



Matane-sur-Mer - Submersion

Modélisation de la submersion côtière

Préparé par :

Lasalle | NHC Inc.

9620 rue Saint-Patrick

LaSalle, QC H8R 1R8

Tel: 514.366.2970

www.lasallenhc.com

Préparé pour :

Ville de Matane

230, avenue Saint-Jérôme

Matane, QC G4W 3A2

Au nom de :

Jérôme Caron

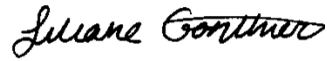
SUIVI DU DOCUMENT

Date	Révision No.	Révisé par	Émis pour
2025-09-08	00	Tristan Aubel, Liliane Gonthier	Préliminaire
2025-10-29	01	Tristan Aubel, Liliane Gonthier	Final

Rapport préparé par :



Sami Gysin
Ingénieur de projet
OIQ : 6029728



Liliane Gonthier
Ingénieure de projet
OIQ : 6043586

Rapport révisé par :



Tristan Aubel
Ingénieur chargé de projet - Associé
OIQ : 129611

CLAUSE DE LIMITATION DE RESPONSABILITÉ

Ce document a été préparé par Lasalle NHC de façon conforme aux bonnes pratiques d'ingénierie et est destiné à l'usage exclusif de Ville de Matane et de leurs représentants autorisés dans le cadre spécifique du projet Matane-sur-Mer - Submersion.

Le contenu de ce document ne peut être appliqué ou utilisé, en tout ou en partie, par ou à l'avantage d'autres parties sans l'autorisation écrite de Lasalle|NHC. Aucune autre garantie, expresse ou tacite, n'est accordée.

Lasalle|NHC et ses directeurs, associés, employés et mandataires n'assument aucune responsabilité à l'utilisation ou au recours du présent document ou de son contenu par des parties autres que Ville de Matane .

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX, FIGURES, ET PHOTOS	VII
1 INTRODUCTION	1
2 MÉTHODOLOGIE	2
2.1 Submersion côtière – Principes de base	2
2.2 Données utilisées	3
2.3 Données bathymétriques et topographiques (voir section 2.6.2)	3
2.4 Outils de modélisation	3
2.4.1 Mike par DHI	3
2.4.2 XBeach-G par Deltares	4
2.4.3 XBeach (2D) par Deltares	4
2.5 Résumé de la méthodologie employée	5
2.6 Montage du MNT	7
2.6.1 Référencement altimétrique et géodésique	7
2.6.2 Provenance des données	7
2.6.3 Étendue du MNT	7
2.6.4 Maillage du MNT	8
2.7 Conditions limites des modèles	10
3 CONDITIONS MARITIMES	11
3.1 Niveaux d'eau	11
3.1.1 Provenance des données	11
3.1.2 Composantes de niveau d'eau	11
3.1.3 Niveau d'eau total	14
3.1.4 Niveau d'eau en climat futur	16
3.2 Vagues	18
3.2.1 Données disponibles	18
3.2.2 Transformation locale des vagues	19
3.2.3 Validation des vagues	19
3.2.4 Statistiques des vagues	26
3.2.5 Périodes de retour combinées niveau d'eau-vagues	28
3.3 Tempêtes étudiées	30
3.3.1 Validation des événements de tempêtes étudiés	30
3.4 Changements climatiques	36
4 ÉTENDUE DE LA SUBMERSION CÔTIÈRE	38
4.1 Conditions actuelles	38
4.1.1 Observations	38
4.1.2 Résultats de calage	39
4.2 Conditions futures	44
5 RISQUES LIÉS À LA SUBMERSION CÔTIÈRE	46

6	CONCLUSION	52
7	RÉFÉRENCES	54

LISTE DES TABLEAUX, FIGURES, ET PHOTOS

TABLEAUX

Tableau 3.1 : Niveaux caractéristiques de la marée à Matane (MPO, 2021)	12
Tableau 3.2 : Niveaux d'eau extrêmes pour Matane, Climat actuel 2024	15
Tableau 3.3: Niveaux d'eau extrêmes en climat futur (horizon 2100)	17
Tableau 3.4: Niveau d'eau aux heures de tempêtes étudiées et scénarios du rehaussement de la mer étudiés	37
Tableau 5.1: Débit moyen maximal de franchissement en climat actuel	48
Tableau 5.2: Débit moyen maximal de franchissement en climat futur (2055) avec un rehaussement du niveau de la mer de + 0,22 m (ENMM SSP5 8,5)	49
Tableau 5.3: Débit moyen maximal de franchissement en climat futur (2100) avec un rehaussement du niveau de la mer de + 0,61 m (ENMM SSP5 8,5)	50

FIGURES

Figure 2.1 : Limites des modèles de vagues et de franchissement	8
Figure 2.2 : Maillage du modèle local MIKE SW	9
Figure 2.3 : Maillage du modèle XBeach	9
Figure 2.4 : Vue d'ensemble du site à l'étude et des transects pour lesquels le franchissement des vagues a été modélisé	10
Figure 3.1 : Amplitude de la marée à Matane	12
Figure 3.2 : Surcotes modélisées par le modèle du golfe de Lasalle NHC lors de la tempête de janvier 2018 (5 janvier 2018 – 9 :00),	13
Figure 3.3 : Validation des niveaux d'eau	14
Figure 3.4 : Occurrences des niveaux d'eau historiques à Matane	15
Figure 3.5 : Rehaussement du niveau de la mer au quai des pêcheurs, Matane (MPO)	17
Figure 3.6 : Modèle du golfe de Lasalle NHC – Génération de vagues	19
Figure 3.7 : Validation et correction du modèle des vagues – Hauteurs des vagues	21
Figure 3.8 : Validation et correction du modèle des vagues – Périodes des vagues	22
Figure 3.9 : Validation du modèle des vagues – Directions des vagues	23
Figure 3.10 : Validation finale de la hauteur des vagues modélisées et corrigées à Saint-Ulric	24
Figure 3.11 : Validation finale de la période des vagues modélisées et corrigées à Saint-Ulric	25
Figure 3.12 : Climat des vagues à Matane	27
Figure 3.13 : Contraintes respectées dans le calcul de probabilités stochastiques	28
Figure 3.14 : Périodes de retour combinées (vagues et niveaux d'eau)	29
Figure 3.15 : Validation des événements de tempêtes étudiés et ajustements des vagues au large du modèle d'ensemble	31

Figure 3.16 : Hauteur et direction des vagues à la pointe de la tempête du 6 décembre 2010 à 19h	32
Figure 3.17 : Hauteur et direction des vagues d'une des pointes de la tempête du 30 décembre 2016 à 19h	33
Figure 3.18 : Hauteur et direction des vagues d'une des pointes de la tempête du 30 décembre 2016 à 21h	34
Figure 3.19 : Hauteur et direction des vagues à la pointe de la tempête du 5 janvier 2018 à 9h	35
Figure 4.1 : Données de calage – exemple des observations recueillies pour caler la simulation du franchissement à l'aide d'un modèle XBeach-G (profil 2284)	40
Figure 4.2 : Exemples de dommages et de débris répertoriés après les tempêtes - utilisés pour caler les modèles 1D XBeach-G	40
Figure 4.3 : Résultats de modélisation XBeach (2D) de la tempête du 6 décembre 2010 à 19h – Incompatibilité de la méthode de modélisation	41
Figure 4.4 : Exemple de résultats de calage d'un modèle 1D XBeach-G – Profil au chaînage 2+284m	43
Figure 4.5 : Cartographie des épaisseurs d'eau tirée des résultats de la submersion de l'évènement de tempête du 6 décembre 2010	44
Figure 4.6 : Étendue de la submersion – Comparaison climat actuel vs climat futur 2100	45
Figure 5.1 : Schéma représentant le franchissement des vagues à la crête d'un des profils (transects) modélisés	47
Figure 5.2 : Débit moyen maximal de franchissement en climat actuel	48
Figure 5.3 : Débit moyen maximal de franchissement en climat futur (2055) avec un rehaussement du niveau de la mer de + 0,22 m (ENMM SSP5 8,5)	49
Figure 5.4 : Débit moyen maximal de franchissement en climat futur (2100) avec un rehaussement du niveau de la mer de + 0,61 m (ENMM SSP5 8,5)	50
Figure 5.5 : Valeurs critiques des débits de franchissement (USACE, 2011)	51

PHOTOS

Photos 2.1: Exemples de submersion côtière par jet de rive; Vidéo prise le 30 décembre 2016 le long de la rue Matane-sur-Mer (source : oldtruck, 1 ^{er} janvier 2017)	2
Photo 2.2 : Exemple de submersion côtière de plus grand débit; Photo prise à Percé (MPO, 2024)	2
Photos 4.1 : Dommages répertoriés, glaces de mer épaisses et blocs de l'enrochement projetés sur une maison et jusqu'à la rue Matane-sur-Mer lors de la tempête du 5 janvier 2018 (Radio-Canada, 2018)	39

1 INTRODUCTION

Depuis 2010, les résidents côtiers de Matane-sur-Mer ont connu plusieurs tempêtes majeures qui ont causé de nombreux dommages et même forcé la démolition de quinze résidences. Avec le rehaussement de la mer, l'étendue des impacts de la submersion côtière ne fera qu'augmenter.

Dans le cadre de la démarche d'appréciation des risques côtiers du secteur de Matane-sur-Mer, la Ville de Matane a mandaté Lasalle|NHC (LNI) pour la modélisation de la submersion côtière du secteur. Le mandat fait partie du projet d'atténuation des risques d'érosion et de submersion côtière financé par le ministère de la Sécurité publique (MSP).

Les objectifs de l'étude incluent la caractérisation des processus menant à la submersion côtière dans le secteur, la définition de l'étendue des zones impactées par celle-ci, et ce, en climat actuel ainsi qu'en climat futur (2100) avec le rehaussement du niveau marin. Trois tempêtes ont été identifiées pour procéder à l'analyse de submersion, la tempête du 6 décembre 2010, celle du 30 décembre 2016 et celle du 5 janvier 2018.

Le présent rapport rend compte de l'étude de la modélisation de la submersion côtière à Matane-sur-Mer en 7 chapitres. Le chapitre 2.1 explique les principes de base de la submersion côtière. Le chapitre 2 enchaîne avec une présentation de la méthodologie utilisée dans le cadre de cette étude. Le chapitre 3 détaille les conditions maritimes du secteur de Matane-sur-Mer. Le chapitre 4 traite de l'étendue de la submersion côtière en conditions actuelles ainsi qu'en conditions futures. Le chapitre 5 aborde les risques liés à la submersion côtière dans le secteur à l'étude. Finalement, les conclusions de l'étude sont exposées au chapitre 6.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 Submersion côtière – Principes de base

La submersion côtière est un phénomène physique qui survient lorsque la combinaison du niveau de la marée, de la surcote induite par l'onde de tempête, et de la remontée (*run-up*) des vagues franchit la crête de la première ligne de défense de la côte (Didier, 2014).

La submersion peut se produire de deux manières : le franchissement dû à la remontée des vagues sous forme de jet de rive (voir photos 2.1) et la submersion de plus grand débit, une inondation directe, résultant d'un niveau d'eau élevé par rapport à la crête de la côte et du franchissement des vagues (voir photo 2.2). La submersion côtière augmente avec la remontée du niveau moyen des mers.



Photos 2.1: Exemples de submersion côtière par jet de rive; Vidéo prise le 30 décembre 2016 le long de la rue Matane-sur-Mer (source : oldtruck, 1^{er} janvier 2017)



Photo 2.2 : Exemple de submersion côtière de plus grand débit; Photo prise à Percé (MPO, 2024)

2.2 Données utilisées

La présente étude a été réalisée en utilisant une variété de données (observées, mesurées et modélisées) provenant de diverses sources. Sans s'y limiter, les données utilisées peuvent se résumer comme suit :

- Niveaux mesurés aux marégraphes de Rimouski (02985) et de Sainte-Anne-des-Monts (02935) pour la période de 1980 à 2022 opérés par le MPO;
- Marée astronomique à la station de Matane (02955) pour la période de 1980 à 2022 fournie par le MPO;
- Bouée AWAC déployée par l'ISMER située à Saint-Ulric;
- Niveaux simulés à Rimouski, Sainte-Anne-des-Monts et Matane par le modèle du golfe de Lasalle|NHC de 1980 à août 2024;
- Limites de submersion côtière relevées lors des tempêtes étudiées (UQAR et MSP);
- Observations photographiques et vidéo montrant la submersion et/ou l'étendue de la submersion après les tempêtes étudiées dans le secteur de Matane-sur-Mer (différentes sources en ligne, MSP, UQAR).

2.3 Données bathymétriques et topographiques (voir section 2.6.2)

2.4 Outils de modélisation

Divers outils de modélisation ont été utilisés dans le cadre de la présente étude. Mis à part les logiciels de prétraitement et de post-traitement des données, les outils de modélisation utilisés peuvent se diviser en trois catégories principales, soit un modèle 2D couvrant le large (MIKE 21), les modèles 1D d'attaque frontale des vagues sur la plage (XBeach-G) et un modèle 2D de submersion côtière (XBeach).

2.4.1 Mike par DHI

Les travaux de modélisation 2D ont été réalisés à l'aide des divers modules de MIKE 21, conçus et commercialisés par la firme danoise DHI Water & Environment. Ces modules permettent une description complète de l'ensemble des processus régissant l'hydrodynamique et le transport sédimentaire en milieu côtier: niveaux d'eau, agitation due aux vagues, courants littoraux, transport sédimentaire en charriage et en suspension, évolution de la morphologie littorale, etc.

Les travaux de modélisation de la présente étude ont été effectués avec le module MIKE 21 suivant :

MIKE 21 SW (Spectral Waves) : modèle bidimensionnel de génération de vagues et de transformation des vagues à l'approche du littoral et génération des contraintes de radiation produisant les courants littoraux;

2.4.2 XBeach-G par Deltares

L'analyse de l'attaque frontale des vagues et de la submersion côtière a été réalisée avec le modèle XBeach-G de Deltares. Ce modèle permet de simuler en 1D avec une formulation non-hydrostatique, l'hydrodynamique de la propagation des vagues du large jusqu'à la berge d'une manière analogue à ce qui serait observé dans un canal à houle. Cela permet ainsi de modéliser l'hydrodynamique des phénomènes de run-up de vagues et de franchissement des vagues. Les résultats de run-up de vagues calculés par le modèle ont d'ailleurs été validés sur la base de mesures réalisées sur des plages de galets en Angleterre et ont servi au développement d'une formule empirique adaptée à ce type de morphologie (G. Poate et al., 2016) (McCall, 2015).

2.4.3 XBeach (2D) par Deltares

Une analyse de submersion côtière a été réalisée avec le modèle XBeach de Deltares. La formulation *surf beat*, propageant des vagues de manière hydrostatique, a été utilisée pour simuler en 2D la submersion côtière. La formulation *surf beat* permet de simuler les courants générés par les vagues et par les vents ainsi que le run-up et le run-down de la composante infragravitaire des trains de vagues caractérisées par de longues périodes (25-250 s). Cette approche est davantage adaptée aux plages dissipatives (pente faible) sur lesquelles les vagues de courtes périodes sont rapidement dissipées et le run-up est conditionné par la composante infragravitaire.

Lorsque le mécanisme dominant de submersion côtière est caractérisé par une inondation due à un niveau d'eau très élevé (qui atteint ou excède la crête de la ligne de côte, cette formulation peut être utilisée pour identifier les patrons d'inondation par la submersion et l'influence de la combinaison niveau d'eau/hauteur de vagues sur le franchissement sur l'ensemble du secteur à l'étude. Toutefois, dans le cadre de cette étude, les observations et les données obtenues indiquent que la submersion est principalement engendrée par le jet de rive, soit typiquement les vagues de courte période (<12 s). Le jet de rive lié au run-up de ces vagues n'est donc pas représenté adéquatement par la formulation *surf beat* puisque chaque vague doit être résolue, la formulation non-hydrostatique doit alors être privilégiée (section 2.4.2).

2.5 Résumé de la méthodologie employée

Les diverses étapes peuvent se résumer comme suit :

Montage du MNT (Modèle numérique de terrain)

- Compilation des données bathymétriques et topographiques pour s'assurer de la cohérence des jeux de données et de leur continuité;
- Montage du MNT pour le modèle XBeach (2D);
- Extraction des profils pour les modèles 1D XBeach-G.

Caractérisation du climat maritime et analyse statistique

- Utilisation des données de niveau d'eau incluant les données de marée astronomique à Matane (MPO), et de surcote calculées à l'aide d'un modèle du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent de LNI;
- Validation des données du modèle de surcote de LNI avec les données relevées aux marégraphes de Rimouski et de Sainte-Anne-des-Monts;
- Identification du scénario climatique utilisé pour la modélisation en climat futur et des valeurs de rehaussement du niveau de la mer étudiées;
- Analyse de l'impact du rehaussement du niveau de la mer sur les probabilités d'occurrence d'évènements de niveaux d'eau élevés et extrêmes;
- Utilisation des données de vagues mesurées par la bouée de Saint-Ulric opérée par l'ISMER (2010 à 2020), et de vagues à l'aide d'un modèle du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent de LNI;
- Validation et correction des données de vagues du modèle de vagues de LNI à l'aide des données de vagues de la bouée de Saint-Ulric;
- Détermination de la dépendance statistique entre les variables de niveau d'eau et de hauteur de vagues;
- Calculs des probabilités d'occurrence des évènements de tempête;
- Identification des tempêtes étudiées;
- Validation et correction du modèle de l'ensemble du secteur de Matane avec les données de la bouée de Saint-Ulric pour les évènements de tempêtes.

Caractérisation des évènements de tempêtes

- Compilation des données photographiques, vidéos et des relevés des limites de la submersion côtière des évènements de tempêtes.

Analyse de la submersion côtière (XBeach 2D, mode *surfbeat*)

- Modélisation 2D XBeach, en mode *surfbeat*, de la submersion côtière en climat actuel et futur;
- Validation avec les données d'observations pour chaque évènement de tempête.

Analyse de l'attaque frontale des vagues (XBeach-G, hydrodynamique)

- Modélisation 1D (XBeach-G) de la submersion côtière en climat actuel;
- Validation avec les données d'observations pour chaque évènement de tempête;
- Modélisation 1D en climat futur.

Traitement des données SIG (Système d'Information Géographique) de submersion côtière

- Élaboration de surfaces de submersion côtière interpolées entre les profils des modèles 1D.

2.6 Montage du MNT

2.6.1 Référencement altimétrique et géodésique

Pour la modélisation du climat de vagues au large, l'ensemble des données bathymétriques a été importé dans le logiciel de prétraitement MIKE Zero (DHI). Le tout a été converti en projection NAD1983 MTM5 et l'origine des élévations (*datum*) utilisée est celle du niveau géodésique CGVD28. À titre d'information, le zéro des cartes à Matane est à l'élévation -1,98 m CGVD28.

2.6.2 Provenance des données

Le montage du modèle numérique de terrain (MNT) a été effectué à l'aide des données bathymétriques et topographiques suivantes :

- La photogrammétrie à très haute résolution (30 cm sur le plan horizontal), relevée en septembre 2022 (Photogram_sept2022_30cm.txt);
- Les données bathymétriques à haute résolution (1m sur le plan horizontal), relevées en mai 2023, (Bathy_Matane_Mai2023_pts1m.txt);
- Le lidar terrestre à très haute résolution (25 cm sur le plan horizontal), relevé en 2019 (LIDAR_2019_Matane_sur_Mer.txt);
- Le lidar terrestre à très haute résolution (22 cm sur le plan horizontal), relevé en 2009 (LIDAR_2009_Matane-sur-Mer.txt);
- Les données NONNA10 et NONNA100 à faible résolution (MPO) pour compléter les zones où aucun relevé local n'a été effectué.

2.6.3 Étendue du MNT

La figure 2.1 illustre l'étendue des différents MNT utilisés pour la modélisation de la transformation des vagues à l'aide des modèles de MIKE21 SW, XBeach (2D) ainsi que XBeach-G. L'étendue du modèle MIKE21 SW couvre 36 km sur 11 km au large, celui de XBeach (2D) couvre 8 km sur 3 km et les modèles 1D XBeach-G sont d'une longueur variant entre 500 et 700 m.

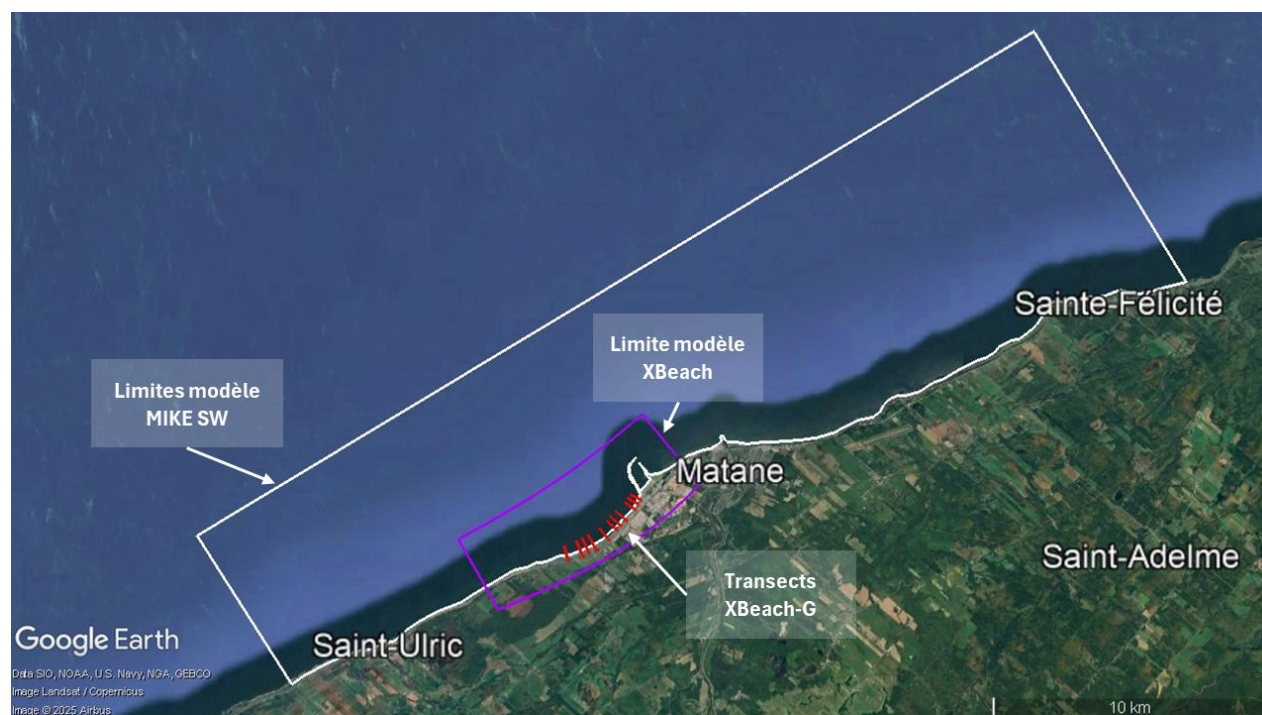


Figure 2.1 : Limites des modèles de vagues et de franchissement

2.6.4 Maillage du MNT

Dans le but de raffiner autant que possible le maillage du MNT tout en obtenant des temps de calcul raisonnables, deux versions distinctes du MNT ont été utilisées.

En premier lieu, un modèle d'ensemble (36 km sur 11 km) couvrant la zone d'étude ainsi que la bouée de Saint-Ulric, utilisée pour la validation des données de vagues, a été utilisé pour modéliser la transformation des vagues sur une période de 11 ans incluant l'ensemble des tempêtes d'intérêt et concomitant avec la période de mesure de l'AWAC (voir la figure 2.2). La largeur des mailles de ce modèle varie de 125 m à proximité de la côte à 500 m plus loin au large dans les zones plus profondes.

Les propriétés des vagues transformées des événements de tempête ont ensuite été extraites aux limites du modèle XBeach (2D) (voir la figure 2.3) et à la limite au large des transects XBeach-G (voir la figure 2.4) dans le but d'alimenter les modèles locaux de transformation de vagues. La largeur des mailles du modèle XBeach (2D) varie de 2 m dans la zone d'intérêt, le long de la rue Matane-sur-Mer, jusqu'à 130 m à proximité des conditions limites du modèle. La discrétisation des transects XBeach-G est de 0,1 m dans la zone de franchissement des vagues et s'étend jusqu'à 3 m à l'extérieur de celle-ci.

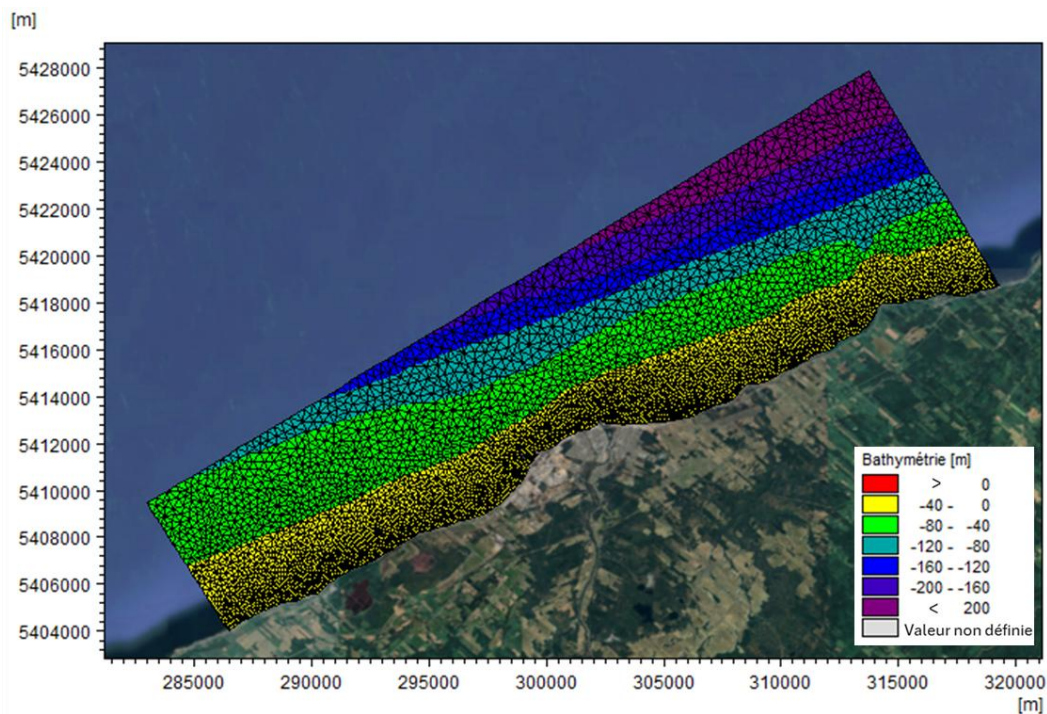


Figure 2.2 : Maillage du modèle local MIKE SW

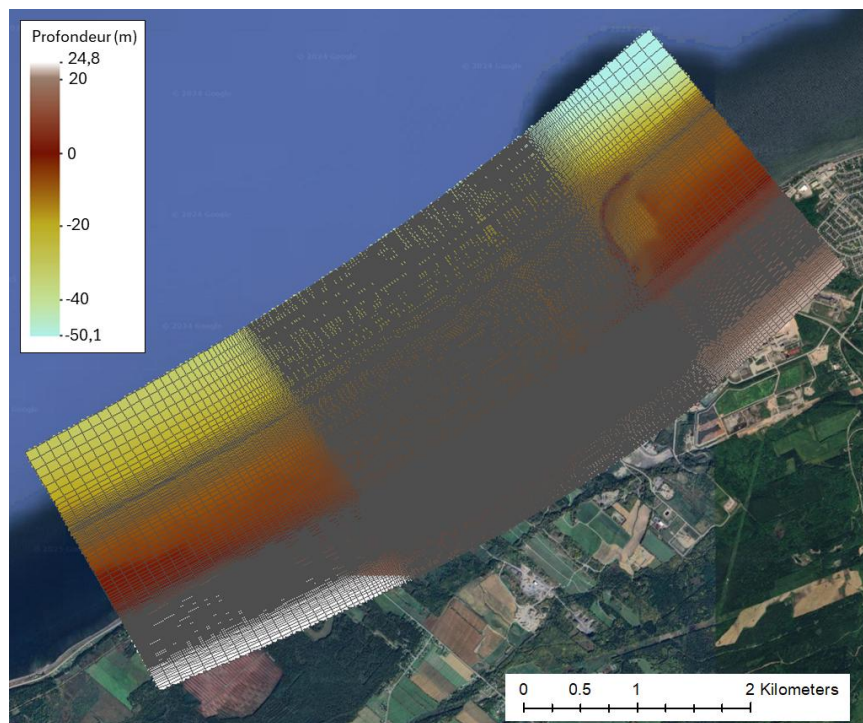


Figure 2.3 : Maillage du modèle XBeach

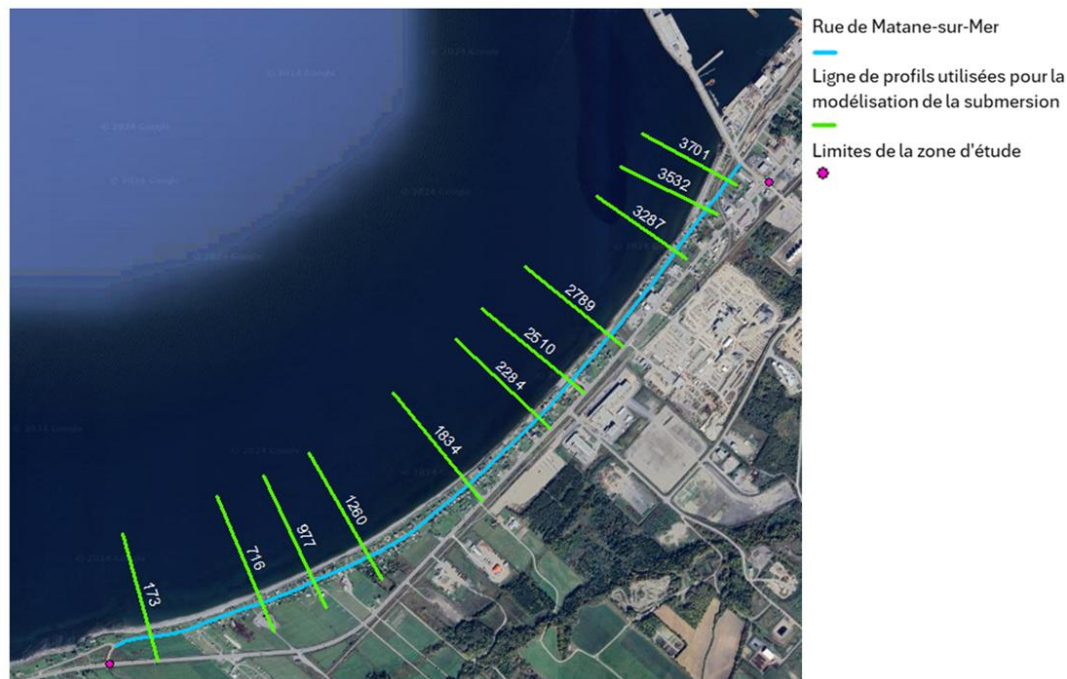


Figure 2.4 : Vue d'ensemble du site à l'étude et des transects pour lesquels le franchissement des vagues a été modélisé

2.7 Conditions limites des modèles

Les données des conditions limites du modèle d'ensemble MIKE21 SW proviennent du modèle du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent de LNI. Comme mentionné précédemment, les données des conditions limites du modèle XBeach (2D) et XBeach-G (1D) ont été extraites du modèle d'ensemble de transformation de vagues.

Le niveau d'eau est quant à lui fixé à une valeur constante dans l'espace (mais pas dans le temps).

3 CONDITIONS MARITIMES

3.1 Niveaux d'eau

3.1.1 Provenance des données

Les données brutes de niveaux d'eau utilisées dans le cadre de la présente étude proviennent de trois sources principales:

- Les niveaux mesurés entre 1984 et 2022 (39 ans) par le marégraphe de Rimouski (#02985) et entre 1980 et 1997 (18 ans) par le marégraphe de Sainte-Anne-des-Monts (#02935) opérés par le MPO;
- La marée astronomique à la station Matane (#02955) fournie par le MPO pour la période de 1980 à 2022;
- Les niveaux simulés à Rimouski, Sainte-Anne-des-Monts et Matane entre 1980 et août 2024 (presque 45 ans) par le modèle du golfe de Lasalle|NHC.

D'une manière générale, les niveaux mesurés sont à privilégier par rapport aux niveaux modélisés puisque l'incertitude est moindre. Toutefois, aucune donnée de niveau d'eau n'a été mesurée à Matane. Les données mesurées d'une station située dans la même région peuvent donc être utilisées pour vérifier et, si nécessaire, corriger les niveaux d'eau simulés.

Les niveaux d'eau du modèle de Lasalle|NHC sont une superposition de la marée astronomique obtenue avec une analyse harmonique du signal fourni par le MPO (#02955) et les surcotes modélisées par le modèle de Lasalle|NHC.

Certains travaux de vérification et de modélisation pour cette étude ont été effectués en 2023 et les données sur les niveaux d'eau étaient donc seulement disponibles jusqu'à la fin de 2022. Pour s'assurer de la représentativité des niveaux d'eau dans le secteur de Matane, une étape de validation a été réalisée en comparant les niveaux d'eau simulés aux niveaux d'eau enregistrés aux stations de Rimouski (période : 1984-2022) et de Sainte-Anne-des-Monts (1980-1997). Dans le cadre de cette étude, débutant à la fin 2024, la méthodologie étant déjà validée, les niveaux d'eau jusqu'en août 2024 ont été ajoutés à la série temporelle afin de mettre à jour certaines simulations.

3.1.2 Composantes de niveau d'eau

3.1.2.1 Marée (forçage astronomique)

La figure 3.1 montre la variation de l'amplitude de la marée à Matane et le tableau 3.1 présente les caractéristiques de la marée à Matane tirées des tables des marées du ministère des Pêches et Océans (MPO, 2021). La différence d'élévation entre le zéro des cartes (marégraphique) et le

niveau moyen des mers (géodésique) à Matane est de 1,98 m (altitude du zéro des cartes : -1,98 m CGVD28).

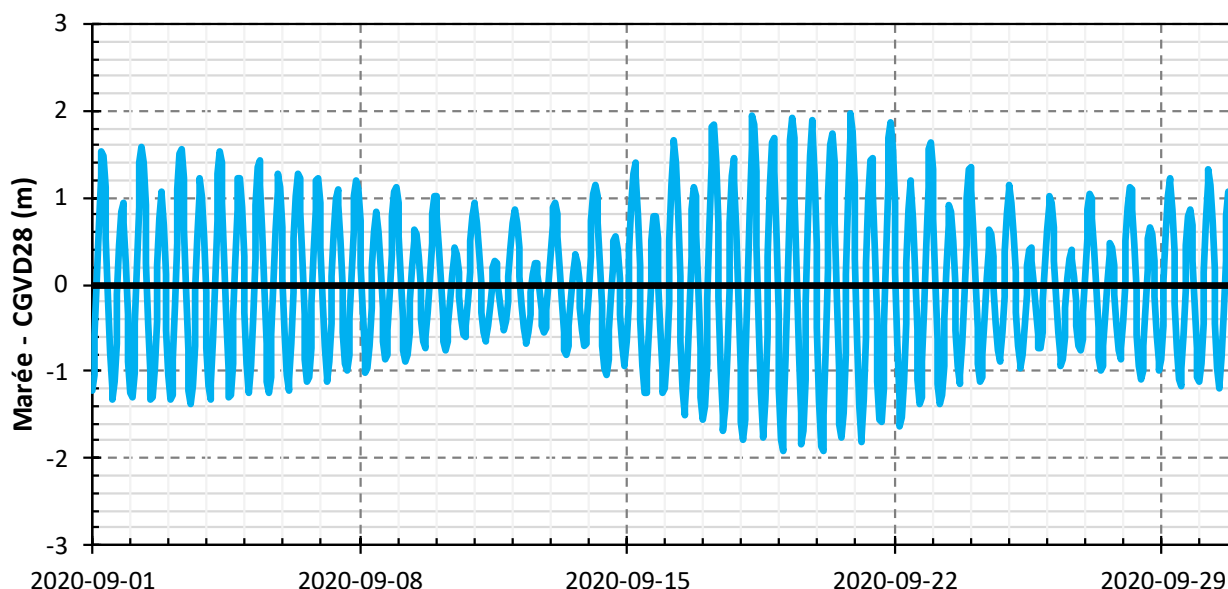


Figure 3.1 : Amplitude de la marée à Matane

Tableau 3.1 : Niveaux caractéristiques de la marée à Matane (MPO, 2021)

CARACTÉRISTIQUES DE LA MARÉE	NIVEAU MARÉGRAPHIQUE, ZC (m)	NIVEAU GÉODÉSIQUE, NMM (m)
Marnage, marée moyenne	2,6	
Marnage, grande marée	4,2	
Pleine mer supérieure, grande marée (PMSGM)	4,2	2,2
Pleine mer supérieure, marée moyenne (PMSMM)	3,4	1,4
Niveau moyen de l'eau (NME)	2,0	0,0
Basse mer inférieure, marée moyenne (BMIMM)	0,7	-1,3
Basse mer inférieure, grande marée (BMIGM)	0,0	-2,0

Note : Niveau d'eau géodésique CGVD28 (m) = Niveau d'eau marégraphique ZC (m) – 1,98 m

3.1.2.2 Surcote (forçage météorologique)

Le modèle de Lasalle|NHC utilise le module MIKE21 HD (Hydrodynamics) de DHI pour simuler les surcotes (ondes de tempête positive) ainsi que les décotes (ondes de tempête négative). Ce modèle couvre non seulement le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent, mais également la baie d'Hudson ainsi qu'une grande portion de l'océan Atlantique. Le modèle est alimenté, sur

l'ensemble de son domaine, par les vents et la pression atmosphérique issus du modèle de réanalyse météorologique CFSR de la NOAA (résolution de 36 km). Le modèle de Lasalle|NHC a été validé sur la base d'une vingtaine de marégraphes mesurant les niveaux d'eau à divers endroits dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent, la baie d'Hudson et l'océan Atlantique. Le modèle de Lasalle|NHC a été mis à profit pour obtenir des données de surcote à Matane entre 1980 et août 2024 (presque 45 ans de données).

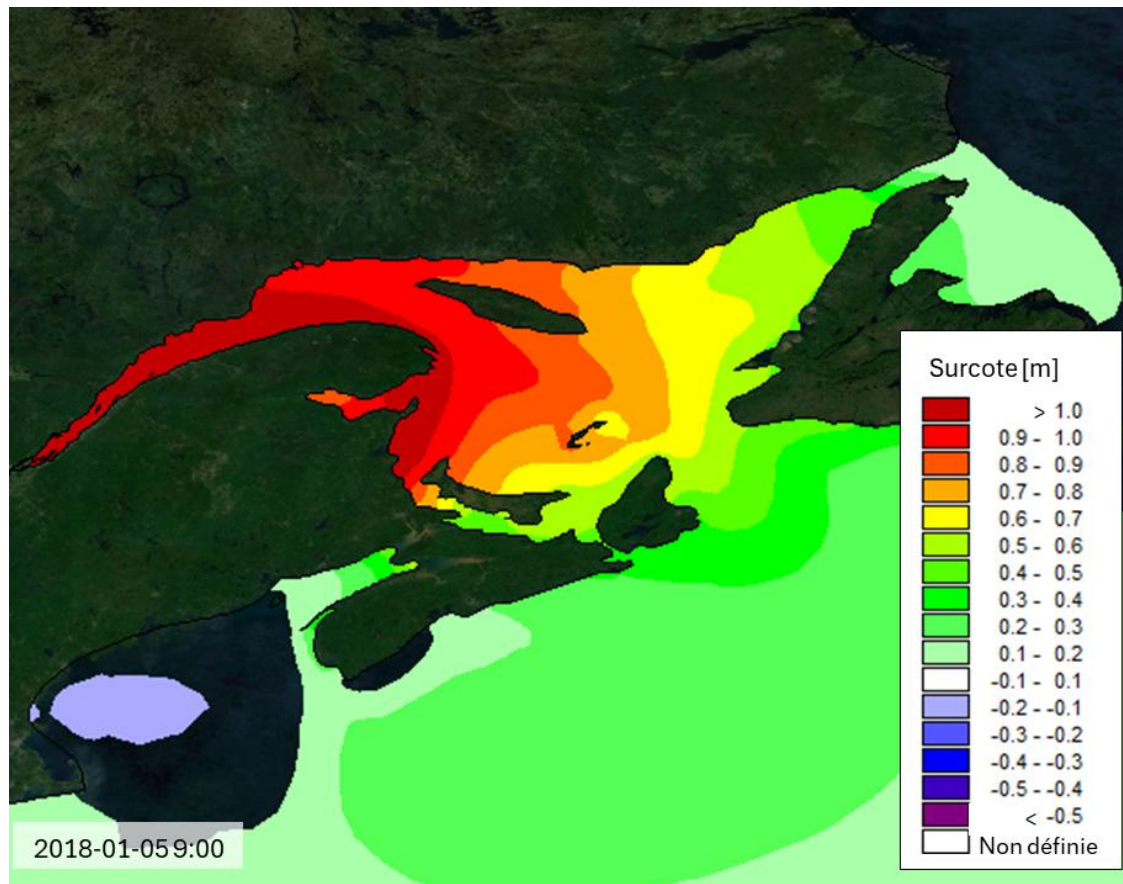


Figure 3.2 : Surcotes modélisées par le modèle du golfe de Lasalle|NHC lors de la tempête de janvier 2018 (5 janvier 2018 – 9 :00),

3.1.3 Niveau d'eau total

Les niveaux d'eau totaux qui ont été utilisés pour le projet de Matane ont été calculés en superposant la marée (forçage astronomique) et les surcotes (forçage atmosphérique) modélisées par le modèle du golfe de Lasalle|NHC et le niveau d'eau moyen.

Afin de valider les niveaux d'eau modélisés, une comparaison a été faite entre les niveaux d'eau modélisés par le modèle de Lasalle|NHC et ceux mesurés par les marégraphes de Rimouski et Sainte-Anne-des-Monts. La figure 3.3 affiche une comparaison des occurrences des niveaux d'eau modélisés et mesurés pendant les années 1984 à 2022 à Rimouski et 1980 à 1997 à Sainte-Anne-des-Monts. On constate que le modèle représente précisément les niveaux d'eau aux deux marégraphes avec une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 0,12 m à Rimouski et 0,11 m à Sainte-Anne-des-Monts, ce qui indique que le modèle est en mesure de reproduire adéquatement les niveaux d'eau dans le secteur d'étude et que les résultats extraits à Matane peuvent être utilisés avec confiance pour y caractériser les niveaux d'eau.

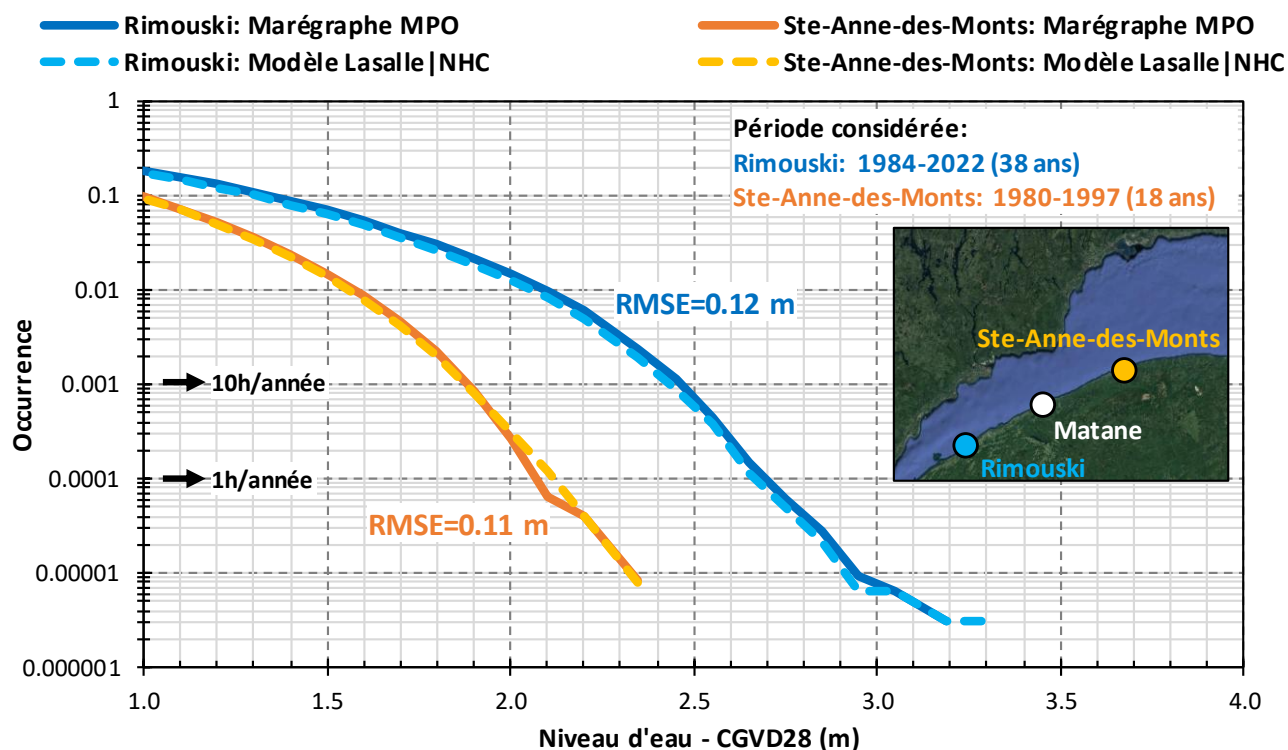


Figure 3.3 : Validation des niveaux d'eau

Le modèle du golfe de Lasalle|NHC a donc été mis à profit pour obtenir les données de niveaux d'eau historiques à Matane pour la période de 1980 à août 2024 (presque 45 années). La figure 3.4 montre les occurrences des niveaux d'eau à Matane. Le niveau d'eau maximal de 2,86 m a été atteint le 6 décembre 2010.

De plus, une analyse des niveaux d'eau extrêmes par l'ajustement de lois de distribution des extrêmes a été réalisée. Celle présentant le meilleur ajustement pour le site de Matane est la loi de distribution statistique de type « Gumbel ». Le tableau 3.2 présente les résultats obtenus.

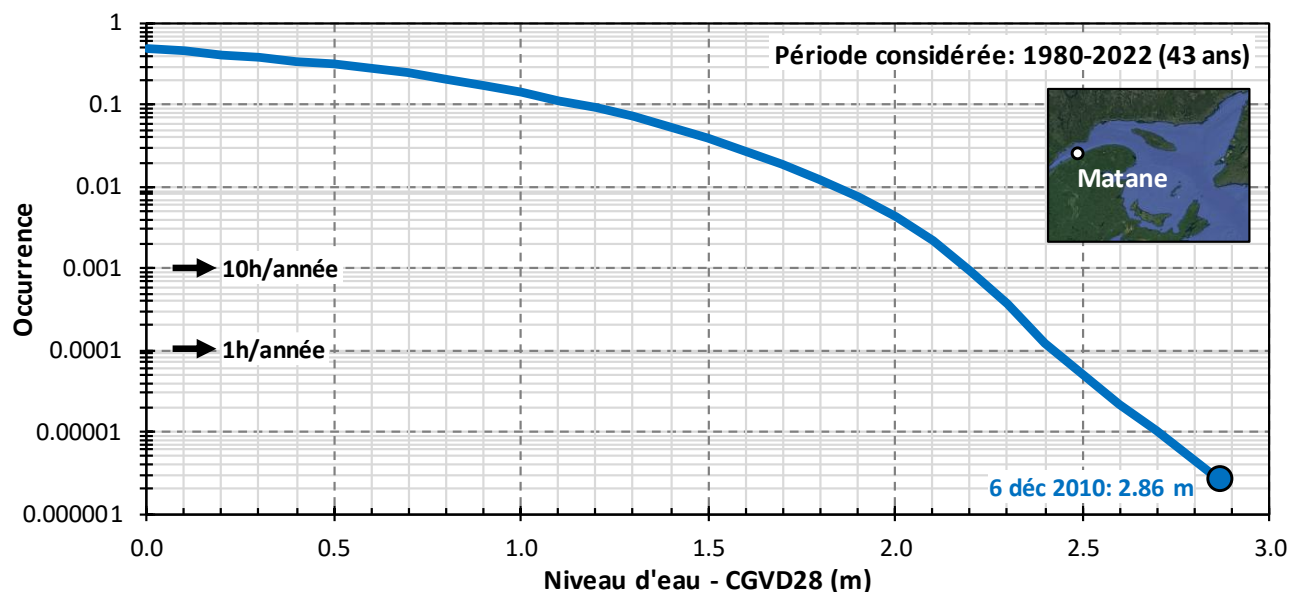


Figure 3.4 : Occurrences des niveaux d'eau historiques à Matane

Tableau 3.2 : Niveaux d'eau extrêmes pour Matane, Climat actuel 2024

T (Années)	Niveaux d'eau extrêmes (m, CGVD28) Climat actuel 2024
2	2.44
5	2.58
10	2.67
15	2.72
20	2.76
25	2.79
50	2.87
100	2.96

3.1.4 Niveau d'eau en climat futur

L'augmentation du niveau de la mer est à considérer dans un contexte de changements climatiques. La figure 3.5 présente le rehaussement relatif projeté à Matane selon différents scénarios climatiques (OCANEE produit par MPO). Dans le cadre de la présente étude, le scénario SSP5 8,5 a été sélectionné. Celui-ci représente le scénario climatique pessimiste révisé, où les émissions de gaz à effet de serre continuent d'augmenter, pour donner un portrait conservateur des limites projetées de submersion côtière.

Le rehaussement relatif du niveau moyen de la mer considéré en climat futur (horizon 2100) est de + 0,61 m par rapport au niveau moyen des mers de 2010 (ENMM SSP5 8,5 Révision 6) à Matane. Cette valeur inclut le rehaussement du niveau moyen des mers et le mouvement vertical de la croûte terrestre (rebond isostatique). Il est à noter que le climat actuel identifié dans cette étude représente le niveau moyen des mers de 2010 pour représenter de manière conservatrice le rehaussement du niveau moyen des mers en conditions futures par rapport aux tempêtes étudiées qui se sont déroulées entre 2010 et 2018. Selon le scénario du ENMM SSP5 8,5, le rehaussement du niveau moyen des mers en 2025 par rapport à 2010 est faible (+0,05 m) par rapport au rehaussement projeté en 2100 et est à l'intérieur des incertitudes des projections. Il faut également noter l'absence d'observations des niveaux d'eau à Matane, ne permettant pas de valider les tendances historiques du rehaussement du niveau moyen dans la zone d'étude entre 2010 et 2025. Il est donc raisonnable et légèrement conservateur, d'utiliser le niveau moyen de 2010 comme référence du climat actuel dans la présente étude.

Le tableau 3.3 présente les niveaux d'eau extrêmes en climat futur.

En parallèle, le MSP, poursuivant des analyses de solutions, a demandé à Lasalle|NHC d'étudier un rehaussement relatif sur les 30 prochaines années (horizon 2055) pour appuyer cette analyse sur un horizon plus rapproché. Il en ressort que le rehaussement relatif du niveau moyen de la mer anticipé à l'horizon 2055 est de + 0,22 m par rapport au niveau moyen des mers de 2010 (ENMM SSP5 8,5 Révision 6) à Matane.

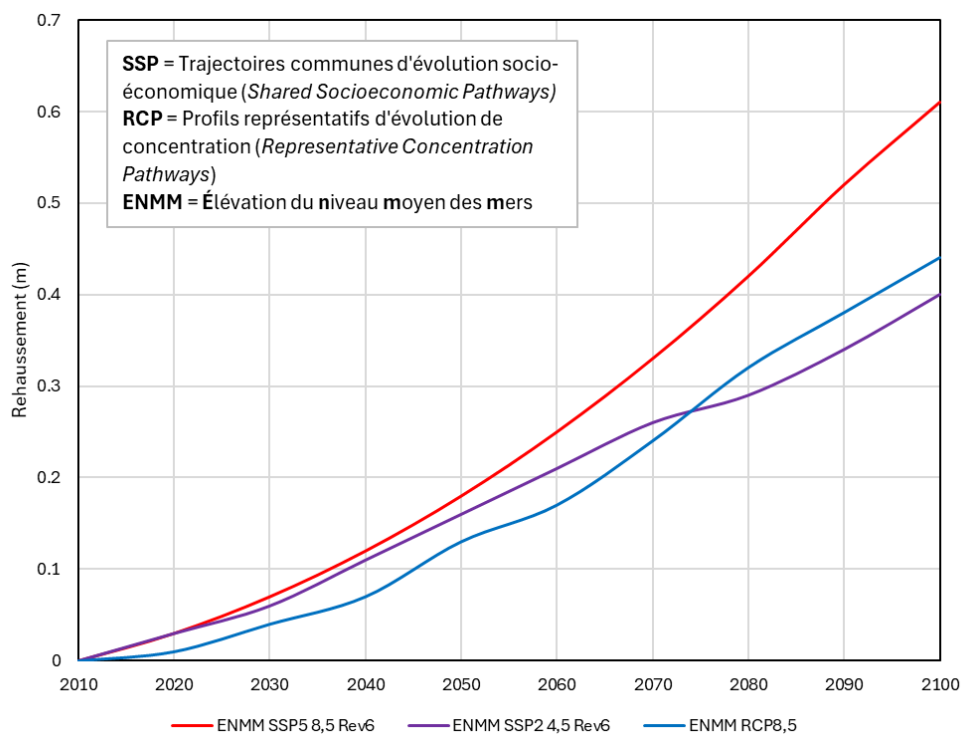


Figure 3.5 : Rehaussement du niveau de la mer au quai des pêcheurs, Matane (MPO)

Tableau 3.3: Niveaux d'eau extrêmes en climat futur (horizon 2100)

T* (années)	Niveau d'eau à Matane (m, CGVD28)		
	Climat actuel [†]	Climat futur 2055 SSP5 8,5	Climat futur 2100 SSP5 8,5
		Scénario ENMM (+0,22m)	Scénario ENMM (+0,61m)
2	2.44	2.66	3.05
5	2.58	2.80	3.19
10	2.67	2.89	3.28
15	2.72	2.94	3.33
20	2.76	2.98	3.37
25	2.79	3.01	3.40
50	2.87	3.09	3.48
100	2.96	3.18	3.57

* La période de retour est calculée avec la loi Gumbel

† Voir section 3.1.4

3.2 Vagues

3.2.1 Données disponibles

Les données brutes de vagues dans le cadre de la présente étude proviennent de 2 sources :

- Les vagues mesurées entre 2010 et 2020 (11 ans) par la bouée de Saint-Ulric opérée par l'ISMER;
- Les vagues simulées entre 1980 et août 2024 (presque 45 ans) par le modèle du golfe de Lasalle|NHC en appliquant les vents du modèle météorologique CFSR (NOAA) d'une résolution de 36 km. Il faut noter que l'analyse statistique inclut seulement la période de 1980 et 2022, puisqu'il a été déterminé que l'analyse n'avait pas besoin d'être mise à jour, car elle inclut toutes les tempêtes identifiées pour la submersion et qu'elle couvre une assez longue période (43 ans). Cela fait en sorte que l'ajout d'une année n'est pas significatif.

Les données de vagues mesurées par la bouée de l'ISMER localisée à Saint-Ulric ont été utilisées pour calibrer et valider le modèle de vagues de Lasalle|NHC. Cette bouée offre des données de hauteur, période et direction de vagues. Les résultats de validation sont présentés à la section 3.2.3 de ce rapport.

Le modèle de Lasalle|NHC utilise le module MIKE21 SW (Spectral Waves) de DHI pour générer et transformer les vagues dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Ce modèle s'étend de l'île d'Orléans jusqu'aux détroits de Cabot et Belle Isle à Terre-Neuve. Aux conditions frontières, le modèle est alimenté par des données de vagues issues du modèle de réanalyse ERA5 opéré par l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Le modèle peut être alimenté, sur l'ensemble de son domaine, par les vents issus du modèle de réanalyse météorologique CFSR de la NOAA (résolution de 36 km) ou de ceux issus du modèle de prévision météorologique HRDPS d'Environnement Canada (résolution de 2,5 km). Le modèle de Lasalle|NHC a été validé sur la base d'une vingtaine de bouées mesurant les propriétés des vagues à divers endroits dans le golfe. Le modèle du golfe de Lasalle|NHC ne tient pas compte de la dissipation de l'énergie des vagues par la glace à la dérive en hiver. Autrement dit, le modèle adopte l'hypothèse d'une absence totale de glace à la dérive en hiver.

Certains travaux de vérification et de modélisation préalables à cette étude ont été effectués en 2023 pour le MSP et les données étaient donc seulement disponibles jusqu'à la fin de 2022 (voir la section 3.2.3.1). Les vagues jusqu'en août 2024 ont été ajoutées à la série temporelle à la fin de 2024 afin de mettre à jour certaines simulations.

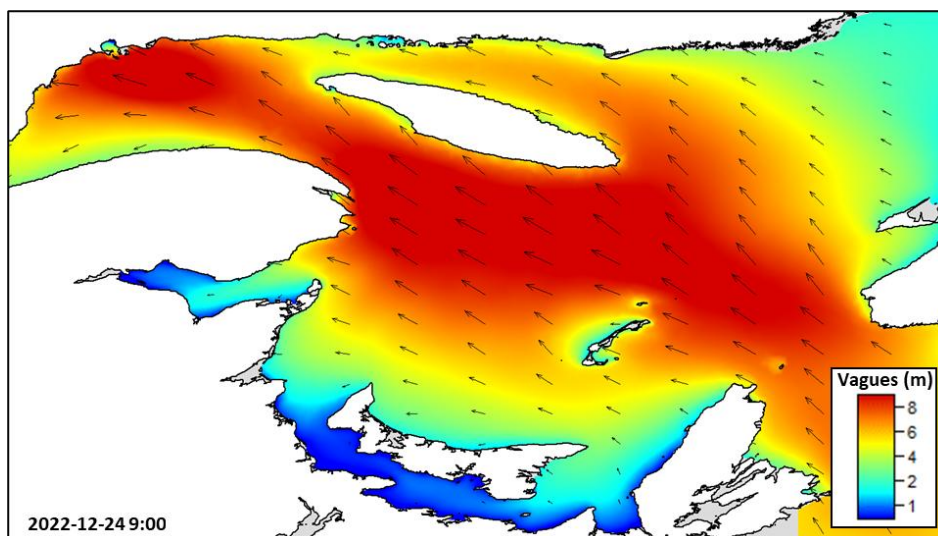


Figure 3.6 : Modèle du golfe de Lasalle|NHC – Génération de vagues

3.2.2 Transformation locale des vagues

Pour transformer les vagues issues du modèle du golfe jusqu'au littoral de Matane, le modèle de Matane présenté à la section 2.6 a été utilisé. En guise de rappel, ce modèle impose les données de hauteur (H_s), période (T_p) et direction des vagues aux limites au large du modèle et il tient également compte de la variation du niveau d'eau dans le temps. Le même jeu de données a été modélisé, soit la période 1980 – août 2024 pour le forçage CFSR.

3.2.3 Validation des vagues

3.2.3.1 Validation d'ensemble

Le modèle du golfe de Lasalle|NHC a été utilisé pour obtenir des données de vagues entre 1980 et août 2024 (presque 45 ans) aux conditions frontières du modèle local. Afin de calibrer et valider les vagues générées avec le forçage CFSR et la transformation des vagues dans le modèle local, les vagues générées avec le modèle local ont été extraites à l'emplacement de la bouée à St Ulric et validées avec les données mesurées par cette même bouée de, celle-ci étant localisée 12 km à l'est du site d'étude à Matane. Le forçage HRDPS, un forçage à plus grande résolution dans l'estuaire du Fleuve St-Laurent n'a pas été retenu pour la présente étude, car deux des trois tempêtes (6 décembre 2010 et 30 décembre 2016) sur lesquelles se concentre cette étude se sont produites avant la mise en place du modèle HRDPS.

L'épaisseur d'eau à l'endroit de la bouée est de 34 m ($z=-34$ m en CGVD28). Cette bouée offre des données de mesures pour les années 2010 à 2020.

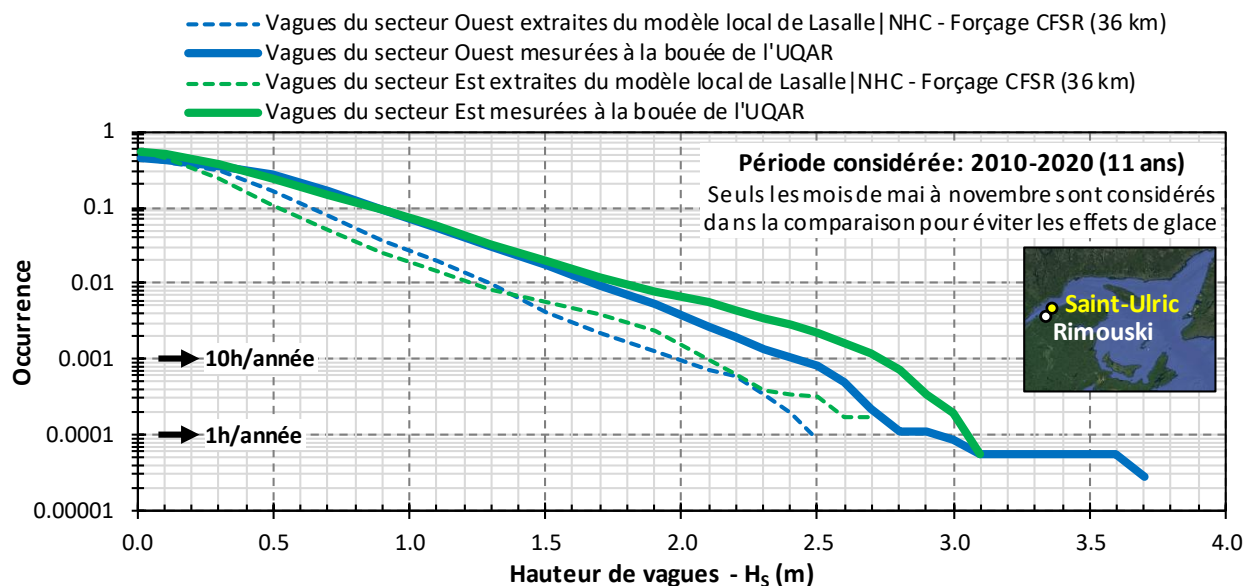
Pour valider la propagation des vagues du modèle du golfe de Lasalle|NHC, les données simulées ont été comparées aux données mesurées par la bouée AWAC à Saint-Ulric, et ce seulement pour les mois de mai à novembre pour exclure les effets de glace sur la comparaison puisque le modèle ne tient pas compte de la glace. Il est important de noter que c'est l'ensemble des données (1980 à 2022) qui est utilisé pour générer les statistiques de vagues et réaliser l'étude et non seulement les données utilisées dans le processus de validation. La méthode d'analyse statistique est conservatrice puisque les vagues sont simulées en eau libre, et ce même en période hivernale. Il faut noter également que les tempêtes identifiées pour l'étude ont été comparées aux mesures de l'AWAC de Saint-Ulric lorsque ces dernières étaient disponibles pour une validation plus détaillée (voir section 3.3).

Les figures 3.7a (hauteurs des vagues), 3.8a (périodes des vagues) et 3.9 (directions des vagues) montrent que les vagues modélisées ont tendance à être significativement sous-estimées lorsque les vents issus du modèle météorologique planétaire CFSR (résolution de 36 km) sont utilisés pour alimenter le modèle de vagues de Lasalle|NHC. Comme mentionné plus haut, le modèle CFSR est utilisé, car le modèle HRDPS (d'une résolution de 2,5 km) ne couvre pas deux des tempêtes étudiées. Une telle sous-estimation était anticipée puisque la résolution du modèle météorologique CFSR n'est pas suffisamment fine pour bien schématiser les patrons de vents à proximité de Saint-Ulric et de Matane. Ainsi, dans un contexte où les vents issus du modèle météorologique CFSR sont utilisés pour générer des vagues entre 1980 et août 2024, il devient impératif d'appliquer un facteur de correction aux hauteurs et périodes des vagues afin d'éviter une sous-estimation des vagues et de la submersion possible ainsi que le sous-dimensionnement des ouvrages potentiel de protection côtière. D'une manière générale, les roses de vagues obtenues avec la bouée et le modèle de vagues alimenté par CFSR sont similaires en termes de patron de directions. Une correction n'a donc pas été appliquée aux directions pour cette raison, mais aussi parce que les directions ne peuvent pas être corrigées par un facteur comme les deux autres propriétés de vagues.

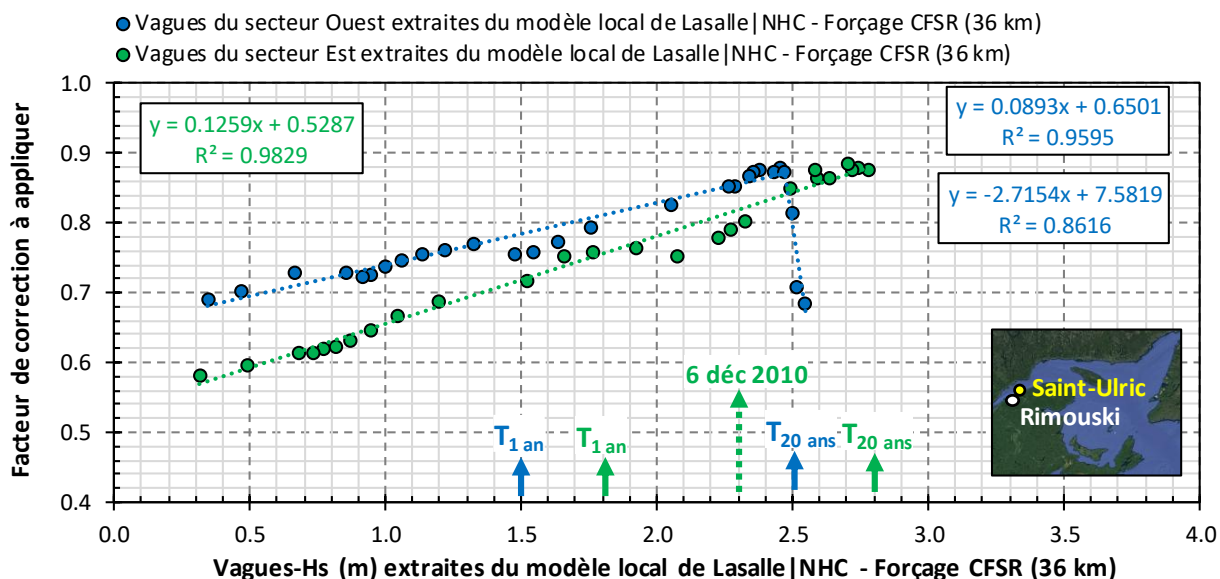
Les caractéristiques des vagues diffèrent significativement entre les vagues de l'est et celles de l'ouest puisqu'elles sont générées dans différentes parties de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent et dans des conditions météorologiques différentes. La validation et la correction des vagues ont donc été traitées séparément pour chaque direction. La figure 3.7b affiche les facteurs de correction appliqués aux hauteurs de vagues et la figure 3.8b affiche les facteurs appliqués aux périodes de vagues. Les facteurs varient non seulement en fonction de la direction, mais aussi de la hauteur et de la période des vagues extraites du modèle.

Les vagues aux conditions frontières (au large) du modèle local ont été corrigées avec la méthodologie présentée ci-haut, puis imposée au modèle pour lancer une nouvelle simulation de transformation des vagues. Une fois transformées, les nouvelles vagues modélisées à la bouée de Saint-Ulric ont été comparées avec celles mesurées par la bouée dans le but de valider la méthodologie développée dans le cadre de la présente étude. Les résultats de calibration et de validation sont synthétisés sur les figures 3.10 et 3.11 pour les hauteurs et périodes de vagues

respectivement. La série temporelle 1980 à août 2024 de vagues corrigées sera ensuite utilisée pour les statistiques et l'analyse des événements individuels.



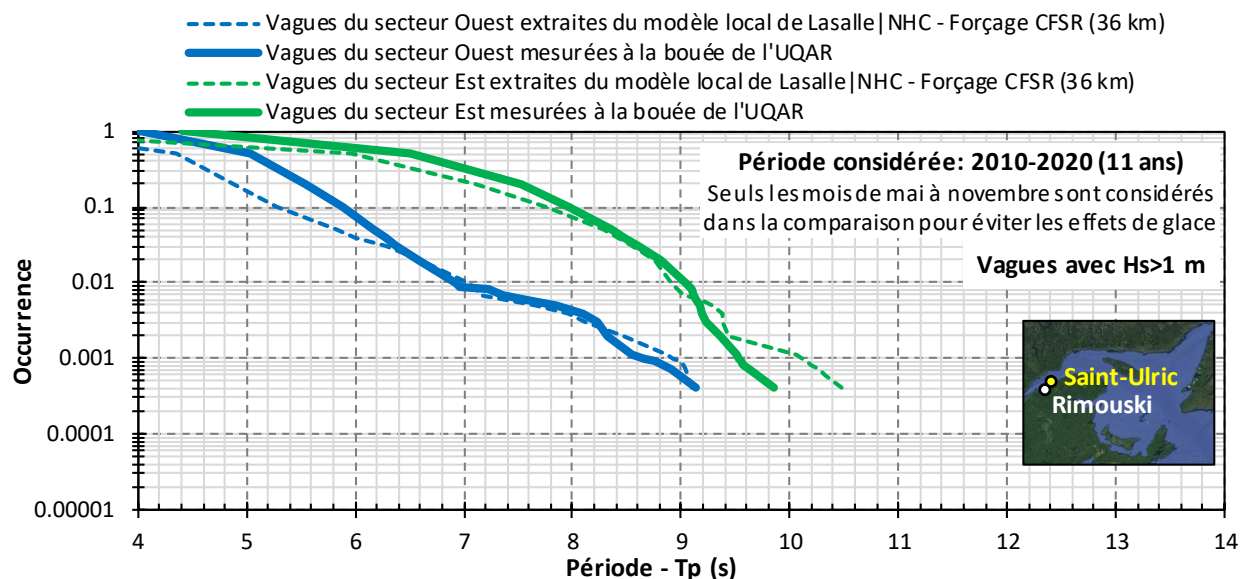
a) Validation du modèle de vagues de Lasalle | NHC (Bouée de Saint-Ulric)



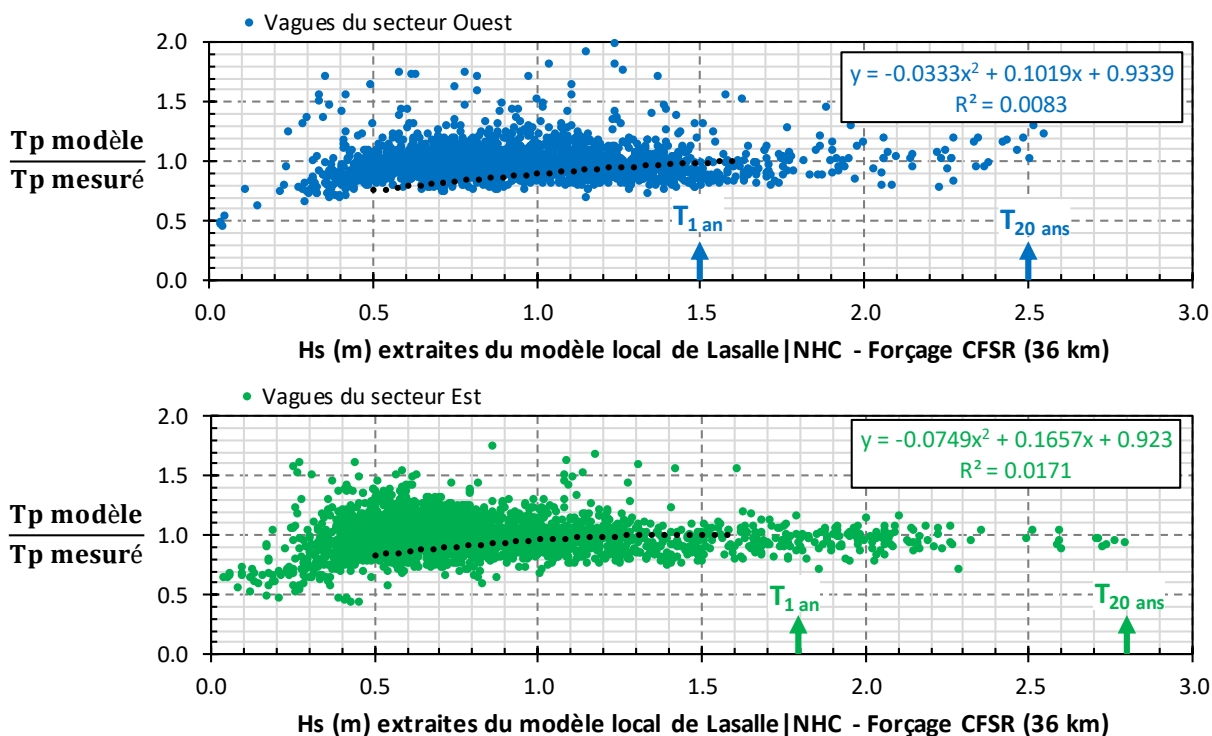
Facteur de correction à appliquer = 0.7 à 0.9 pour les vagues de l'ouest (pas d'extrapolation)
 sur les hauteurs de vagues 0.6 à 0.9 pour les vagues de l'est (pas d'extrapolation)

b) Facteur de correction à appliquer en fonction de la hauteur de vagues

Figure 3.7 : Validation et correction du modèle des vagues – Hauteurs des vagues



a) Validation du modèle de vagues de Lasalle | NHC (Bouée de Saint-Ulric)



Facteur de correction à appliquer = **0.75 à 1** pour les vagues de l'ouest (pas d'extrapolation)
 sur les périodes de vagues **0.8 à 1** pour les vagues de l'est (pas d'extrapolation)

b) Facteur de correction à appliquer en fonction de la hauteur de vagues

Figure 3.8 : Validation et correction du modèle des vagues – Périodes des vagues

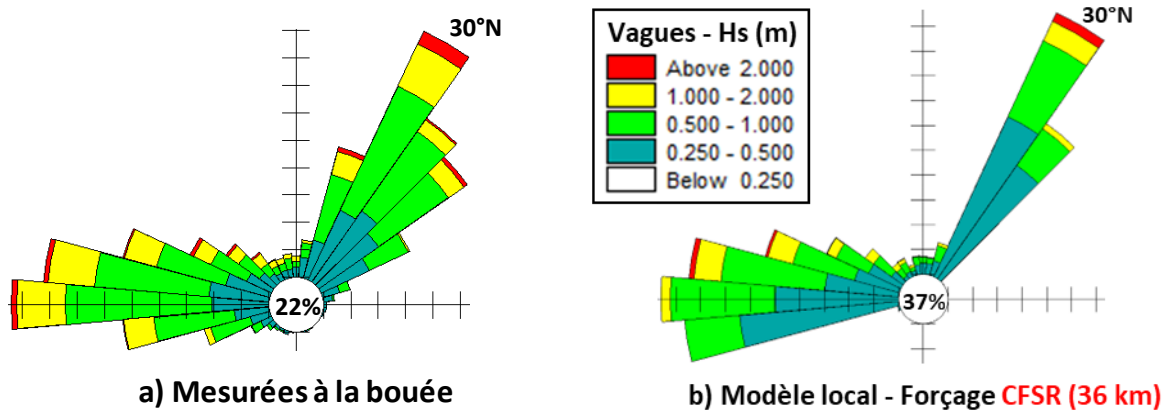
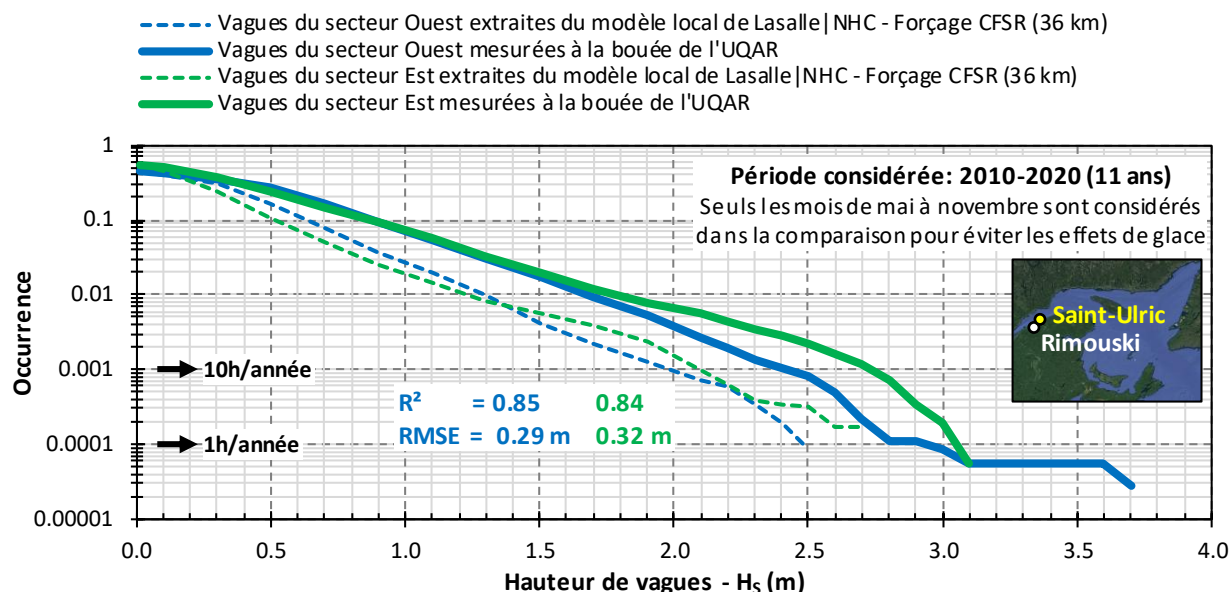
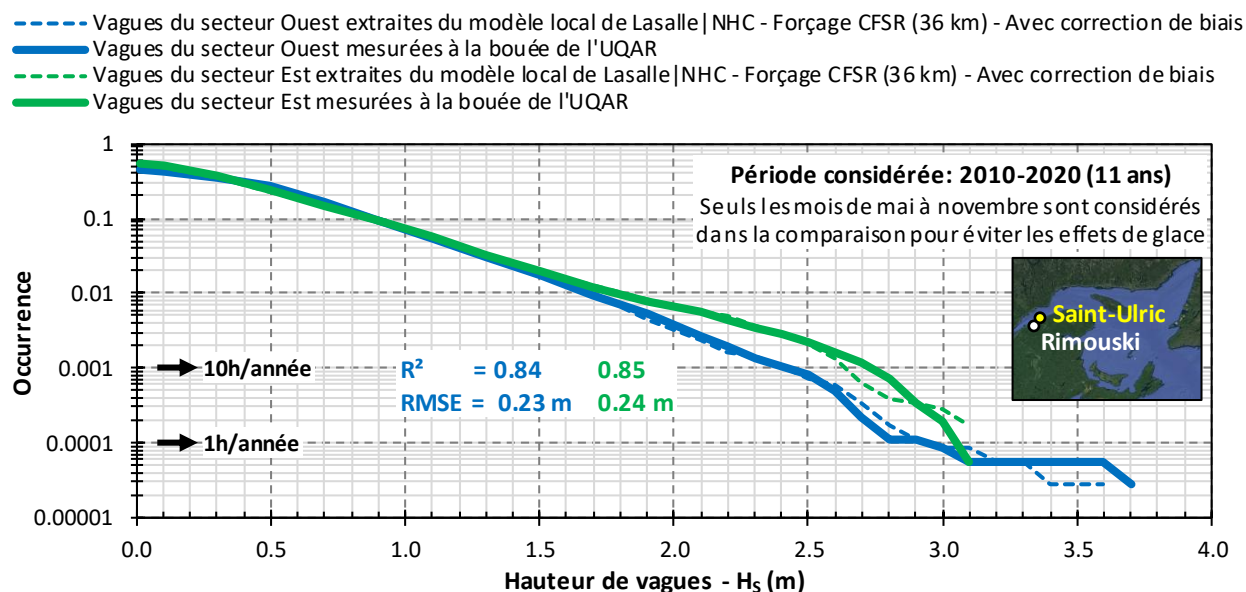


Figure 3.9 : Validation du modèle des vagues – Directions des vagues



a) Validation du modèle de vagues de Lasalle | NHC (Bouée de Saint-Ulric)
Hauteur de vagues - **Sans** la correction des biais



b) Validation du modèle de vagues de Lasalle | NHC (Bouée de Saint-Ulric)
Hauteur de vagues - **Avec** la correction des biais

Figure 3.10 : Validation finale de la hauteur des vagues modélisées et corrigées à Saint-Ulric

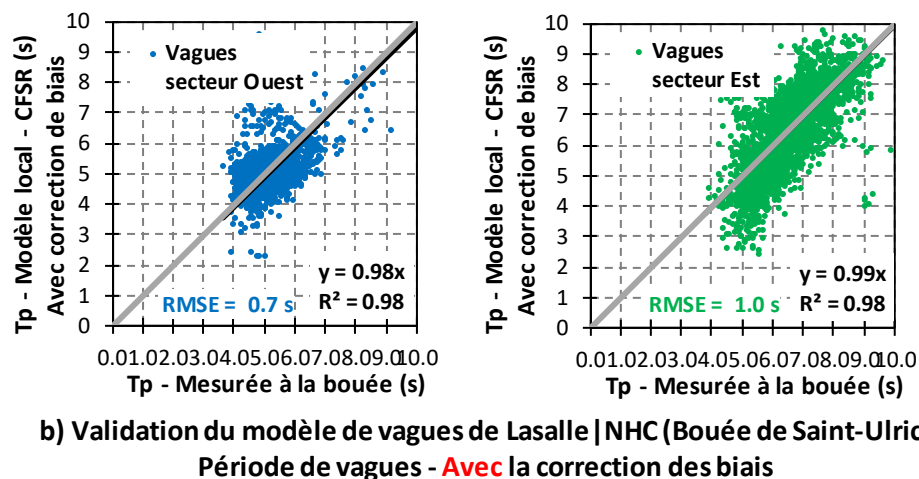
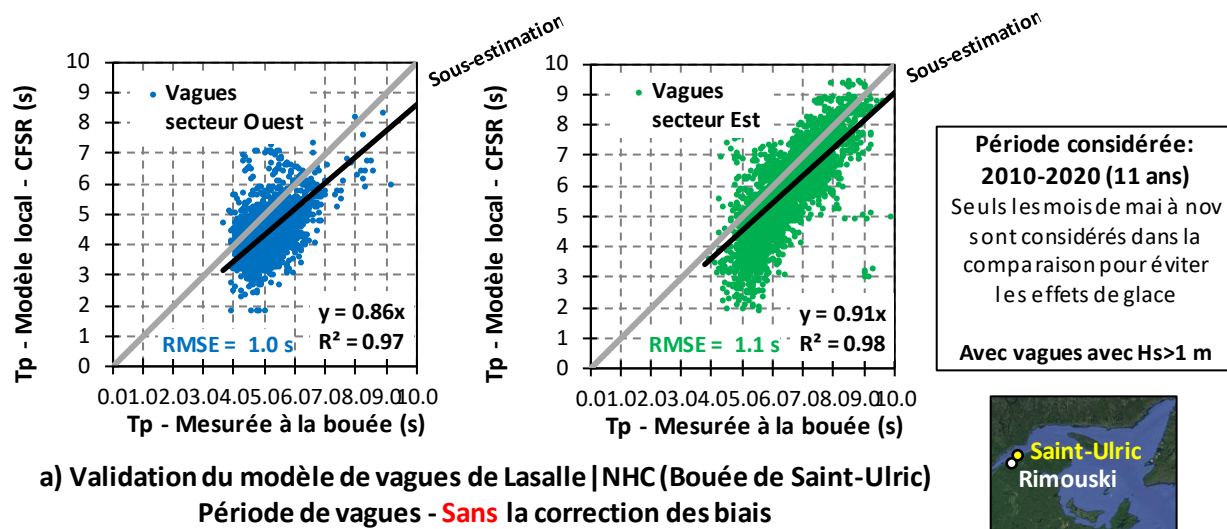


Figure 3.11 : Validation finale de la période des vagues modélisées et corrigées à Saint-Ulric

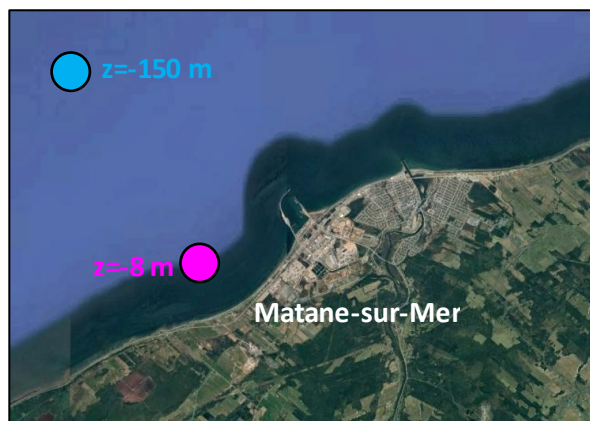
3.2.4 Statistiques des vagues

La figure 3.12 résume l'analyse du climat de vagues à Matane. Les périodes de retour des hauteurs des vagues, les roses des vagues et les dépendances entre les hauteurs et les périodes des vagues ont été obtenues en utilisant les vagues modélisées par le modèle local de Lasalle|NHC entre 1980 et 2022 (43 ans) calées suivant la méthodologie présentée à la section précédente. Les vagues ont été simulées sur l'ensemble des années, incluant l'hiver où une simplification conservatrice est apportée : l'absence de glace. Ainsi, il importe de rappeler que le modèle de vagues de Lasalle|NHC ne tient pas compte de la dissipation de l'énergie des vagues par la glace. En d'autres mots, les données de vagues fournies par le modèle de Lasalle|NHC représente un climat maritime futur (où il y aurait absence de glace à la dérive en hiver).

Le tableau a) de la figure 3.12 montre les périodes de retour des hauteurs à l'approche du rivage à une épaisseur d'eau de 8 m. Une tempête plus commune avec une période de retour de deux ans peut produire des vagues avec une hauteur de 2,24 m, alors qu'un événement rare avec une période de retour de 100 ans peut provoquer des vagues allant jusqu'à 3,18 m à une épaisseur d'eau de 8 m.

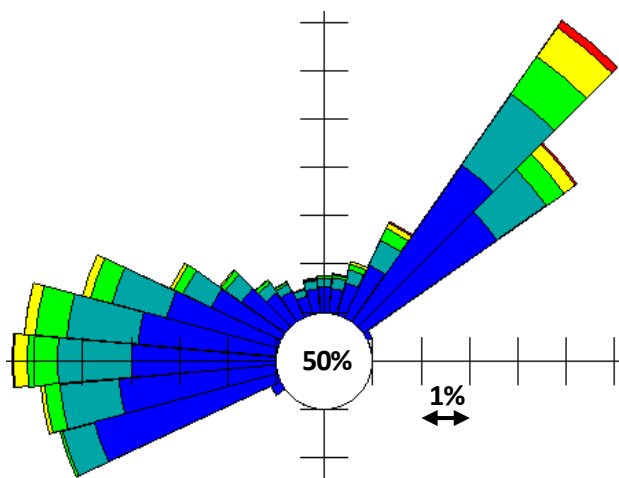
La rose des vagues sur la figure 3.12b indique deux directions dominantes de vagues, soit l'ouest et le nord-est, à une épaisseur d'eau de 150 m (environ 8 km au large de Matane). À l'approche du rivage (figure 3.12c), à une épaisseur d'eau de 8 m (environ 1 km au large), les vagues ont tendance à tourner significativement sous l'effet de réfraction au point où les directions dominantes deviennent le ONO et le NNE. Les deux directions dominantes sont donc relatives selon l'épaisseur d'eau d'eau et pour cette raison, elles seront invoquées plus généralement en tant que vagues de l'ouest ou de l'est.

Les figures 3.12d 3.12e affichent la correspondance entre la hauteur de vagues et la période de celles-ci à une épaisseur d'eau de 8 m. Les figures montrent que les vagues les plus fortes provenant de l'ouest ont généralement une période comprise entre 6 s et 9 s et que celles provenant de l'est ont le plus souvent une période ≥ 8 s.

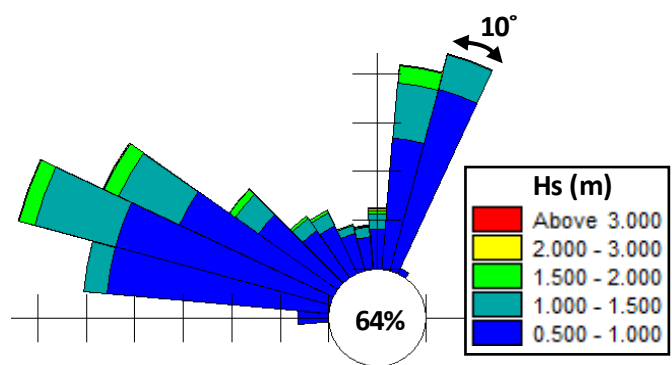


T (années)	Hs (m)
2	2.24
5	2.49
10	2.66
15	2.75
20	2.82
25	2.87
50	3.03
100	3.18

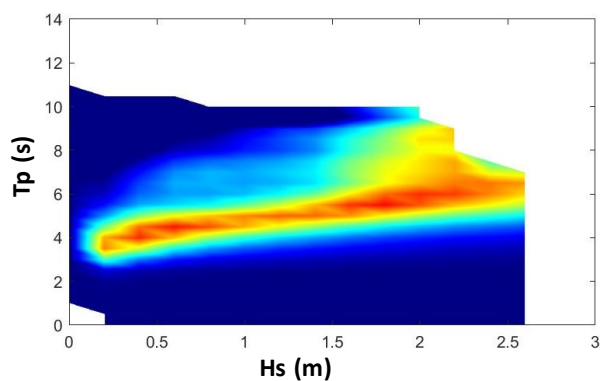
a) Réurrence des vagues
1 km au large (z=-8 m)



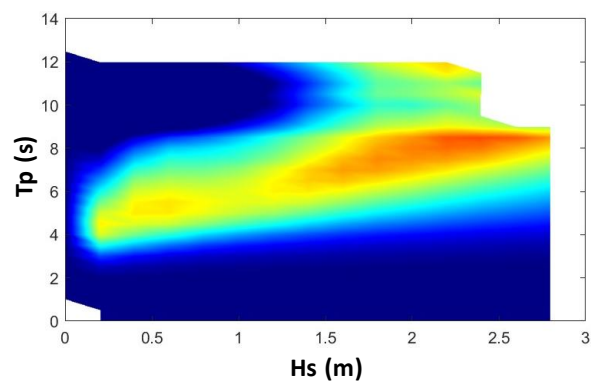
b) Rose des vagues - 8 km au large (z=-150 m)



c) Rose des vagues - 1 km au large (z=-8 m)



d) Relation hauteur - période
Vagues de l'ouest (z=-8 m)



e) Relation hauteur - période
Vagues de l'est (z=-8 m)

Figure 3.12 : Climat des vagues à Matane

3.2.5 Périodes de retour combinées niveau d'eau-vagues

Les sections précédentes présentaient, de manière indépendante, les statistiques sur de niveaux d'eau et les vagues. Toutefois, les variables de niveaux d'eau et de vagues ne sont pas entièrement indépendantes puisqu'elles découlent d'un même système météorologique. La présente section a ainsi pour but d'analyser et de présenter les périodes de retour combinées de niveau d'eau et de vagues.

Les calculs de périodes de retour combinées de niveau d'eau et de vagues ont été réalisés en utilisant une approche stochastique. La méthodologie consiste à évaluer la probabilité d'occurrence simultanée de vagues, surcote et marée (le niveau d'eau résulte de la superposition de la surcote et de la marée). Les contraintes de dépendance statistique, telles que résumées à la figure 3.13, ont été respectées :

- La dépendance est maintenue entre les vagues et les surcotes puisqu'elles découlent d'un même système météorologique;
- Une indépendance totale est considérée entre les vagues et la marée puisqu'elles découlent de deux systèmes indépendants (forçage atmosphérique versus forçage astronomique);
- Une indépendance totale est considérée entre les surcotes et la marée puisqu'elles découlent de deux systèmes indépendants (forçage atmosphérique versus forçage astronomique);

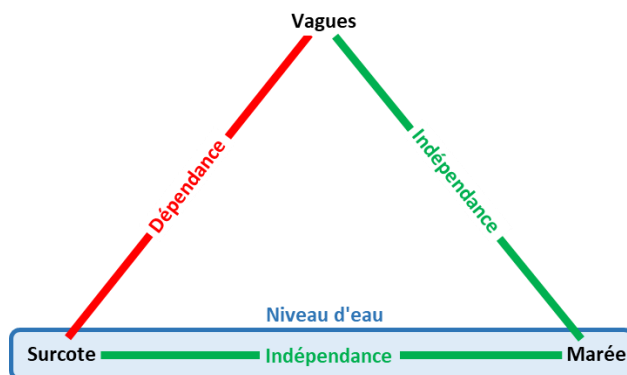


Figure 3.13 : Contraintes respectées dans le calcul de probabilités stochastiques

Les résultats de périodes de retour combinées sont présentés sur la figure 3.14. Cette figure identifie et caractérise certains événements qui se démarquent ou qui sont d'un certain intérêt pour la suite de l'étude.

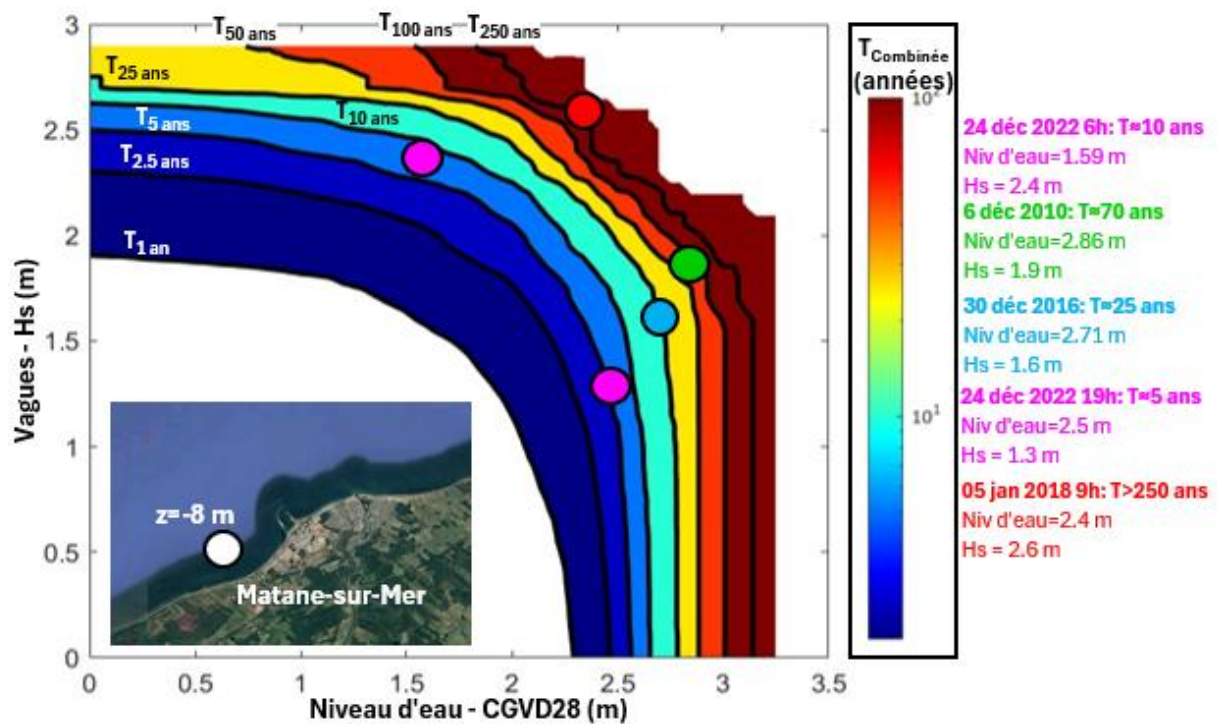


Figure 3.14 : Périodes de retour combinées (vagues et niveaux d'eau)

Les caractéristiques pendant le pic des 3 tempêtes qui ont été analysées au cours de la présente étude sont résumées ci-dessous :

- 6 décembre 2010 – secteur est, Hs = 1,9 m, Tp = 7.5 s, Niv = 2,86 m, T= 70 ans
- 30 décembre 2016 – secteur est, Hs = 1,6 m, Tp = 9,3 s, Niv = 2,71 m, T= 25 ans
- 5 janvier 2018 – secteur est, Hs = 2,6 m, Tp = 8,9 s, Niv = 2,37 m, T>250 ans

3.3 Tempêtes étudiées

Les trois tempêtes identifiées à la section précédente sont relativement récentes et ont marqué les résidents de la rue Matane-sur-Mer par les dommages engendrés. Elles ont été retenues par le MSP pour évaluer les risques de submersion côtière en climat actuel ainsi qu'en climat futur.

Ayant été suffisamment significatives, ces tempêtes ont conduit à des relevés des limites de submersion. Ces relevés ont été effectués sur le terrain par l'UQAR et par le MSP quelques jours après leur passage. La disponibilité des données a permis le calage des modèles du franchissement des vagues.

3.3.1 Validation des événements de tempêtes étudiés

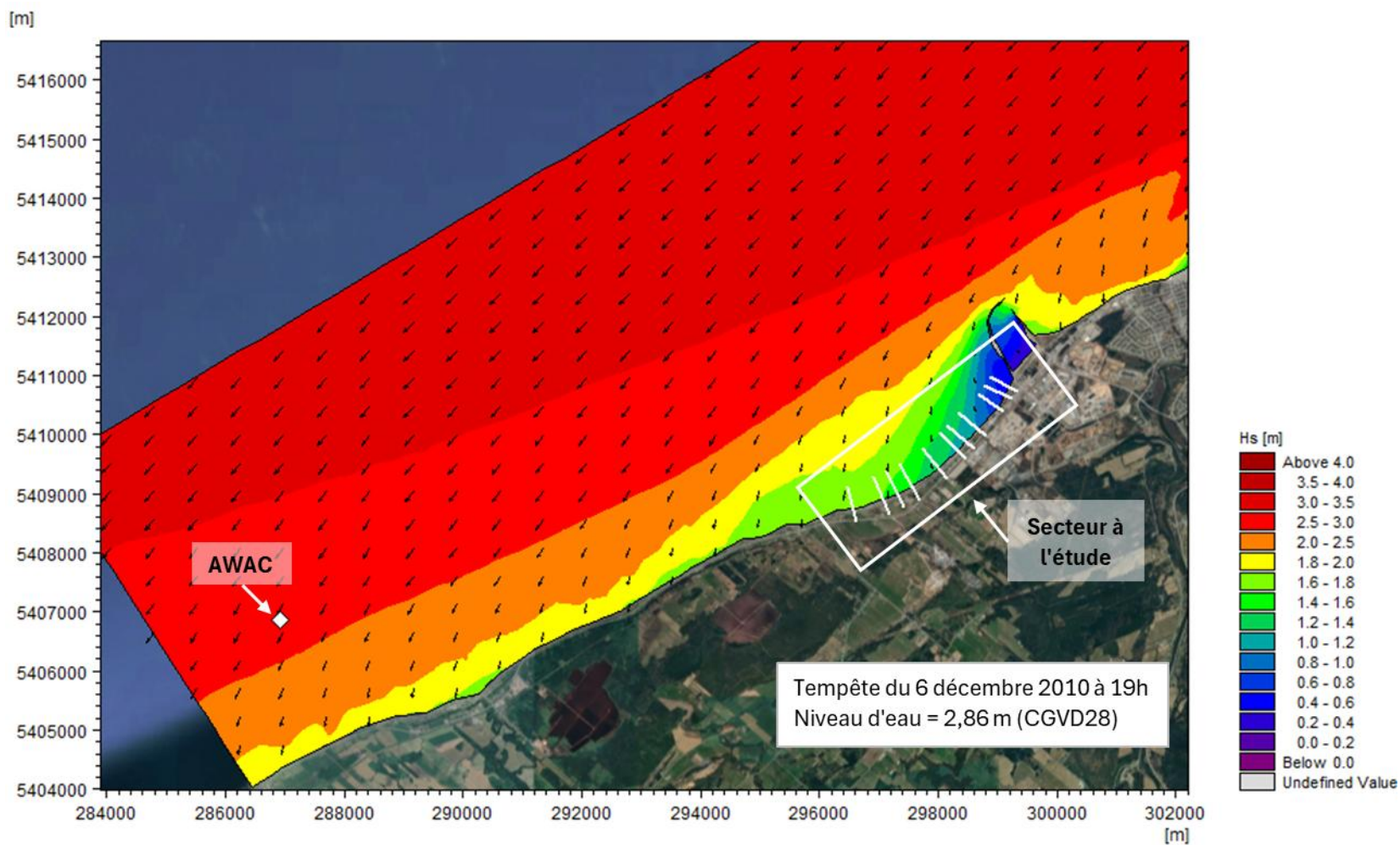
Les événements de tempêtes étudiés ont été validés avec les données de la bouée de Saint-Ulric. Deux ajustements aux caractéristiques des vagues aux conditions limites du modèle d'ensemble ont été réalisés pour mieux représenter les événements (voir figure 3.15). Pour la tempête du 6 décembre 2010, la période de pointe des vagues au large du modèle a été augmentée de 0,5 s. Pour la tempête du 5 janvier 2018, la hauteur significative des vagues au large du modèle a été augmentée par un facteur de 15%. La série temporelle des données de vagues a été mise à jour en conséquence.

Les climats de vagues des pointes de tempêtes sont présentés aux figures 3.16 et 3.19.

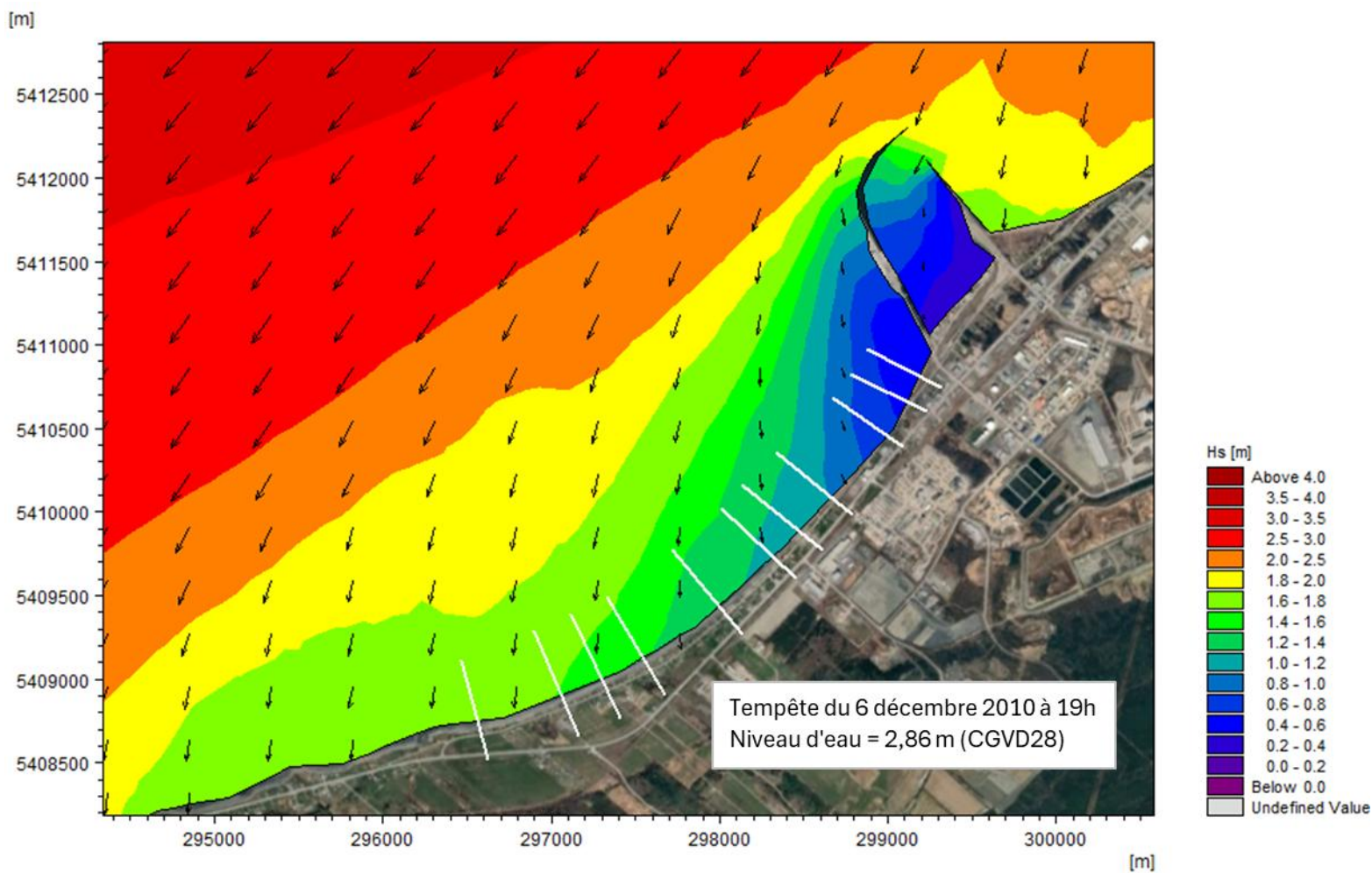


Date & Heure (UTC)	Bouée AWAC			Modèle LNI à l'emplacement de l'AWAC			Modèle LNI corrigé à l'emplacement de l'AWAC		
	Hs [m]	Tp [s]	Direction [deg]	Hs [m]	Tp [s]	Direction [deg]	Hs [m]	Tp [s]	Direction [deg]
2010-12-06 19:00	2.69	8.26	34.0	2.73	7.77	33.1	2.69	8.26	32.7
2016-12-30 19:00	2.19	9.74	353.8	2.48	10.56	33.4	---	---	---
2016-12-30 20:00	2.59	5.86	321.6	2.48	9.99	10.2	---	---	---
2016-12-30 21:00	2.71	6.16	305.6	2.72	7.55	319.6	---	---	---
2018-01-05 9:00	3.95	10.30	40.3	3.48	9.34	27.0	4.01	9.34	27.0

Figure 3.15 : Validation des évènements de tempêtes étudiés et ajustements des vagues au large du modèle d'ensemble

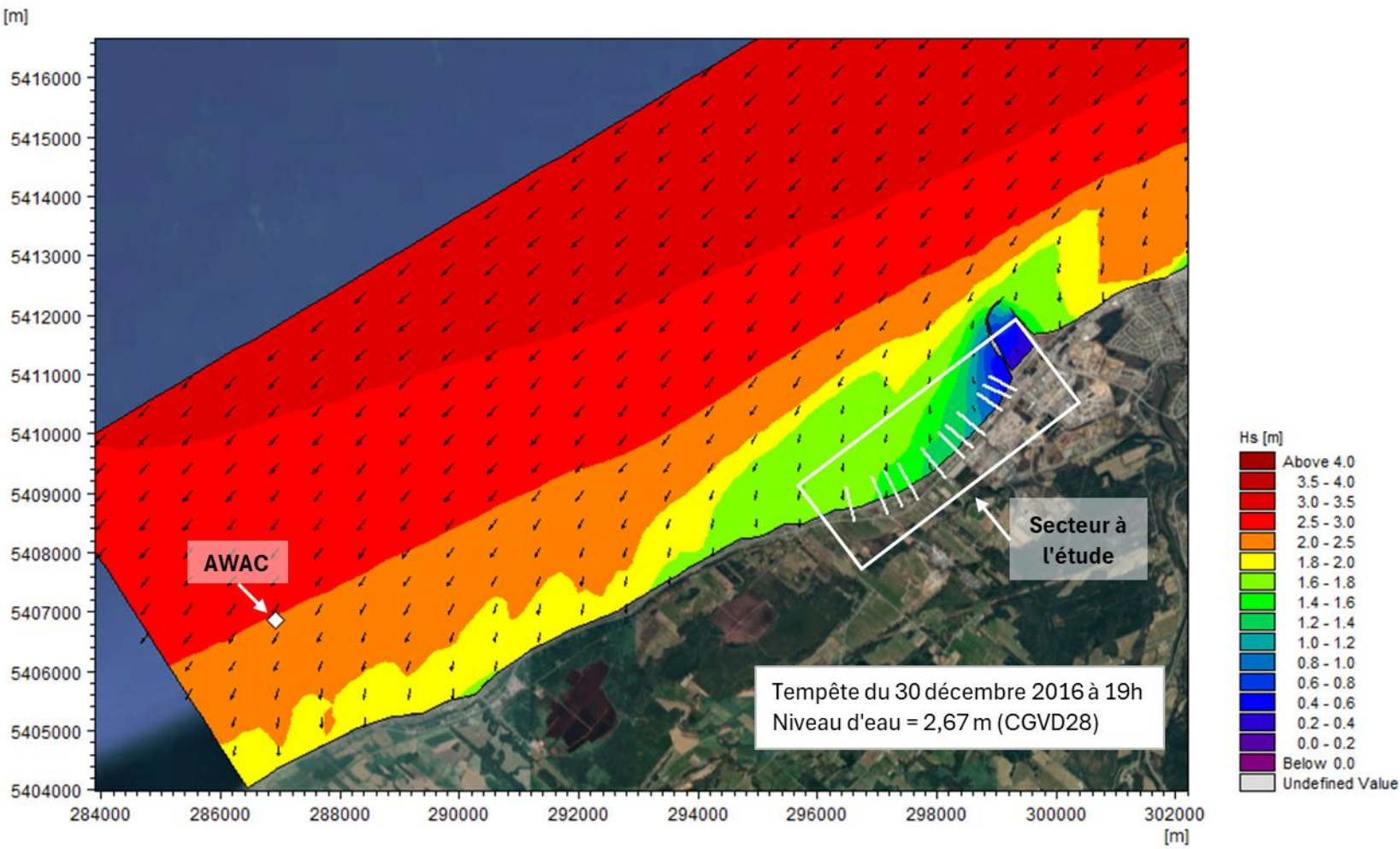


a) Vue d'ensemble

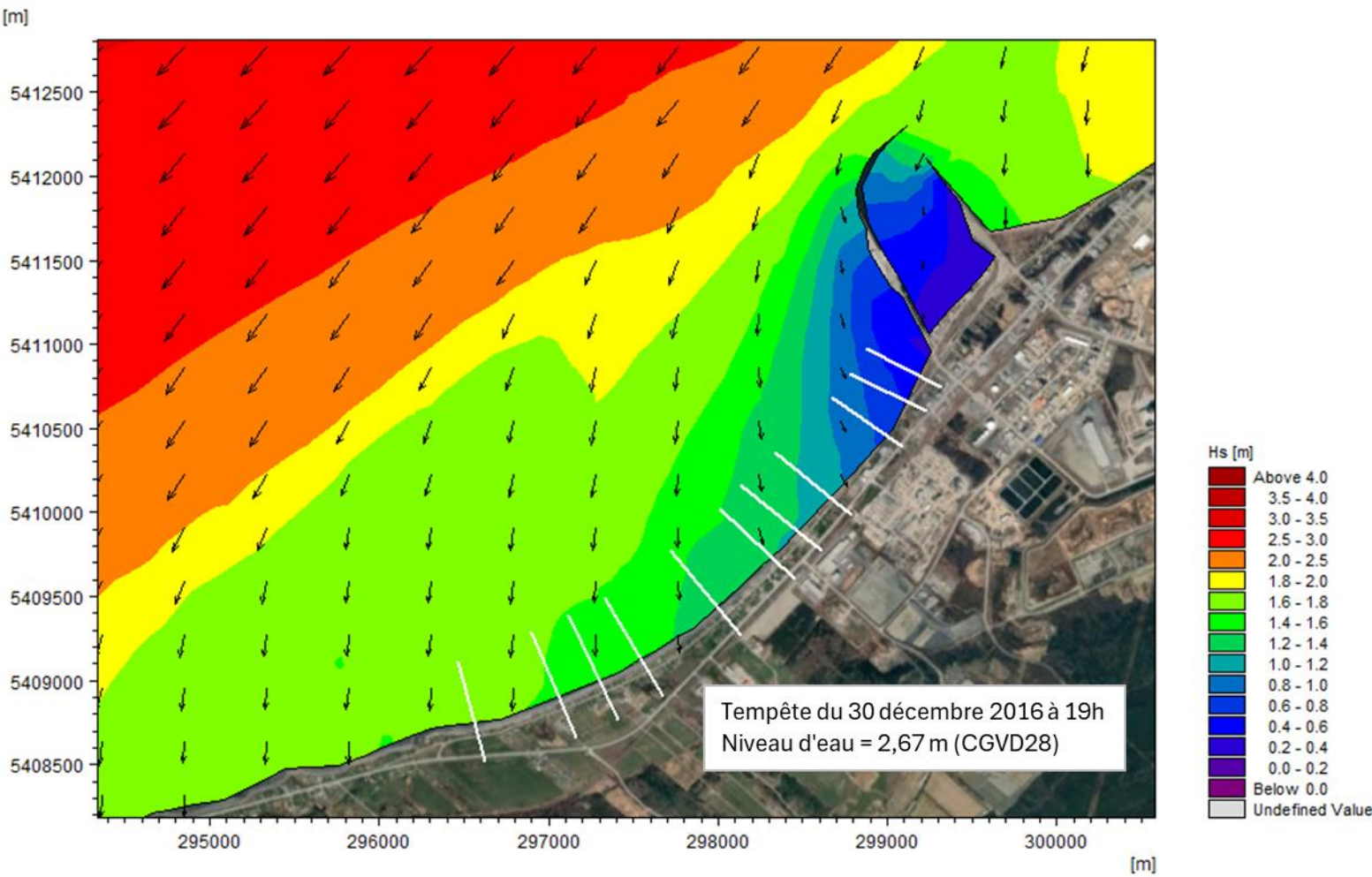


b) Vue du secteur Matane-sur-Mer

Figure 3.16 : Hauteur et direction des vagues à la pointe de la tempête du 6 décembre 2010 à 19h

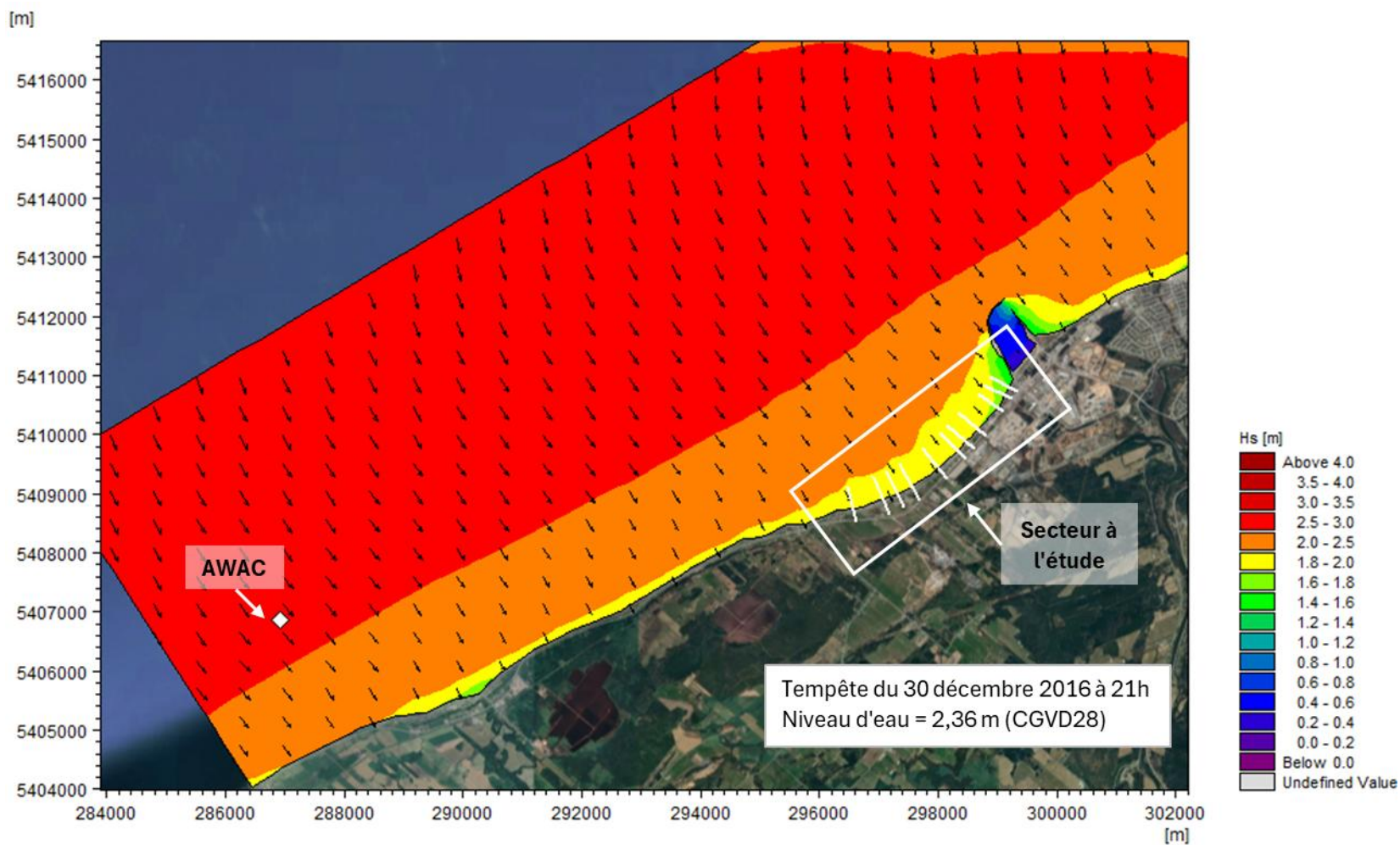


a) Vue d'ensemble

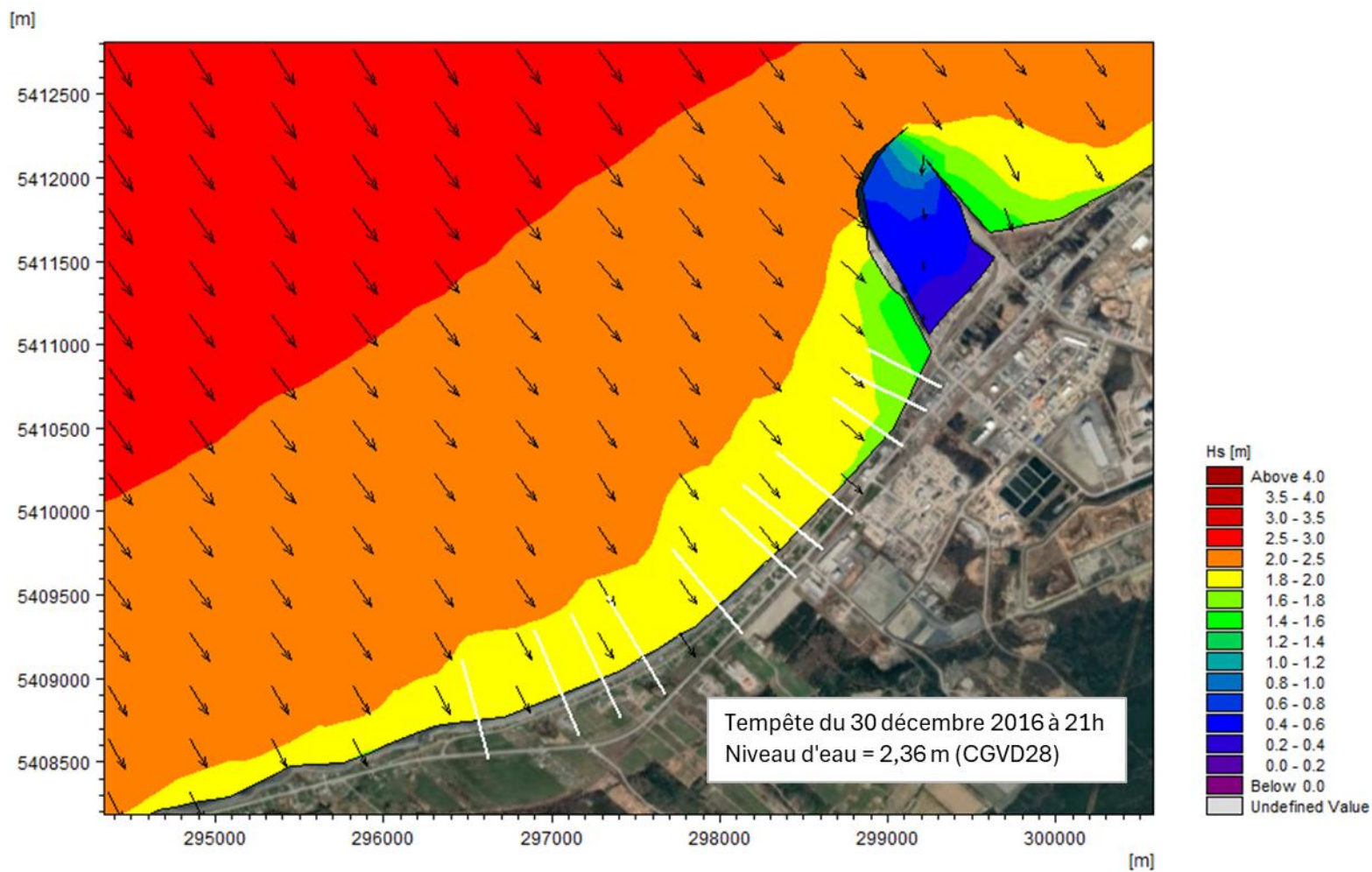


b) Vue du secteur Matane-sur-Mer

Figure 3.17 : Hauteur et direction des vagues d'une des pointes de la tempête du 30 décembre 2016 à 19h

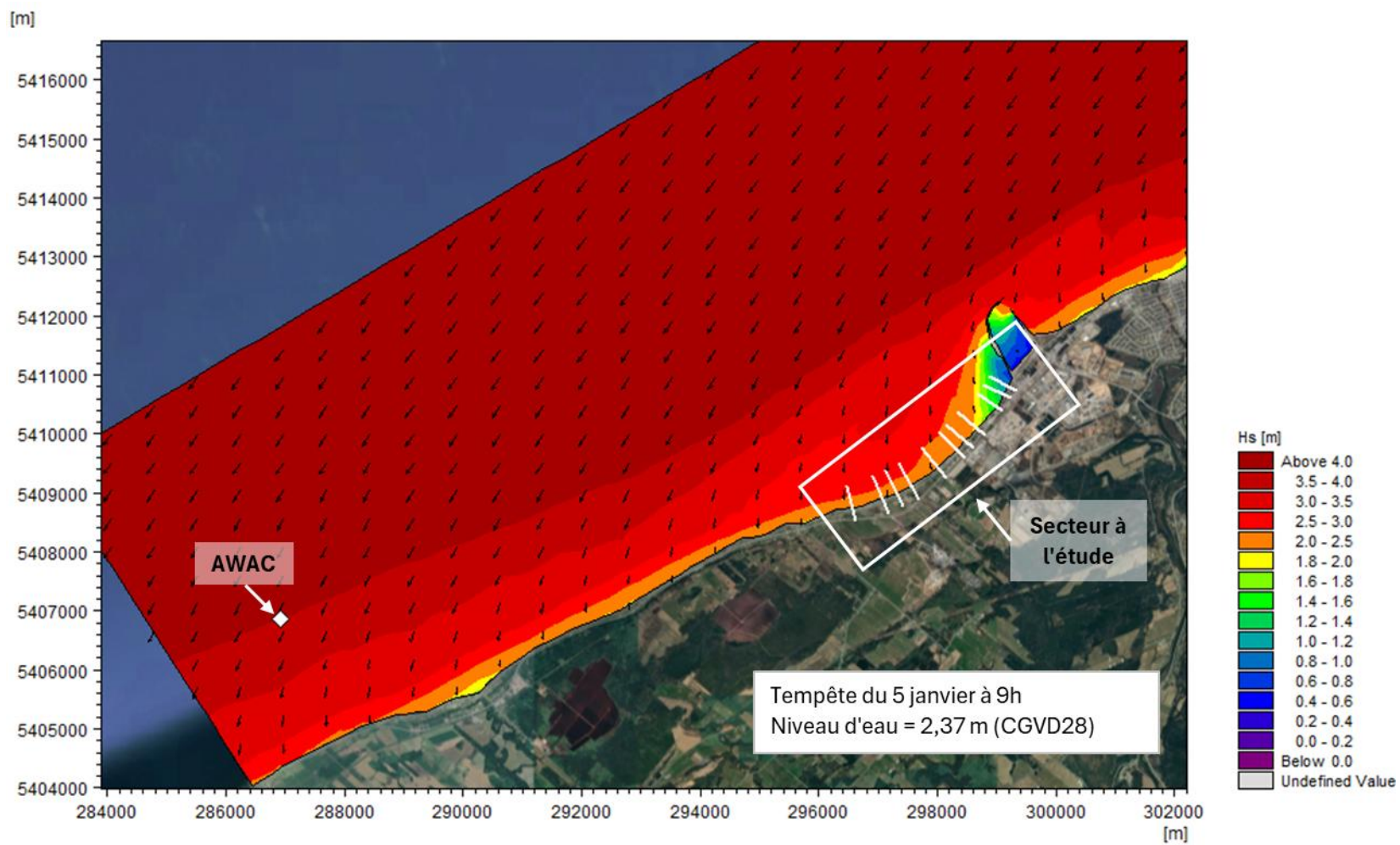


a) Vue d'ensemble

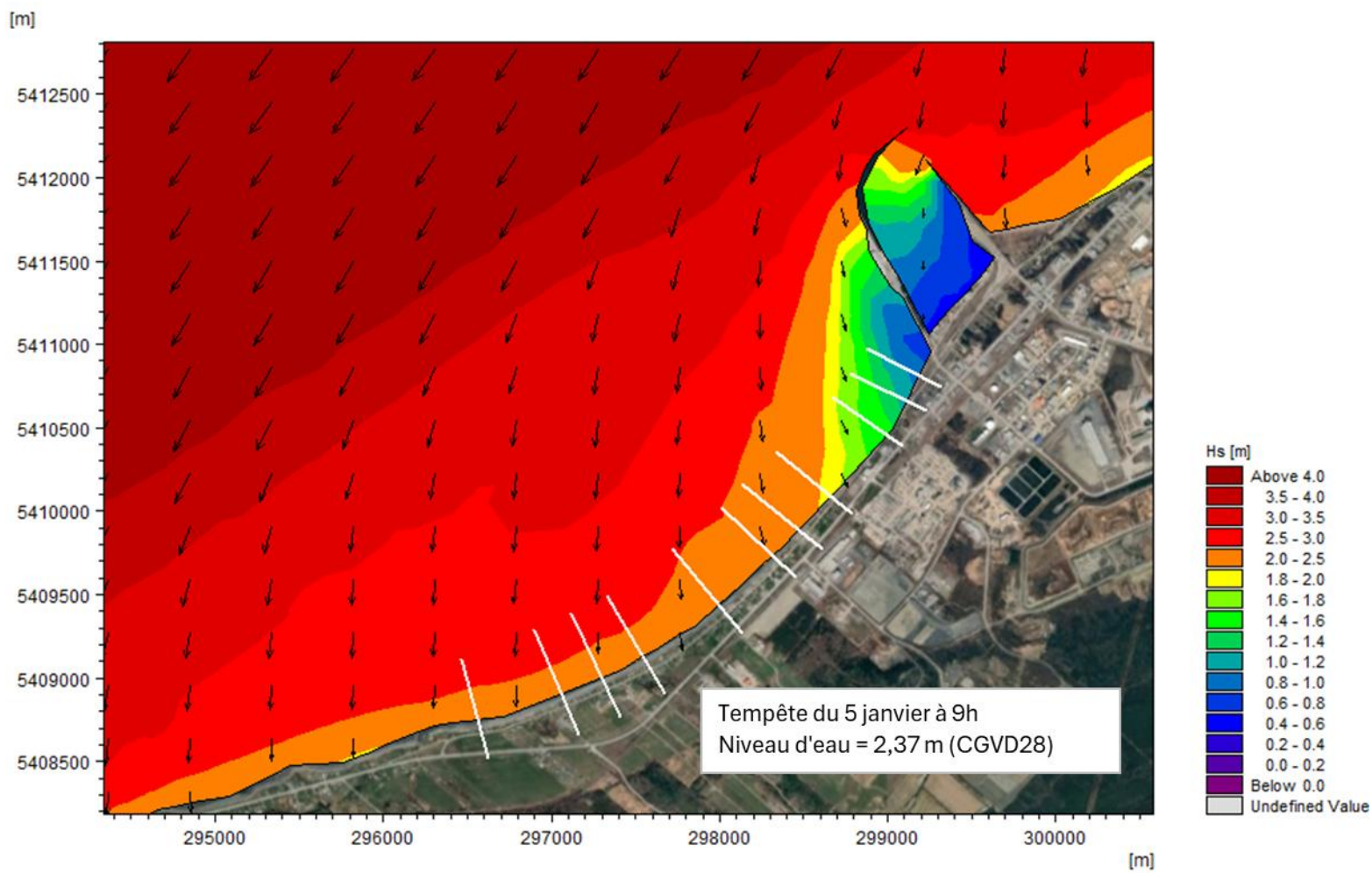


b) Vue du secteur Matane-sur-Mer

Figure 3.18 : Hauteur et direction des vagues d'une des pointes de la tempête du 30 décembre 2016 à 21h



a) Vue d'ensemble



b) Vue du secteur Matane-sur-Mer

Figure 3.19 : Hauteur et direction des vagues à la pointe de la tempête du 5 janvier 2018 à 9h

3.4 Changements climatiques

Les changements climatiques auront un impact sur les risques de submersion côtière, et ce en changeant le régime des glaces, en influençant le régime des vents et en rehaussant le niveau moyen de la mer.

La formation de glace le long des rives joue un rôle important en protégeant les berges contre l'action directe des vagues. Par ailleurs, la présence de morceaux de glace flottants à la surface de l'eau contribue à dissiper l'énergie des vagues, réduisant ainsi leur hauteur. En ce sens, la couverture de glace en hiver constitue une forme de protection naturelle qui aide à limiter les phénomènes d'érosion. Cependant, avec l'augmentation progressive de la température moyenne de l'air, liée aux changements climatiques, la durée de la saison glaciologique tend à se raccourcir. Comme le montre l'ISMER et UQAR dans leur étude sur le régime des vagues dans un contexte de changements climatiques (Neumeier et al., 2013), dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, la formation de la glace sur les plans d'eau surviendra plus tard en hiver, tandis que sa fonte commencera plus tôt au printemps. Cette réduction de la période de couverture glacée rendra les berges plus exposées aux effets érosifs pendant une part croissante de l'année. Dans le cadre de la présente étude, une absence du couvert de glace est considérée autant en climat actuel qu'en climat futur et ce, même durant la période hivernale. Cette démarche est conservatrice puisqu'un facteur d'atténuation des vagues aurait été imposé aux périodes hivernales.

Les changements climatiques pourraient aussi influencer le régime des vents. Cependant, les modèles climatiques actuels ne permettent pas de dégager clairement une tendance à long terme concernant la vitesse, la direction et la fréquence des tempêtes.

Comme mentionné à la section 3.1.4, le scénario climatique SSP5 8,5 (révision 6) a été retenu pour analyser l'étendue de la submersion côtière en climat futur ainsi que pour obtenir un portrait des risques côtiers encourus. Deux horizons climatiques ont été étudiés : l'horizon 2055 et l'horizon 2100. Dans les deux cas, le rehaussement de l'élévation du niveau moyen des mers (ENMM) a été étudié par rapport à 2010 (voir la section 3.1.4 pour plus de détails). Les scénarios climatiques ont été choisis de concert avec les intervenants du MSP réalisant l'étude de risque. Le tableau 3.4 présente les niveaux d'eau utilisés pour la modélisation des tempêtes retenues en climat actuel ainsi qu'en climat futur.

Tableau 3.4: Niveau d'eau aux heures de tempêtes étudiées et scénarios du rehaussement de la mer étudiés

		Climat Actuel	Horizon 2055	Horizon 2100
			ENMM SSP5 8,5	ENMM SSP5 8,5
			+ 0,22 m [†]	+ 0,61 m [†]
Tempête	Date & Heure (UTC)	[m]		
2010	2010-12-06 19:00	2.86	3.08	3.47
2016	2016-12-30 19:00	2.67	2.89	3.28
	2016-12-30 20:00	2.71	2.93	3.32
	2016-12-30 21:00	2.36	2.58	2.97
2018	2018-01-05 9:00	2.37	2.59	2.98

† correspond à l'augmentation relative du niveau moyen des mers à Matane (voir section 3.1.4 pour plus de détails)

4 ÉTENDUE DE LA SUBMERSION CÔTIÈRE

4.1 Conditions actuelles

4.1.1 Observations

Les limites de submersion relevées par l'UQAR et par le MSP indiquent que durant les trois événements de tempêtes étudiés les vagues ont franchi l'enrochement de manière généralisée et auraient atteint la rue Matane-sur-Mer à plusieurs endroits.

Les figures 4.2 et 4.3 illustrent un exemple des observations disponibles pour caler les résultats de modélisation de la submersion côtière. Celles-ci incluent des photos prises par l'UQAR à la suite de la tempête du 30 décembre 2016, des photos tirées d'articles et de vidéos de reportage, ainsi qu'une vidéo prise par un passant lors de la tempête de 2016. Une analyse des images satellites relevées avant et après le passage des tempêtes permet également de constater que des maisons ont été démolies : 2 après le passage de la tempête de 2010, 3 après la tempête de 2016 et 10 après le passage de la tempête du 5 janvier 2018.

En conditions actuelles, le principal mécanisme de submersion est le franchissement par jet de rive. Comme l'illustrent les photos 2.1, à la section 2.1, lors de la tempête du 30 décembre 2016, le jet de rive atteint une élévation de 4 à 5 m et on observe une submersion de la côte s'étendant jusqu'aux habitations prises en photos. Les photos 4.1 montrent également un exemple de dommages répertoriés et de projectiles, glaces de mer épaisses et roches d'enrochement, retrouvés sur les propriétés en bordure de mer et à proximité de la rue Matane-sur-Mer.



Photos 4.1 : Dommages répertoriés, glaces de mer épaisses et blocs de l’enrochement projetés sur une maison et jusqu’à la rue Matane-sur-Mer lors de la tempête du 5 janvier 2018 (Radio-Canada, 2018)

4.1.2 Résultats de calage

La modélisation de la submersion côtière a été réalisée en deux temps : en modélisant l’ensemble du secteur en 2D en utilisant XBeach en mode *surfbeat* et en modélisant la remontée des vagues à l’aide de modèles 1D XBeach-G.

Les modèles utilisés pour simuler la submersion côtière ont été calés en climat actuel avec les données de limites de submersion fournies par le MSP. Ces relevés représentent les lignes de débris de tempête retrouvés le long de la côte. Ces limites ont été relevées quelques jours après les tempêtes et donc il est impossible de savoir si des débris se sont rendus sur la rue Matane-sur-Mer puisqu’ils auraient été ramassés. Pour l’ensemble des trois événements de tempête modélisés, l’étendue a été estimée comme atteignant au maximum la rue Matane-sur-Mer.

À l’aide des observations récoltées ainsi que des relevés des limites de submersion, une validation des résultats de la modélisation 1D XBeach-G (où l’hydrodynamique de chaque vague est représentée) démontre une représentation adéquate de la submersion. Celle-ci est discutée dans la section 4.1.2.2. Contrairement à la méthode 1D, la méthode de modélisation XBeach (2D) en mode *surfbeat* ne représente pas adéquatement la submersion observée (voir la section 4.1.2.1 pour plus de détails).

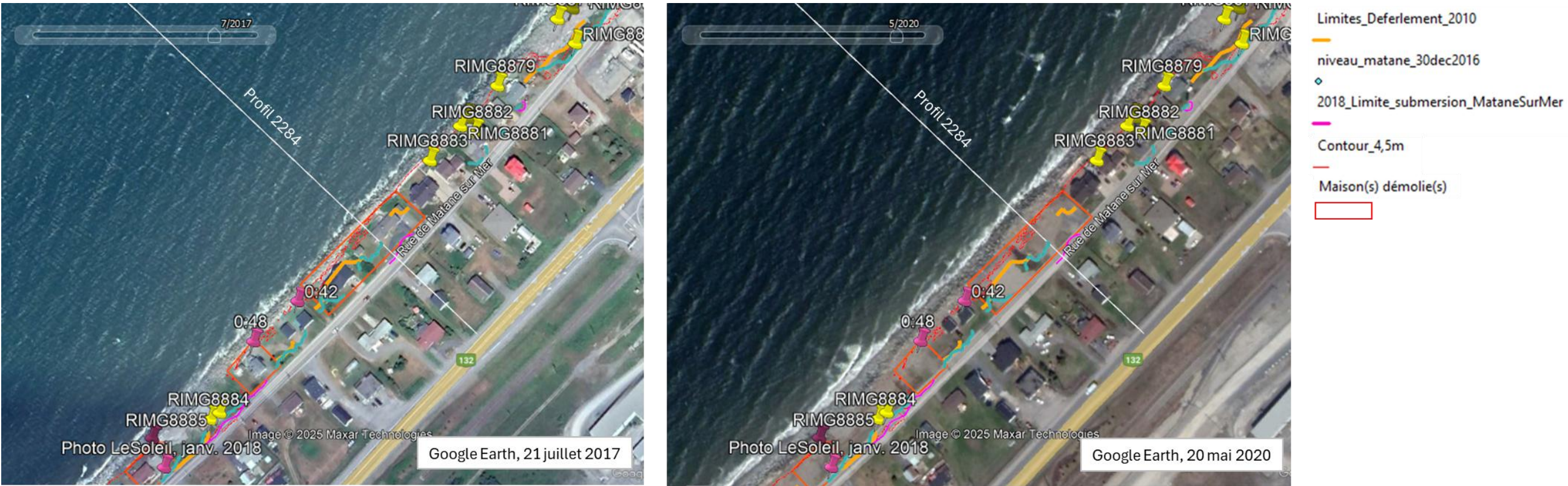


Figure 4.1 : Données de calage – exemple des observations recueillies pour caler la simulation du franchissement à l’aide d’un modèle XBeach-G (profil 2284)



a) Dommages répertoriés après la tempête du 5 janvier 2018 (TVA Nouvelles, 9 janvier 2018)



b) Débris sur les propriétés au nord de la rue Matane-sur-Mer après la tempête du 30 décembre 2016 (UQAR, 2 janvier 2017)



Figure 4.2 : Exemples de dommages et de débris répertoriés après les tempêtes - utilisés pour caler les modèles 1D XBeach-G

4.1.2.1 Modèle XBeach en mode *surfbeat*

Le modèle XBeach (2D), utilisé en mode *surfbeat*, présente certaines limitations dans le contexte spécifique de cette étude. Initialement développé pour simuler le *run-up* des vagues de longue période (supérieure à 20 secondes) sur des plages à pente douce, ce mode repose sur une représentation stochastique de l'enveloppe des vagues, sans résolution explicite des vagues individuelles. Comme mentionné à la section 2.4.3, à Matane-sur-Mer, les vagues incidentes présentent des périodes de pointe inférieures à 10 secondes, ce qui limite la capacité du modèle à reproduire avec précision le *run-up* généré par ces conditions. Par ailleurs, la résolution spatiale du maillage s'est révélée insuffisante pour représenter les détails morphologiques de la zone côtière, notamment la pente abrupte de l'enrochement et du talus de plage. Ces caractéristiques ne sont pas pleinement compatibles avec les paramétrisations intégrées au modèle XBeach pour le déferlement des vagues et la dissipation par friction. En dépit de ces contraintes, XBeach a néanmoins été utilisé à des fins exploratoires, notamment pour identifier les zones potentielles de franchissement aux points bas de la côte, et pour analyser les patrons d'écoulement à l'intérieur du domaine côtier en cas de franchissement (sans jet de rive). La figure 4.3 affiche les résultats de simulation XBeach pour la pointe de la tempête du 6 décembre 2010 et illustre les problèmes de représentation du franchissement avec la méthode *surfbeat* liés à l'absence de franchissement simulé en conditions actuelles.

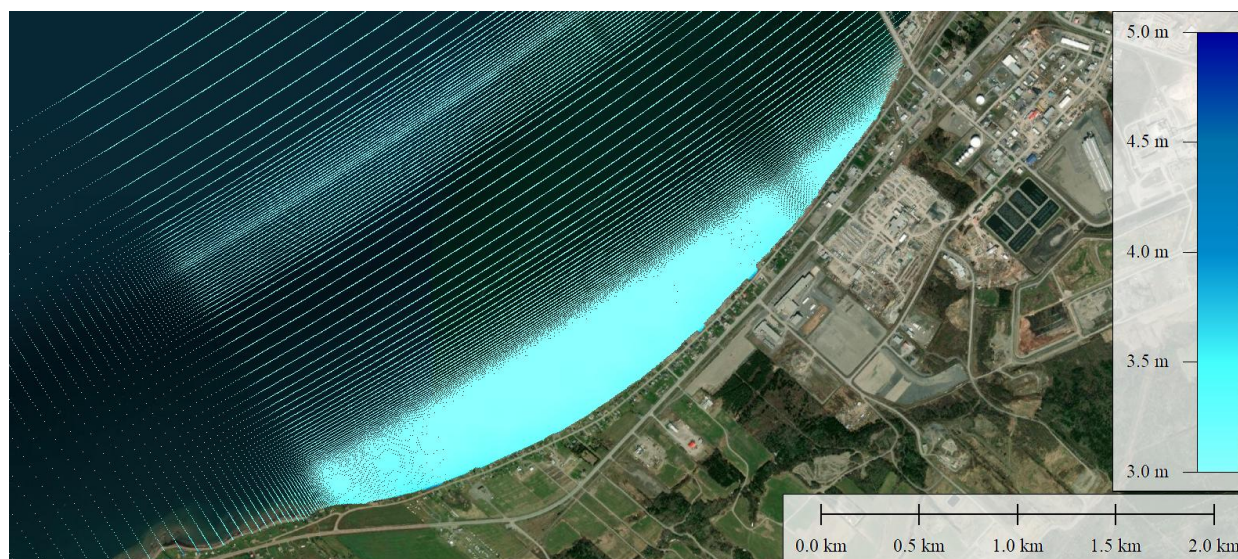


Figure 4.3 : Résultats de modélisation XBeach (2D) de la tempête du 6 décembre 2010 à 19h – Incompatibilité de la méthode de modélisation

4.1.2.2 Présentation des résultats des modèles 1D XBeach-G

Lors du calage, les modèles 1D XBeach-G créés pour 11 profils (transects) ont été ajustés pour représenter la remontée des vagues adéquatement pour les trois événements de tempêtes. Une fois calés, les modèles représentent adéquatement la remontée des vagues sur l'enrochement, ou

sur le haut de talus. La figure 4.4 affiche un exemple des résultats de calage du modèle 1D XBeach-G pour les trois tempêtes étudiées ainsi que les résultats de la modélisation de la submersion sous forme de points géoréférencés. Le jet de rive maximal y est représenté autour du chaînage 500 m, là où se trouve l'enrochement le long du profil.

Par la suite, les résultats de modélisation XBeach-G ont été utilisés pour interpoler l'étendue de la submersion sur l'ensemble du secteur de la rue Matane-sur-Mer (voir la figure 4.5 pour un exemple de la cartographie). Pour produire des étendues de submersion côtière avec des données de modélisation du franchissement de vagues en 1D, des rasters ont été créés avec les données de surface d'élévation maximale modélisée. Puis des rasters d'épaisseur d'eau ont été créés par rapport à un MNT du secteur d'une résolution de 1 x 1 m.

Les résultats des simulations en conditions actuelles représentent une submersion peu profonde. Les résultats de modélisation de la submersion côtière le long des modèles 1D montrent une étendue de la submersion côtière atteignant les propriétés en bordure de mer et la rue Matane-sur-Mer sur 9 transects. L'étendue de la submersion côtière modélisée empiète sur la rue Matane-sur-Mer sur deux transects : celui au chaînage 1834 m et celui au chaînage 3287 m, et ce de manière très peu profonde (< 10 cm).

Lorsque les résultats de submersion sont interpolés entre les transects des modèles 1D, des résultats similaires sont observés, sauf à quelques exceptions où se trouvent des points le long de la rue Matane-sur-Mer et où la submersion atteindrait les terrains du côté sud-est de la rue. À noter que lors du post-traitement des données interpolées pour la cartographie, une marge de 10 cm sur l'épaisseur d'eau est considérée pour distinguer et retirer les zones qui ne sont pas connectées à la zone de submersion. Cet ajustement prend en compte les incertitudes liées au fait que les modèles 1D sont calés sur des données ayant été relevées quelques jours après le passage des tempêtes étudiées. La méthodologie pour le traitement des résultats pour la cartographie de la submersion côtière générée par des modèles 1D est décrite en plus de détails dans un mémo technique partagée le 13 juin 2025 avec le MSP.

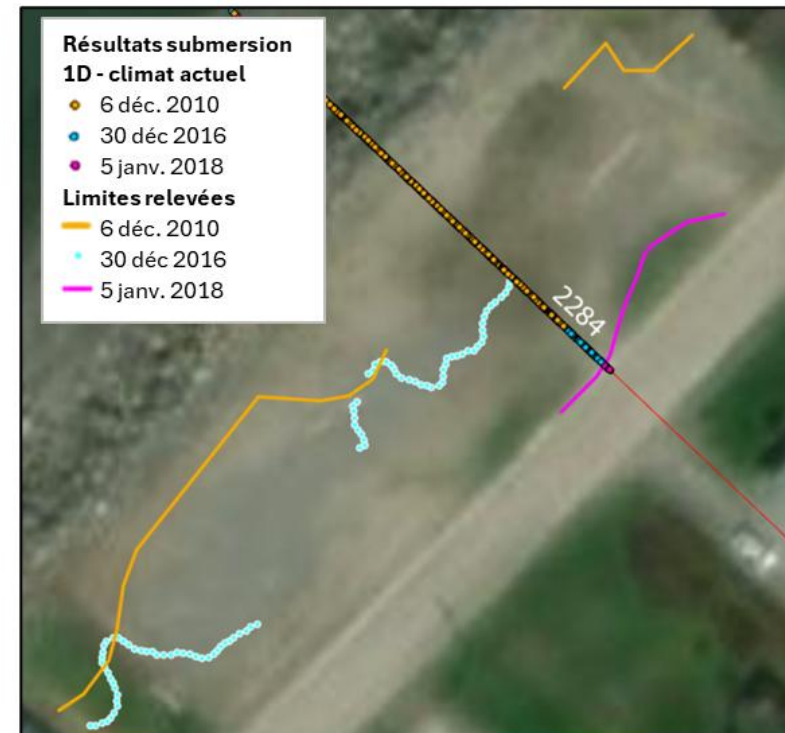
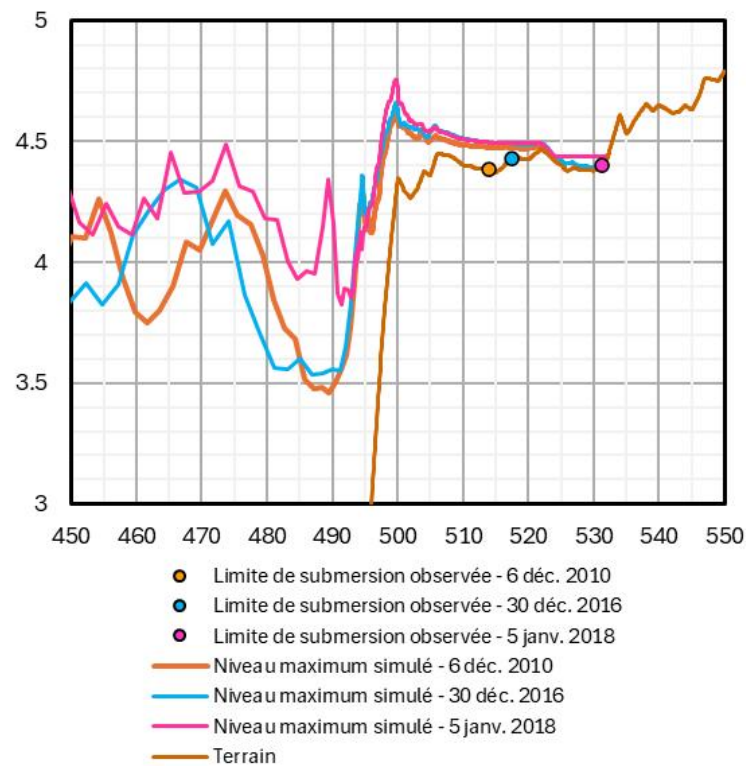


Figure 4.4 : Exemple de résultats de calage d'un modèle 1D XBeach-G – Profil au chaînage 2+284m

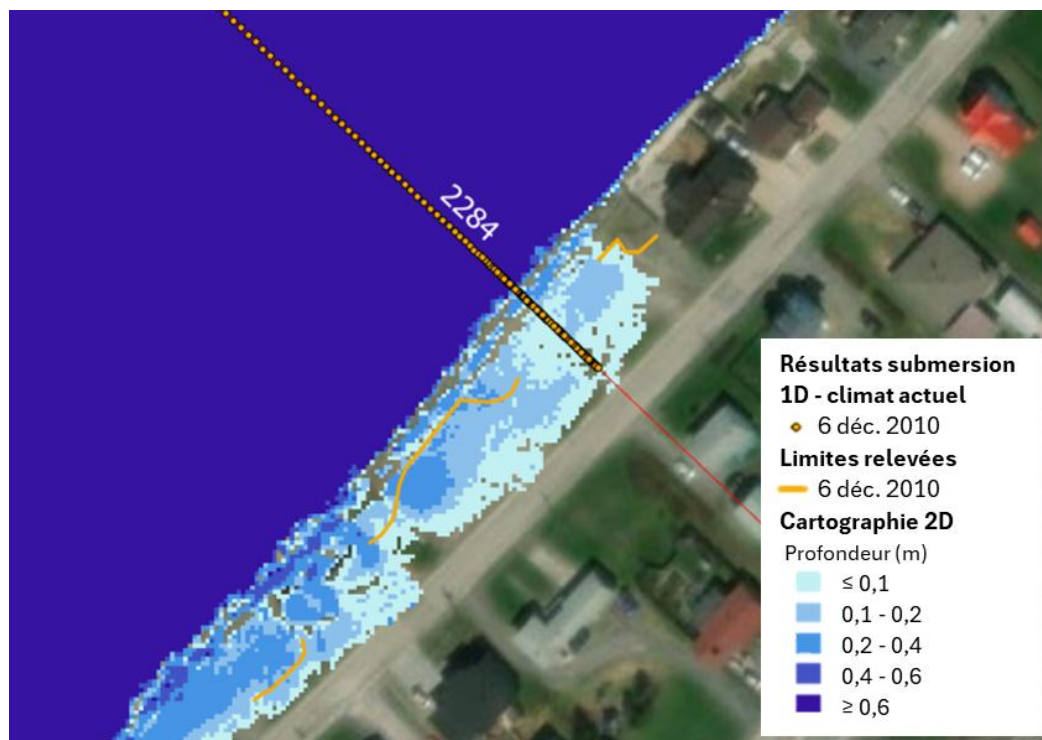


Figure 4.5 : Cartographie des épaisseurs d'eau tirée des résultats de la submersion de l'évènement de tempête du 6 décembre 2010

4.2 Conditions futures

La submersion lors des tempêtes des 6 décembre 2010, 30 décembre 2016 et 5 janvier 2018 a été simulée le long des profils des modèles 1D XBeach-G en climat futur sur deux horizons : 2055 et 2100. Le niveau d'eau en climat futur représente l'élévation du niveau moyen des mers (ENMM SSP5 8,5 Révision 6).

L'étude du scénario considérant le rehaussement de la mer relatif sur l'horizon 2055 fait suite à une demande du MSP pour l'ajout d'un scénario intermédiaire. Sur l'horizon 2055, le scénario simulé correspond à l'élévation du niveau moyen des mers, de + 0,22 m (ENMM SSP5 8,5 Révision 6). Sur l'horizon 2100, les scénarios simulés correspondent à l'élévation du niveau moyen des mers, de + 0,61 m, (ENMM SSP5 8,5 Révision 6).

L'étendue de la submersion côtière augmente dans tous les scénarios climatiques futurs analysés. En climat actuel, les submersions observées lors des trois événements de tempête restent limitées aux propriétés situées directement en bord de mer ainsi qu'à la rue Matane-sur-Mer. À l'horizon 2055, la submersion s'étend davantage, notamment dans le secteur au sud-ouest de la rue Matane-sur-Mer, où la topographie est particulièrement basse. En 2055, l'eau atteint jusqu'à 25 mètres au sud-est de la rue, au niveau du transect localisé au chaînage 173 m.

À l'horizon 2100, les résultats de modélisation révèlent une progression significative de l'emprise de la submersion, affectant les terrains situés au sud-est de la rue Matane-sur-Mer sur une bande s'étendant depuis l'extrémité ouest du secteur jusqu'au chaînage 2000 m. Au niveau du transect au chaînage 173 m, la submersion s'étend alors jusqu'à 50 m au sud-est de la rue Matane-sur-Mer.



Figure 4.6 : Étendue de la submersion – Comparaison climat actuel vs climat futur 2100

5 RISQUES LIÉS À LA SUBMERSION CÔTIÈRE

La submersion côtière, actuellement limitée aux zones en bord de mer et à la rue Matane-sur-Mer, s'étendra progressivement vers l'intérieur des terres dans les scénarios climatiques futurs, et ce surtout au sud-est de la rue dans les secteurs les plus bas du relief

Les inondations côtières pendant les tempêtes présentent des risques importants en raison de la vitesse élevée des courants et des vagues. La submersion peut causer de graves dommages aux structures et créer des conditions dangereuses pour les personnes et les véhicules. En parallèle, les vagues générées par les tempêtes, surtout lorsqu'elles sont projetées sous forme de jet de rive, peuvent frapper de manière répétée et peuvent projeter des débris sur des structures ou sur des personnes.

Un des indicateurs utilisés pour quantifier les risques liés à la submersion côtière est le débit moyen maximal de franchissement. Le débit moyen maximal de franchissement correspond à la valeur maximale du débit moyen de franchissement à un point donné le long des profils (voir figure 5.1). Les valeurs du débit moyen maximal de franchissement sont présentées à deux emplacements, à la crête de l'enrochement/du haut de plage et à la rue Matane-sur-Mer, par profil et pour chaque évènement simulé aux tableaux 5.1 à 5.3 ainsi qu'aux figures 5.2 à 5.4.

Les débits de franchissement simulés peuvent être comparés pour évaluer leur amplitude et le potentiel de danger aux valeurs critiques de franchissement établies dans le Coastal Engineering Manual par le US Army Corps of Engineers (USACE) (2011) présentées à la figure 5.5.

En conditions actuelles, les débits de franchissement (valeur présentée en litre/seconde/mètre) varient de nul à 6,9 L/s/m et n'affectent la route que sur un des transects (celui au chaînage 1834 m). Ceux-ci dépassent le seuil du 1 L/s/m sur 5 des transects modélisés.

Sur l'horizon intermédiaire de 2055, les débits de franchissement augmentent à la crête de l'enrochement, mais le franchissement n'atteint la rue Matane-sur-Mer que sur trois profils, aux chaînages 173, 1834 et 3287 m.

Sur l'horizon 2100, les résultats de simulation montrent une augmentation considérable du débit de franchissement où des dommages structurels importants dans les zones submergées sont fortement probables.

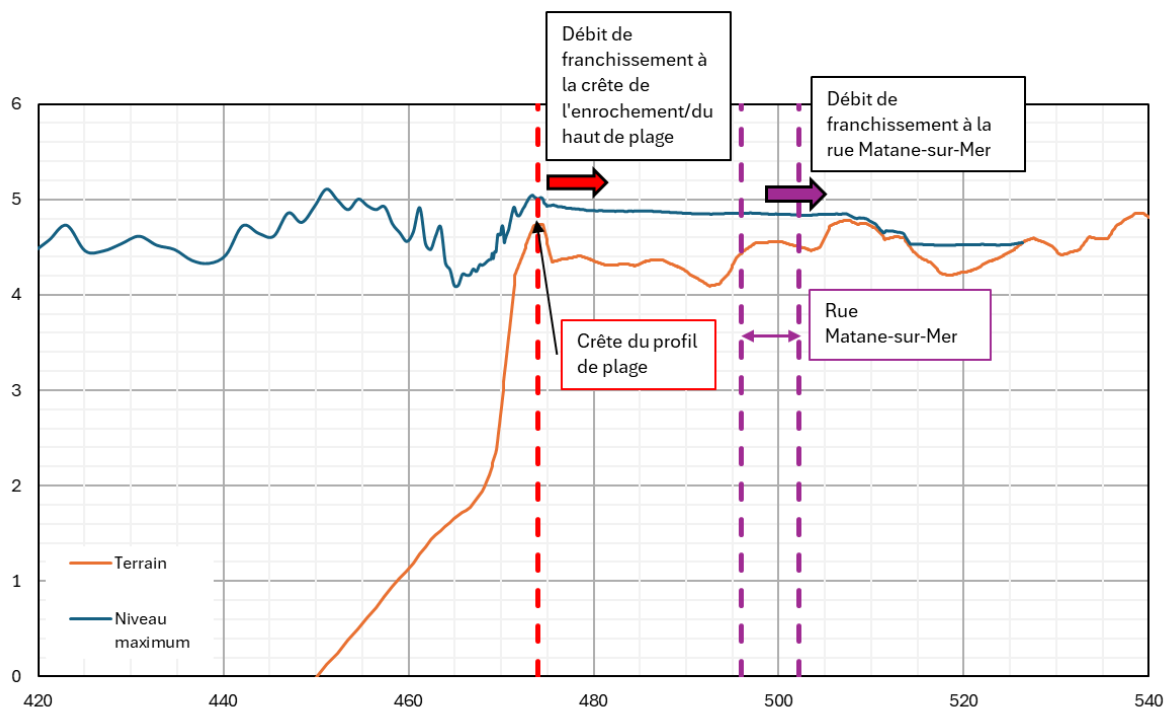


Figure 5.1 : Schéma représentant le franchissement des vagues à la crête d'un des profils (transects) modélisés

Tableau 5.1: Débit moyen maximal de franchissement en climat actuel

Profil	Tempête du 6 décembre 2010			Tempête du 30 décembre 2016			Tempête du 5 janvier 2018		
	Date & Heure (UTC)	Débit moyen (L/s/m)		Date & Heure (UTC)	Débit moyen (L/s/m)		Date & Heure (UTC)	Débit moyen (L/s/m)	
		Crête de l'enrochement / haut de plage	Rue Matane- sur-Mer		Crête de l'enrochement / haut de plage	Rue Matane- sur-Mer		Crête de l'enrochement / haut de plage	Rue Matane- sur-Mer
Ch173	2010-12-06 19h	0.4	0.0	2016-12-30 19h	0.0	0.0	2018-01-05 9h	0.0	0.0
Ch716	2010-12-06 19h	2.6	0.0	2016-12-30 19h	1.8	0.0	2018-01-05 9h	1.5	0.0
Ch977	2010-12-06 19h	0.5	0.0	2016-12-30 19h	0.1	0.0	2018-01-05 9h	0.1	0.0
Ch1260	2010-12-06 19h	0.3	0.0	2016-12-30 19h	0.3	0.0	2018-01-05 9h	0.4	0.0
Ch1834	2010-12-06 19h	1.0	0.4	2016-12-30 19h	1.4	0.6	2018-01-05 9h	1.3	0.7
Ch2284	2010-12-06 19h	1.0	0.0	2016-12-30 19h	1.4	0.0	2018-01-05 9h	3.5	0.0
Ch2510	2010-12-06 19h	0.0	0.0	2016-12-30 19h	0.0	0.0	2018-01-05 9h	0.0	0.0
Ch2789	2010-12-06 19h	1.5	0.0	2016-12-30 19h	2.1	0.0	2018-01-05 9h	6.9	0.0
Ch3287	2010-12-06 19h	0.0	0.0	2016-12-30 21h	1.9	0.0	2018-01-05 9h	2.8	1.0
Ch3532	2010-12-06 19h	0.0	0.0	2016-12-30 21h	0.0	0.0	2018-01-05 9h	0.0	0.0
Ch3701	2010-12-06 19h	0.0	0.0	2016-12-30 21h	0.0	0.0	2018-01-05 9h	0.0	0.0

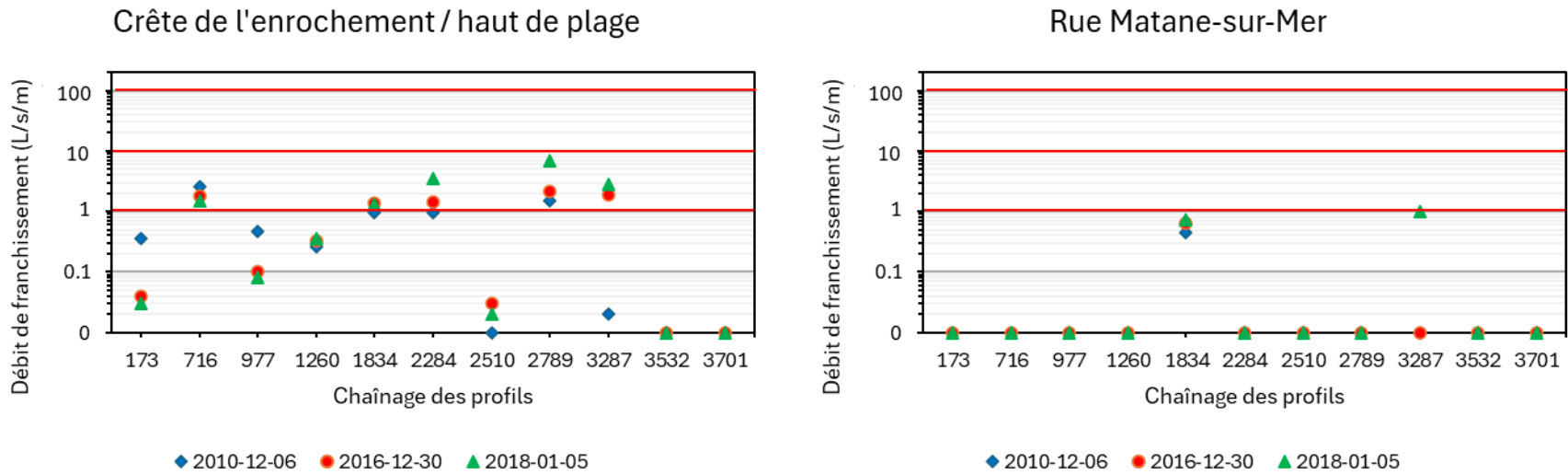


Figure 5.2 : Débit moyen maximal de franchissement en climat actuel

Tableau 5.2: Débit moyen maximal de franchissement en climat futur (2055) avec un rehaussement du niveau de la mer de + 0,22 m (ENMM SSP5 8,5)

Profil	Tempête du 6 décembre 2010			Tempête du 30 décembre 2016			Tempête du 5 janvier 2018		
	Date & Heure (UTC)	Débit moyen (L/s/m)		Date & Heure (UTC)	Débit moyen (L/s/m)		Date & Heure (UTC)	Débit moyen (L/s/m)	
		Crête de l'enrochement / haut de plage	Rue Matane- sur-Mer		Crête de l'enrochement / haut de plage	Rue Matane- sur-Mer		Crête de l'enrochement / haut de plage	Rue Matane- sur-Mer
Ch173	2010-12-06 19h	5.1	3.8	2016-12-30 19h	2.6	1.1	2018-01-05 9h	3.5	1.8
Ch716	2010-12-06 19h	8.6	0.0	2016-12-30 19h	8.1	0.0	2018-01-05 9h	9.2	0.0
Ch977	2010-12-06 19h	3.2	0.0	2016-12-30 20h	0.9	0.0	2018-01-05 9h	1.4	0.0
Ch1260	2010-12-06 19h	2.0	0.0	2016-12-30 19h	2.4	0.0	2018-01-05 9h	3.7	0.0
Ch1834	2010-12-06 19h	4.1	1.9	2016-12-30 19h	5.7	2.5	2018-01-05 9h	8.3	3.4
Ch2284	2010-12-06 19h	3.0	0.0	2016-12-30 19h	4.0	0.0	2018-01-05 9h	9.7	0.0
Ch2510	2010-12-06 19h	0.1	0.0	2016-12-30 19h	0.3	0.0	2018-01-05 9h	0.4	0.0
Ch2789	2010-12-06 19h	4.0	0.0	2016-12-30 19h	4.3	0.0	2018-01-05 9h	15.0	0.0
Ch3287	2010-12-06 19h	0.2	0.0	2016-12-30 21h	5.1	4.1	2018-01-05 9h	6.1	5.3
Ch3532	2010-12-06 19h	0.0	0.0	2016-12-30 21h	0.0	0.0	2018-01-05 9h	0.0	0.0
Ch3701	2010-12-06 19h	0.4	0.0	2016-12-30 21h	0.5	0.0	2018-01-05 9h	0.2	0.0

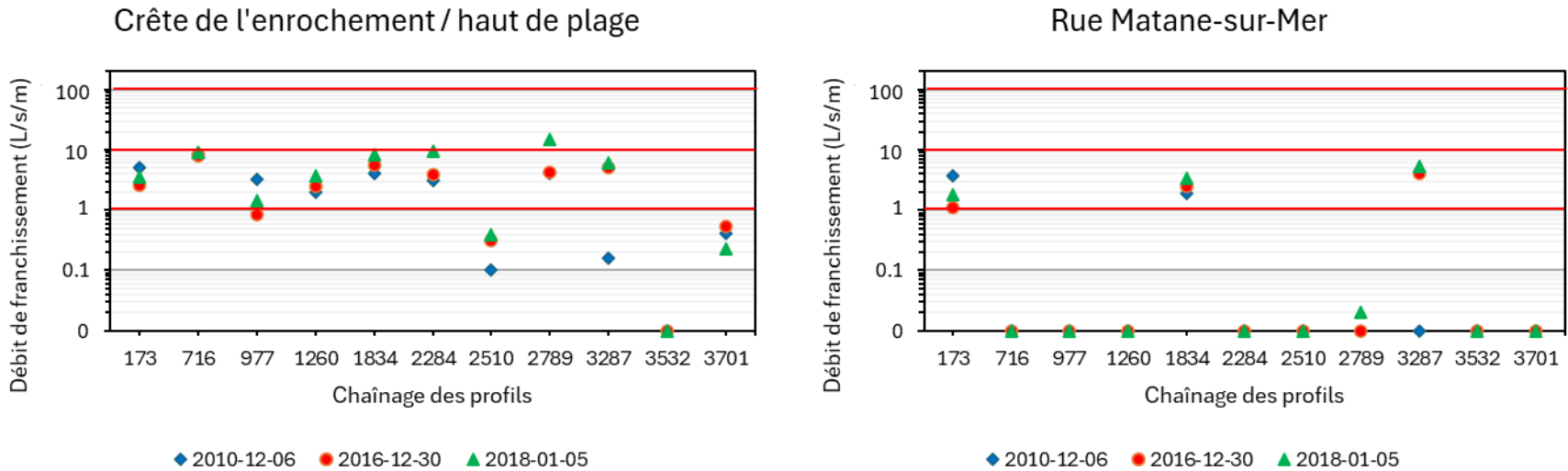


Figure 5.3 : Débit moyen maximal de franchissement en climat futur (2055) avec un rehaussement du niveau de la mer de + 0,22 m (ENMM SSP5 8,5)

Tableau 5.3: Débit moyen maximal de franchissement en climat futur (2100) avec un rehaussement du niveau de la mer de + 0,61 m (ENMM SSP5 8,5)

Profil	Tempête du 6 décembre 2010			Tempête du 30 décembre 2016			Tempête du 5 janvier 2018		
	Date & Heure (UTC)	Débit moyen (L/s/m)		Date & Heure (UTC)	Débit moyen (L/s/m)		Date & Heure (UTC)	Débit moyen (L/s/m)	
		Crête de l'enrochement / haut de plage	Rue Matane- sur-Mer		Crête de l'enrochement / haut de plage	Rue Matane- sur-Mer		Crête de l'enrochement / haut de plage	Rue Matane- sur-Mer
Ch173	2010-12-06 19h	22.4	14.7	2016-12-30 19h	14.1	9.5	2018-01-05 9h	19.3	13.1
Ch716	2010-12-06 19h	33.8	2.8	2016-12-30 19h	33.1	2.7	2018-01-05 9h	41.5	2.7
Ch977	2010-12-06 19h	20.5	0.0	2016-12-30 19h	14.0	0.0	2018-01-05 9h	23.2	0.0
Ch1260	2010-12-06 19h	16.1	0.0	2016-12-30 19h	16.1	0.0	2018-01-05 9h	27.1	0.0
Ch1834	2010-12-06 19h	23.1	11.2	2016-12-30 19h	23.3	11.4	2018-01-05 9h	42.4	19.0
Ch2284	2010-12-06 19h	14.5	0.0	2016-12-30 19h	16.0	0.1	2018-01-05 9h	29.6	0.2
Ch2510	2010-12-06 19h	4.0	0.5	2016-12-30 19h	6.0	1.2	2018-01-05 9h	8.7	1.7
Ch2789	2010-12-06 19h	18.2	0.2	2016-12-30 19h	18.7	0.2	2018-01-05 9h	39.2	1.1
Ch3287	2010-12-06 19h	2.0	0.0	2016-12-30 21h	14.7	14.5	2018-01-05 9h	16.7	16.4
Ch3532	2010-12-06 19h	0.2	0.0	2016-12-30 21h	0.8	0.2	2018-01-05 9h	1.1	0.3
Ch3701	2010-12-06 19h	14.9	0.0	2016-12-30 21h	10.9	0.0	2018-01-05 9h	6.2	0.0

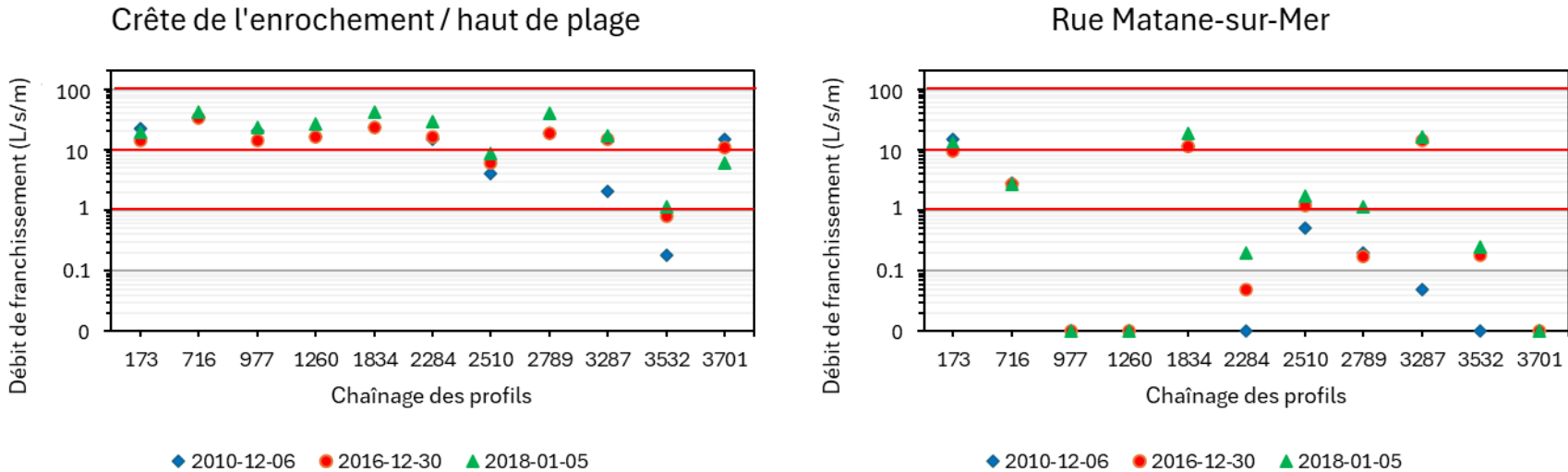


Figure 5.4 : Débit moyen maximal de franchissement en climat futur (2100) avec un rehaussement du niveau de la mer de + 0,61 m (ENMM SSP5 8,5)

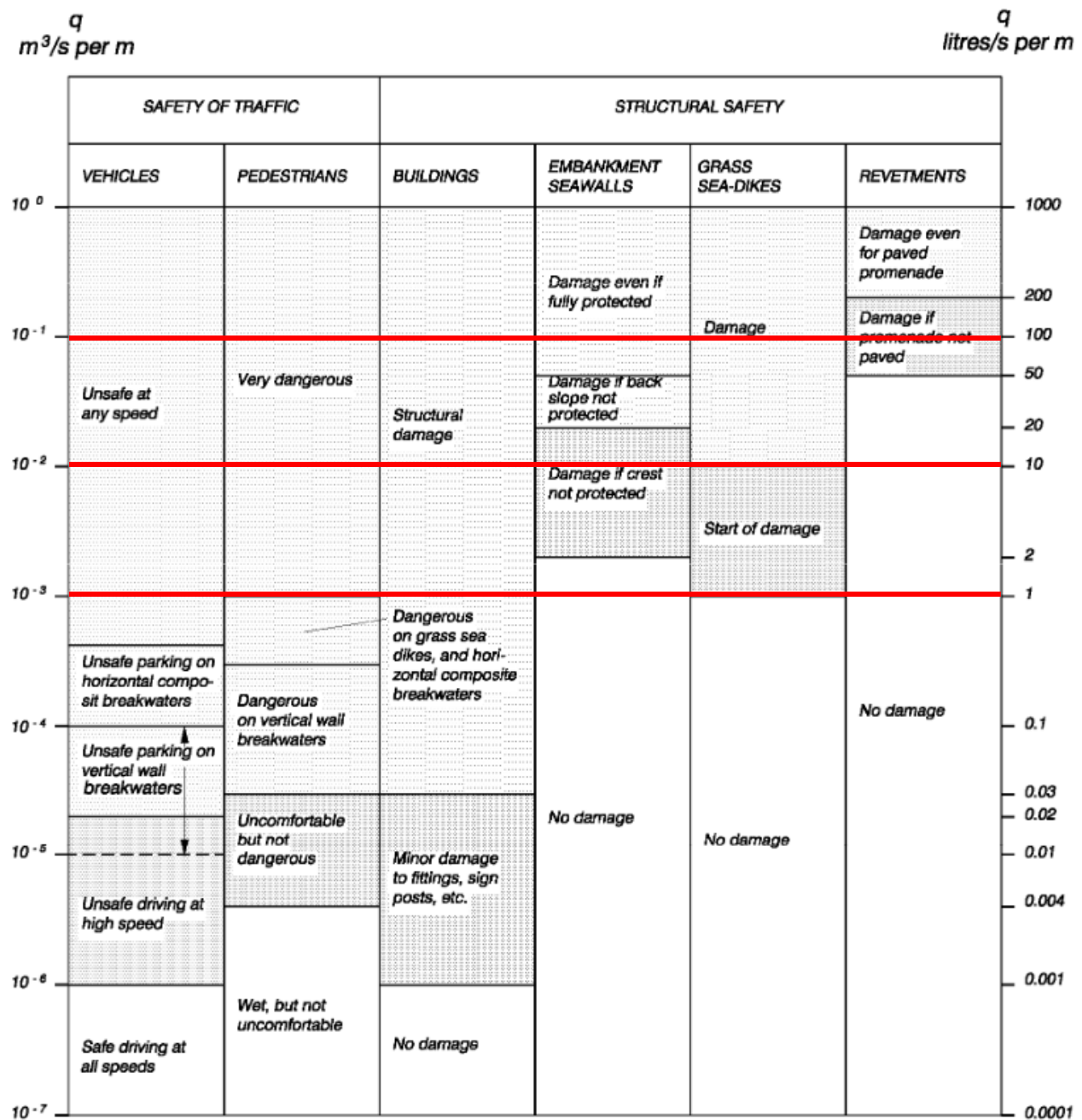


Figure 5.5 : Valeurs critiques des débits de franchissement (USACE, 2011)

6 CONCLUSION

Afin d'appuyer la démarche d'appréciation des risques côtiers du secteur de Matane-sur-Mer, la Ville de Matane a mandaté LNI pour la modélisation de la submersion côtière du secteur. Plus spécifiquement, cette étude a pour but de caractériser les processus menant à la submersion côtière ainsi que de définir l'étendue des zones submergées en climats actuel et futur.

La première étape était le montage des modèles numériques de terrain (MNT) nécessaires pour modéliser la génération de vagues au large de Matane et la transformation des vagues jusqu'au secteur de Matane-sur-Mer. L'ensemble des données disponibles (Lidar et relevés bathymétriques) a été utilisé pour le montage d'un modèle global (MIKE), d'un modèle local (XBeach) et de modèles 1D XBeach-G.

La deuxième étape était la caractérisation et l'analyse du climat maritime à Matane-sur-Mer. Des analyses statistiques de données de vagues et de niveaux d'eau ont été réalisées pour obtenir les périodes de retour d'événements de tempête marquants. Trois tempêtes ont été identifiées pour procéder à l'analyse de submersion, la tempête du 6 décembre 2010, celle du 30 décembre 2016 et celle du 5 janvier 2018. Le scénario conservateur SSP5 8,5 (Rév. 6) a été retenu pour projeter le rehaussement du niveau moyen de la mer et son effet sur la submersion côtière à Matane-sur-Mer. Deux horizons temporels ont été étudiés, 2055 et 2100.

La troisième étape était de définir l'étendue de la submersion côtière. À Matane-sur-Mer, le mécanisme principal de la submersion côtière est le jet de rive, ce qui a imposé une modélisation à l'aide de modèles 1D XBeach-G utilisant une formulation non-hydrostatique permettant la résolution des vagues de courtes périodes (*phase-resolving*), et a exclu la modélisation 2D de la submersion côtière à l'aide de XBeach avec une formulation surf-beat (résolution des vagues infragravitaires de longue période). L'étendue de la submersion côtière a été interpolée entre les 11 transects XBeach-G.

La quatrième étape consistait à analyser les risques de submersion côtière en fonction du débit de franchissement et des vitesses maximales atteintes à l'enrochement, ou au haut de talus, et au niveau de la rue Matane-sur-Mer.

Pour la caractérisation et l'étendue de la submersion côtière, les résultats des simulations en conditions actuelles montrent une submersion côtière peu profonde, principalement limitée aux zones en bordure de mer. La submersion modélisée atteint la rue Matane-sur-Mer sur deux transects (aux chaînages 1834 m et 3287 m), avec une épaisseur d'eau inférieure à 10 cm. Sur un total de neuf transects, les propriétés directement sur la côte sont exposées à la submersion. À l'horizon 2055, la submersion côtière s'étend davantage, en particulier dans les zones basses au sud-ouest de la rue Matane-sur-Mer. À l'horizon 2100, cette emprise progresse significativement, affectant une large bande de terrain au sud-est de la rue entre l'extrémité ouest du secteur et le chaînage 2000 m.

Les risques liés à la submersion côtière ont été évalués en fonction du débit moyen maximal de franchissement. En conditions actuelles, les débits de franchissement varient de nul à 6,9 L/s/m,

dépassant le seuil de 1 L/s/m sur cinq transects, mais n'affectant la route et les résidences situées directement sur la côte que sur celui situé au chaînage 1834 m. À l'horizon 2055, les débits augmentent à la crête de l'enrochement, avec un franchissement atteignant la rue Matane-sur-Mer sur trois profils (chaînages 173, 1834 et 3287 m). D'ici 2100, les simulations prévoient une hausse marquée des débits de franchissement, rendant probables des dommages structurels majeurs dans les zones exposées à la submersion. Il est important de noter que les risques sont présentés ici de manière très générale et que l'étude de risque à proprement parler n'était pas incluse dans le présent mandat, celle-ci sera effectuée par la MSP sur la base, entre autres, des résultats obtenus dans le cadre de la présente étude.

7 RÉFÉRENCES

- Didier, D. (2014). *Évaluation de la submersion côtière l'estimation in situ du wave run-up sur les côtes basses du Bas-Saint-Laurent, Québec* [UQAR].
https://semaphore.uqar.ca/id/eprint/1041/1/David_Didier_septembre2014.pdf
- Dufresne, L. (2018, janvier 9). Une vingtaine d'évacuations à Matane-sur-Mer. *TVA Nouvelles*.
<https://www.tvanouvelles.ca/2018/01/09/une-vingtaine-devacuations-a-matane-sur-mer>
- G. Poate, T., T. McCall, R., & Masselink, G. (2016). *A new parameterisation for run-up on gravel beaches*. Poate et al (2016) - A New Parameterisation for Run-up on Gravel Beaches.pdf.
- McCall, R. T. (2015). *Process-based modelling of storm impacts on gravel coasts*. Process-basedModellingOfStormImpactsOnGravelCoasts.pdf.
- Neumeier, U. et al. (2013). Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques. Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec.
- Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, septembre 2013
- oldtruck (Réalisateur). (2017, janvier 1). *Matane tempête 30 décembre 2016* [Video recording]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=hFbEZdGHhQ8>
- Pêches et Océans Canada (MPO), Outil canadien d'adaptation aux niveaux d'eau extrêmes (OCANEE). [En ligne]. Disponible sur: <https://www.dfo-mpo.gc.ca/science/oceanography-oceanographie/accasp-psaccma/can-ewlat-ocanee/index-fra.html>
- Radio-Canada (5 janvier 2018). De la glace catapultée dans les maisons par la mer à Matane. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1076388/de-la-glace-catapultee-dans-les-maisons-par-la-mer-a-matane>
- Radio-Canada (6 janvier 2018). Après la tempête, place au nettoyage à Matane et Chandler. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1076586/tempete-dommages-chandler-matane>
- US Army Corps of Engineers (2011), *Coastal Engineering Manual* (Change 3).