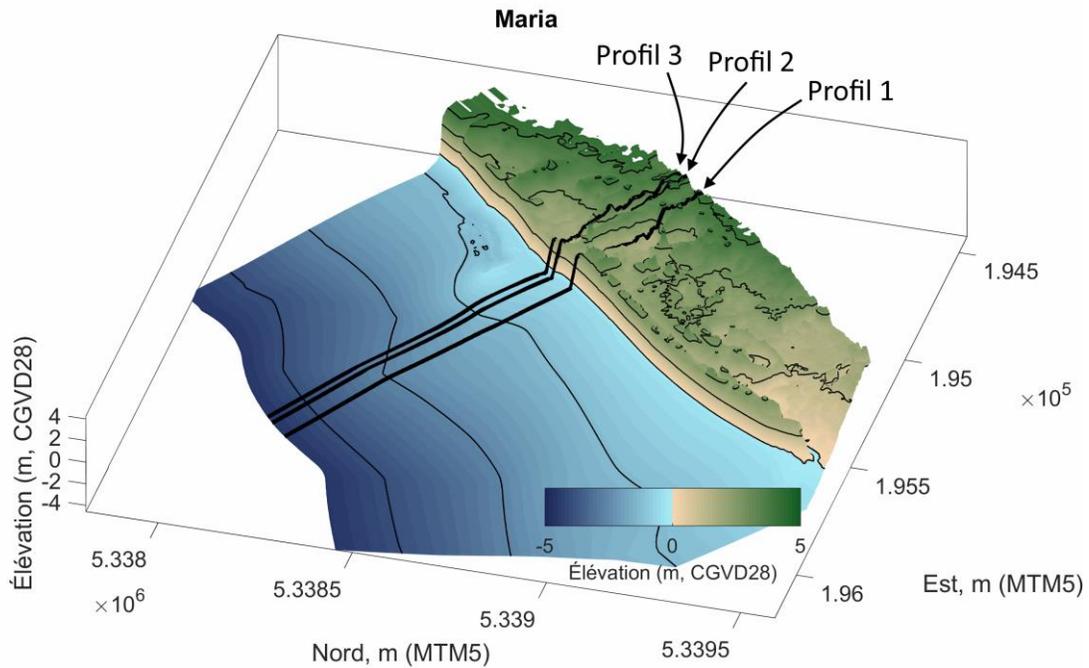


Figure 27: Choix des profils d'étude (1-2-3) pour le site de Maria. Les profils d'étude ont été choisis dans la zone urbaine, aux endroits où la dynamique et la submersion était particulièrement importante.

Les deux tempêtes modélisées ont un impact très important sur le site de Maria. Les profils avant et après tempête font état d'une profonde modification du site, avec une érosion particulièrement forte au niveau du trait de côte (figure 28). Comme on a pu le voir précédemment (section 3.1.2), le niveau d'eau à la côte est important, provoquant de fortes submersions.

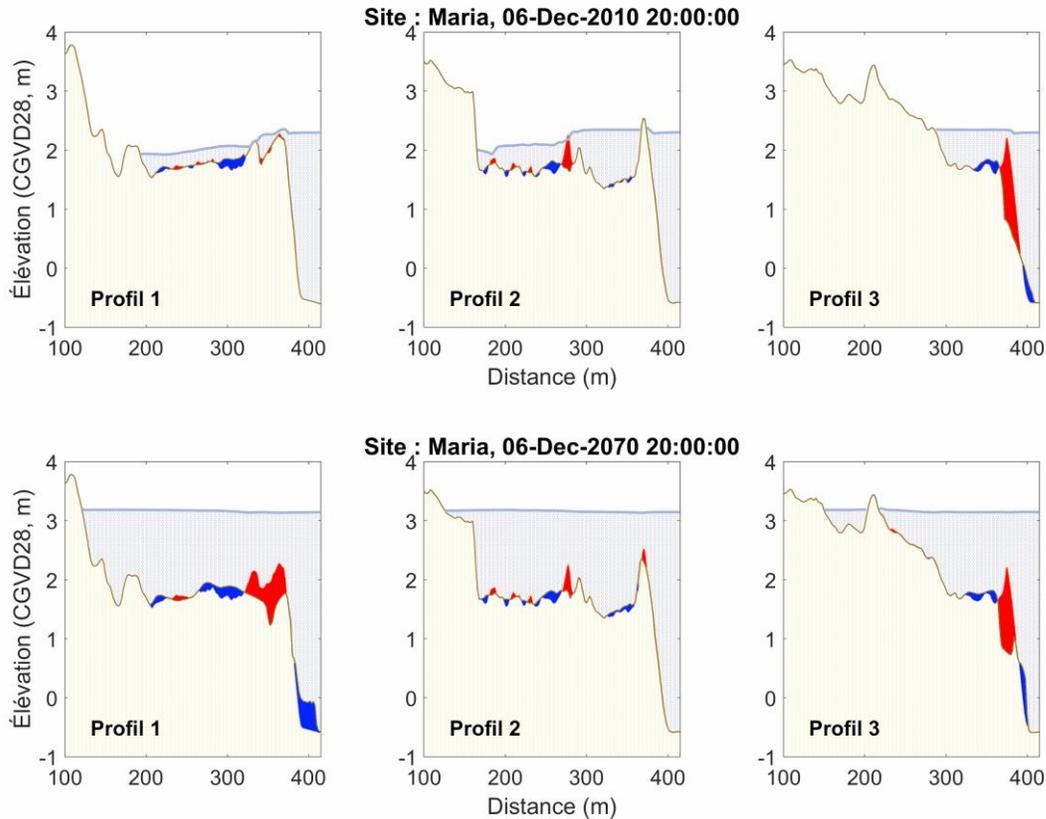


Figure 28: Évolution des profils d'étude modélisés par XBeach pour le site de Maria. En haut, évènement historique du 6 décembre 2010, en bas un évènement hypothétique pour l'année 2070. Le niveau d'eau est le niveau moyen (marée et surcote) atteint lors du pic de la tempête. Le profil final est indiqué par le trait marron foncé et les quantités de sédiments érodés sont indiquées en rouge et accrétés en bleu.

En 2010, les profils 1 et 2 montrent des changements moins importants avec des poches d'érosion-accrétion qui se succèdent dans les terres (lobes de transgression). Le trait de côte n'est pratiquement pas impacté, bien qu'il soit submergé dans les deux cas. En revanche, sur le profil 3, à l'ouest, l'ensemble du haut de plage est fortement érodé ce qui induit un recul du trait de côte de près de 10 mètres alors que la flexure en bas de plage prograde de 8 m. On a donc un élargissement du haut estran de près de 20 mètres associé à l'apparition d'un pied de microfalaise et d'un haut de plage plus réfléchifs. Le bilan sédimentaire pour ce profil montre un déficit important de 41 m².

En 2070, le haut de plage subit d'importants dommages avec des reculs mesurés jusqu'à 10 mètres. Pour le profil 1, on n'observe pas de recul horizontal mais une érosion verticale importante. Le sédiment est redéposé en bas de plage et en arrière de la plage. Le profil 3 montre une dynamique similaire à celle observée pour la tempête du 6 décembre 2010, avec là aussi un bilan sédimentaire déficitaire (-34 m²). On note l'apparition d'une berme en milieu de plage d'une hauteur de 20 cm environ.

Tableau 5: Bilan sédimentaire et évolution des marqueurs morphologiques (trait de côte, flexure, pied de dune – microfalaïse) pour les profils d'étude au cours des deux évènements modélisés pour le site de Maria.

2010	Blain sédimentaire (m ²)			Dynamique de l'estran Position horizontale (m)		
	Accrétion	Érosion	Bilan net	Trait de côte	Flexure	Pied de dune (microfalaïse)
Profil 1	23,4	8,3	+15,1	0,0	0,0	X
Profil 2	18,8	24,2	-5,7	0,0	0,0	X
Profil 3	21,92	63,05	-41,13	-10,0	+8,0	-X

2070	Blain sédimentaire (m ²)			Dynamique de l'estran Position horizontale (m)		
	Accrétion	Érosion	Bilan net	Trait de côte	Flexure	Pied de dune (microfalaïse)
Profil 1	67,8	71,3	-3,5	+2,0	+20,0	+3,9
Profil 2	27,8	28,6	-0,75	-3,9	0,0	X
Profil 3	28,6	62,8	-34,2	-10,0	+2,0	0,0

On observe sur l'ensemble de la zone et pour l'évènement de 2010 un volume total de 8776,25 m³ de sédiments accrétés, et de 9975,80 m³ de sédiments érodés. On a donc au total un bilan net déficitaire atteignant -1199,55 m³. Pour la tempête du 6 décembre 2070, on enregistre un volume total de 12239,6 m³ de sédiments accrétés, et 14768,71 m³ de sédiments érodés. On a donc au total un bilan net de -2529,1 m³. Dans le cas des deux évènements, le volume de sédiment érodés est important. La prise en compte de la hausse du niveau marin relatif pour le secteur de Maria engendre une érosion plus intense à la côte de l'ordre de + 50 % en termes de volume.

3.2.3 Site de Pointe-Lebel

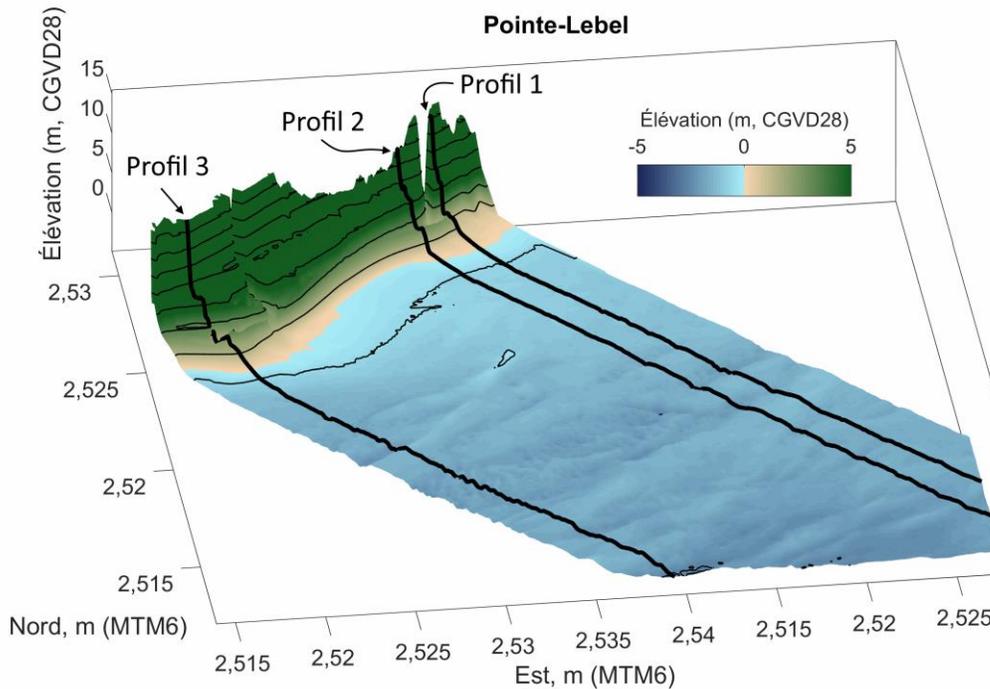


Figure 29: Choix des profils d'étude (1-2-3) pour le site de Pointe-Lebel. Le profil n°2 est situé dans le lit d'une petite rivière.

Lors des deux tempêtes, on observe des changements modérés le long des profils (figure 30). Les quantités de sédiments mis en mouvement sont assez importants (supérieures à 50 m^3). Les sédiments érodés sont généralement redéposés rapidement en haut de plage mais une certaine quantité est évacuée ailleurs que sur la partie active de la plage, comme sur le profil n°1 qui montre un profil très érodé avec un bilan sédimentaire négatif atteignant $90 \text{ m}^3/\text{m}$.

Les profils 1 et 2 montrent tous une érosion plus ou moins marquée au niveau du haut estran avec, pour le profil 2, une accrétion rapide sur la partie active de la plage (figure 30). Sur le profil 3, le niveau d'eau n'atteint pas le trait de côte supérieur mais le cordon sableux présent montre une érosion à sa base et une accrétion au niveau de sa crête, celui-ci étant entièrement submergé lors de l'évènement. Seul le profil n°2 montre un recul du trait de côte qui en réalité se traduit par une érosion verticale ce qui modifie la forme du trait de côte.

Lors de la tempête hypothétique de 2076, on observe à peu près les mêmes changements que lors de celle de 2016 mais avec un ordre de grandeur plus important.

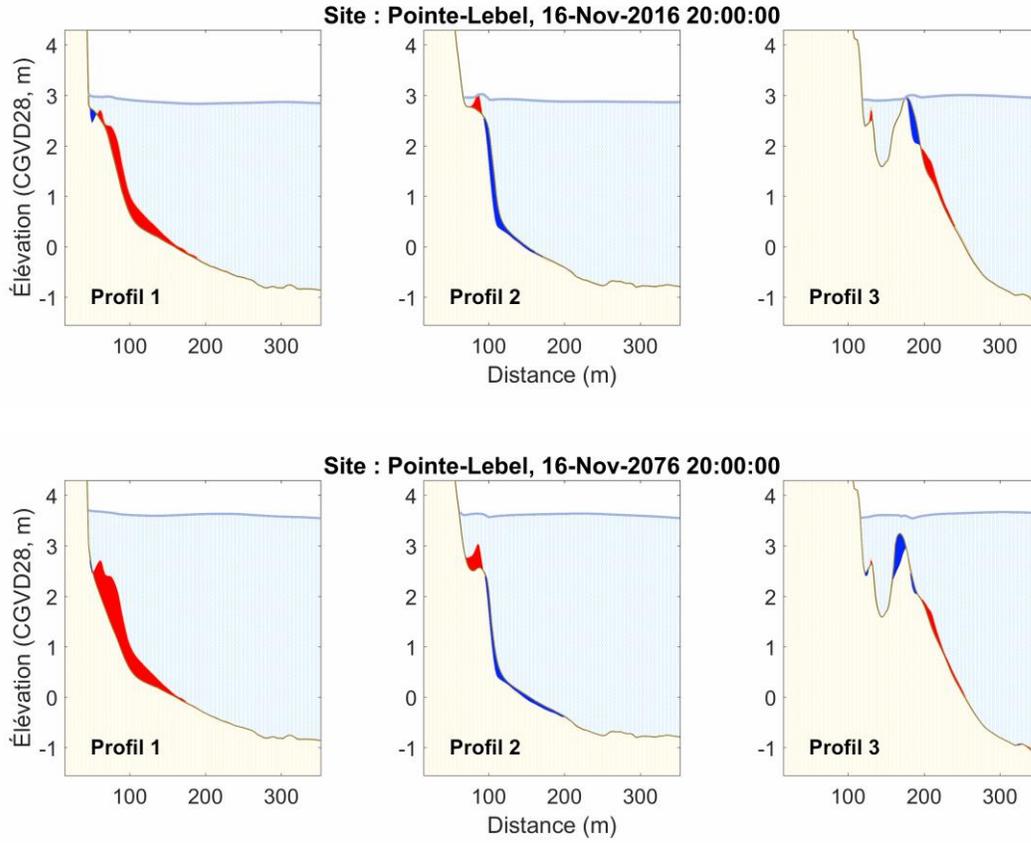


Figure 30: Évolution des profils d'étude modélisés par XBeach pour le site de Pointe-Lebel. En haut, évènement historique du 16 novembre 2016, en bas un évènement hypothétique pour l'année 2076. Le niveau d'eau est le niveau moyen (marée et surcote) atteint lors du pic de la tempête. Le profil final est indiqué par le trait marron foncé et les quantités de sédiments érodés sont indiquées en rouge et accrétés en bleu.

Tableau 6: Bilan sédimentaire et évolution des marqueurs morphologiques (trait de côte, flexure, pied de dune – microfalaise) pour les profils d'étude au cours des deux évènements modélisés pour le site de Pointe-Lebel.

2016	Blain sédimentaire (m ²)			Dynamique de l'estran Position horizontale (m)		
	Accrétion	Érosion	Bilan net	Trait de côte	Flexure	Pied de dune (microfalaise)
Profil 1	31,8	122,5	-90,9	0,0	-4,0	-2,0
Profil 2	76,5	30,5	+45,9	-1,0	+6,0	*
Profil 3	55,2	63,8	-8,6	0,0	0,0	0,0

* Pas de pied de dune ou de microfalaise

2076	Blain sédimentaire (m ²)			Dynamique de l'estran Position horizontale (m)		
	Accrétion	Érosion	Bilan net	Trait de côte	Flexure	Pied de dune (microfalaise)
Profil 1	43,9	-188,6	-144,2	0,0	+18,0	+4,0
Profil 2	84,7	54,5	+30,2	+10,0	+6,0	*
Profil 3	86,4	-72,7	+13,7	0,0	0,0	0,0

*Pas de pied de dune ou de microfalaise

On observe sur l'ensemble de la zone et pour l'évènement de 2016 un volume total de 8058,11m³ de sédiments accrétés, et de 6080,35m³ de sédiments érodés. On a donc au total un bilan net excédentaire atteignant +1977,76m³. Pour la tempête du 16 novembre 2076, on enregistre un volume total de 15703,68 m³ de sédiments accrétés, et 10753,98m³ de sédiments érodés. On a donc au total un bilan net de +4949,69m³.

3.2.4 Site de Pointe-aux-Loups

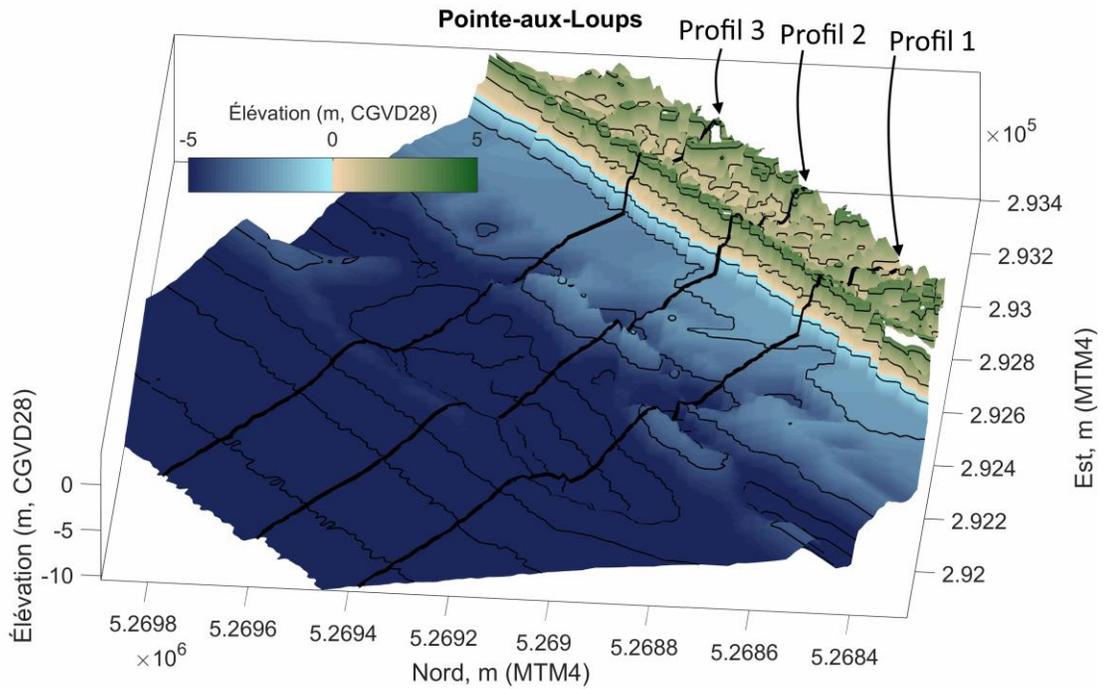


Figure 31: Choix des profils d'étude (1-2-3) pour le site de Pointe-aux-Loups.

L'évènement du 21-22 décembre 2010 a été particulièrement violent dans la région des Îles-de-la-Madeleine. Des vents importants (70 km/h établi) ont généré des vagues au large atteignant 5,5 m de haut. Cela a donné lieu à un intense transport sédimentaire (figure 32). On observe un basculement entre le haut de plage, où une forte érosion est observée, alors que le bas de plage de plage montre une forte accrétion. La réponse de la plage face à ce forçage semble similaire le long du trait de côte.

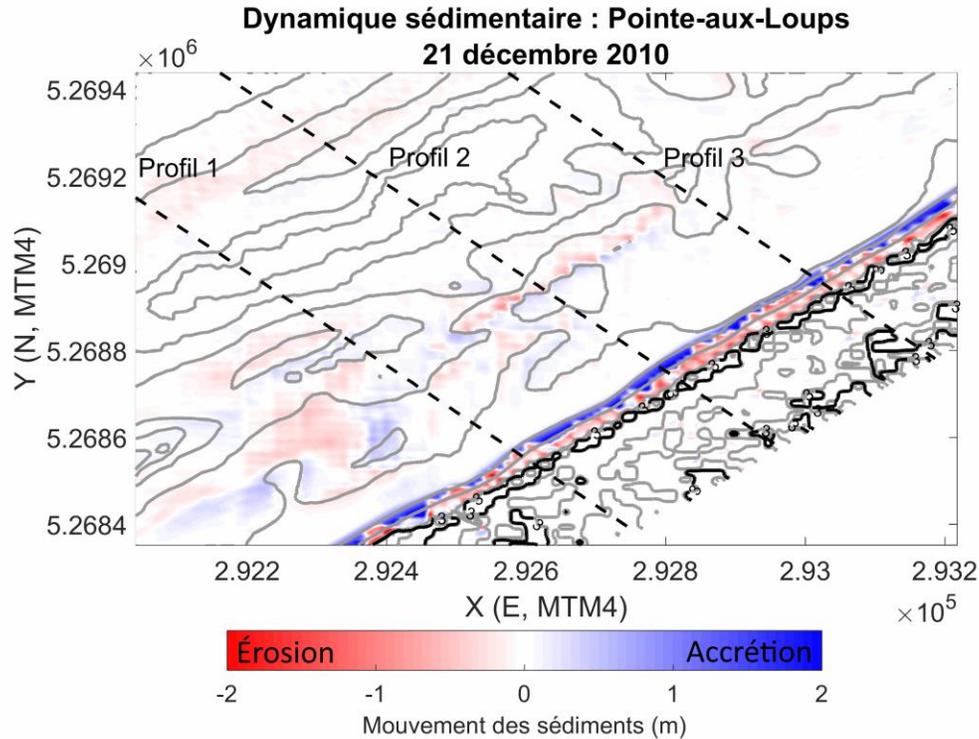


Figure 32: Dynamique sédimentaire modélisée lors de la tempête du 21 décembre 2010 pour le site de Pointe-aux-Loups. Les profils d'étude sont indiqués par des lignes pointillées. Les isobathes (gris clair et noir ($z = 3$ m)) sont indiqués.

Lors de l'évènement de 2010, le niveau d'eau n'a pas été assez haut pour engendrer un recul du trait de côte. Par contre le pied de dune montre un recul important sur les profils ouest - est (1 – 3), de près de 10 mètres (figure 33, tableau 7). La flexure de plage prograde du fait d'une importante accrétion en bas de plage, notamment sur le profil 3 (+ 180 m²). On observe une avancée vers la mer de la flexure de 8 m pour le profil 1 et 20 m pour le profil 3. En conséquence la zone d'estran globale s'élargit avec un profil de plage plus dissipatif.

La prise en compte dans le modèle d'un niveau d'eau plus important lors de l'évènement de 2070 (+ 0,94 m), a d'importants effets sur l'évolution de la plage (figure 33). Le niveau d'eau plus élevé entraîne une plus faible dissipation de l'énergie des vagues par le fond. Les vagues arrivent à la côte avec une énergie plus importante et la ligne de rivage plus proche du trait de côte. Celui-ci subit une forte érosion, on constate un recul de 2 et 4 mètres sur les profils 1 et 2 respectivement. Le profil 3 montre une érosion encore plus intense avec une disparition du sommet de dune. Le trait de côte reste à la même position horizontale mais baisse de 1,35 m en verticale. Des lobes de transgression sont aussi reproduite par le modèle (non visible sur les figures). Ces derniers se trouvent au maximum à 66 m vers les terres à partir du trait de côte. Ils pourraient partiellement recouvrir la route 199 qui se trouve à environ 80 m du trait de côte.

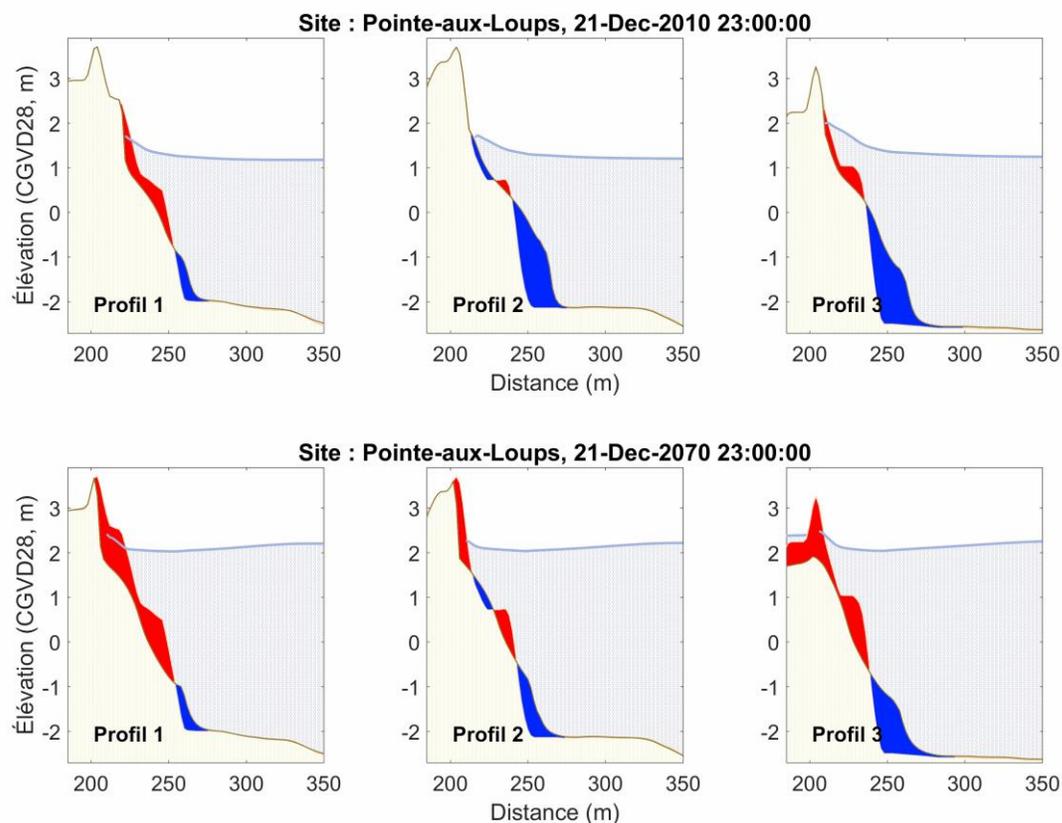


Figure 33: Évolution des profils d'étude modélisés par XBeach pour le site de Pointe-aux-Loups. En haut, événement historique du 21 décembre 2010, en bas un événement hypothétique pour l'année 2070. Le niveau d'eau est le niveau moyen (marée et surcote) atteint lors du pic de la tempête. Le profil final est indiqué par le trait marron foncé et les quantités de sédiments érodés sont indiquées en rouge et accrétés en bleu.

Tableau 7: Bilan sédimentaire et évolution des marqueurs morphologiques (trait de côte, flexure, pied de dune – microfalaise) pour les profils d'étude au cours des deux événements modélisés pour le site de Pointe-aux-Loups.

2010	Blain sédimentaire (m ²)			Dynamique de l'estran Position horizontale (m)		
	Accrétion	Érosion	Bilan net	Trait de côte	Flexure	Pied de dune (microfalaise)
Profil 1	60,0	102,2	-42,3	0,0	+8,0	-9,9
Profil 2	186,4	37,6	+148,7	0,0	+17,9	-1,9
Profil 3	180,5	60,3	+120,2	0,0	+19,9	-9,9

2070	Blain sédimentaire (m ²)			Dynamique de l'estran Position horizontale (m)		
	Accrétion	Érosion	Bilan net	Trait de côte	Flexure	Pied de dune (microfalaise)
Profil 1	210,3	216,6	-6,2	-1,9	+6,0	-24,0
Profil 2	183,6	91,7	+92,1	-4,0	+7,9	-17,9
Profil 3	160,3	174,6	-14,4	0,0	+16,0	+6,0

On observe sur l'ensemble de la zone et pour l'évènement de 2010 un volume total de 81 119,3 m³ de sédiments érodés, et de 134413,79 m³ de sédiments accrétés. On a donc au total un bilan net excédentaire atteignant +53294,51 m³. Pour la tempête du 6 décembre 2070, on enregistre un volume total de 148802,71 m³ de sédiments érodés, et 238061,03 m³ de sédiments accrétés. On a donc au total un bilan net de +89258,32 m³. Pour les des deux évènements modélisés, les volumes sédimentaires sont très importants. Une forte accrétion est enregistrée, par sédimentation rapide des volumes érodés en haut de plage au niveau de la flexure mais possiblement par des transferts entre les barres sableuses observées un peu plus au large. En effet, ces systèmes complexes et très dynamiques peuvent jouer un rôle important en captant les sédiments érodés à la côte mais aussi en servant de réservoir sédimentaire pouvant alimenter la plage.

4. Conclusion

Ce chapitre du projet Résilience côtière traite de l'impact des tempêtes hivernales sur les plages sableuses du littoral québécois. Une sélection de 4 sites a été faite, réunissant des caractéristiques différentes (en termes d'exposition, de dynamique et de contexte géomorphologique) et des enjeux spécifiques. Pour chacun des sites d'études, un modèle numérique XBeach est implanté. Celui-ci contient une calibration de plusieurs paramètres libres du modèle adapté à chacun des sites. Grâce à cet outil, une simulation de la dynamique hydrosédimentaire est réalisée avec les caractéristiques d'une tempête hivernale historique. Afin de mesurer l'impact des tempêtes futures, une seconde simulation prenant en compte les mêmes conditions hydrodynamiques ainsi que la hausse du niveau marin relatif est faite. La hausse du niveau marin relatif est calculée pour chacun des sites. Une analyse des transferts sédimentaires ainsi que des variables hydrodynamiques est réalisée lors de ces événements.

Notre étude montre que l'impact de la tempête historique considérée varie selon les sites. Une submersion marine est observée sur le littoral de Sainte-Luce, touchant plusieurs dizaines de résidences. La nappe de submersion atteindrait par endroit la Route du Fleuve, relativement exposée car surplombant la plage. Cette submersion est accompagnée d'une érosion assez intense à certains endroits avec un recul du trait de côte de l'ordre de plusieurs mètres. Pour Pointe-Lebel, la modélisation de l'évènement du 16 novembre 2016 montre un impact modéré de la tempête avec une érosion du trait de côte pouvant être importante (quelques mètres de recul) accompagnée de franchissement par les vagues. Les résidences présentes sur le littoral ne sont pas directement affectées mais les parcelles exposées ont subi une légère inondation ainsi qu'un recul du trait de côte. Ces observations sont en accord avec des observations vidéo réalisées lors de l'évènement. Sur le site de Maria, l'effet de la tempête sur la municipalité est majeur. Une grande partie de la zone modélisée est submergée, occasionnant un isolement de certains secteurs résidentiels ainsi qu'une coupure de plusieurs voies de communication routières. Des courants importants dans les zones submergées suggèrent que celles-ci peuvent s'avérer dangereuses pour les populations et les services de secours. Pour le site de Pointe-aux-Loups, de nombreux franchissements du cordon dunaire sont enregistrés. Ils occasionnent des inondations plus ou moins importantes sur l'arrière-plage. Ces franchissements sont accompagnés de courants importants et pourraient compromettre l'utilisation de la Route 199, surplombant la plage.

Ces observations restent valables pour chacun des sites étudiés lors de la tempête hypothétique (2070 ou 2076), mais à une échelle supérieure. En effet, pour Maria et Sainte-Luce notamment la submersion marine est bien plus importante. Pour la municipalité de Maria, pratiquement l'ensemble de la bande terrestre contenue dans la grille du modèle se retrouve submergée. Cela représente une centaine d'infrastructures, résidences privées et commerciales. Dans le cas où une telle submersion adviendrait, la sécurité de la population résidente dans l'ensemble de la zone étudiée serait compromise. À Sainte-Luce, l'ensemble de la bande littorale entre la mer et la Route du Fleuve est exposée au risque de submersion avec une quantité d'eau importante (plus de 1 m d'eau au niveau des façades nord des bâtiments faisant face à la mer). La Route du Fleuve deviendrait probablement impraticable, l'eau atteignant 0,80 m à plusieurs endroits. Les courants

et les vagues modélisés au niveau de la bande littorale exposée atteignent des valeurs dangereuses (plus de 1,5 m/s pour les courants et 1 m de vague).

5. Références

Bandet, M., Caulet, C., Baudry, J., Didier, D., Dubuc, D., Marion, N., McKinnon, R., Paul-Hus, C., Caveen, J., Sévigny, C., Senneville, S., Dumont, D. et Bernatchez, P. (2020). *Programme de mesure et de modélisation de la morphodynamique de l'érosion et de la submersion côtière dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (MoDESCo), Phase III : rapport final*. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, novembre 2020, 259 p.

Barnett, R. L., Bernatchez, P., Garneau, M. and Cahill, N. (2015). *500 years of sea level variability and acceleration at les Îles-de-la-Madeleine*. XIX INQUA 2015, 26 Jul-2 Aug., Nagoya, Japan.

IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

McCall, R. T., Masselink, G., Poate, T. G., Roelvink, J. A., Almeida, L. P., Davidson, M., & Russell, P. E. (2014). Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G. *Coastal Engineering*, 91, 231-250.

Oppenheimer, M., et al. (2019). 'Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities' in: Pörtner, H.-O. et al. (eds), IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Van Ormondt, M., Nederhoff, K., & van Dongeren, A. (2020). Delft Dashboard: a quick set-up tool for hydrodynamic models. *Journal of Hydroinformatics*, 22(3), 510-527.

Peltier, W., Argus, D. and Drummond, R. (2015): Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model. *J. Geophys. Res-Earth*, 120(1), 450–487.

Quintin, C., Bernatchez, P., Jolivet, Y. (2013). *Impacts de la tempête du 6 décembre 2010 sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de la baie des Chaleurs*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et Chaire de recherche en géoscience côtière, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, Février 2013, Volume I : 48p. + Volume II : 170 p.

Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A. P., De Vries, J. V. T., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal engineering*, 56(11-12), 1133-1152.

Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K., & Dastgheib, A. (2018). Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band runup. *Coastal Engineering*, 134, 103-123.

Savoie-Ferron, F., Drouet, M., Drejza, S., Fraser, C., Marie, G. et P. Bernatchez (2021). *Modélisation de l'effet de la hausse du niveau de la mer sur les marais maritimes*, Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, juillet 2021, 105 p.

Schwalm, C. R., Glendon, S., & Duffy, P. B. (2020). *RCP8. 5 tracks cumulative CO2 emissions*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(33), 19656-19657.

Senneville, S., St-Onge Drouin, S., Dumont, D., Bihan-Poudec, A.-C., Belemaalem, Z., Corriveau, M., Bernatchez, P., Bélanger, S., Tolszczuk-Leclerc, S. et Villeneuve, R. (2014). *Rapport final : Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques*, ISMER-UQAR, Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec : Rimouski, Canada.

Simmons, J. A., Harley, M. D., Marshall, L. A., Turner, I. L., Splinter, K. D., & Cox, R. J. (2017). Calibrating and assessing uncertainty in coastal numerical models. *Coastal Engineering*, 125, 28-41.

Slangen, A. B. A., Katsman, C. A., van de Wal, R. S. W., Vermeersen, L. L. A., et Riva, R.E.M. (2012). Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios. *Clim. Dyn.*, 38, 1191-1209.

Vousdoukas, M. I., Ferreira, Ó., Almeida, L. P., & Pacheco, A. (2012). Toward reliable storm-hazard forecasts: XBeach calibration and its potential application in an operational early-warning system. *Ocean Dynamics*, 62(7), 1001-1015.

6. Annexes

6.1 Annexe 1 : Conditions météo-marines utilisées pour le forçage du modèle XBeach

Dans cette annexe les données utilisées en entrée du modèle numérique XBeach sont présentées. Les données de vague et du niveau prédit sont issues du modèle WaveWatch III©. Le niveau d'eau mesuré est celui issu de la station marégraphique la plus proche (Service Hydrographique du Canada), lorsque des données sont disponibles pour la période. Le cas échéant, le niveau d'eau mesuré est celui prédit et l'onde de tempête n'est donc pas pris en compte (site de Pointe-Label et de Longue-Pointe-de-Mingan). À noter qu'une sous-estimation du niveau d'eau prédit (WaveWatch III©) pour le site de Maria est envisageable. Dans ce cas, la surcote très importante (1,5 m au maximum) serait surestimée, mais le niveau d'eau mesuré n'est pas affecté.

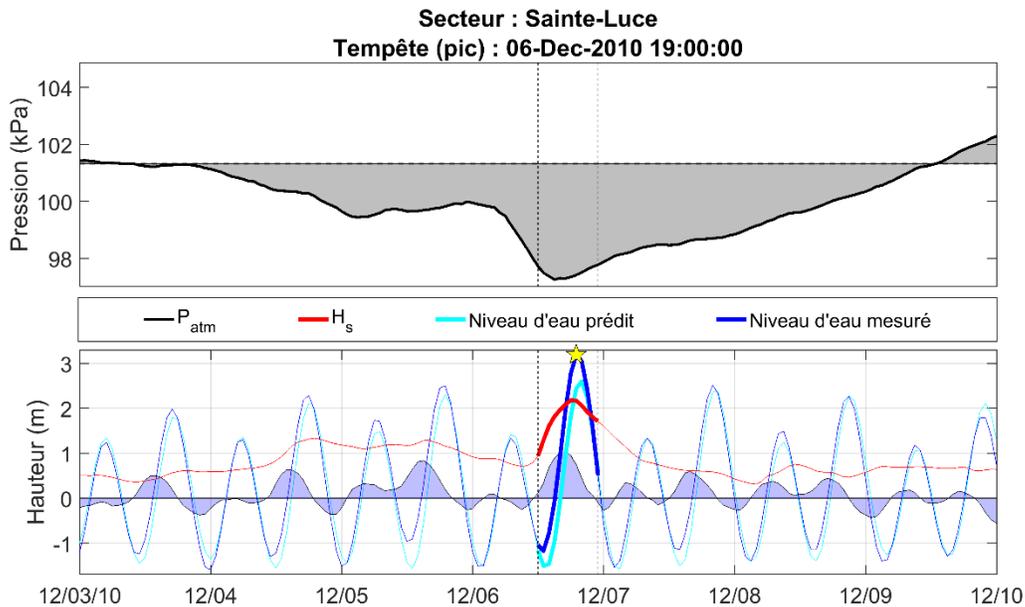


Figure 34 : Conditions météo-marines observées à Sainte-Luce lors de la tempête du 6 décembre 2010. P_{atm} : Pression atmosphérique ; H_s : Hauteur significative des vagues. Les barres horizontales pointillées mettent en évidence la période reproduite dans les simulations numériques avec XBeach. L'étoile jaune représente le niveau de marée atteint lors de l'évènement (comprenant l'onde de tempête ici).

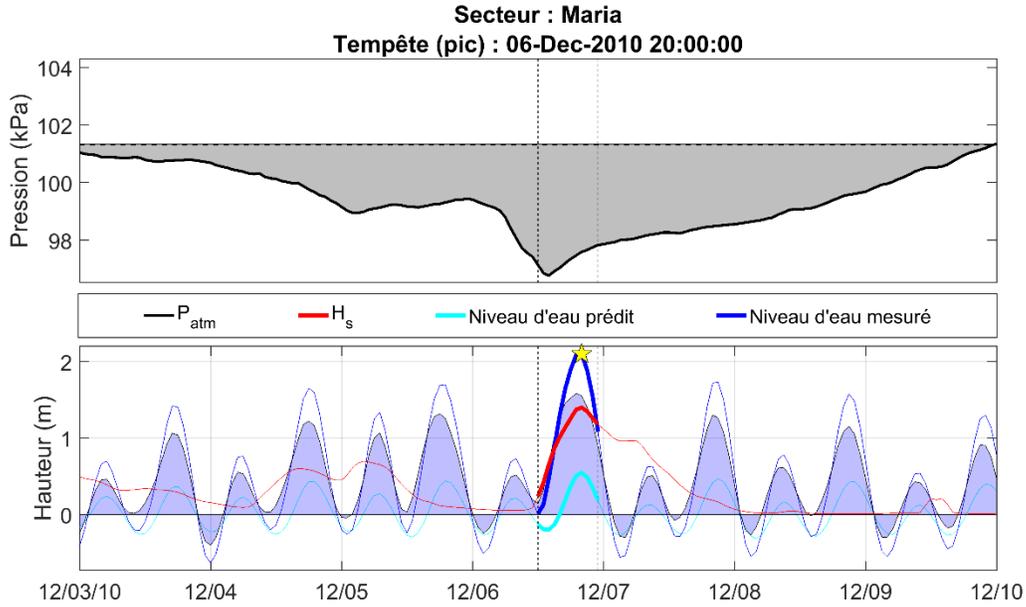


Figure 35: Conditions météo-marines observées à Maria lors de la tempête du 6 décembre 2010. P_{atm} : Pression atmosphérique ; H_s : Hauteur significative des vagues. Les barres horizontales pointillées mettent en évidence la période reproduite dans les simulations numériques avec XBeach. L'étoile jaune représente le niveau de marée atteint lors de l'évènement (comprenant l'onde de tempête ici). Il faut noter ici que le niveau prédit est issu du modèle Wavewatch III.

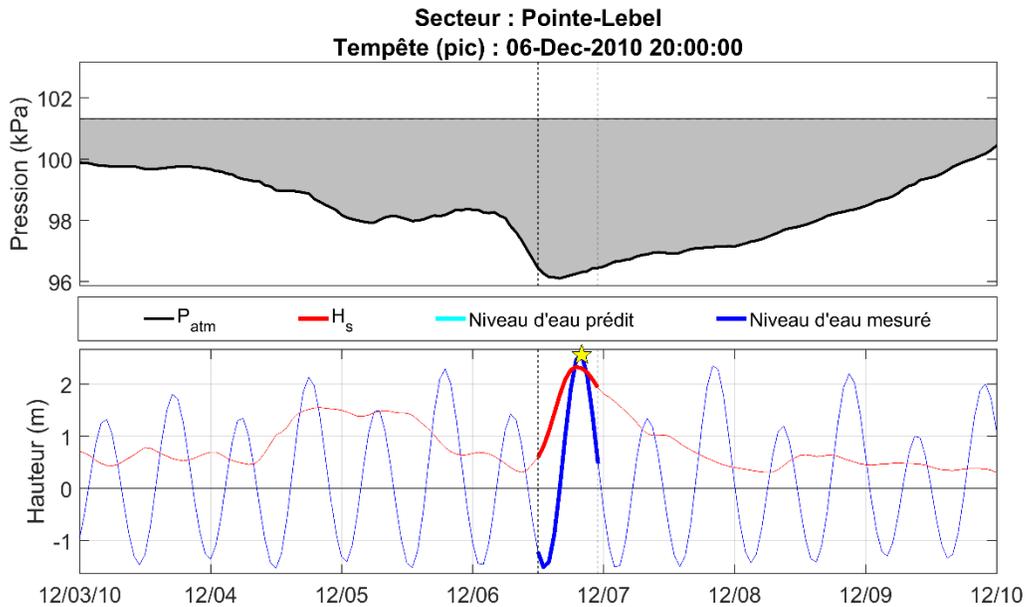


Figure 36: Conditions météo-marines observées à Pointe-Lebel lors de la tempête du 6 décembre 2010. P_{atm} : Pression atmosphérique ; H_s : Hauteur significative des vagues. Les barres horizontales pointillées mettent en évidence la période reproduite dans les simulations numériques avec XBeach. L'étoile jaune représente le niveau de marée atteint lors de l'évènement (comprenant l'onde de tempête ici).

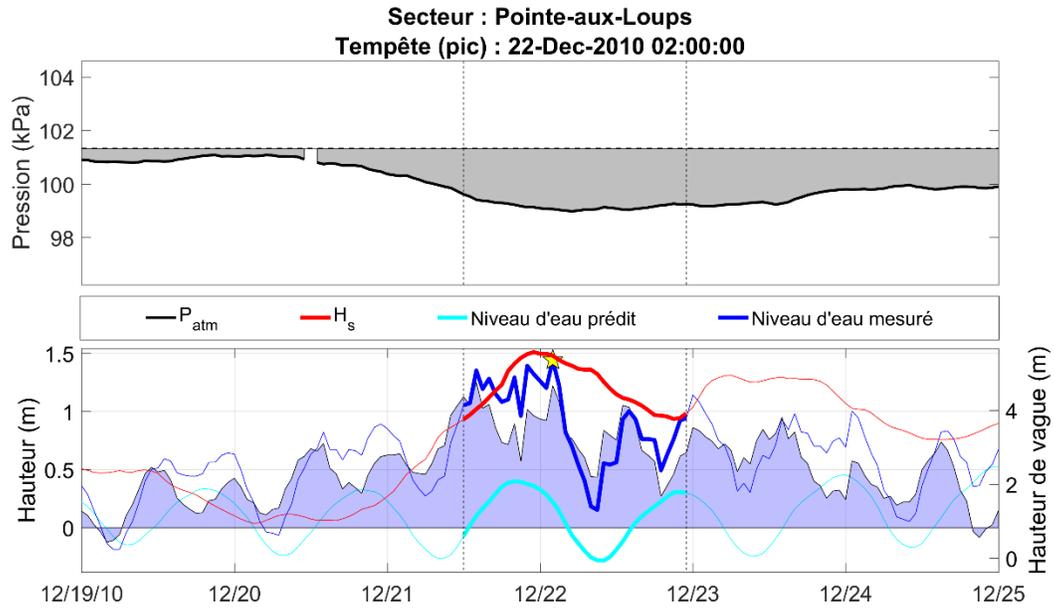


Figure 37: Conditions météo-marines observées à Pointe-aux-Loups lors de la tempête du 6 décembre 2010. P_{atm} : Pression atmosphérique ; H_s : Hauteur significative des vagues. Les barres horizontales pointillées mettent en évidence la période reproduite dans les simulations numériques avec XBeach. L'étoile jaune représente le niveau de marée atteint lors de l'évènement (comprenant l'onde de tempête ici).

6.2 Annexe 2 : Génération des grilles de calcul

Exemple de génération d'une grille de calcul à Sainte-Luce avec le module Delft DashBoard (van Ormondt *et al.*, 2020).

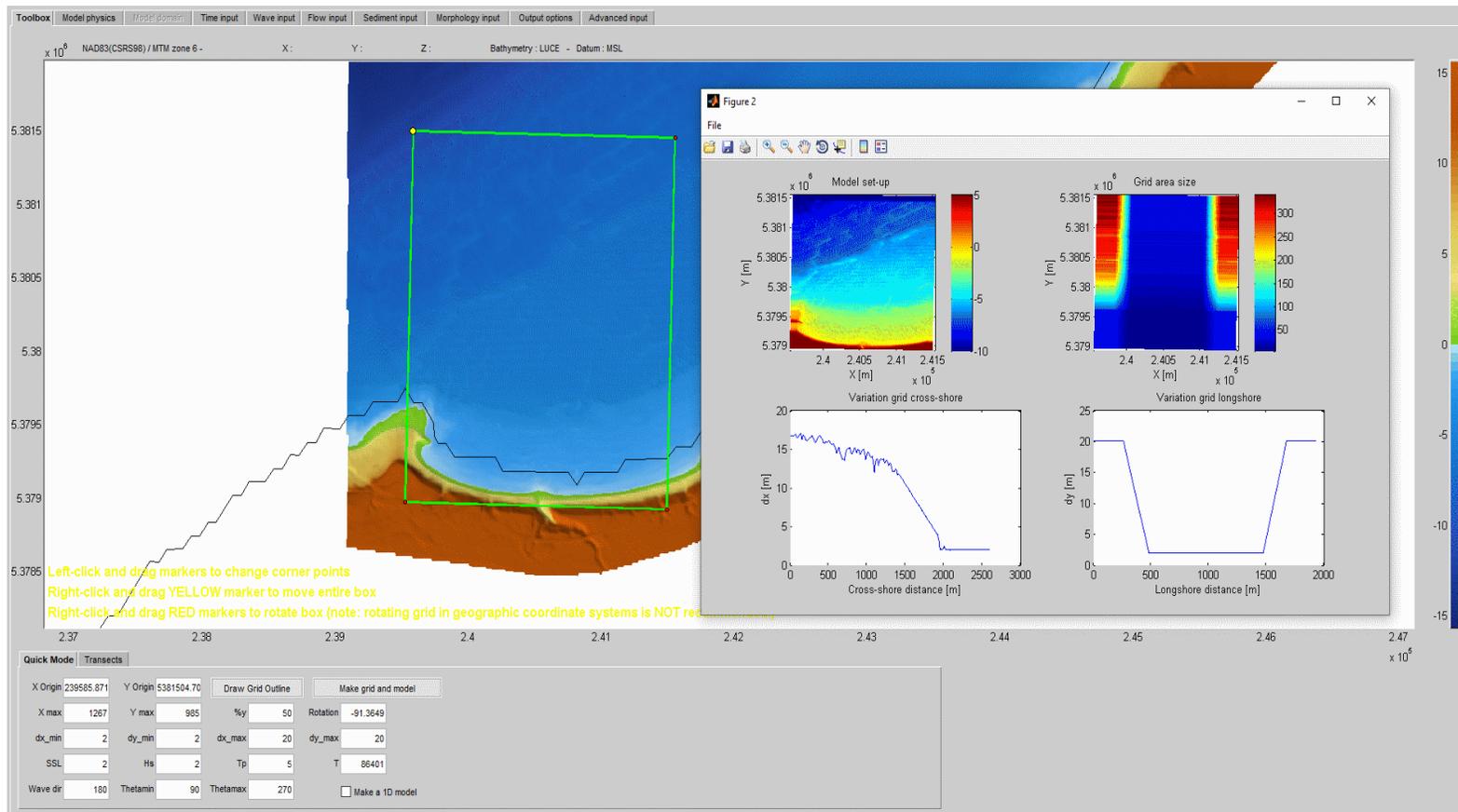


Figure 38: Interface du module « Delft DashBoard » pour l'implémentation des modèles numériques XBeach sur les sites d'études (ici Sainte-Luce). Grâce à cette interface, les grilles de calculs 2D peuvent être générées à partir des surfaces topo-bathymétriques préalablement créées. De nombreux paramètres peuvent être modifiés lors de la génération des grilles de calculs.

6.3 Annexe 3 : Calcul de la hausse du niveau marin relatif

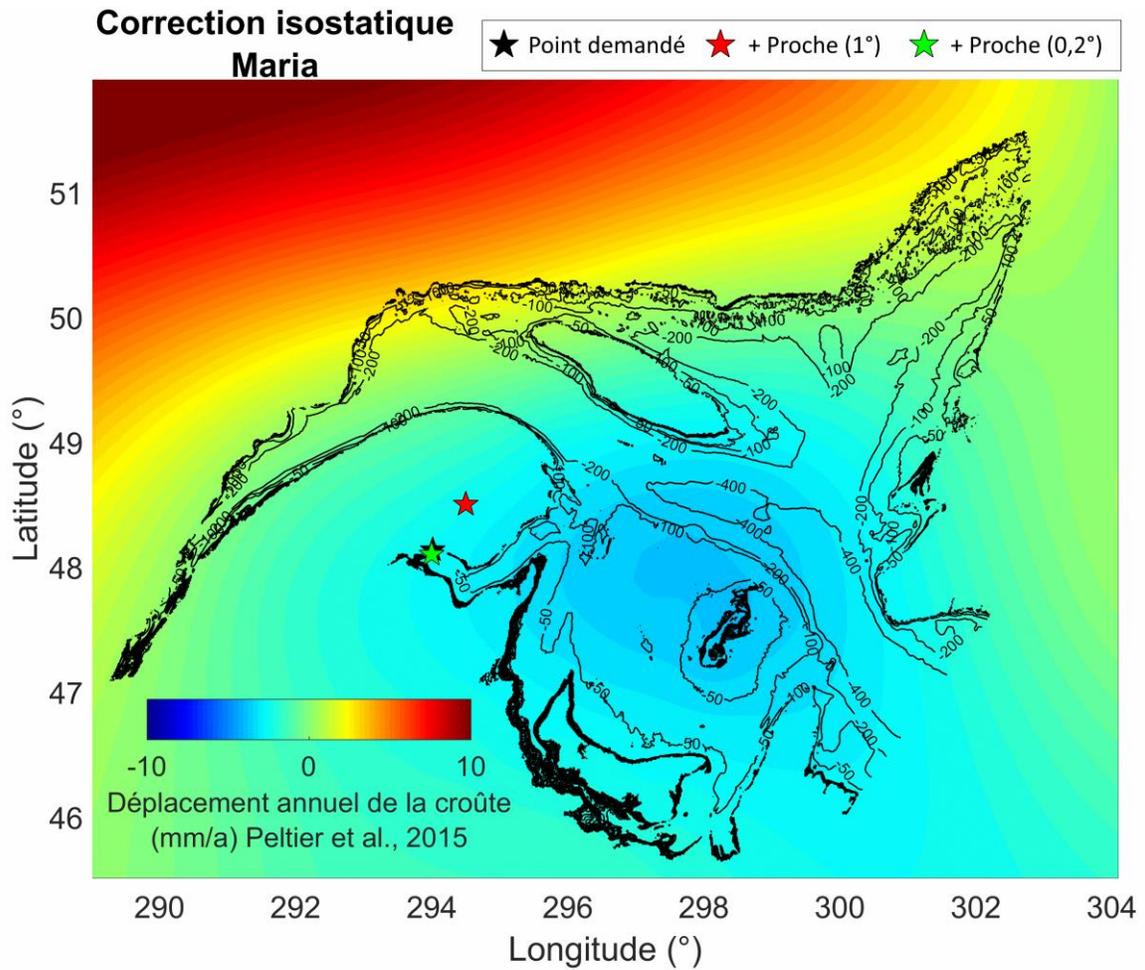


Figure 39: Illustration de la correction appliquée aux données de Oppenheimer et al., 2019 pour le site de Maria (étoile noire). Les données de Oppenheimer et al., 2019 brutes sont extraites au point à 1° de résolution (étoile rouge). La correction isostatique appliquée (Peltier et al., 2015, haute résolution (0,2°)) est extraite au point illustré par l'étoile verte.