Réaménagement des installations portuaires de Matane

Étude d'impact sur l'environnement
Volume 4 - Annexe J - Partie 2

Société portuaire du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie (SPBSG)
Version finale
N° de référence (client) : 40-2223-001/002/004

Juillet 2026
16-02301790.000-0400-EN-R-0200-00

Société portuaire du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie (SPBSG)
No de référence (client) : 40-2223-001/002/004

Préparé par :



Annie Bérubé, biol.
Chargée de projet
Englobe – Études environnementales et changements climatiques

Annie Taillon, biogéographe, M. Sc. Eau
Chargée de projet
Norda Stelo – Environnement

Vérifié et approuvé par :



Martin Fleury, ing.
Chef de projet
OIQ membre nº : 130048
Englobe – Études environnementales et changements climatiques



Stéphan Ferrero, ing.
Directeur de projet
OIQ membre nº : 121171
Norda Stelo – Génie côtier et portuaire

Équipe de réalisation

Société portuaire du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie (SPBSG)

Chargés de projet	Caroline Ratté, directrice de l'environnement et du développement durable David Parent, ingénieur, directeur des infrastructures portuaires

Norda Stelo | Englobe Corp.

Chargé de projet	Stéphan Ferrero, ingénieur
Coordonnatrice en environnement	Catherine Lalumière, biologiste, MBA
Coordonnatrice adjointe en environnement	Annie Taillon, biogéographe, M. Sc. Eau
Responsables de disciplines	Annie Bérubé, biologiste Daniel Plourde, spécialiste en environnement social Martin Fleury, ingénieur
Collaborateurs	Aline Cobut, ingénieure PRT (permis restrictif temporaire), Ph. D. André Boilard, ingénieur, MBA Anne-Sophie Colombani, B. Sc. Arnaud Ducastel, ingénieur Benoît Proulx, archéologue, Ph. D. Carolanne Blanchet, ingénieur Caroline Bureau, biologiste, M. Env. Catherine Vallières, biologiste, M. Sc. Cédric Sirois, géographe, M. Sc. Chanèle Poirier, biogéographe, M. Sc. Env. Clément Mortier, géomorphologue, M. Sc. Gabrielle Trottier, biologiste, Ph. D. Marie-Andrée Burelle, anthropologue Myriam Goulet, M. Sc. Myriam Huard, biologiste, DESS Patrick Desaulniers, ingénieur Sarah-Claude Lachance, biologiste, M. Sc. Vincent Kiepura, spéc. en environnement social Yannick Cordon, ingénieur
Cartographie/SIG	Manuel Pronovost, géomaticien, B. Sc. Philippe Lemieux, géomaticien, M. Sc.
Édition	Julie Korell, réviseure, B.A.

Sous-traitants

Groupe Lasalle|NHC	Benoît Ruest, ingénieur Nicolas Guillemette, ingénieur
Créa-Sphère	Martin Aubé, Ph. D.
Sensea Canada	Cédric Gervaise, Ph. D.
Table ronde Participation publique	Hugo Mimee, professionnel de la participation publique Isabel T. Dion, analyste-rédactrice en participation publique

Registre des révisions et émissions

Nº DE RÉVISION	DATE	DESCRIPTION
0A	Mai 2025	Émission de la version préliminaire pour commentaires
0B	Septembre 2025	Émission de la version pré-finale
0B	Avril 2026	Émission de la version pré-finale
00	Juillet 2026	Émission version finale

Propriété et confidentialité

« Ce document est destiné exclusivement aux fins qui y sont mentionnées. Toute utilisation du rapport doit prendre en considération l'objet et la portée du mandat en vertu duquel le rapport a été préparé ainsi que les limitations et conditions qui y sont spécifiées et l'état des connaissances scientifiques au moment de l'émission du rapport. Le Consortium Norda Stelo/Englobe ne fournit aucune garantie ni ne fait aucune représentation autre que celles expressément contenues dans le rapport.

Ce document est l'œuvre du Consortium Norda Stelo/Englobe. Toute reproduction, diffusion ou adaptation, partielle ou totale, est strictement prohibée sans avoir préalablement obtenu l'autorisation écrite du Consortium Norda Stelo/Englobe et de son Client. Pour plus de certitude, l'utilisation d'extraits du rapport est strictement interdite sans l'autorisation écrite du Consortium Norda Stelo/Englobe et de son Client, le rapport devant être lu et considéré dans sa forme intégrale.

Aucune information contenue dans ce rapport ne peut être utilisée par un tiers sans l'autorisation écrite du Consortium Norda Stelo/Englobe et de son Client. Le Consortium Norda Stelo/Englobe se dégage de toute responsabilité pour toute reproduction, diffusion, adaptation ou utilisation non autorisée du rapport.

Si des essais ont été effectués, les résultats de ces essais ne sont valides que pour l'échantillon décrit dans le présent rapport.

Les sous-traitants du Consortium Norda Stelo/Englobe qui auraient réalisé des travaux au chantier ou en laboratoire sont dûment évalués selon la procédure relative aux achats de notre système qualité. Pour toute information complémentaire ou de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec votre chargé de projet. »



Réaménagement des installations portuaires de Matane

Évaluation du climat maritime, des conditions d'agitation, de la dynamique hydrosédimentaire et réfection du brise-lame ouest

Rapport No. R0561

Préparé pour :

Norda Stelo
1225 Boulevard Champlain,
Québec, Québec G1K 0A2

Préparé par :

Lasalle NHC Inc.
5600 Boulevard des Galeries
Québec, QC, G2K 2H6
www.lablasalle.com

Contact du projet NHC :
Nicolas Guillemette, Ing., M.Sc.
Associé principal
nguillemette@lasallenhc.com

11 décembre 2024
Rapport final

NHC Référence 08008098

Suivi du document

Date	Revision No.	Révisé par	Émis par
22-12-2023	1 – préliminaire 60 %	Nicolas Guillemette	Nicolas Guillemette
13-06-2024	2 – préliminaire 80 %	Nicolas Guillemette	Nicolas Guillemette
25-07-2024	3 – préliminaire 99 %	Nicolas Guillemette	Nicolas Guillemette
25-09-2024	4 – préfinal	Nicolas Guillemette	Nicolas Guillemette
11-12-2024	5 - final	Nicolas Guillemette	Nicolas Guillemette

Rapport préparé par :



Justin Mckibbon, ing., M.Sc.
Lasalle|NHC
No OIQ: 5000352



Benoit Ruest, ing., M.Sc.
Lasalle|NHC
No OIQ: 5054787

Rapport révisé par:



Nicolas Guillemette, ing., M.Sc.
Lasalle|NHC
No OIQ: 146393

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 **Norda Stelo** et de leurs représentants autorisés dans le cadre spécifique du projet de réaménagement des installations portuaires de Matane

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 **Norda Stelo**.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES III

LISTE DES TABLEAUX V

LISTE DES FIGURES VI

1 INTRODUCTION 1
1.1 Contexte du projet 1
1.2 Localisation et description du site 1
1.3 Objectifs 2

2 CARACTÉRISATION DU CLIMAT MARITIME 4
2.1 Intrants et données disponibles 4
2.1.1 Bathymétrie et topographie 4
2.1.2 Échantillonnage et caractéristiques des sédiments sur le fond marin 6
2.2 Niveau d'eau 6
2.2.1 Caractéristiques de la marée 6
2.2.2 Niveaux d'eau extrêmes – climat actuel 2023 7
2.2.3 Niveau d'eau extrêmes – climat futur 9
2.3 Régime des vagues au large 10
2.4 Régime des vagues à proximité du havre portuaire de Matane 14
2.5 Principaux évènements de tempêtes historiques 16
2.6 Courantométrie 17
2.7 Régime des glaces 19

3 RÉFECTION ET RECONSTRUCTION DU BRISE-LAME OUEST 21
3.1 État de l'ouvrage existant 21
3.1.1 Ouvrage original 21
3.2 Études et travaux de réfection antérieurs 24
3.3 Inspection visuelle 2023 27
3.3.1 Segment 1 (chemin d'accès) 28
3.3.2 Segment 2 (Guérite et bureau) 29
3.3.3 Segment 3 (Entrepôt) 30
3.3.4 Segment 4 (Quai nord) 31
3.3.5 Segment 5 (Brise-lame, pierres) 32
3.3.6 Segment 6 (Brise-lame, tétrapodes) 33
3.3.7 Segment 7 (Brise-lame, musoir) 34
3.4 Vulnérabilité au franchissement par les vagues 35
3.4.1 Méthodologie et seuils recommandés 35
3.4.2 Vulnérabilité de l'ouvrage existant 36
3.5 Interventions recommandées et programme de suivi 39
3.5.1 Chemin d'accès, guérite, bureau et entrepôt (segments 1 à 3) 39
3.5.2 Quai nord (segment 4) 46
3.5.3 Brise-lame (segments 5 à 7) 49

4 CONDITIONS D'AGITATION DANS LE HAVRE 50
4.1 Contexte et objectifs 50
4.1.1 Géométries retenues 50
4.1.2 Navires de conception 51
4.1.3 Conditions d'agitation configuration existante 52
4.1.4 Critères d'agitation 53
4.1.5 Polygones d'extraction des résultats d'agitation 53
4.2 Modèle d'agitation 54
4.2.1 Stratégie de modélisation 54
4.2.2 Mise en œuvre du modèle 54
4.2.3 Scénarios modélisés 55
4.3 Résultats de modélisation de l'agitation 57
4.4 Discussion et recommandations 63

5 MODÉLISATION HYDROSÉDIMENTAIRE DE LA QUALITÉ D'EAU DURANT LES ACTIVITÉS DE DRAGAGE 65
5.1 Approche de modélisation 65
5.1.1 Modélisation hydrodynamique 65
5.1.2 Modélisation de la dispersion des sédiments en suspension 68
5.2 Intrants et hypothèses 70
5.2.1 Caractéristiques des sédiments dragués 70
5.2.2 Paramètres d'opération retenus (dragage mécanique ou hydraulique) 72
5.3 Critères de qualité d'eau à respecter 76
5.4 Scénarios de modélisation retenus (cas défavorables) 76
5.5 Résultats de modélisation du panache de dilution et de dispersion des sédiments en suspension 79
5.5.1 Dilution et dispersion des sédiments en suspension associés au dragage à l'intérieur du havre de Matane (secteur quai et secteur entrée) 80
5.5.2 Dilution et dispersion des sédiments en suspension associés au relargage des sédiments dragués au site d'immersion au large de Matane 82

6 MODÉLISATION HYDROSÉDIMENTAIRE DES PATRONS D'ÉROSION ET DE SÉDIMENTATION À L'INTÉRIEUR DU HAVRE 87
6.1 Objectifs et hypothèses 87
6.2 Historique de sédimentation et de dragage du havre de Matane 88
6.3 Patrons d'érosion/sédimentation en conditions existantes 93
6.3.1 Modèle GAIA 93
6.3.2 Paramétrisation et calibration 94
6.4 Patrons d'érosion/sédimentation en conditions projetées 96

7 SOMMAIRE DES RÉSULTATS D'ANALYSE ET DES IMPACTS DU RÉAMÉNAGEMENT DES INSTALLATIONS PORTUAIRES DANS LE HAVRE DE MATANE 99
Régime hydrodynamique et dynamique des glaces à l'intérieur du havre 99
Réfection du brise-lame ouest 100
Conditions d'agitation à l'intérieur du havre 101

Évaluation de la qualité de l'eau durant les opérations de dragage (havre et site d'immersion) 102
Caractérisation de la dynamique sédimentaire et de l'effort en dragage d'entretien à l'intérieur du havre 103

8 RÉFÉRENCES 105

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Niveaux caractéristiques de la marée à Matane (MPO, 2021). 7
Tableau 2-2 Niveaux d'eau extrêmes pour Matane, climat actuel 2024 (m, ZC) 9
Tableau 2-3 Rehaussement relatif du niveau moyen des mers incluant l'allocation verticale pour le secteur de Matane (outil Can-EWLAT, Zhai et al. 2023) 9
Tableau 2-4 Niveaux d'eau extrêmes pour Matane, climat futur (m, ZC) 10
Tableau 3.1 Seuils de franchissement proposés par le manuel EurOtop (2018) 36
Tableau 3.2 Débits et volumes de franchissement extrêmes estimés sur l'ouvrage existant en climat actuel et futur (2070) et limites de franchissement recommandées 38
Tableau 3.3 Débits et volumes de franchissement extrêmes anticipés pour les coupe-types A, B, C et D 42
Tableau 3.4 Paramètres de conception considérés pour le dimensionnement des pierres et calibres recommandés sur les coupe-types A, B, C et D 43
Tableau 3.5 Débits et volumes de franchissement extrêmes anticipés pour la coupe-type E 47
Tableau 3.6 Paramètres de conception considérés pour le dimensionnement des pierres et calibres recommandés sur la coupe-type E 48
Tableau 4-1 Polygones d'extraction des résultats d'agitation des vagues à l'intérieur du havre de Matane 54
Tableau 4-2 Scénarios de vagues modélisés avec le modèle ARTEMIS 56
Tableau 4-3 Comparaison des conditions d'agitation au quai commercial (quais 1 et 2) en conditions existantes et pour les différentes configurations de quai par rapport aux critères retenus 61
Tableau 4-4 Comparaisons des conditions d'agitation locales pour les autres secteurs d'intérêt en conditions existantes et pour les différentes configurations de quai étudiées en conditions projetées. 62
Tableau 5-1 Granulométrie des sédiments dragués 71
Tableau 5-2 Paramètres physiques du milieu 72
Tableau 5-3 Paramètres de modélisation selon les méthodes de dragage mécanique et hydraulique 73
Tableau 5-4 Paramètres de modélisation STFATE associés au relargage des sédiments 74
Tableau 5-5 Paramètres de modélisation PSED pour le relargage des sédiments 76
Tableau 5-6 Liste de scénarios de modélisation hydrosédimentaire pour les travaux de dragage dans le havre de Matane 78
Tableau 5-7 Liste de scénarios de modélisation hydrosédimentaire pour le relargage des sédiments dragués au site d'immersion localisé au large du havre de Matane 78

Tableau 6-1 Liste des relevés bathymétriques historiques utilisés pour évaluer les taux de sédimentation/érosion à l'intérieur du havre de Matane 91

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Localisation des installations portuaires de Matane et des différents usagers présents dans le havre 2
Figure 2-1 Bathymétrie du havre de Matane et des zones adjacentes 4
Figure 2-2 Bathymétrie de la zone de relargage des sédiments dragués au large de Matane 5
Figure 2-3 Relevé Lidar 2022 des infrastructures portuaires de Matane, Pascal Mercier, arpenteur géomètre 5
Figure 2-4 Localisation des stations d'échantillonnage tel que relevé par Englobe (2023) 6
Figure 2-5 Exemple du modèle global de surcote développé par Lasalle|NHC – évènement de tempête Dorian, 2019-09-08 7
Figure 2-6 Validation des niveaux d'eau du modèle global de Lasalle|NHC avec les marégraphes de Rimouski et Saint-Anne-des-Monts 8
Figure 2-7 Courbe classée des niveaux d'eau historiques à Matane (1980-2023) 8
Figure 2-8 Modèle global de génération des vagues 1980-2023 (Lasalle|NHC, 2023) 11
Figure 2-9 Validation des hauteurs de vagues obtenues du modèle de Lasalle|NHC par rapport aux données mesurées à la bouée de Saint-Ulric (UQAR) 11
Figure 2-10 Validation des périodes de vagues obtenues du modèle de Lasalle|NHC par rapport aux données mesurées à la bouée de Saint-Ulric 12
Figure 2-11 Validation des directions de vagues obtenues du modèle global Mike 21 SW de Lasalle|NHC par rapport aux données mesurées à la bouée de Saint-Ulric 13
Figure 2-12 Modèle Mike 21 SW de propagation des vagues du large vers le havre portuaire de Matane 14
Figure 2-13 Roses des vagues et hauteurs de vagues extrêmes obtenues au large et à l'entrée du havre de Matane 15
Figure 2-14 Roses des vagues et hauteurs de vagues extrêmes obtenues le long du brise-lame ouest 16
Figure 2-15 Périodes de retour combinées des tempêtes de 2010, 2016 et 2022 17
Figure 2-16 Courants de marée générés dans le havre de Matane par une marée montante de vives- eaux – existant vs configuration B14 18
Figure 2-17 Courants de marée générés dans le havre de Matane par une marée descendante de vives-eaux – existant vs configuration B14 18
Figure 2-18 Exemple des ridges et des floes formant le charriot à l'embouchure du port de Matane 20
Figure 3-1 Conception originale du brise-lame ouest – Vue en plan - extrait des plans « tel que construit » (Ménard, Marsan & Thibeault, 1970) 22
Figure 3-2 Conception originale du brise-lame ouest – Coupe-types - extrait des plans « tel que construit » (Ménard, Marsan & Thibeault, 1970) 24
Figure 3-3 Localisation approximative des rangs de blocs en « Y » placés en 1981 pour rehausser la crête du brise-lame 25
Figure 3-4 Localisation des travaux de réfection effectués en 2008 26

Figure 3-5 Coupe-type de la réparation du tronc (extrait des plans « tel que construit », Baird, Consultants Ropars Inc. & CIMA+, 2009) 27
Figure 3-6 Segmentation des zones homogènes identifiées sur le brise-lame ouest..... 28
Figure 3-7 Profil transversal de l'enrochement ouest le long du segment 01 (Chemin d'accès) 29
Figure 3-8 Localisation de la rangée supplémentaire de grosses pierres sur l'accotement du chemin d'accès..... 29
Figure 3-9 Profil transversal de l'enrochement ouest le long du segment 02 (Guérite et bureau)..... 30
Figure 3-10 Profil transversal de l'enrochement ouest le long du segment 03 (Entrepôt) 31
Figure 3-11 Profil transversal de l'enrochement le long du segment 04 (Quai nord) 32
Figure 3-12 Profil transversal du brise-lame le long du segment 05 (Brise-lame, pierres)..... 33
Figure 3-13 Localisation des déficiences observées en crête et sur le parement extérieur du brise-lame 34
Figure 3-14 Profil transversal du brise-lame le long du segment 06 (Brise-lame, tétrapodes) 34
Figure 3-15 Profil transversal du brise-lame le long du segment 07 (Brise-lame, musoir)..... 35
Figure 3-16 Coupe-type A recommandée pour la réfection de l'enrochement sur les segments 1 et 2 40
Figure 3-17 Coupe-type B recommandée pour la réfection de l'enrochement sur le segment 3..... 40
Figure 3-18 Coupe-type C recommandée pour la construction de l'enrochement ceinturant l'agrandissement de la zone d'entreposage proposé..... 41
Figure 3-19 Coupe-type D recommandée pour la construction de l'enrochement ceinturant l'agrandissement de la zone d'entreposage proposé..... 41
Figure 3-20 Enrochement ouest : Zones de réfection recommandées (sans agrandissement de l'aire d'entreposage)..... 44
Figure 3-21 Enrochement ouest : Zones de réfection recommandées (avec agrandissement de l'aire d'entreposage)..... 45
Figure 3-22 Coupe-type E recommandée pour la réfection de l'enrochement sur le segment 4..... 46
Figure 4-1 Comparaison des géométries de quai B17 et B16 – conditions post-travaux..... 51
Figure 4-2 Navire de conception Quebec Arcturus (vraquier)..... 52
Figure 4-3 Navire de conception Bow Master (navire-citerne) 52
Figure 4-4 Géométrie et maillage du modèle ARTEMIS pour le Havre de Matane - conditions existantes..... 55
Figure 4-5 Comparaison des hauteurs de vagues dépassées 12 heures par année (critère Hs ≤ 1,0 m) à l'intérieur du havre de Matane en conditions existantes et pour les géométries de quai B4, B14 et B16..... 58
Figure 4-6 Comparaison des hauteurs de vagues dépassées 72 heures par année (critère Hs ≤ 0,8 m) à l'intérieur du havre de Matane en conditions existantes et pour les géométries de quai B4, B14 et B16..... 59
Figure 4-7 Comparaison des hauteurs de vagues dépassées 144 heures par année (critère Hs ≤ 0,6 m) à l'intérieur du havre de Matane en conditions existantes et pour les géométries de quai B4, B14 et B16..... 60
Figure 5-1 Domaine de calcul complet du modèle hydrodynamique TELEMAC-2D..... 66
Figure 5-2 Bathymétrie du modèle hydrodynamique TELEMAC-2D dans la zone d'étude (havre de Matane, site d'immersion et embouchure de la rivière Matane)..... 67

Figure 5-3 Comparaison des niveaux d'eau mesurés (SHC) aux stations marégraphiques de Rimouski et de Sept-Îles avec les niveaux d'eau modélisés avec le modèle TELEMAC-2D (T2D) 68
Figure 5-4 Comportement des sédiments relargués en eau libre (source : Moritz, 1994) 70
Figure 5-5 Distribution verticale de la masse de sédiments en suspension dans la colonne d'eau suivant un relargage unique tel qu'évalué par le modèle STFATE selon le type de dragage et le type de marée 75
Figure 5-6 Position des sites de dragage et d'immersion retenus pour les scénarios de modélisation 79
Figure 5-7 Maximum de la moyenne géométrique sur 6 heures de l'augmentation des concentrations de sédiments en suspension associée au dragage mécanique dans le secteur du quai 81
Figure 5-8 Maximum de la moyenne géométrique sur 6 heures de l'augmentation des concentrations de sédiments en suspension associée au dragage hydraulique dans le secteur du quai 81
Figure 5-9 Maximum de la moyenne géométrique sur 6 heures de l'augmentation des concentrations de sédiments en suspension associée au dragage mécanique dans le secteur de l'entrée du havre 82
Figure 5-10 Maximum de la moyenne géométrique sur 6 heures de l'augmentation des concentrations de sédiments en suspension associée au dragage hydraulique dans le secteur de l'entrée du havre 82
Figure 5-11 Maximum de la moyenne géométrique sur 6 heures de l'augmentation des concentrations de sédiments en suspension associée au relargage au site d'immersion des sédiments dragués mécaniquement 84
Figure 5-12 Maximum de la moyenne géométrique sur 6 heures de l'augmentation des concentrations de sédiments en suspension associée au relargage au site d'immersion des sédiments dragués hydrauliquement 85
Figure 5-13 Répartition verticale dans la colonne d'eau des sédiments relargués à différents instants suivant le début des relargages successifs pour différent scénarios de relargage simulés (information tirée des résultats de modélisation STFATE-PSED) 86
Figure 6-1 Zones draguées à l'intérieur du havre de Matane en 2008 (gauche) et en 2015 (droite) 89
Figure 6-2 Identifiant des points de référence à l'intérieur du havre de Matane utilisés pour estimer les taux de sédimentation historiques à partir des relevés bathymétriques disponibles entre 2000 et 2023. Le trait rouge représente la géométrie projetée B17 pour les nouveaux postes à quai 92
Figure 6-3 Évolution du fond marin (taux annuels moyens d'érosion - / sédimentation +) à l'intérieur du havre de Matane (aux points de référence) estimée à partir des relevés bathymétriques réalisés entre 2000 et 2023 en excluant l'influence des travaux de dragage de 2008 et de 2015, ainsi que le relevé bathymétrique de 2019. Le trait rouge représente la géométrie projetée B17 pour les nouveaux postes à quai 93
Figure 6-4 Géométrie du modèle hydrosédimentaire couplé TELEMAC-2D/GAIA en conditions existante et projetée (géométrie B17). Les conditions limites du modèle sont imposées à la frontière au large (trait rouge) 94

Figure 6-5 Évolution du fond marin (taux annuels moyens d'érosion - / sédimentation +) sur une année complète en conditions existantes obtenu du modèle GAIA avec comme forçage un signal de marée et une concentration ambiante de sédiments en suspension. L'évolution annuelle aux points de référence (c.f. section 6.2) est présentée pour faciliter la comparaison avec les taux de sédimentation historiques 96
Figure 6-6 A) Évolution du fond marin (taux annuels moyens d'érosion - / sédimentation +) sur une année complète en conditions projetées (géométrie B17) modélisée par le modèle GAIA avec comme forçage un signal de marée et une concentration ambiante de sédiments en suspension. B) Variation de la sédimentation modélisée sur une année complète en conditions projetées (géométrie B17) par rapport aux conditions existantes 98

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte du projet

La construction initiale du Port de Matane par Transport Canada a débuté en 1967 pour se terminer en 1972. À l'époque, les installations portuaires comprenaient les deux brise-lames (est et ouest), le quai commercial et le quai éperon. Deux ans plus tard, soit en 1974, un traversier-routier est venu se greffer dans la section est du havre reliant Matane à Baie-Comeau et, en 1977, ce fut au tour du traversier-rail d'être construit à proximité du traversier routier pour la même destination. Par la suite, en 1988, l'aire d'entreposage située près du quai commercial fut augmentée pour permettre une plus grande manutention de marchandises en transit provenant des activités portuaires au quai commercial. Le quai éperon quant à lui, perpendiculaire au quai commercial et condamné depuis plusieurs années, a été entièrement démoli entre 2016 et 2019. En 2020, la totalité des installations portuaires a été cédée au gouvernement du Québec et la Société portuaire du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie (SPBSG) a été fondée pour en assumer la gestion. Pêches et Océans Canada (MPO) assure toujours la gestion du quai des pêcheurs via une entente d'occupation.

Plus récemment, un rapport d'analyse structurale produit en 2018 par Transport Canada a permis de démontrer que le quai commercial de Matane est en fin de vie utile. La capacité portante de la structure a été diminuée de façon significative et certains tronçons du quai ont été condamnés, ce qui réduit sa longueur utilisable et fait qu'il ne répond plus aux besoins actuels des usagers. La SPBSG a alors pris la décision de lancer un projet de réaménagement des installations portuaires de Matane afin de planifier la reconstruction du quai commercial et la modernisation des installations portuaires. Une première analyse technique concernant l'aménagement du port de Matane et la reconstruction du quai produite en 2019 par CIMA+ a permis de démontrer la faisabilité technique de deux (2) options de reconstruction potentielle. En 2021, en complément à l'étude de 2019 de CIMA+, EMS a réalisé une nouvelle étude de faisabilité pour l'aménagement du port de Matane en y incluant des caractérisations géotechniques et environnementales. Une étude de navigabilité par le centre de simulation et d'expertise maritime (CSEM) a également a été réalisée. À la suite de cette étude, quatre (4) options de reconstruction ont été analysées et comparées.

C'est ensuite en février 2023 que la SPBSG a lancé un appel d'offre afin d'identifier un expert-conseil pour entreprendre l'ingénierie et la réalisation de l'étude d'impact dans le cadre du projet de réaménagement des installations portuaires de Matane.

1.2 Localisation et description du site

Le havre portuaire de Matane est situé sur la rive sud de l'estuaire du Saint-Laurent directement au cœur de la ville de Matane. Le havre est protégé de part et d'autre par des brise-lames avec une entrée orientée Nord-Nord-Est (NNE) et les installations portuaires qu'on y retrouvent regroupent différents usagers, notamment, la SPBSG, la Société des Traversiers du Québec (STQ), ainsi qu'un regroupement de pêcheurs (**Figure 1-1**).



Figure 1-1 Localisation des installations portuaires de Matane et des différents usagers présents dans le havre

1.3 Objectifs

L'objectif de cette étude est de caractériser le climat maritime au large de Matane et à l'approche du havre portuaire, d'évaluer les conditions hydrodynamiques et les conditions d'agitation à l'intérieur du havre, ainsi que la dynamique hydrosédimentaire dans un contexte d'évaluation des impacts sur la qualité d'eau durant les opérations de dragage et de relargage et également quant aux changements morphologiques du fond marin à prévoir post-travaux par l'ajout et la modification des installation portuaires. Ces activités visent à la fois à caractériser les conditions existantes, ainsi que les conditions projetées (post-travaux) et ce, autant dans le but de supporter la conception des travaux en génie maritime, notamment les travaux de dragage, de construction d'un nouveau poste à quai, ainsi que la réfection/reconstruction du brise-lame ouest, que pour supporter la réalisation de l'étude d'impact sur l'environnement et l'évaluation des impacts environnementaux pendant la durée des travaux, incluant la gestion des matières en suspension (MES) pour fin d'autorisation environnementale.

Plus spécifiquement, les objectifs du mandat sont les suivants :

— Caractériser le climat maritime et l'environnement côtier (niveaux d'eau, vents, vagues, évènements de tempêtes, régime des glaces, courantométrie);

— Définir les critères de conception pour la réfection et/ou la reconstruction du brise-lame ouest et réaliser le dimensionnement préliminaire, incluant une estimation des coûts (Classe D);

- Évaluer les conditions d'agitation des vagues en condition existante (actuelle) et selon différents scénarios de réaménagement du havre de Matane (post-travaux);
- Évaluer la dilution et la dispersion du panache de sédiments en suspension lors des travaux de dragage dans le havre et de relargage au large de Matane afin de caractériser la variation spatio-temporelle du panache de MES et ainsi appuyer le processus d'évaluation des impacts environnementaux;
- Évaluer les conditions hydrosédimentaires en caractérisant les patrons d'érosion/sédimentation en condition existante et selon différents scénarios de réaménagement du havre de Matane (post-travaux), en incluant le secteur de l'embouchure de la rivière Matane;
- Évaluer l'impact des changements climatiques sur les différentes variables d'intérêt (niveaux d'eau, glaces et vagues) pour fin de conception et assurer la résilience des infrastructures en climat futur.

2 CARACTÉRISATION DU CLIMAT MARITIME

2.1 Intrants et données disponibles

2.1.1 Bathymétrie et topographie

La **Figure 2-1** illustre la bathymétrie, exprimée par rapport au zéro des cartes (ZC), dans le secteur du havre portuaire de Matane. Cette bathymétrie correspond en fait à la bathymétrie 2023 la plus à jour combinant les relevés de WSP (juin 2023) et Englobe (septembre 2023). Les profondeurs d'eau à l'intérieur du havre varient en moyenne entre 2 et 10 m. L'entrée du havre présente un chenal dont la profondeur est d'environ 10 m et dont celle-ci atteint également le quai commercial et la gare fluviale avec une réduction des profondeurs autour de 8 m à l'approche des quais. Plus au sud dans le secteur du quai des pêcheurs, un chenal à 4 m de profondeur est présent et se prolonge devant le quai.

De part et d'autre du havre de Matane, la bathymétrie est relativement uniforme passant de 0 à 10 m de profondeur à l'extrémité nord du brise-lame ouest pour ensuite atteindre 40 m de profondeur assez rapidement dès qu'on s'éloigne de l'infrastructure.

Par ailleurs, un relevé additionnel réalisé par Englobe en octobre 2023 a permis d'obtenir la bathymétrie au site d'immersion en mer (site d'immersion) identifié pour le rejet d'une partie des sédiments qui seront dragués dans le cadre du présent projet. Ce site se situe au large de Matane, soit tout juste au nord du havre, lequel présente des profondeurs d'eau de l'ordre de 55 à 60 m par rapport au zéro des cartes (ZC). La **Figure 2-2** présente la bathymétrie pour ce secteur.

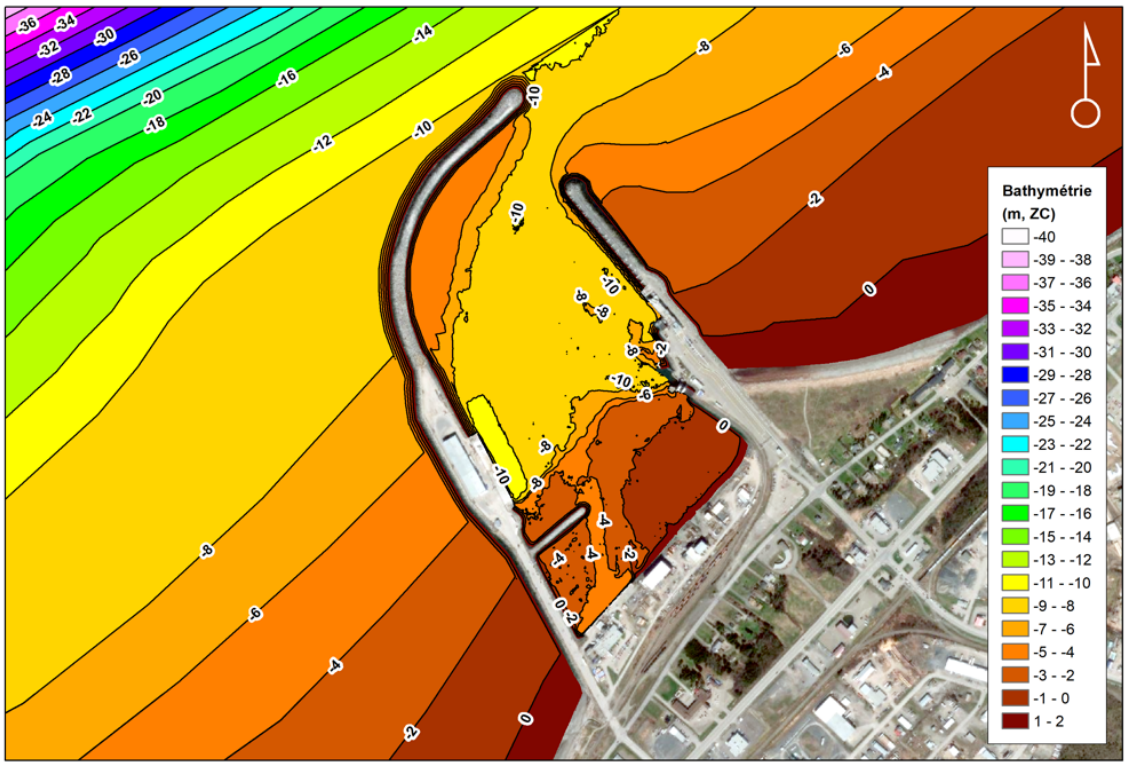


Figure 2-1 Bathymétrie du havre de Matane et des zones adjacentes

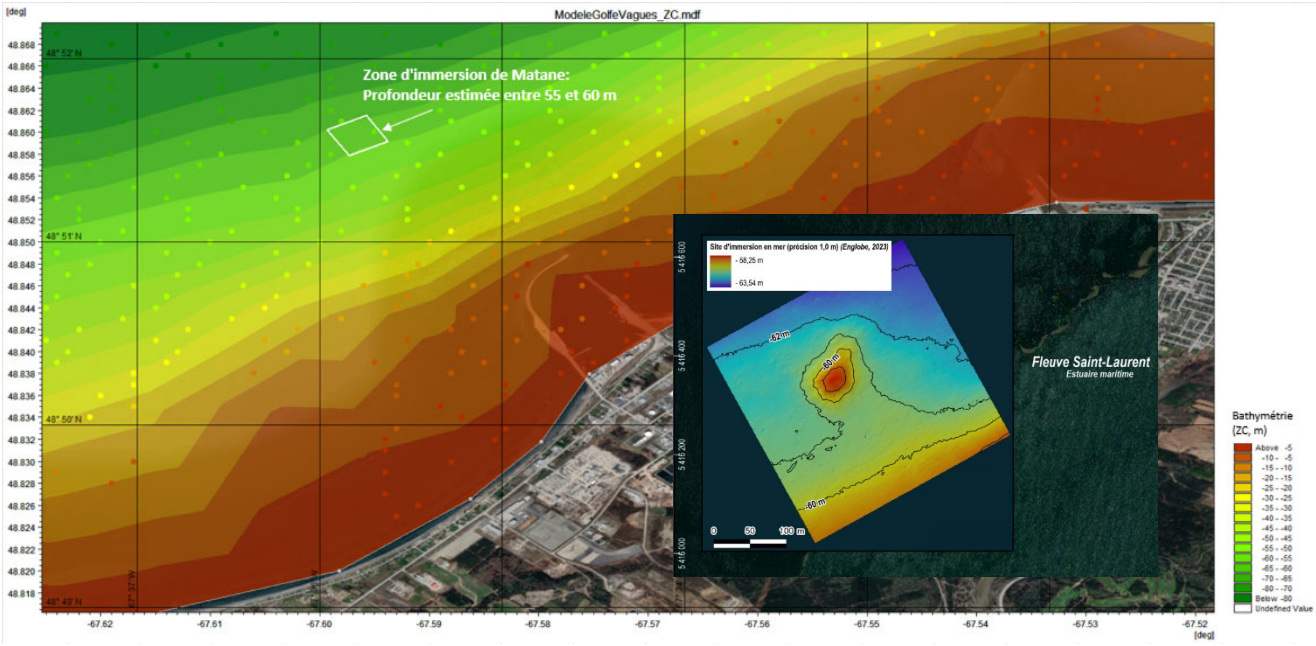


Figure 2-2 **Bathymétrie de la zone de relargage des sédiments dragués au large de Matane**

Par ailleurs, des données topographiques ont également été obtenues pour l'ensemble des infrastructures portuaires que l'on retrouve au port de Matane, soit un relevé Lidar réalisé le 30 octobre 2022 par Pascal Mercier, arpenteur géomètre (**Figure 2-3**)

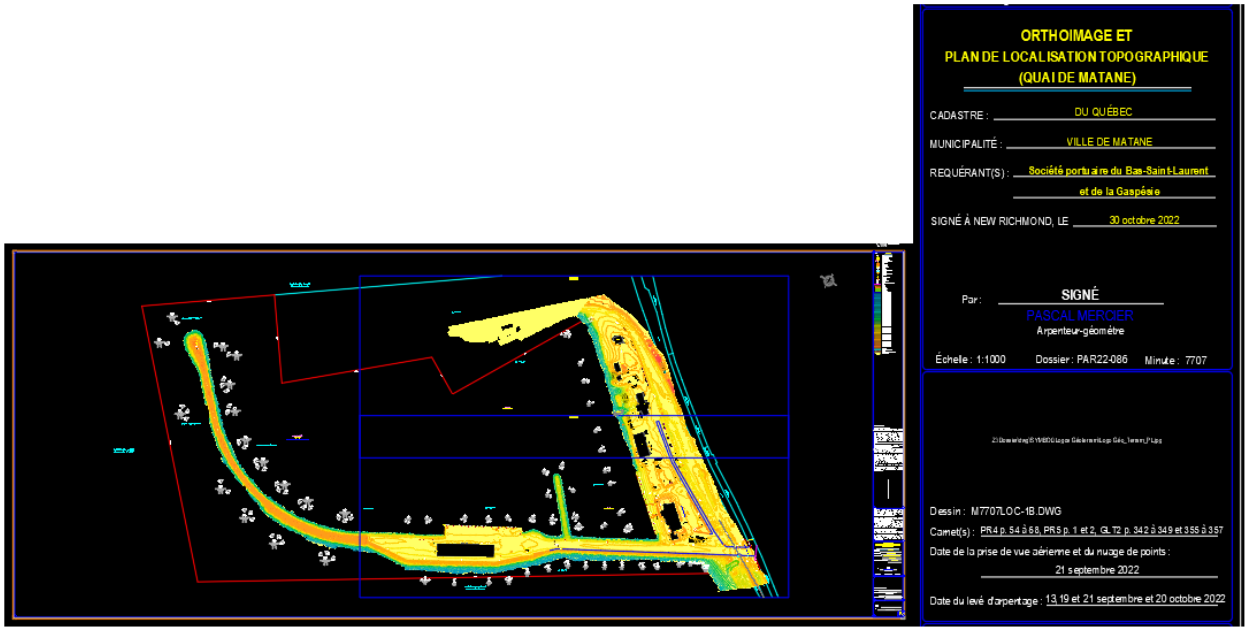


Figure 2-3 **Relevé Lidar 2022 des infrastructures portuaires de Matane, Pascal Mercier, arpenteur géomètre**

2.1.2 Échantillonnage et caractéristiques des sédiments sur le fond marin

Les relevés récents réalisés par Englobe (2023) et collectés pour l'ensemble du havre (**Figure 2-4**) proposent une dominance de matière organique, limon et argile en surface, ce qui est certes plus fins que les résultats suggérés par Cima+ (2019). Il semble donc, depuis les 4-5 dernières années, que certains événements ont pu contribuer à l'apport d'un substrat plus fin dans le havre.

Par ailleurs, selon les études géotechniques et les rapports de forage, les sols en place au site de Matane sont principalement constitués d'une première couche de sable d'une épaisseur variant entre 1 et 3 m, suivie d'une couche de silt argileux (environ 3-12 m d'épaisseur selon l'endroit) avec trace de sable et de gravier de consistance raide à dure, suivie parfois d'une couche d'argile et ensuite le roc, parfois de type schiste, parfois de type grès (Cima+, 2019). Le roc a été rencontré à des élévations relativement variables (entre les élévations -18 et -28,25 m), selon l'emplacement, avec un taux de récupération très variable passant de 16 à 92 %.



Figure 2-4 Localisation des stations d'échantillonnage tel que relevé par Englobe (2023)

2.2 Niveau d'eau

2.2.1 Caractéristiques de la marée

Le **Tableau 2-1** 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.

Tableau 2-1 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 : CGVD28 (m) = ZC (m) – 1,98 m

2.2.2 Niveaux d'eau extrêmes – climat actuel 2023

Le modèle global de Lasalle|NHC (**Figure 2-5**) permet de simuler les surcotes (ondes de tempête positives) ainsi que les décotes (ondes de tempête négatives). 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 (résolution de 36 km) du Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Ce modèle global de niveau d'eau 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, notamment pour les marégraphes de Rimouski et de Saint-Anne-des-Monts **(Figure 2-6**).

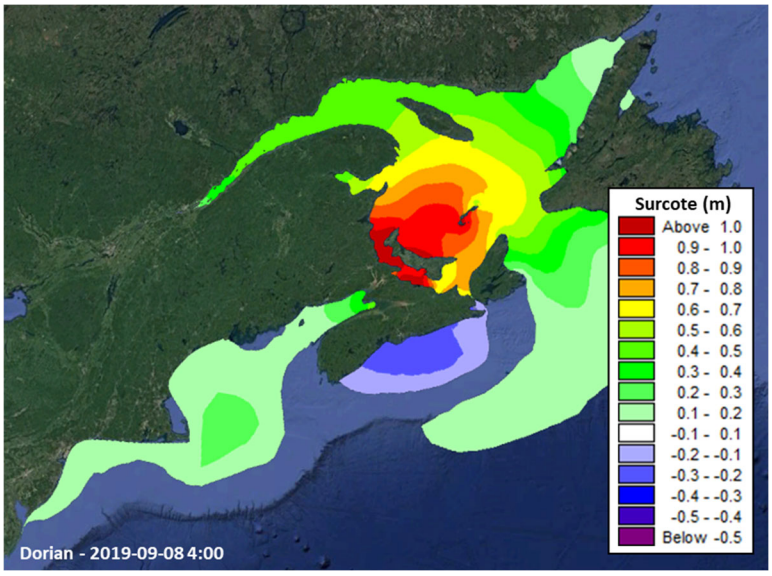


Figure 2-5 Exemple du modèle global de surcote développé par Lasalle|NHC – évènement de tempête Dorian, 2019-09-08

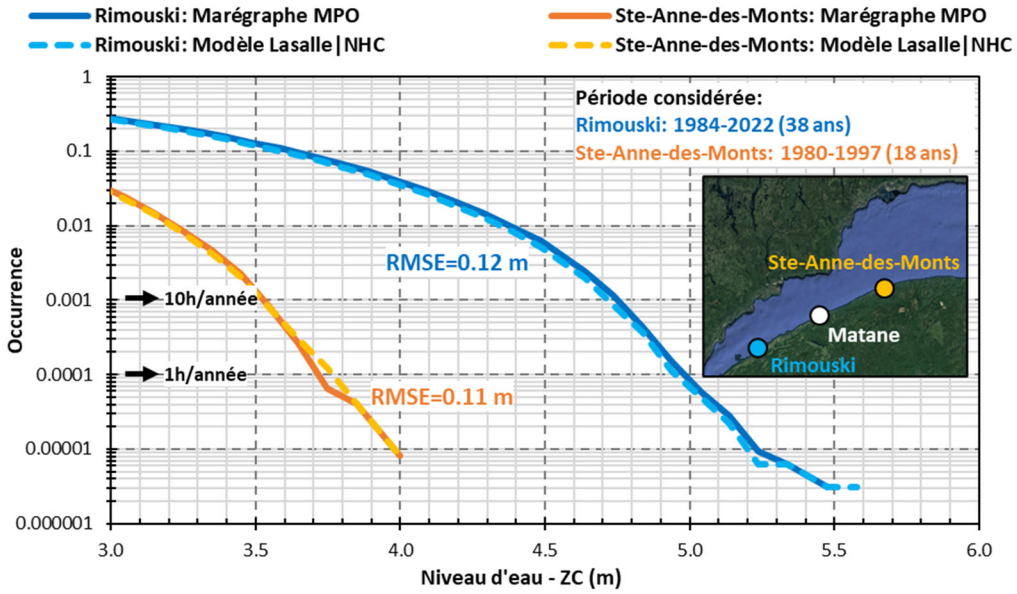


Figure 2-6 **Validation des niveaux d'eau du modèle global de Lasalle|NHC avec les marégraphes de Rimouski et Saint-Anne-des-Monts**

Le modèle global a donc été mis à profit pour obtenir des données de niveaux d'eau historiques à Matane entre 1980 et 2023 (43 ans de données, **Figure 2-7**) et ainsi réaliser une analyse des niveaux d'eau extrêmes par l'ajustement de lois de distribution des extrêmes. Celle présentant le meilleur ajustement pour le site de Matane est la loi de distribution statistique de type « Gumbel ». Le **Tableau 2-2** présente les résultats obtenus

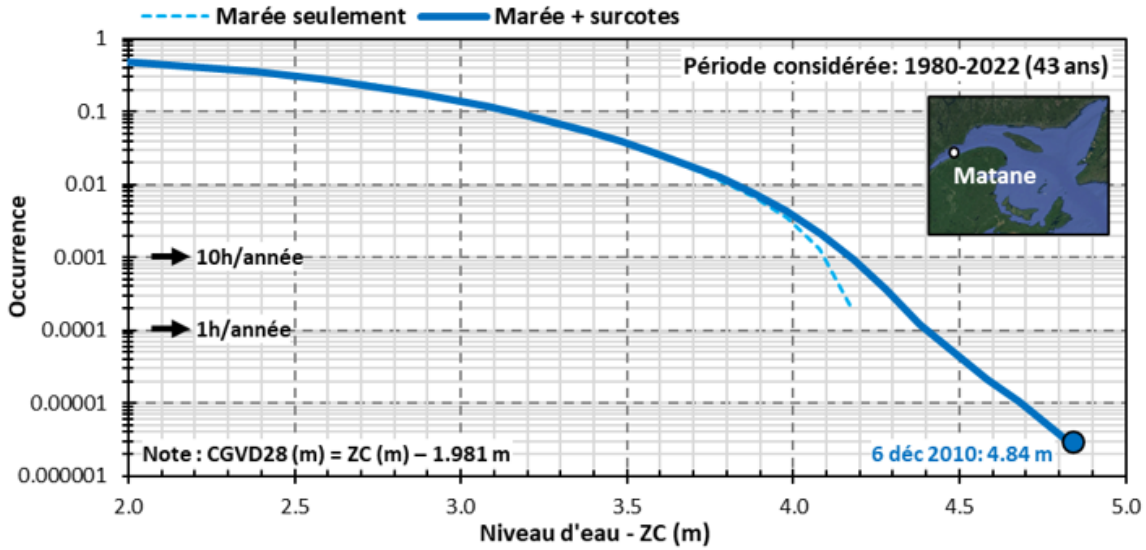


Figure 2-7 **Courbe classée des niveaux d'eau historiques à Matane (1980-2023)**

Tableau 2-2 Niveaux d'eau extrêmes pour Matane, climat actuel 2024 (m, ZC)

T (Années)	Niveaux d'eau extrêmes (m, ZC) Climat actuel 2024
2	4.42
5	4.56
10	4.65
15	4.70
20	4.74
25	4.77
50	**4.86**
100	**4.94**

2.2.3 Niveau d'eau extrêmes – climat futur

Le Bedford Institute of Oceanography a mis en place un l'outil Can-EWLAT (Zhai et al. 2023) qui évalue le rehaussement relatif du niveau moyen des mers, lequel tient compte du mouvement de la croûte terrestre, ainsi que de l'allocation verticale (vertical allowance) à plusieurs stations marégraphiques canadiennes. Selon cette référence, qui considère la même période de référence que l'intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) soit 1986-2005, les projections du rehaussement du niveau moyen à Matane suggèrent un rehaussement relatif de l'ordre de 19 à 32 cm d'ici 2070 et de 23 à 68 cm pour l'horizon 2100 et ce, en se référant aux scénarios RCP2.6 et RCP8.5. Le Tableau 2-3 présente l'information obtenue.

Tableau 2-3 Rehaussement relatif du niveau moyen des mers incluant l'allocation verticale pour le secteur de Matane (outil Can-EWLAT, Zhai et al. 2023)

Horizon	Rehaussement relatif du niveau moyen des mers (Inclus allocation verticale) (m)	
	Scénario RCP2.6	Scénario RCP8.5
2050	0,12	0,16
2060	0,14	0,22
2070	0,19	**0,32**
2100	0,23	**0,68**

En se basant sur ces données, des rehaussements de **+32 cm** et de **+68 cm** ont été retenus pour les horizons 2070 et 2100 respectivement en retenant le scénario RCP8.5. Ainsi, les niveaux d'eau extrêmes suivants sont obtenus en climat futur (**Tableau 2-4**).

Tableau 2-4 Niveaux d'eau extrêmes pour Matane, climat futur (m, ZC)

T (Années)	Niveaux d'eau extrêmes (m, ZC)		
	Actuel 2024	2070 (+32 cm)	2100 (+68 cm)
2	4.42	4,74	5,10
5	4.56	4,88	5,24
10	4.65	4,97	5,33
15	4.70	5,02	5,38
20	4.74	5,06	5,42
25	4.77	5,09	5,45
50	4.86	5,18	5,54
100	4.94	5,26	5,62

Il est à noter que les niveaux d'eau extrêmes selon les différentes périodes de retour présentées au **Tableau 2-4** s'avèrent une projection en climat futur qui tient compte du rehaussement anticipé du niveau moyen des mers pour le secteur de Matane, sans toutefois inclure l'impact possible d'une modification du régime de tempêtes (fréquence et intensité) dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent. Bien qu'il semble y avoir consensus au niveau de la communauté scientifique sur le fait que le régime de tempêtes pourrait évoluer en climat futur, il n'est pas possible à ce jour de quantifier et d'anticiper plus clairement comment un changement du régime de tempêtes impacterait la fréquence et l'intensité des surcotes et par conséquent les périodes de retour associées sur les niveaux d'eau extrêmes. Ce constat n'empêche aucunement de procéder à des travaux de conception d'ouvrages portuaires et côtiers sur la base des connaissances disponibles à ce jour en intégrant certaines hypothèses conservatrices. Toutefois, cela nous indique tout de même la nécessité de maintenir à jour les projections de niveaux d'eau extrêmes à mesure que la science du climat évolue et se précise afin de réévaluer les risques selon les tendances et prédictions à venir.

2.3 Régime des vagues au large

Le modèle global Mike 21 SW de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent de Lasalle|NHC (**Figure 2-8**) a été utilisé pour obtenir des données de vagues entre 1980 et 2023 (43 ans). Ce modèle a été validé, pour le présent site d'étude, à l'aide de la bouée de l'UQAR localisée à Saint-Ulric. Les climats de vent horaire CFSR (Climate Forecast System Reanalysis), composés d'une grille de points espacés aux 36 km, a été retenus pour générer les vagues dans le modèle. De légers ajustements au modèle ont été réalisés afin de mieux représenter les hauteurs de vagues et les périodes. Avec ces corrections, le modèle reproduit adéquatement et de façon satisfaisante les patrons de vagues à la bouée de Saint-Ulric et par conséquent au large de Matane. Les **Figure 2-9, Figure 2-10 et Figure 2-11** présentent les validations du modèle global de Lasalle|NHC et ce, en fonction des hauteurs de vagues, des périodes et des directions respectivement.

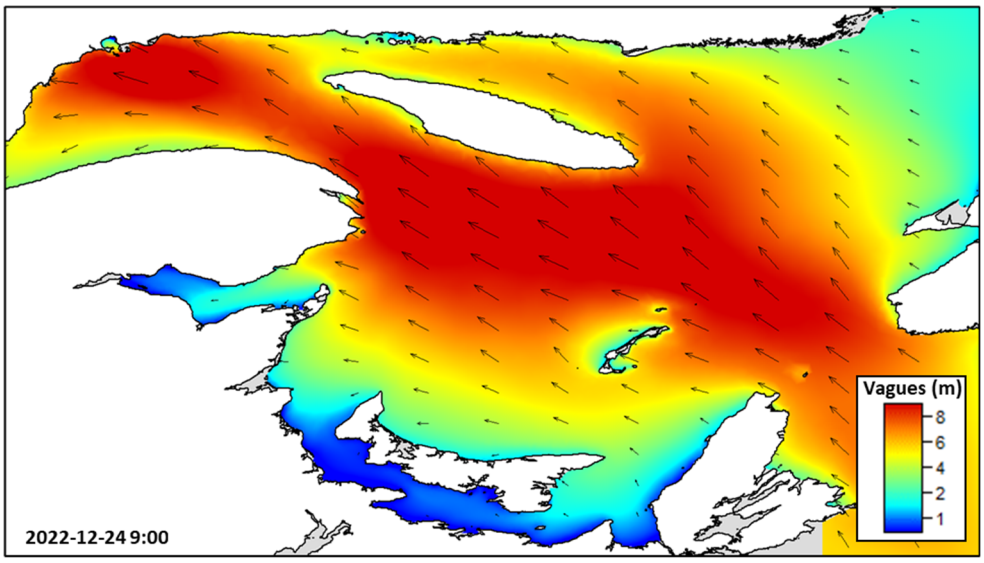


Figure 2-8 Modèle global de génération des vagues 1980-2023 (Lasalle|NHC, 2023)

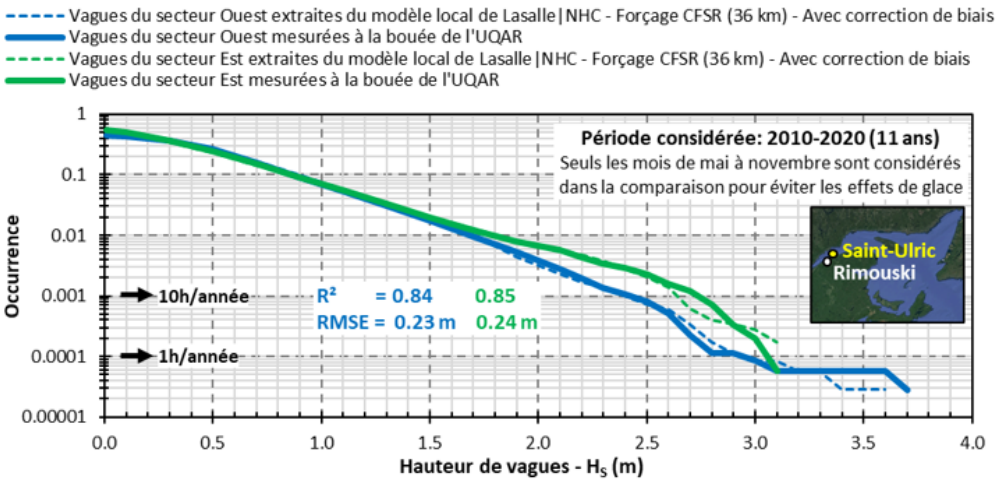


Figure 2-9 Validation des hauteurs de vagues obtenues du modèle de Lasalle|NHC par rapport aux données mesurées à la bouée de Saint-Ulric (UQAR)

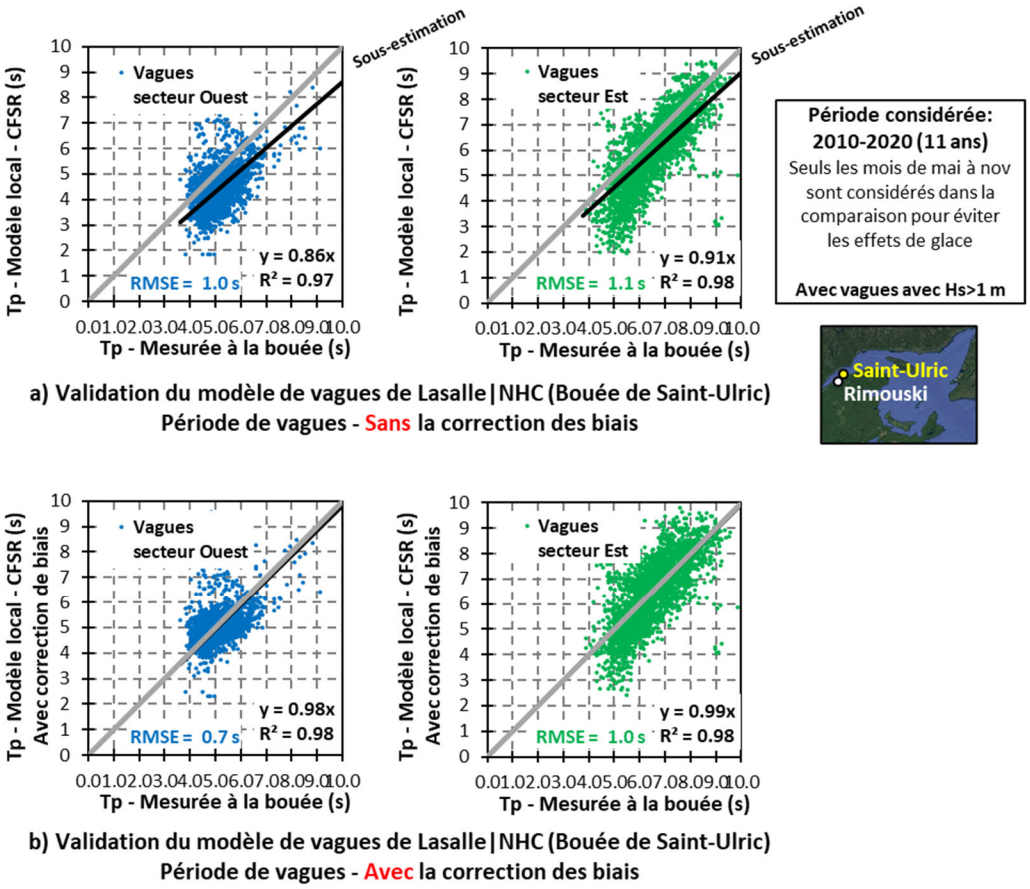


Figure 2-10 **Validation des périodes de vagues obtenues du modèle de Lasalle|NHC par rapport aux données mesurées à la bouée de Saint-Ulric**

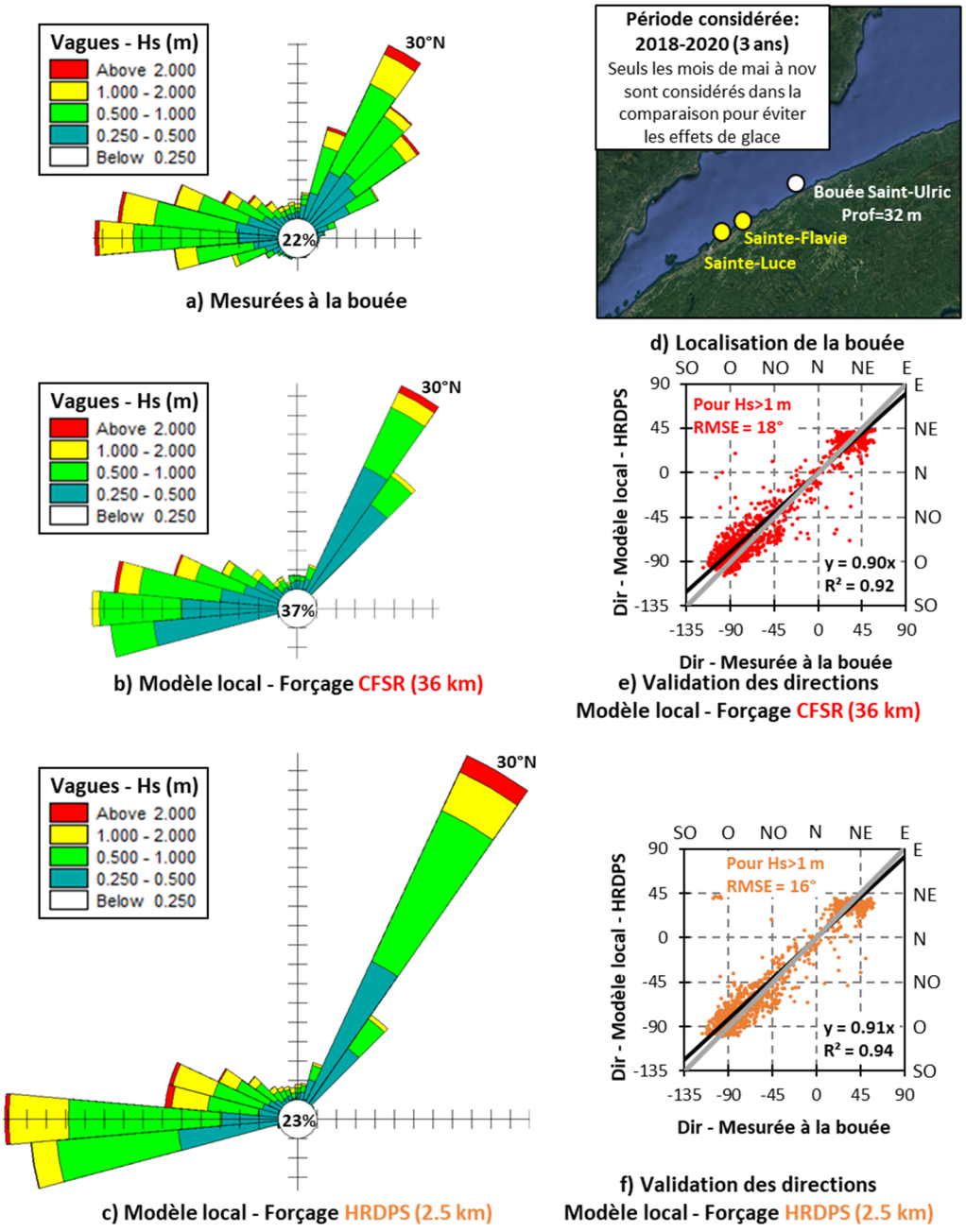


Figure 2-11 **Validation des directions de vagues obtenues du modèle global Mike 21 SW de Lasalle|NHC par rapport aux données mesurées à la bouée de Saint-Ulric**

2.4 Régime des vagues à proximité du havre portuaire de Matane

Suite à cette validation, un second modèle local toujours en Mike 21 SW a été utilisé pour réaliser la transformation des vagues du large vers la côte afin de reproduire le climat de vagues à proximité du havre portuaire de Matane (**Figure 2-12**). Afin de tenir compte des impacts des changements climatiques et de la réduction du couvert de glace dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en climat futur, tous les mois de l'année ont été considérés en considérant l'absence de glace à la dérive afin d'obtenir le climat de vagues à proximité de la zone d'étude.

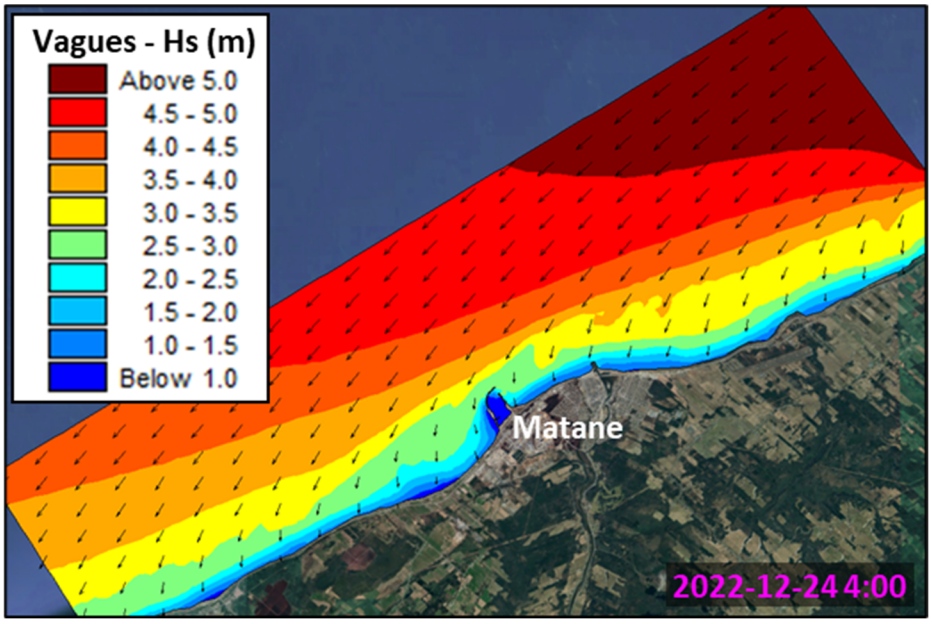


Figure 2-12 **Modèle Mike 21 SW de propagation des vagues du large vers le havre portuaire de Matane**

Les climats de vagues dérivés pour différentes profondeurs d'eau à proximité de la zone portuaire de Matane sont présentés aux **Figure 2-13** et **Figure 2-14**, incluant les hauteurs de vagues extrêmes pour chacun des points d'extraction retenus. Des hauteurs de vagues de période de retour de 100 ans de l'ordre de 3,2 à 3,5 m sont obtenues à des profondeurs de 9 à 11 m (ZC) et diminuent à environ 2,2 m à une profondeur de 2 m (ZC).

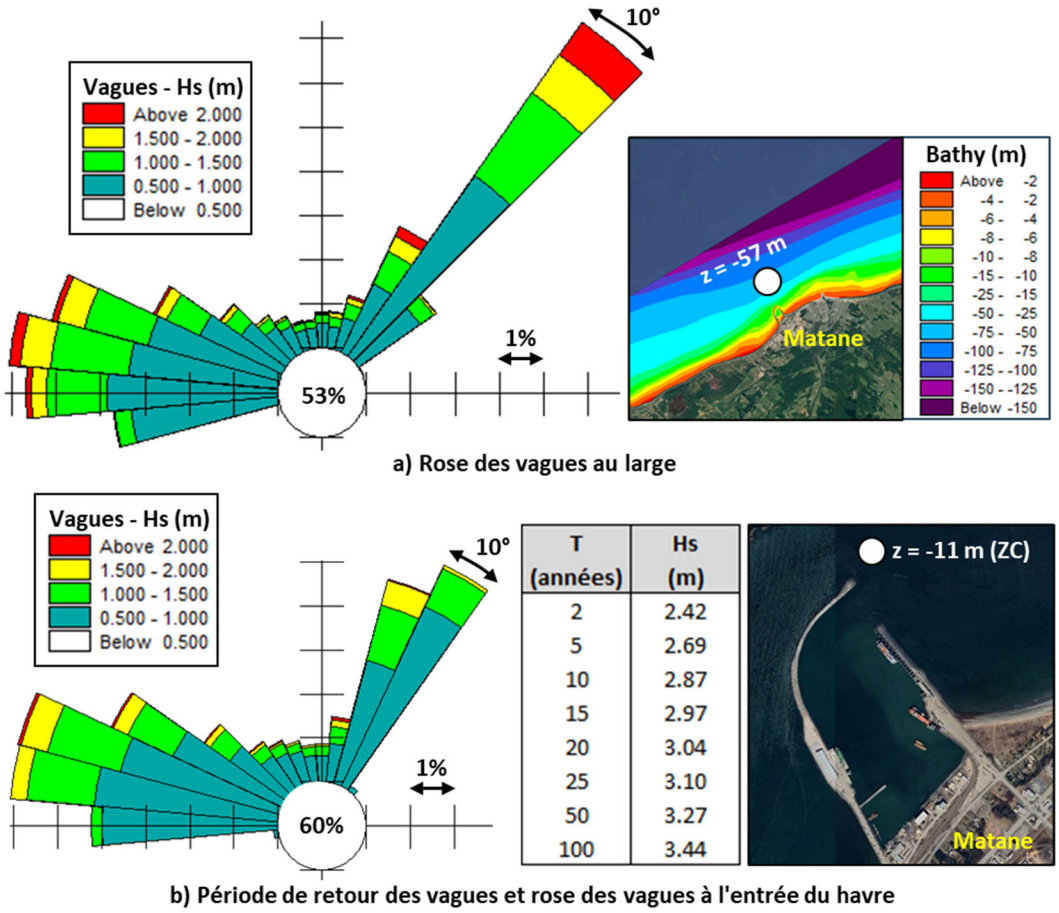
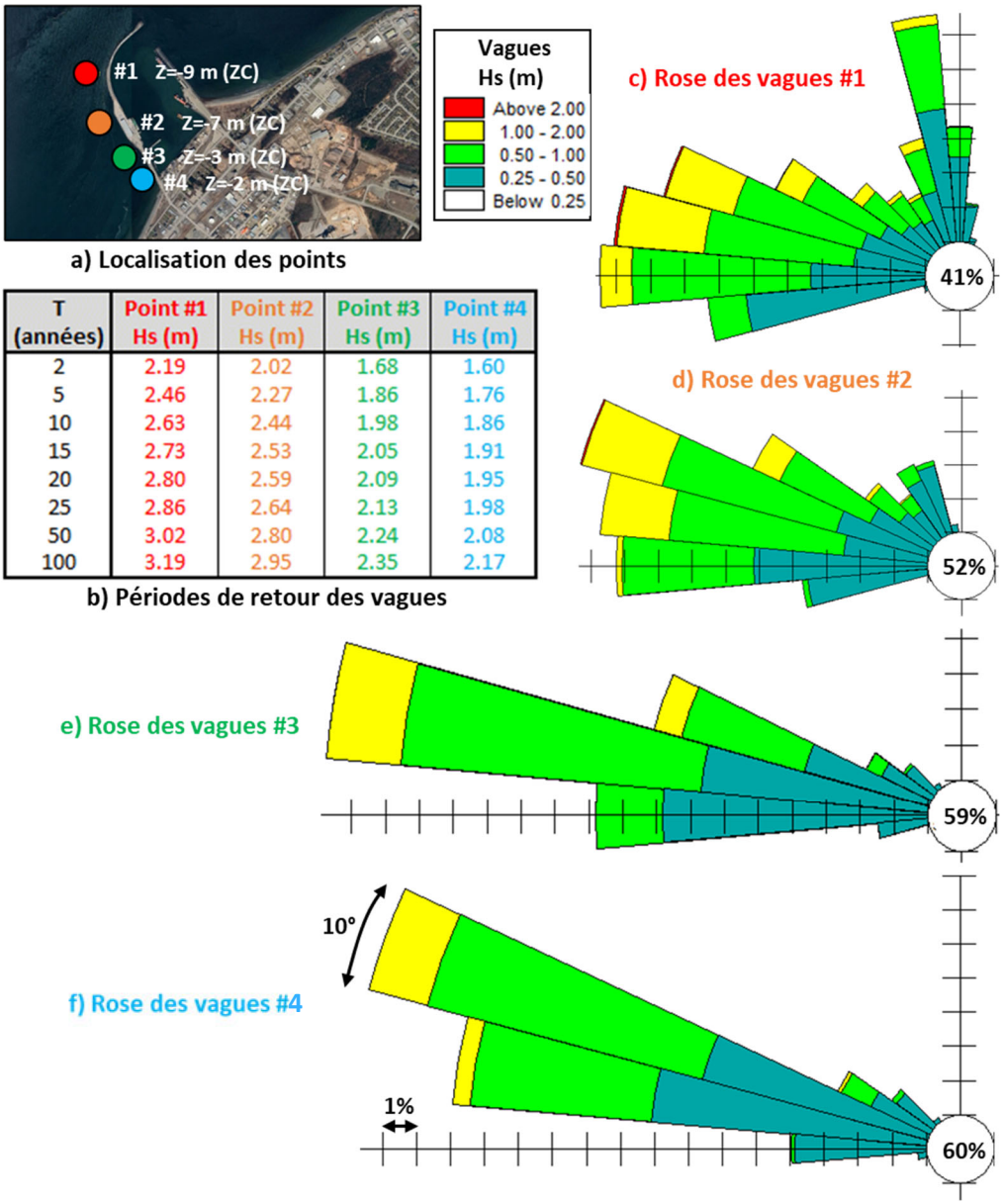


Figure 2-13 **Roses des vagues et hauteurs de vagues extrêmes obtenues au large et à l'entrée du havre de Matane**



T (années)	Point #1 Hs (m)	Point #2 Hs (m)	Point #3 Hs (m)	Point #4 Hs (m)
2	2.19	2.02	1.68	1.60
5	2.46	2.27	1.86	1.76
10	2.63	2.44	1.98	1.86
15	2.73	2.53	2.05	1.91
20	2.80	2.59	2.09	1.95
25	2.86	2.64	2.13	1.98
50	3.02	2.80	2.24	2.08
100	3.19	2.95	2.35	2.17

b) Périodes de retour des vagues

Figure 2-14 **Roses des vagues et hauteurs de vagues extrêmes obtenues le long du brise-lame ouest**

2.5 Principaux évènements de tempêtes historiques

Les vagues importantes, étant générées par de forts vents, surviennent la plupart du temps durant des dépressions atmosphériques (cyclones) couvrant de grandes superficies. La combinaison de l'effet de baromètre inversé et des vents constants sur le Saint-Laurent peut engendrer des surcotes de tempêtes importantes qui se superposeront à l'amplitude de la marée. Pour cette raison, les tempêtes exceptionnelles qui engendrent des débordements côtiers et des dommages aux infrastructures surviennent la plupart du temps lorsque les hauts niveaux d'eau et les fortes vagues se superposent. Cette corrélation peut être quantifiée par le biais d'une analyse de dépendance des vagues et des niveaux d'eau.

Pour l'estuaire du fleuve et le secteur de Matane, nous avons retenu trois (3) évènements de tempêtes, soit les deux évènements extrêmes du 6 décembre 2010 et 30 décembre 2016 et dans une moindre mesure, l'évènement plus récent du 24 décembre 2022. La **Figure 2-15** présente les périodes de retour combinées pour ces trois évènements de tempêtes. Celles-ci ont été calculées pour le point d'extraction # 1 situé du côté ouest à une profondeur d'environ 9 m (ZC).

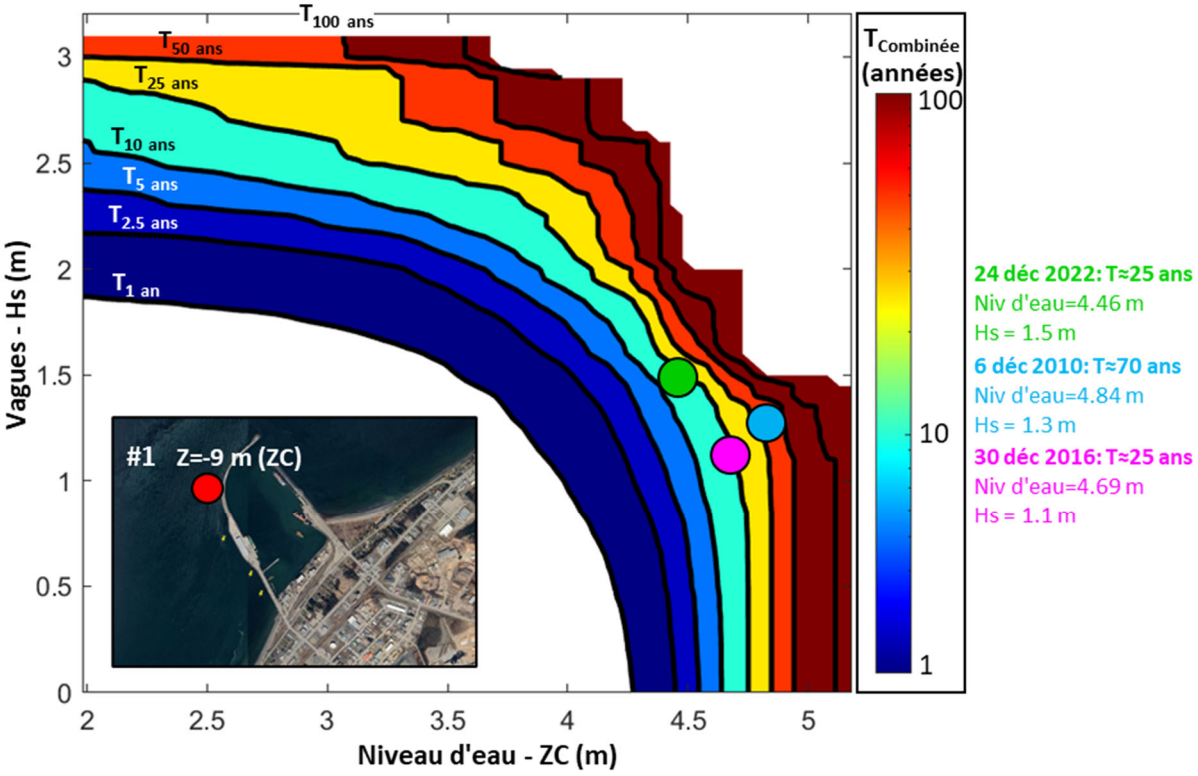


Figure 2-15 Périodes de retour combinées des tempêtes de 2010, 2016 et 2022

Enfin et tel que mentionné à la section 2.2.3, il est également important de rappeler que le régime de tempêtes est porté à évoluer en climat futur dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent, mais qu'aucune directive ou recommandation ne permet à ce jour de quantifier et d'anticiper clairement l'impact de cette modification sur la fréquence et l'intensité du régime des vents et des vagues. Tel que mentionné, ce constat n'empêche aucunement de procéder à des travaux de conception d'ouvrages portuaires et côtiers sur la base des connaissances disponibles à ce jour en intégrant certaines hypothèses conservatrices. Toutefois, cela nous indique tout de même la nécessité de maintenir à jour les projections de niveaux d'eau extrêmes à mesure que la science du climat évolue et se précise afin de réévaluer les risques selon les tendances et prédictions à venir.

2.6 Courantométrie

Une première analyse des courants de marées a été réalisée pour le havre de Matane et ce, en conditions existantes et projetées pour le scénario d'aménagement B14, afin de visualiser l'impact du nouveau poste à quai et de la configuration projetée sur l'hydrodynamique à l'intérieur du havre. Cette première analyse vise à se prononcer de façon préliminaire sur l'impact des nouvelles structures par rapport aux besoins

futurs en dragage de maintenance. Les **Figure 2-16** et **Figure 2-17** présentent les résultats obtenus dans un cycle typique de marée montante et descendante et ce, pour des conditions de vives-eaux.

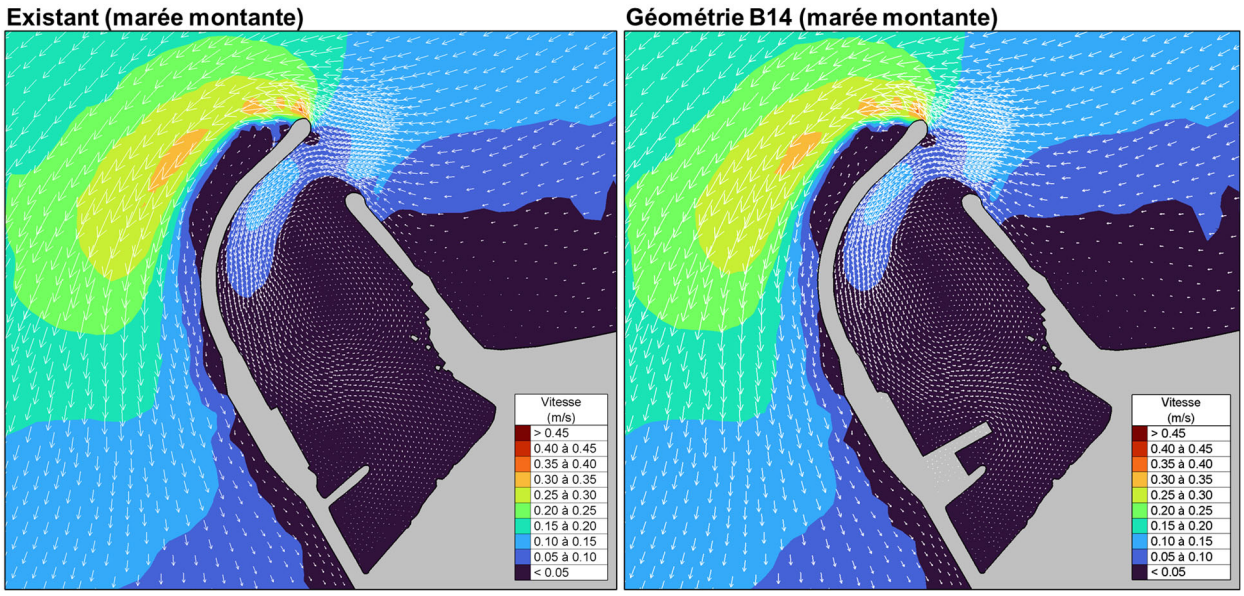


Figure 2-16 Courants de marée générés dans le havre de Matane par une marée montante de vives-eaux – existant vs configuration B14

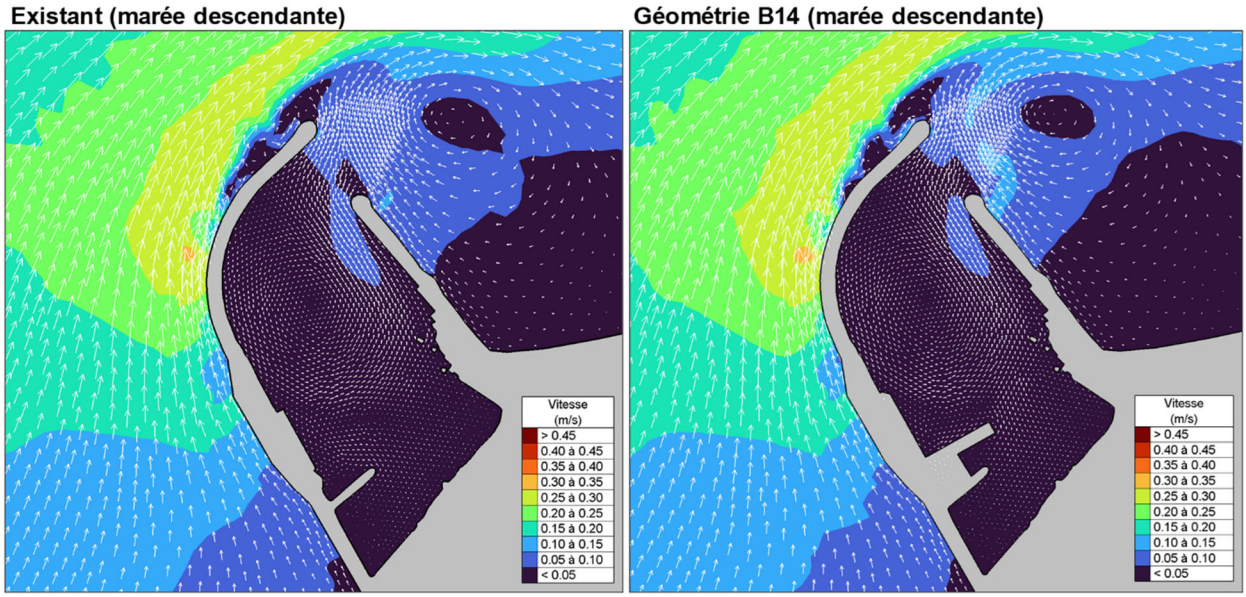


Figure 2-17 Courants de marée générés dans le havre de Matane par une marée descendante de vives-eaux – existant vs configuration B14

Les principaux constats qui découlent de cette analyse visant à comparer les patrons de courants en conditions futures avec le deuxième poste à quai en place selon la configuration B14 sont les suivants :

- L'intensité des courants demeure très faible (voir quasi nulle) dans tout le havre de Matane en conditions actuelles et projetées, à l'exception de l'entrée du havre où les courants de marée sont relativement plus élevés. Aucune modification de l'intensité et directions de ces courants n'est à prévoir en conditions futures avec le nouveau poste à quai selon la configuration B14 et ce, autant dans des conditions de marée montante que descendante. Il est à noter également qu'aucune différence notable n'est anticipé au niveau de la courantométrie si la géométrie finale est modifiée en cours de projet, puisque les courants demeurent nulles dans le secteur des quais.

- Plus localement, dans le secteur du nouveau poste à quai, l'ajout de cette nouvelle structure ne permet pas de constater un impact notable sur les patrons de courants, ni l'apparition de gyres ou de contre-courants plus significatifs. Sur cette base, rien ne porte à croire que la configuration projetée selon la configuration B14 viendrait donc augmenter les taux de sédimentation et par conséquent la fréquence des dragages de maintenance

- Tout juste au sud du deuxième poste à quai, soit dans la zone comprise entre ce nouveau quai et le brise-lame, laquelle forme une zone d'eau morte enclavée entre les deux structures, la différence est négligeable et pour cette raison, il n'est pas anticipé que cette nouvelle configuration entraine une augmentation des taux de sédimentation en conditions futures

- Ailleurs dans le havre au niveau des autres infrastructures et postes à quai (quai des pêcheurs, quai ferroviaire, quai de la STQ), aucune modification notable des courants est observée, ce qui porte à croire qu'une augmentation de la sédimentation n'est également pas anticipée dans ces zones d'opération par les autres usagers du havre

2.7 Régime des glaces

La caractérisation du régime des glaces à proximité du havre de Matane repose principalement sur un compte rendu obtenu le 7 décembre 2020 de M. Guillaume Lelièvre St-Pierre, pilote du traversier Matane-Baie-Comeau pour le Canadien National (CN) et co-propriétaire de l'entreprise Destination Haute Mer, qui offre des excursions de pêche sur le fleuve Saint-Laurent à partir du port de Matane (LELIEVRE, 2020). M. Lelièvre a également déjà œuvré comme pilote sur le traversier Matane-Godbout-Baie-Comeau pour la STQ et connait donc très bien le secteur. Selon cet acompte, la formation des glaces dans la région s'amorce avec l'apparition d'une batture (glace de rive), qui s'établit le long de la côte vers la fin-décembre. Des floes de glace de mer se forment ensuite au large et dérivent vers la côte gaspésienne sous l'influence des vents et des courants dans l'estuaire du Saint-Laurent. La force exercée par les vents et les courants provoque un empilement des floes lorsqu'ils entrent en collision avec la batture, créant ainsi des ridges.

Dans l'estuaire du Saint-Laurent, la direction dominante de dérive des glaces est orientée vers l'est. Le port de Matane crée alors un obstacle important à cette dérive. À l'entrée du port, l'empilement des ridges et des floes crée un chariot, soit une bande de glace très épaisse et pouvant atteindre une largeur de 500 m (**Figure 2-18**). Cette formation longe principalement le brise-lames ouest du port et est reconnue pour avoir provoqué certaines détériorations historiques de la structure en emportant des unités de carapace. Le chariot rend la navigation très difficile pour rentrer et sortir du port.

Toutefois, puisque le chariot demeure au large de l'embouchure du port, il ne semble pas constituer d'enjeu particulier à l'égard du brise-lames est et la zone d'intervention visée dans le cadre de cette étude. La structure demeure plutôt séquestrée dans la glace de rive, laquelle exerce des sollicitations sur la carapace de l'ouvrage jugées inférieures ou équivalentes à celles exercées par les vagues de tempêtes. La glace ne constitue donc pas un enjeu critique pour les étapes subséquentes visant la conception des travaux de réfection.



Photo courtoisie de Destination Haute Mer (LELIEVRE, 2020)

Figure 2-18 Exemple des ridges et des floes formant le charriot à l'embouchure du port de Matane

3 RÉFECTION ET RECONSTRUCTION DU BRISE-LAME OUEST

3.1 État de l'ouvrage existant

3.1.1 Ouvrage original

Les **Figure 3-1** et **Figure 3-2** présentent quelques extraits des plans préparés par Ménard, Marsan & Thibeault pour l'émission « tel que construit » du brise-lame (1970).

L'ouvrage était constitué de deux sections distinctives. La première, proprement désignée comme « l'approche », avait une longueur d'environ 975 m et se prolongeait de la rive jusqu'à l'extrémité nord des installations portuaires (quai). S'enchainait ensuite la section désignée comme le « brise-lame », qui se prolongeait des installations portuaires jusqu'à l'entrée du port, sur environ 700 m supplémentaires.

L'approche était protégée par un revêtement en enrochement constitué de pierres de carapace ayant une masse de 4,5 à 8,2 tonnes, placées selon une pente transversale de 2,0 H : 1 V et reposant sur une couche de pierres filtres de 90 à 900 kg. Une butée en pierres de 1,4 à 5,4 tonnes assurait la stabilité du pied du revêtement et le protégeait contre l'affouillement. La crête du revêtement atteignait quant à elle l'élévation +7,0 m ZC. Enfin, le côté intérieur du remblai était protégé par une couche simple de pierres ayant une masse de 0,9 à 2,7 tonnes et placées selon une pente transversale de 1,5 H : 1 V.

Le revêtement de protection le long du brise-lame était pour sa part constitué d'une première section en pierres de 260 m, dans la zone du coude de l'ouvrage, suivi d'un tronçon en tétrapodes de 460 m, entre le coude et le musoir. Les pierres de carapace sur le flanc extérieur (fleuve) du coude avaient une masse de 6,4 à 10 tonnes et étaient placées selon une pente transversale de 2,0 H : 1 V, tandis que le flanc intérieur (port) était recouvert de pierres ayant une masse de 3,6 à 5,4 tonnes et placées selon une pente transversale de 1,5 H : 1 V. Un tablier de blocs en « Y » était par ailleurs présent sur la crête, qui conservait la même élévation que dans la zone d'approche, soit +7,0 m ZC.

Dans le secteur des tétrapodes, les unités de béton avaient des masses respectives de 6,0 tonnes le long du tronc et 9,6 tonnes au musoir, puis étaient placés selon une pente transversale de 1,33 H : 1 V. Les tétrapodes ceinturaient les côtés intérieur et extérieur de la structure au musoir, tandis qu'ils n'étaient présents que du côté extérieur le long du tronc. La crête et le côté intérieur de l'ouvrage étaient quant à eux protégés par deux rangs de pierres ayant une masse de 3,6 à 5,4 tonnes, placées elles-aussi selon une pente transversale de 1,33 H : 1 V. L'élévation de la crête variait entre +7,6 m ZC et +7,9 m ZC.

Sur l'ensemble de l'ouvrage, le revêtement de carapace reposait sur une couche de pierres filtres ayant une masse de 90 à 900 kg, qui recouvrait le noyau en tout-venant du brise-lame. Une butée en pierres de 1,4 à 5,4 tonnes était par ailleurs présente au pied du revêtement pour assurer sa stabilité et le protéger contre l'affouillement.

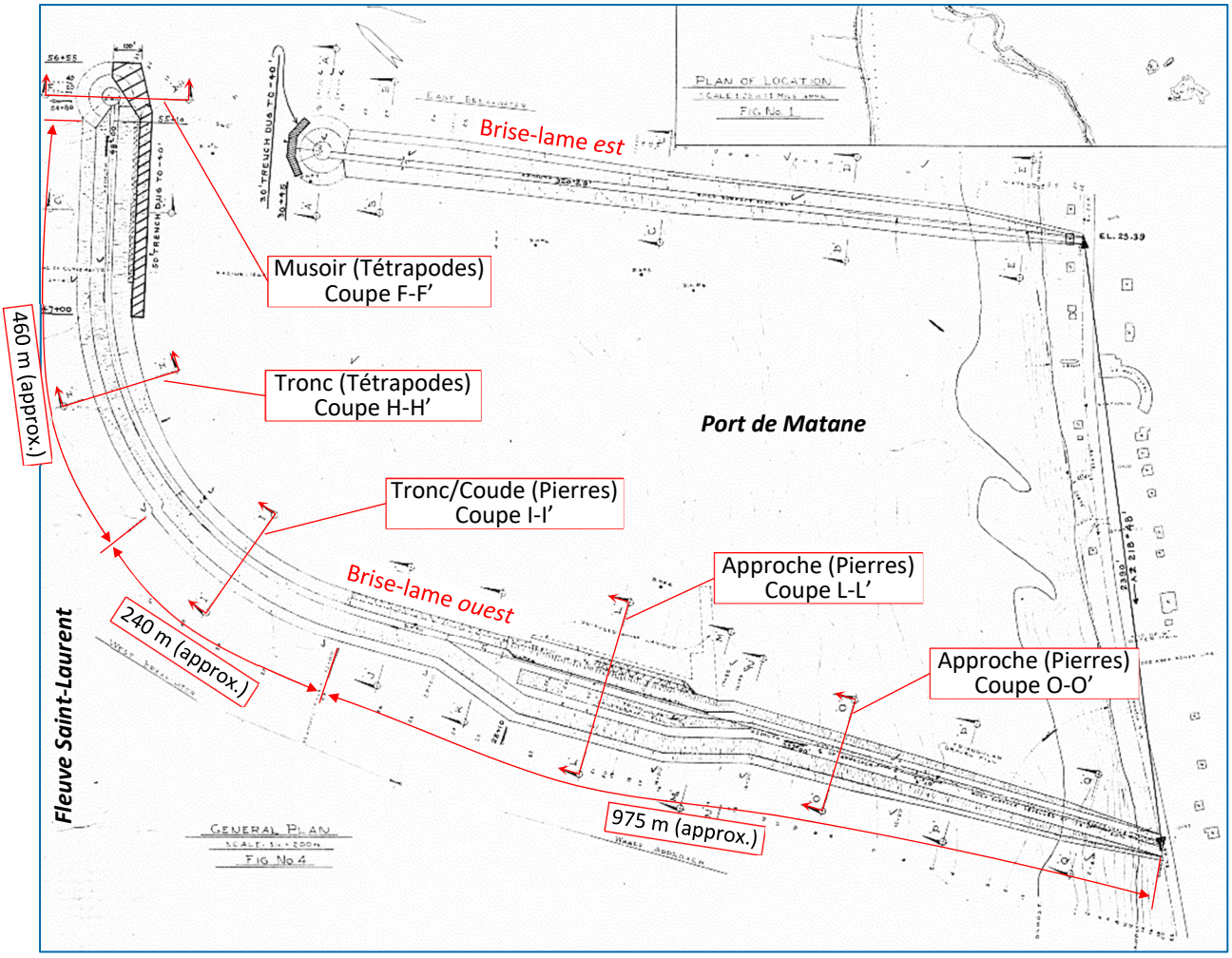
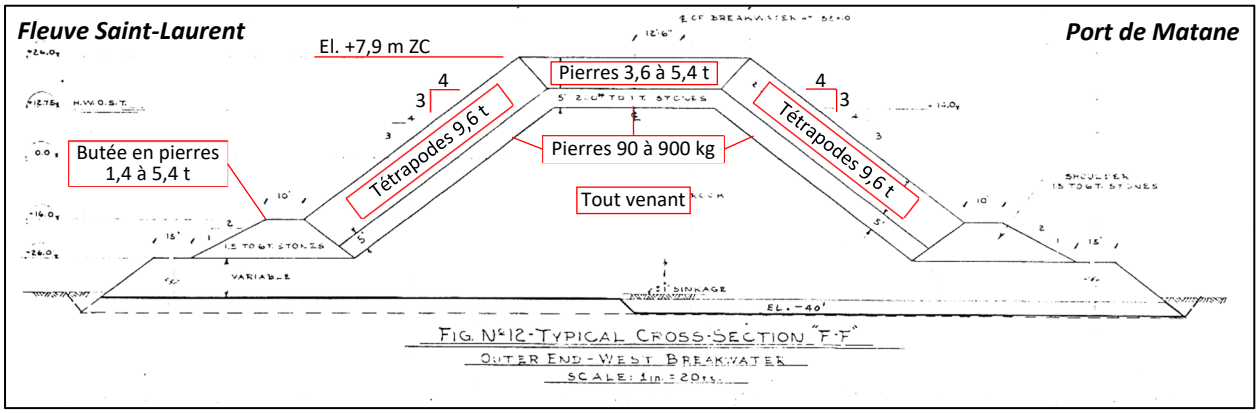
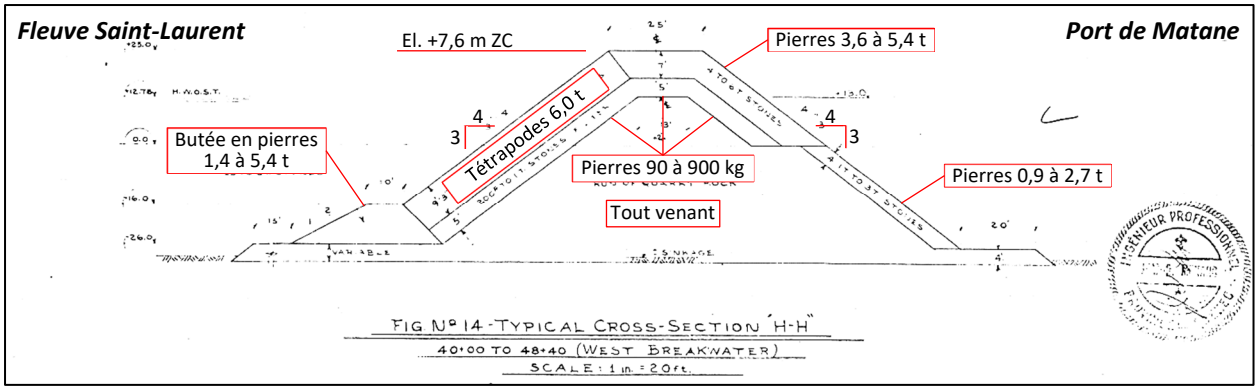


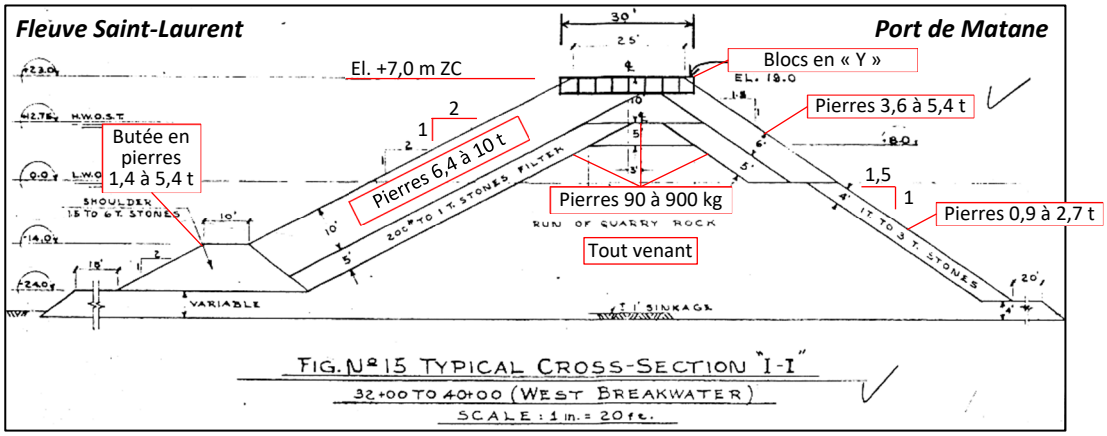
Figure 3-1 Conception originale du brise-lame ouest – Vue en plan - extrait des plans « tel que construit » (Ménard, Marsan & Thibeault, 1970)



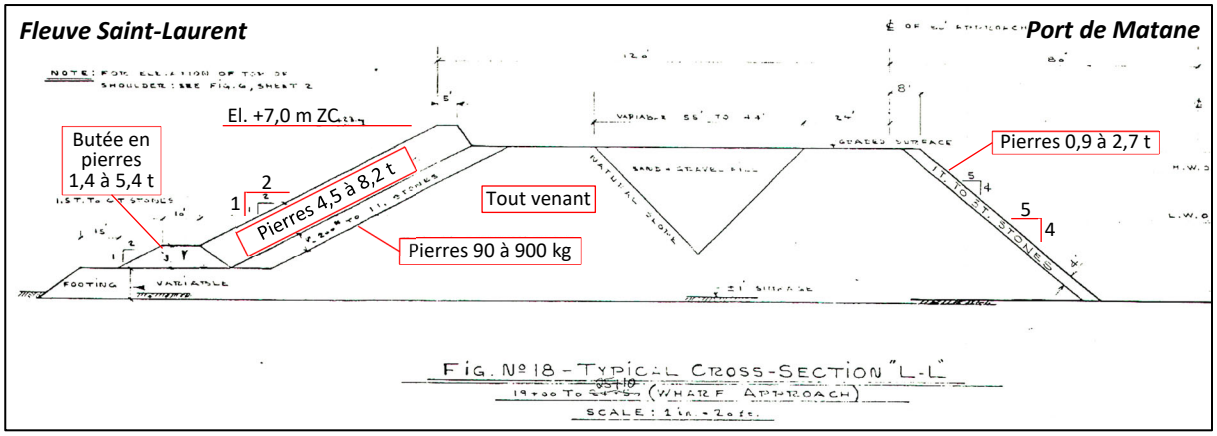
Coupe F-F'



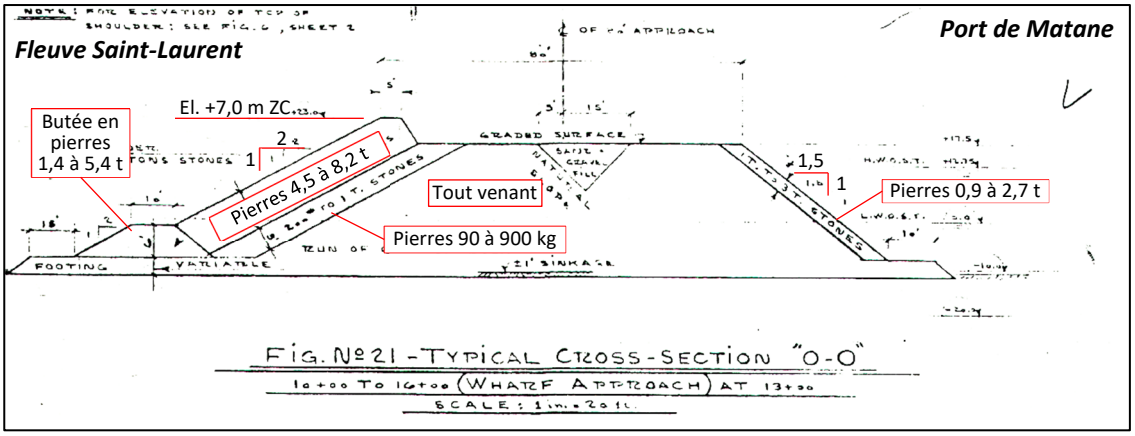
Coupe H-H'



Coupe I-I'



Coupe L-L'



Coupe O-O'

Figure 3-2 Conception originale du brise-lame ouest – Coupe-types - extrait des plans « tel que construit » (Ménard, Marsan & Thibeault, 1970)

3.2 Études et travaux de réfection antérieurs

Baird (2004) présente un résumé des paramètres retenus pour la conception originale du brise-lame dans les années 1960. Malgré une documentation éparse concernant certaines études préparatoires soulignée par les auteurs, il est établi que la hauteur de vague retenue pour effectuer la conception originale du brise-lame était de 4,4 m ($H_{⅓} = H_s$) et qu'une élévation de +3,9 m ZC a été retenue pour le niveau d'eau de conception. La stabilité de la carapace aurait quant à elle été analysée à l'aide de formules empiriques (méthode de Beaudevin, de Sogreah), ainsi qu'avec des essais sur modèles physiques dans un bassin d'agitation.

L'analyse des auteurs démontre cependant que le brise-lame était particulièrement vulnérable au franchissement par les vagues. Cette sensibilité avait notamment été identifiée dans le cadre des essais sur modèles réduits effectués avant la construction de l'ouvrage et se reflétait au niveau des défaillances observés après sa construction. Les dommages les plus importants se concentraient principalement au musoir, ainsi que dans la zone du coude, où la carapace était constituée exclusivement de pierres.

Des travaux de réfection ont été réalisés sur l'ouvrage dans les années 1976, 1981, 1989, 1993 et 1996. Les interventions incluaient principalement le rechargement de certaines portions du revêtement de carapace (partie supérieure des profils) avec des nouvelles pierres ayant des masses variant entre 3,5 à 5,5 tonnes et 6,4 à 10 tonnes. Une partie importante du musoir a également été reconstruite en 1981 suivant sa destruction partielle causée par les aléas maritimes. Dans le cadre de ces travaux, la crête du musoir a été rehaussée à l'élévation +9,1 m ZC, puis renforcée par l'ajout d'un tablier de blocs en « Y ». Des rangées de blocs en « Y » ont également été aménagées dans deux autres sections du brise-lame (proche du musoir et dans la zone du coude) pour rehausser la crête de la structure et réduire le taux de franchissement par les vagues (**Figure 3-3**). Les blocs avaient une hauteur approximative de 1,2 m.



Figure 3-3 Localisation approximative des rangs de blocs en « Y » placés en 1981 pour rehausser la crête du brise-lame

Malgré ces interventions, la dégradation du brise-lame s'est poursuivie. À cet effet, une inspection visuelle réalisée par Baird en 2003 notait le déplacement latéral des blocs en « Y » ajoutés sur la crête en 1981, la perte de pierres de carapace sur le côté extérieur du coude, dans la partie supérieure du profil, la présence de pierres sous-dimensionnées et de zones d'érosion sur le côté intérieur du brise-lame, ainsi qu'une perte substantielle de tétrapodes sur le côté extérieur du musoir (zone refaite en 1981), qui s'était apparemment produite lors d'un événement de tempête isolé en 2001 ou 2002. Les dommages témoignaient des conditions de vagues et de franchissement sévères auxquelles était soumis le brise-lame.

Les analyses effectuées par Baird (2004 et 2006) identifiaient une approche de conception non conservatrice, notamment au niveau des coefficients de stabilité retenus pour le dimensionnement du revêtement de carapace, combinée à une sous-évaluation des paramètres de conception (vagues et niveaux d'eau), comme étant les principales causes derrières les dégradations observées. À cet effet, les essais sur modèles réduits (Baird, 2006) suggéraient que la dégradation du revêtement de carapace pouvait s'amorcer lorsque les vagues atteignaient une hauteur de 3 m au coude et 3,5 m au musoir, puis qu'elle devenait sévère lorsque les vagues excédaient 4 m.

D'autres facteurs aggravants comme les efforts des glaces, une capacité géotechnique insuffisante des sols sous-jacents, une qualité déficiente des matériaux utilisés, ainsi qu'un écart de conformité entre les travaux exécutés et les documents d'ingénierie ont également été considérés, et n'ont pu être catégoriquement écartés, sans toutefois pourvoir confirmer le poids et l'impact de chacune de ces composantes sur les dégradations observées.

Sur la base des analyses effectuées, des nouveaux concepts ont été développés pour la réfection du musoir et du coude du brise-lame. Le niveau d'eau de conception a notamment été rehaussé à +4,5 m ZC

(contre +3,9 m ZC à l'origine) et les hauteurs de vagues retenues pour le dimensionnement du revêtement de carapace ont respectivement été augmentées à 5,0 m au musoir et 5,3 m au coude (contre 4,4 m à l'origine). La stabilité des concepts proposés a été validée à l'aide d'essais sur modèles réduits dans un bassin d'agitation.

Les travaux de réfection ont été exécutés en 2008 et incluaient la mise en place de pierres de 12 à 18 tonnes sur la paroi extérieure de la structure et 8 à 12 tonnes sur la crête et la paroi intérieure du brise-lame, dans les deux zones d'intervention identifiées (**Figure 3-4** et **Figure 3-5**). La crête du brise-lame a également été rehaussée à une élévation de +8,0 m ZC. Enfin, les blocs en « Y » ont été retirés, puis relocalisés le long de l'enrochement sur le côté ouest du quai.

La partie centrale du brise-lame du côté mer, située entre le coude et le musoir (tronçon d'environ 340 m de longueur, muni d'une carapace en tétrapodes de 6,0 tonnes sur le côté extérieur), a quant à elle été exclue des zones d'intervention proposées. À cet effet, Baird (2006) soulignait que cette section du brise-lame conservait un état supérieur aux secteurs adjacents et qu'aucun travail de réfection majeure n'avait été requis à cet endroit depuis la construction de l'ouvrage. L'inspection visuelle notait malgré tout certaines déficiences, dont la présence de quelques tétrapodes brisés ou fracturés, des zones localisées avec tétrapodes manquants ou avec seulement un rang de tétrapodes, une couche de pierres filtres déficiente et des pierres sous dimensionnées sur la crête et la paroi intérieure du brise-lame. Bien que la correction des déficiences fût jugée moins prioritaire que dans les secteurs adjacents à cette époque, il demeurait anticipé que des travaux d'entretien ou de réfection soient requis dans le futur.

Il convient de souligner que la crête du brise-lame a malgré tout été refaite et rehaussée à la même élévation qu'au coude et au musoir lors des travaux de 2008 pour accommoder l'aménagement et le retrait du chemin d'accès temporaire permettant la circulation de la machinerie jusqu'au musoir.

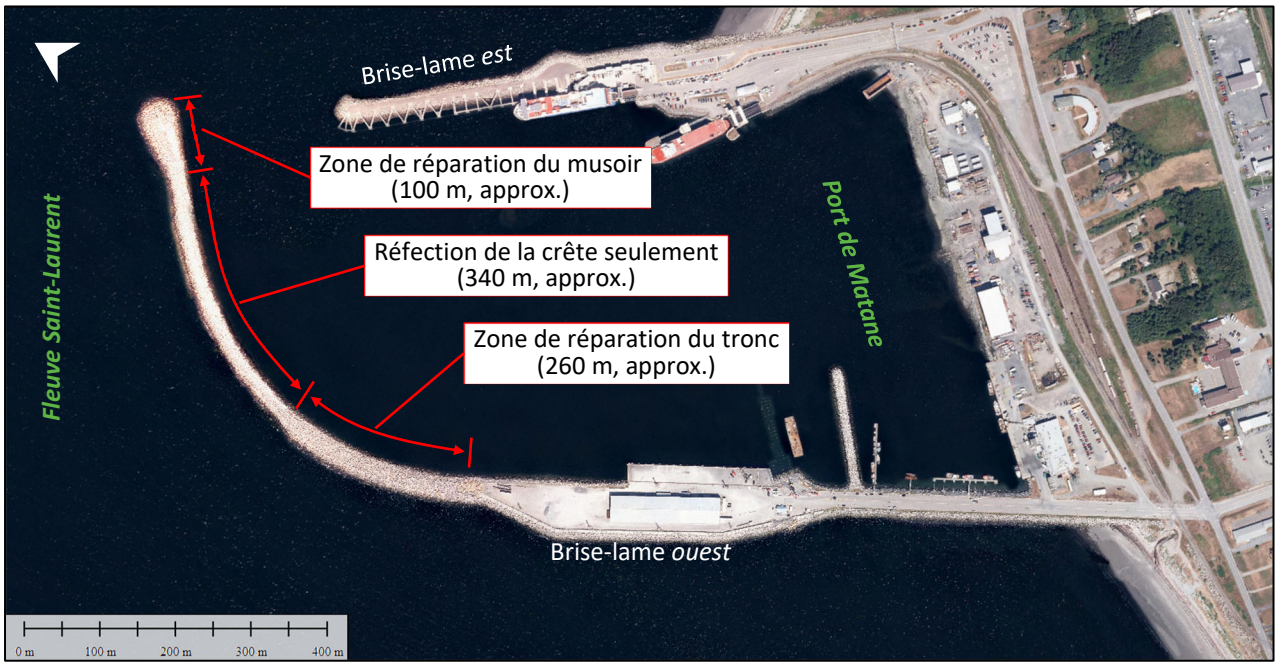


Figure 3-4 Localisation des travaux de réfection effectués en 2008

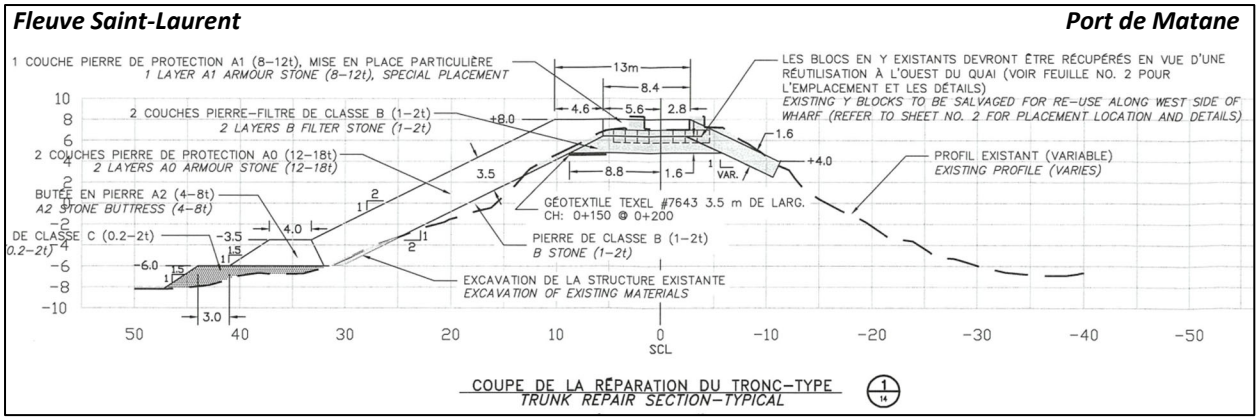


Figure 3-5 Coupe-type de la réparation du tronc (extrait des plans « tel que construit », Baird, Consultants Ropars Inc. & CIMA+, 2009)

3.3 Inspection visuelle 2023

Une inspection visuelle du brise-lame a été réalisée par Lasalle|NHC le 10 octobre 2023. Les conditions météorologiques de cette journée étaient ensoleillées avec vents faibles. La marée basse a été observée à 11h15 (heure avancée de l'est, HAE) et le niveau d'eau est descendu jusqu'à une élévation de +0,6 m ZC, selon les prévisions annoncées par le service Hydrographique du Canada (MPO). L'inspection a été réalisée entre 10h30 et 15h00 (HAE).

Dans le cadre de la visite, des professionnels spécialisés dans le domaine du génie côtier ont marché le long de l'enrochement pour documenter son état, prendre des photos, noter les défaillances et mesurer les dimensions de quelques pierres sur divers tronçons de l'ouvrage. Ils ont également profité de l'occasion pour discuter avec le maître de port des dommages et des enjeux opérationnels occasionnés par les tempêtes historiques. Ce dernier a notamment évoqué les problématiques fréquentes liées au franchissement de la structure par les vagues qui déposent des débris sur le chemin d'accès et qui endommagent certaines infrastructures situées proches de l'enrochement (guérite de réception, bureau du maître de port, etc.). Des détails supplémentaires concernant cette problématique sont présentés à la section 4.4 du rapport.

Les constats réalisés lors de l'inspection sont présentés aux sections suivantes, conjointement avec une analyse des profils relevés en 2022/2023 (topographie/bathymétrie), afin de dresser un portrait global de l'état du revêtement en enrochement, puis le cadrer par rapport à l'état d'origine décrit sur les plans tels que construits. Le découpage des zones homogènes identifiées sur la structure suit la segmentation présentée sur la **Figure 3-6**. Un répertoire photographique présenté à **l'annexe A** consigne les photos les plus éloquentes prises lors de la visite.

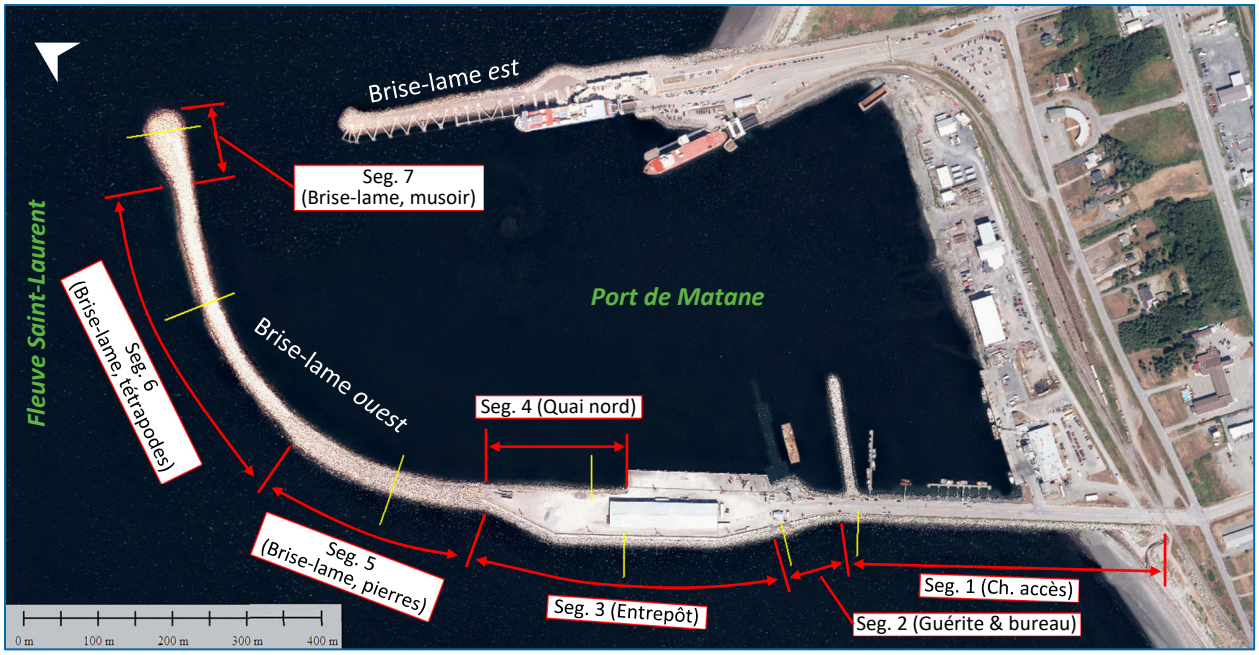


Figure 3-6 Segmentation des zones homogènes identifiées sur le brise-lame ouest

3.3.1 Segment 1 (chemin d'accès)

L'enrochement qui longe le chemin d'accès est caractérisé par des pierres de formes semi-anguleuses (arrêtes légèrement arrondies) dont l'enchevêtrement est plutôt vétuste (**Annexe A, photos 01 à 06**). Les dimensions des pierres sont relativement étalées et plusieurs « petites » pierres sont présentes en surface. Selon les dimensions mesurées lors de l'inspection, des pierres de 0,5 à 7,0 tonnes sont présentes dans l'enrochement. La plupart des pierres ont cependant une masse entre 1,0 et 3,5 tonnes. Des pierres de plus petites dimensions étaient par ailleurs visibles dans certains des interstices inspectés, suggérant qu'une seule couche de pierres de carapace pourrait être présente sur le revêtement. Il convient de rappeler que les plans originaux indiquent que les masses des pierres de carapace devraient être comprises entre 4,5 et 8,2 tonnes (**Figure 3-2, coupe O-O'**).

Les relevés topographiques indiquent quant à eux que la crête du revêtement se situe à une élévation approximative de +6,5 m ZC (**Figure 3-7**), soit environ 0,5 m plus bas que l'élévation d'origine. La pente transversale du revêtement maintient malgré tout une dénivelée relativement conforme à la conception initiale, soit 2 H : 1 V.

Malgré les détériorations identifiées, le revêtement ne présente pas de déficiences majeures ou critiques, telles que des glissements, des affaissements ou des ruptures de pente, des trous dans la couche de carapace laissant les sous-couches exposées ou des teneurs élevées en pierres fissurées ou fracturées. Aucun dommage particulièrement distinctif n'a par ailleurs été observé au niveau du chemin d'accès lors de l'inspection. Une rangée de grosses pierres semblait avoir été ajoutée sur un tronçon d'environ 70 m le long de l'accotement du chemin d'accès, proche de la guérite d'entrée aux installations portuaires (**Annexe A, Photo 06 et Figure 3-8**).

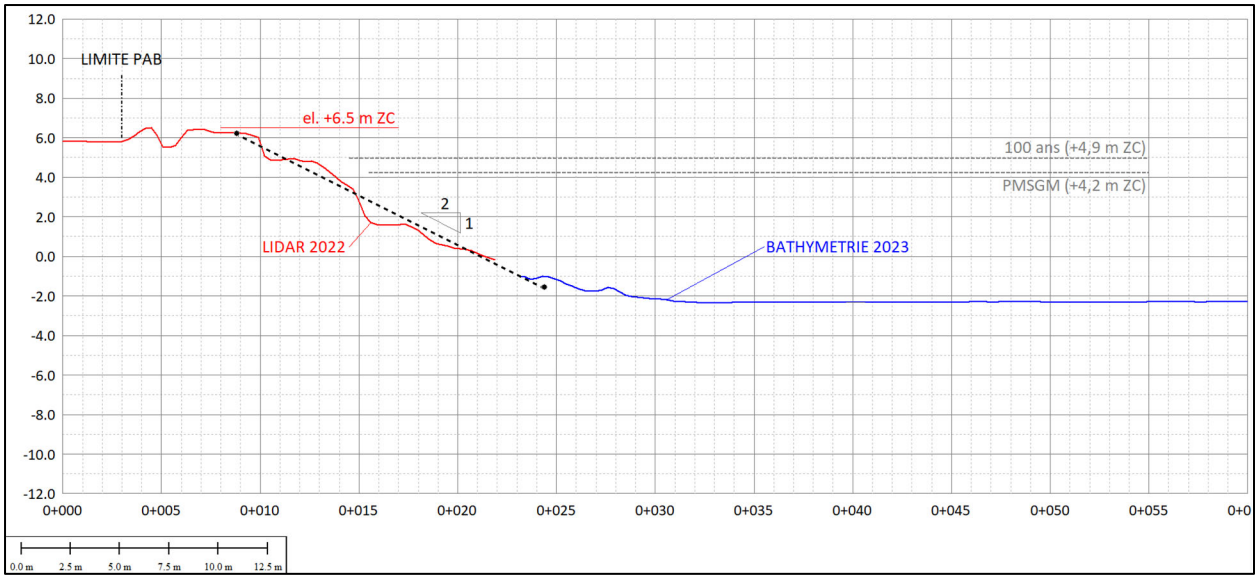


Figure 3-7 Profil transversal de l'enrochement ouest le long du segment 01 (Chemin d'accès)

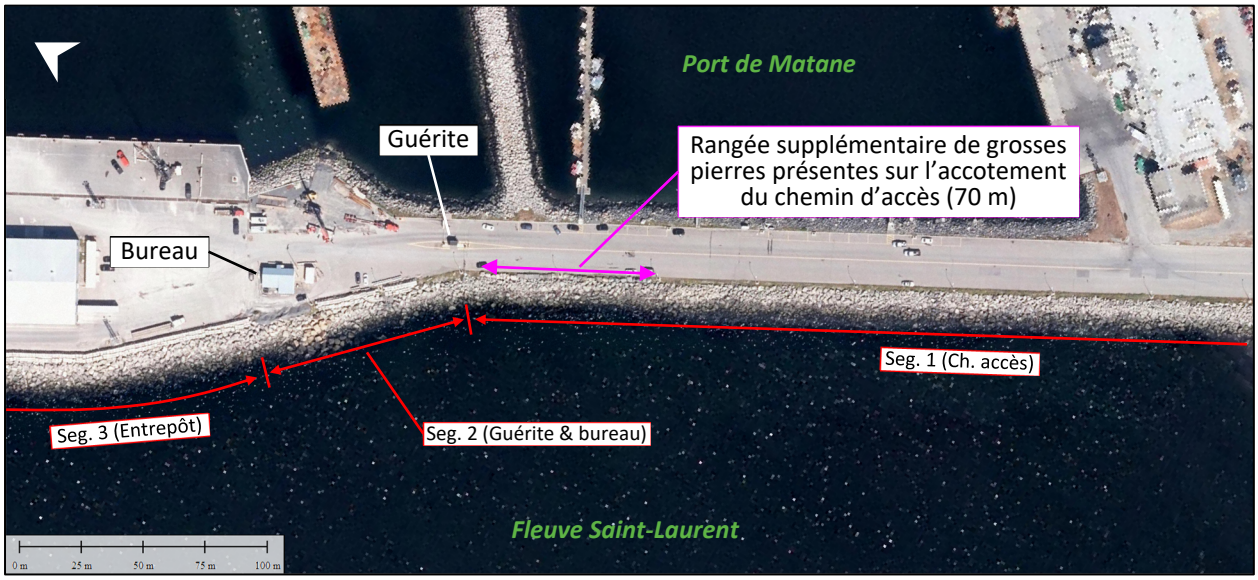


Figure 3-8 Localisation de la rangée supplémentaire de grosses pierres sur l'accotement du chemin d'accès

3.3.2 Segment 2 (Guérite et bureau)

Entre la guérite et le bureau du maître de port, l'enrochement présente une structure plus hétérogène (**Annexe A, photos 07 à 09**). Des blocs en « Y » sont notamment présents en crête sur une partie du segment et des pierres de lithologie différente sont visibles devant le bureau du maître de port. Leur couleur et leurs dimensions se distinguent des autres pierres de l'enrochement. Selon les mesures prises lors de l'inspection, la masse de ces pierres varie entre 3,5 et 12,5 tonnes. Les pierres ne semblent pas

être d'origine et ont probablement été ajoutées dans le cadre de travaux de réfection localisés. Ailleurs, les pierres demeurent de nature et de dimensions similaires à celles présentes le long du chemin d'accès (segment 01). L'enchevêtrement est quant à lui plus déficient.

Devant le bureau du maître de port, la crête de l'enrochement est plus basse que dans les secteurs adjacents. La rangée de blocs en « Y » est notamment interrompue à cet endroit et des pierres de petites tailles sont visibles sur la surface de l'enrochement. Les relevés terrestres indiquent que la crête conserve malgré tout une élévation approximative de +6,5 m ZC. La pente transversale est pour sa part légèrement adoucie à 2,2 H : 1 V (**Figure 3-9**). À cet effet, la forme caractéristique en « S » du profil suggère qu'un certain glissement des pierres de la crête vers le pied se serait produit au cours de la vie du revêtement.

Selon les témoignages du maître de port rencontré lors de l'inspection, des débris et des pierres sont fréquemment projetés par-dessus l'enrochement sur ce segment et endommagent le bâtiment et la guérite situés derrière. Le mur arrière du bureau du maître de port et les fenêtres de la guérite ont notamment dus être renforcis avec des panneaux en béton et des grillages métalliques afin d'éviter les bris aux infrastructures[1].

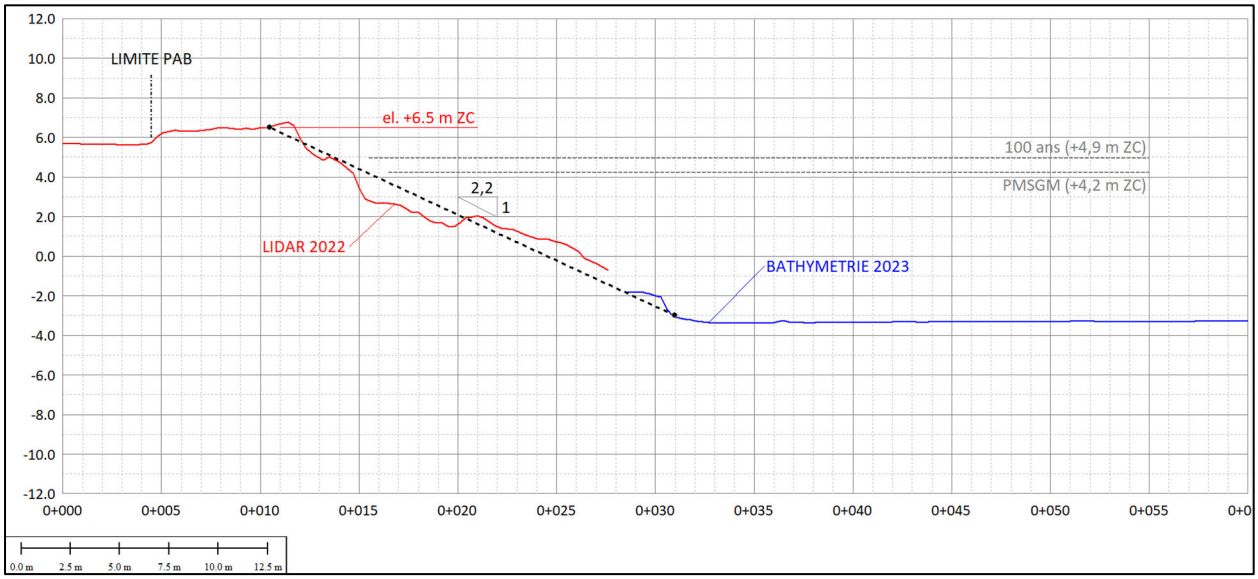


Figure 3-9 Profil transversal de l'enrochement ouest le long du segment 02 (Guérite et bureau)

3.3.3 Segment 3 (Entrepôt)

Dans le secteur de l'entrepôt, l'état de l'enrochement est meilleur que celui des deux secteurs précédents, mais reflète malgré tout, les effets d'un ouvrage cumulant plus de 50 ans de vie utile (**Annexe A, photos 10 à 14**). L'enchevêtrement des pierres n'est pas optimal et les dimensions des pierres sont relativement étalées. Plusieurs « petites » pierres sont notamment apparentes en surface. Selon les mesures prises lors de l'inspection, des pierres de 0,5 à 11 tonnes sont présentes dans l'enrochement. La masse « typique »

[1] Communication verbale avec M. Jean-Pierre Harrison (SPBSG) lors de l'inspection de l'enrochement du 3 octobre 2023.

de la majorité des pierres varie plutôt entre 3 et 8 tonnes. Ceci correspond somme tout assez bien aux calibres indiqués sur les plans originaux (**Figure 3-2**, coupe L-L').

Une rangée de blocs en « Y » est présente en crête sur la longueur complète du segment. Certains blocs ont subi de légers déplacements, mais le parement demeure contigu, avec une crête relativement uniforme à l'élévation +7,0 m ZC (**Figure 3-10**). Sans ces blocs, la crête de l'enrochement serait plutôt autour de +6,4 m ZC. La pente transversale du revêtement est quant à elle d'environ 2,1 H : 1 V.

Malgré les quelques détériorations identifiées, le revêtement ne présente pas de déficiences majeures ou critiques.

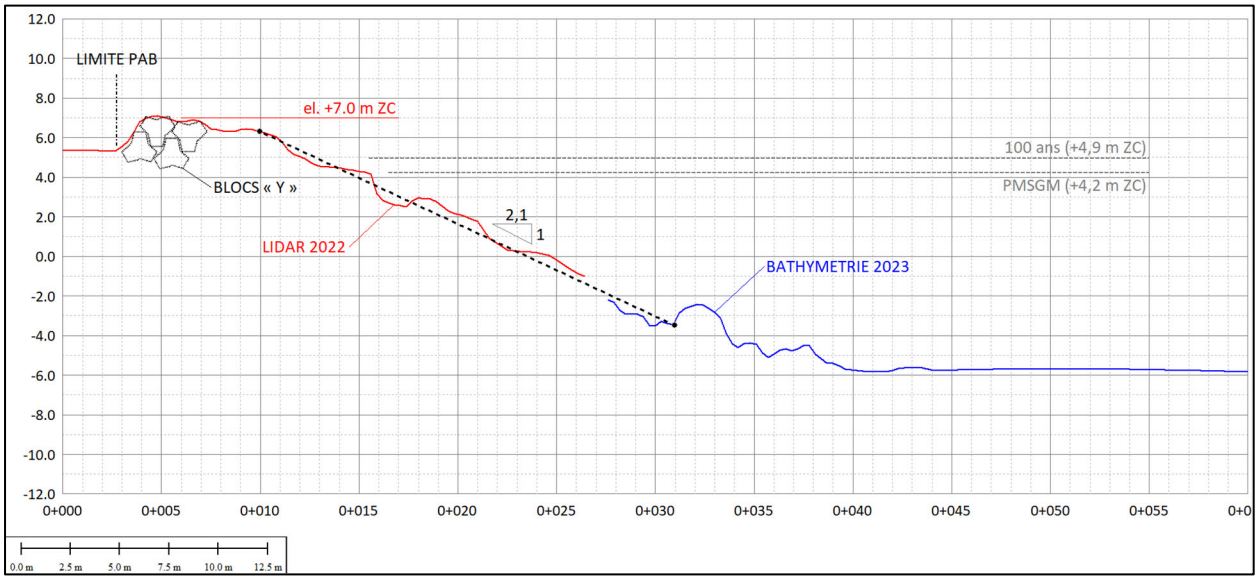


Figure 3-10 Profil transversal de l'enrochement ouest le long du segment 03 (Entrepôt)

3.3.4 Segment 4 (Quai nord)

Au nord du quai, l'enrochement est constitué de pierres de plus petit calibre que sur les parements extérieurs du brise-lame (**Annexe A, photos 15 à 17**). Ceci demeure normal, car les sollicitations dans le bassin portuaire sont moins importantes qu'à l'extérieur du côté mer. Selon les mesures prises lors de l'inspection, l'enrochement est constitué de pierres dont la masse varie entre 0,5 et 3,0 tonnes, ce qui correspond assez bien aux calibres indiqués sur les plans originaux (**Figure 3-2**, coupe L-L').

Les relevés terrestres indiquent pour leur part que la crête du revêtement se trouve à une élévation approximative de +6,3 m ZC et la pente transversale est d'environ 1,4 H : 1 V (**Figure 3-11**).

Selon les témoignages du maître de port, ce segment d'enrochement demeure vulnérable au franchissement par les vagues[2]. Des réparations ont notamment été réalisées à l'extrémité nord du segment en rechargeant la crête avec du riprap de petit calibre (**Annexe A, photo 15**). À l'extrémité sud,

[2] Communication verbale avec M. Jean-Pierre Harrison (SPBSG) lors de l'inspection de l'enrochement du 3 octobre 2023.

les pierres de protection ne s'élèvent pas jusqu'au niveau du tablier de l'aire d'entreposage. Le substrat meuble sous-jacent est apparent en crête, mais demeure recouvert de végétation (**Annexe A, photo 17**).

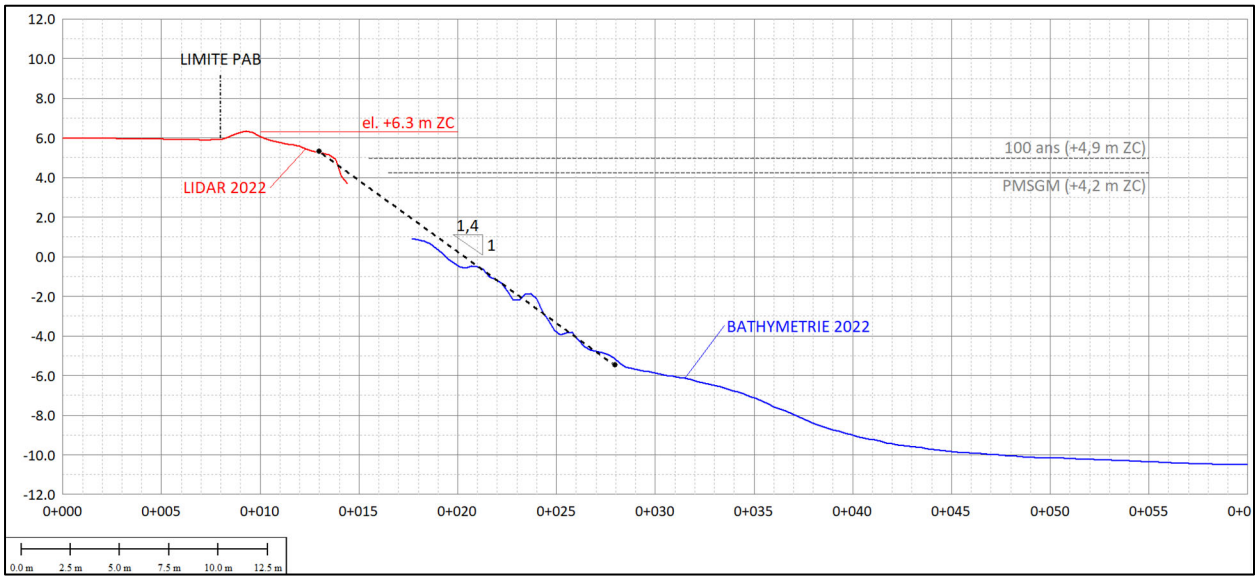


Figure 3-11 Profil transversal de l'enrochement le long du segment 04 (Quai nord)

3.3.5 Segment 5 (Brise-lame, pierres)

Le premier segment du brise-lame correspond au tronçon constitué exclusivement de pierres et ayant fait l'objet de travaux de réfection en 2008 (voir section 4.2). L'enrochement sur ce segment est caractérisé par des pierres anguleuses de grandes dimensions et bien enchevêtrées les unes avec les autres (**Annexe A, photos 18 à 22**). Les pentes latérales et le niveau de la crête sont relativement uniformes et ne présentent pas de signe d'affaissement ni de décrochement. Aucun trou dans la carapace ni de pierres fissurées n'ont été observés lors de l'inspection. L'enrochement parait donc en très bon état.

Du côté intérieur du brise-lame, une démarcation se distingue sur la paroi latérale et correspond probablement à la limite de réfection de 2008 (**Annexe A**, photo 19). Sous cette démarcation, les pierres sont de plus petite taille qu'au-dessus.

Les relevés terrestres indiquent pour leur part que la crête de l'enrochement se trouve à une élévation approximative de +7,5 m ZC (**Figure 3-12**), soit environ 0,5 m plus bas que l'élévation indiquée sur les plans de réfection (**Figure 3-5**). La pente transversale du côté extérieur (fleuve) est d'environ 1,8 H : 1 V, tandis que celle sur la paroi intérieure est de 1,5 H : 1 V.

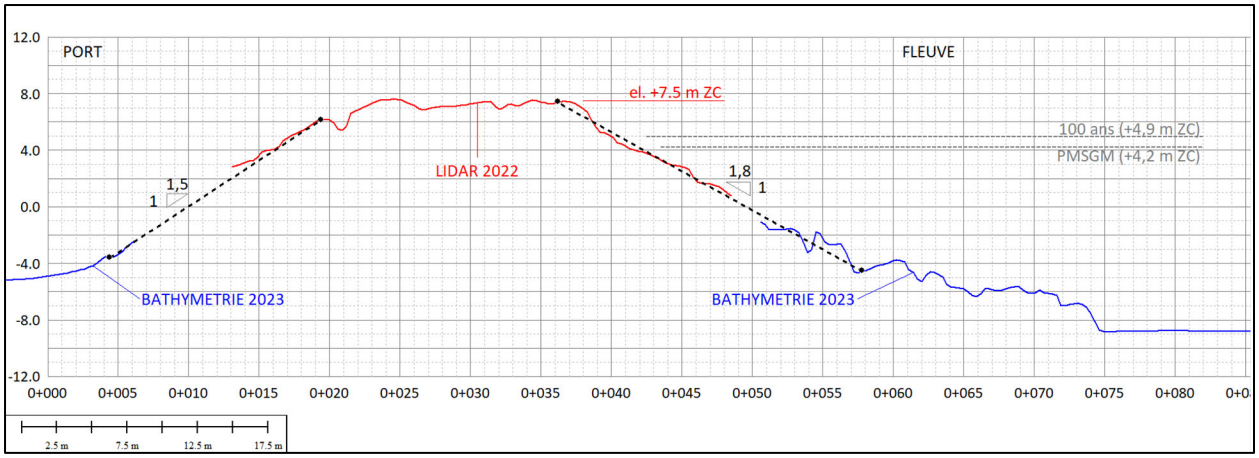


Figure 3-12 Profil transversal du brise-lame le long du segment 05 (Brise-lame, pierres)

3.3.6 Segment 6 (Brise-lame, tétrapodes)

Le prochain segment du brise-lame correspond au tronçon muni d'une carapace en tétrapodes sur le parement extérieur et en pierres sur la crête et le parement intérieur. Il convient de rappeler que la crête du brise-lame a été refaite dans le cadre des travaux de 2008, mais les parois latérales sont restées intouchées.

L'état du revêtement de protection sur ce segment témoigne des effets cumulatifs d'un ouvrage ayant plus de 50 ans de vie utile (**Annexe A, photos 23 à 32**). Les principales défaillances sont surtout observées sur le parement intérieur, où un revêtement de carapace contigu est absent à plusieurs endroits, laissant les pierres filtres et le noyau du brise-lame apparents. Ces dégradations rendent l'ouvrage vulnérable en cas de franchissement par les vagues ou lors de périodes agitées dans le bassin portuaire. Cependant, pour l'instant, le parement conserve une pente latérale relativement uniforme et ne présente pas de signe de glissement, d'affaissement ni de décrochement.

Sur le côté extérieur, les tétrapodes démontrent quelques signes de vieillissement, mais demeurent somme tout en bon état. Les unités sont bien enchevêtrées les unes avec les autres et peu d'entre-elles sont fissurées ou fracturées. Une perte localisée de quelques tétrapodes a été constatée à l'endroit indiqué sur la **Figure 3-13**, mais ce cas demeure isolé et la dégradation ne semble pas avoir exposé les couches de pierres sous-jacentes (**Annexe A, photo 32**).

La crête du brise-lame conserve quant à elle une élévation uniforme et ne présente pas de déformations distinctives (photo 30). Quelques pierres fracturées ont été observées (photo 31), mais leur nombre demeure faible.

Les relevés terrestres indiquent pour leur part que la crête de l'enrochement se trouve à une élévation approximative de +7,9 m ZC (**Figure 3-14**). La pente transversale du côté extérieur (fleuve) s'élève quant à elle à 1,4 H : 1 V dans la partie supérieure du profil (au-dessus du zéro des cartes) et s'adoucis à 3,3 H : 1 V dans la partie inférieure. Cette inflexion suggère la présence d'amoncèlements de pierres ou de tétrapodes au pied du brise-lame, qui pourraient résulter de dislocations antérieures, ou en provenance des secteurs adjacents, ou encore de la disposition de pierres lors des travaux de réfection

réalisés dans le passé. Du côté intérieur du brise-lame, le revêtement maintien une pente transversale d'environ 1,5 H : 1 V.

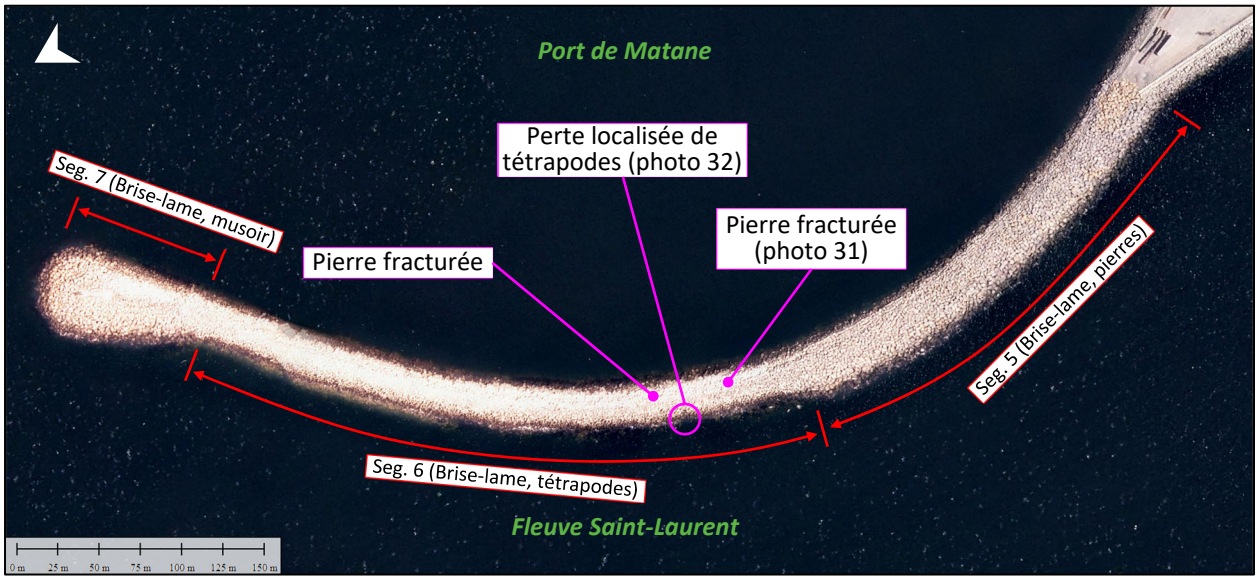


Figure 3-13 Localisation des déficiences observées en crête et sur le parement extérieur du brise-lame

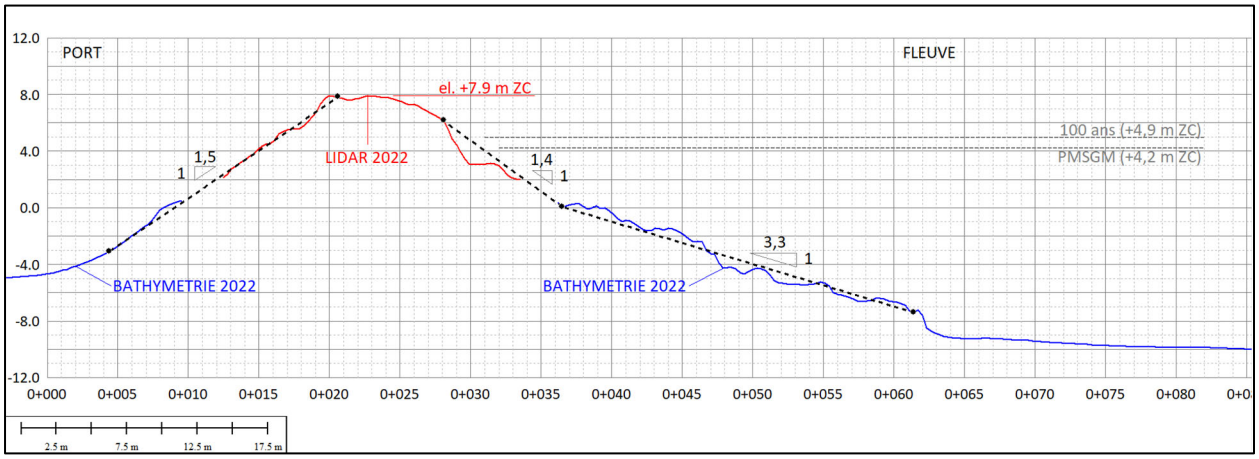


Figure 3-14 Profil transversal du brise-lame le long du segment 06 (Brise-lame, tétrapodes)

3.3.7 Segment 7 (Brise-lame, musoir)

Au musoir, l'enrochement conserve un bon état (**Annexe A, photos 33 à 35**). Les pierres et les blocs angulaires sont bien enchevêtrés les uns avec les autres et le revêtement ne présente pas de déformation distinctive préoccupante.

Selon les relevés terrestres, la crête de l'enrochement atteint une élévation approximative de +8,3 m ZC et les pentes transversales sont de l'ordre de 2 H : 1 V (**Figure 3-15**).

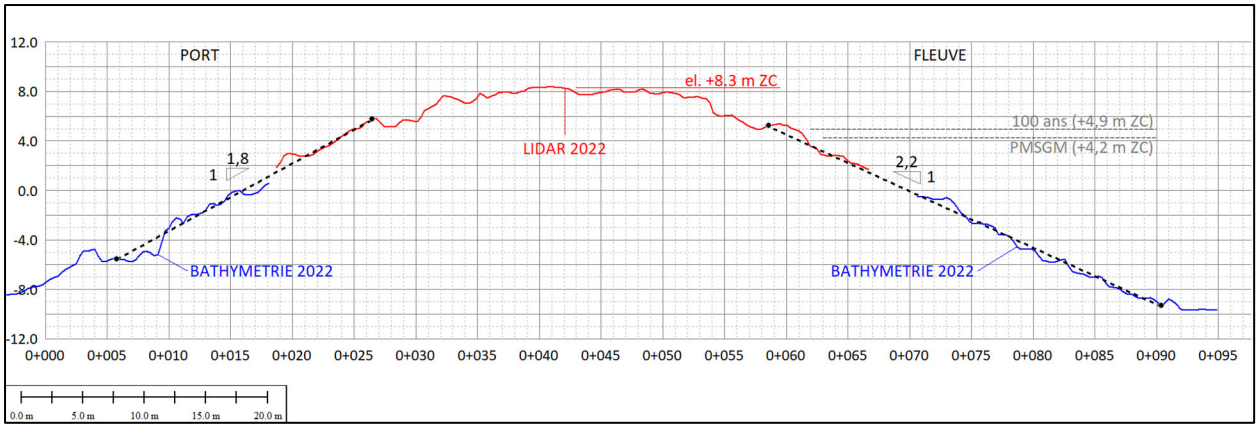


Figure 3-15 Profil transversal du brise-lame le long du segment 07 (Brise-lame, musoir)

3.4 Vulnérabilité au franchissement par les vagues

3.4.1 Méthodologie et seuils recommandés

L'approche préconisée pour évaluer la vulnérabilité au franchissement par les vagues suit la méthodologie présentée dans le manuel EurOtop (2018). Cette référence, destinée aux applications pratiques d'ingénierie, propose des formules permettant d'évaluer le débit de franchissement, le nombre de vagues franchissant la crête et la distribution de leurs volumes respectifs. Les équations ont été calées sur un large éventail d'études académiques et d'essais en laboratoire, réalisés en Europe et à l'International, et tiennent compte des avancées récentes dans le domaine.

Cette référence propose également différents seuils critiques au-dessus desquels le franchissement est considéré comme étant non tolérable. Les limites varient selon le contexte de protection considéré et les conditions d'agitation observées. Le **Tableau 3.1** synthétise les principales contraintes pouvant s'appliquer au projet à l'étude.

Tableau 3.1 Seuils de franchissement proposés par le manuel EurOtop (2018)

Contexte	Débit moyen de franchissement, q (l/s/m)	Volume maximal de franchissement, V_{max} (l/m)
1. Risques envers la pérennité de l'ouvrage [1]		
1.1 Brise-lame en enrochement; $H_{m0} > 5$ m; aucun dommage	1	2 000 à 3 000
1.2 Brise-lame en enrochement; $H_{m0} > 5$; crête et parement arrière conçus pour résister au franchissement	5 à 10	10 000 à 20 000
2. Risques envers les biens situés en crête ou derrière l'ouvrage [2]		
2.1 Infrastructures ou équipement en retrait de 5 à 10 m	1	1 000
3. Risques envers la circulation à pied ou en véhicule [3]		
3.1 Piétons avec vue non obstruée vers le large; $H_{m0} < 2$ m	1	600
3.2 Circulation automobile; $H_{m0} < 2$ m	10 à 20	2 000

Notes:
1. Tableau 3.1 du manuel EurOtop (2018).
2. Tableau 3.2 du manuel EurOtop (2018).
3. Tableau 3.3 du manuel EurOtop (2018).

Ces limites sont d'envergure comparables à d'autres références couramment utilisées dans le domaine du génie côtier. Le *Coastal Engineering Manual* (USACE, 2011) propose notamment des seuils de 20 à 50 l/s/m pour la stabilité structurale des ouvrages et 0,3 à 0,5 l/s/m pour la sécurité pédestre ou en véhicule.

Enfin, il convient de souligner que la notion du volume maximal des vagues est une considération relativement récente dans la littérature, mais qui permet une corrélation plus efficace entre les conditions de franchissement et les risques qu'elles représentent ou les dommages qu'elles peuvent occasionner. En effet, un nombre élevé de petites vagues ou un nombre faible de grosses vagues peuvent mener à des débits de franchissement équivalents. Cependant, les vagues fortes auront un volume maximal beaucoup plus élevé que les vagues faibles et peuvent ainsi occasionner des dommages plus significatifs. Dans le cadre de cette étude, les débits et les volumes de franchissement sont tous les deux considérés pour évaluer la vulnérabilité de l'ouvrage existant et concevoir les réfections recommandées.

3.4.2 Vulnérabilité de l'ouvrage existant

Le **Tableau 3.2** présente les débits et les volumes de franchissement anticipés sur l'ouvrage existant, en conditions actuelles (sans rehaussement du niveau moyen des mers) et projetées (avec un rehaussement de +0,32 m du niveau moyen des mers prévu en 2070). La segmentation du brise-lame correspond à celle présentée sur la **Figure 3-6**.

Les résultats d'analyse tiennent compte de la géométrie du revêtement, du niveau de la crête, du calibre des pierres et de la variation des vagues le long de l'infrastructure. L'évaluation du franchissement est effectuée pour des conditions de vagues et de niveaux d'eau ayant une récurrence conjointe de 100 ans. À cet effet, différentes combinaisons de vagues et de niveaux d'eau ont été étudiées pour identifier quel

scénario menait aux résultats les plus sévères (par exemple, vague 50 ans avec niveau 2 ans, vague 10 ans avec niveau 10 ans, vague 2 ans avec niveau 50 ans, etc.). Les résultats présentés correspondent aux valeurs maximales ainsi obtenues. À titre informatif, la combinaison critique correspond généralement à une vague de récurrence 50 ans et un niveau d'eau de récurrence 2 ans. Une combinaison légèrement différente est cependant retenue pour le segment 4 (Quai nord), car les vagues sont significativement réduites dans le bassin portuaire, en comparaison avec le côté extérieur du brise-lame. Dans ce cas, la vague observée 12 heures par année (récurrence approximative de 1 an) est combinée à un niveau d'eau de récurrence 100 ans.

Les résultats démontrent que l'ouvrage existant est très vulnérable au franchissement par les vagues et que la situation va se détériorer en climat futur, en raison du rehaussement du niveau moyen des mers provoqué par les changements climatiques et une modification potentielle du régime de tempêtes (intensité et fréquence) dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent. Sur les segments juxtaposés aux aires exploitées par les opérations portuaires (1-chemin d'accès, 2-guérite et bureau, 3-entrepôt et 4-quai nord), il apparait judicieux de considérer des seuils de franchissement acceptables de $q \leq 1$ l/s/m et $V_{max} \leq 1\,000$ l/m, afin d'assurer la protection des infrastructures situés en retrait de la crête, ainsi qu'une circulation piétonnière et véhiculaire sécuritaire. Les résultats obtenus en conditions existantes sont significativement plus élevés que ces limites.

Pour les autres segments situés sur le brise-lame, les seuils de franchissement recommandés sont plutôt ceux permettant d'assurer la pérennité de l'ouvrage. Sur les segments visés par les travaux de réfection réalisés en 2008 (5-brise-lame, pierres et 7-brise-lame, musoir), il apparait raisonnable de considérer que la crête et le parement arrière offrent une bonne résistance au franchissement. Les seuils acceptables dans ce cas seraient $q \leq 5$ à 10 l/s/m et $V_{max} \leq 10\,000$ à 20 000 l/m. Les résultats obtenus excèdent le critère de débit (q), mais respectent assez bien les limites recommandées pour le volume maximal (V_{max}).

Une tolérance réduite au franchissement est quant à elle recommandée pour le segment central du brise-lame (6-brise-lame, tétrapodes), en raison des déficiences observées sur le parement arrière (voir section 4.3.6). Les seuils acceptables seraient alors de $q \leq 1$ l/s/m et $V_{max} \leq 2\,000$ à 3 000 l/m. Les résultats obtenus sont toutefois significativement plus élevés que ces limites.

Tableau 3.2 Débits et volumes de franchissement extrêmes estimés sur l'ouvrage existant en climat actuel et futur (2070) et limites de franchissement recommandées

Paramètre	Segment						
	1 (Ch. Accès)	2 (Guérite & Bureau)	3 (Entrepôt)	4 (Quai nord)	5 (Brise-lame, pierres)	6 (Brise-lame, tétrapodes)	7 (Brise-lame, musoir)
Conditions actuelles (2023, sans rehaussement du niveau moyen des mers)							
Hauteur de vague (m) [1]	2,5	2,5	3,1	1,2 [4]	3,3	3,9	3,9
Niveau d'eau (m, ZC) [2]	4,4	4,4	4,4	4,9 [5]	4,4	4,4	4,4
Débit de franchissement moyen, q (l/s/m) [3]	183	220	66	32	117	148	111
Volume maximal de franchissement, V_{max} (l/m) [3]	13 500	15 000	12 200	2 900	16 200	16 600	19 500
Conditions futures (2070, avec rehaussement de +0,32 m du niveau moyen des mers)							
Hauteur de vague (m) [1]	2,5	2,5	3,1	1,2 [4]	3,3	3,9	3,9
Niveau d'eau (m, ZC) [2]	4,7	4,7	4,7	5,3 [5]	4,7	4,7	4,7
Débit de franchissement moyen, q (l/s/m) [3]	330	394	111	94	198	231	175
Volume maximal de franchissement, V_{max} (l/m) [3]	17 100	18 500	15 100	5 600	21 200	21 700	24 300
Limites de franchissement recommandées							
Débit de franchissement moyen, q (l/s/m)	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 5 à 10	≤ 1	≤ 5 à 10
Volume maximal de franchissement, V_{max} (l/m)	≤ 1 000	≤ 1 000	≤ 1 000	≤ 1 000	≤ 10 000 à 20 000	≤ 2 000 à 3 000	≤ 10 000 à 20 000

Notes:
1. Récurrence approximative 50 ans et majorée pour fins de conception
2. Récurrence approximative 2 ans.
3. Récurrence conjointe 100 ans.
4. Récurrence approximative 12 h/année.
5. Récurrence approximative 100 ans.

3.5 Interventions recommandées et programme de suivi

3.5.1 Chemin d'accès, guérite, bureau et entrepôt (segments 1 à 3)

À la lumière des déficiences notées dans le cadre de l'inspection visuelle et de la vulnérabilité constatée à l'égard du franchissement, une réfection complète du revêtement est recommandée sur les segments 1 à 3 (**Figure 3-6)**. Pour réduire le franchissement à des niveaux acceptables, un rehaussement de la crête jusqu'à l'élévation +9,0 m ZC serait requise. Les **Figure 3-16** et **Figure 3-17** illustrent les coupe-types proposées pour la réfection (coupes A et B), alors que le **Tableau 3.3** présente les débits et les volumes de franchissement résultant en conditions projetées. Le **Tableau 3.4** synthétise pour sa part les paramètres de conception considérés pour le dimensionnement des pierres et les calibres recommandés.

Les concepts proposés permettent le recouvrement du revêtement existant avec deux rangs de pierres de carapace sur les segments 1 et 2 (coupe A) et un rang de pierres de carapace sur le segment 3 (coupe B). Un nivèlement préalable avec des pierres filtres pourrait par ailleurs être requis. Une pente transversale de 2 H : 1 V est recommandée pour favoriser une meilleure stabilité des pierres et s'ajuster à la pente de l'ouvrage existant. La mise en place d'une butée au pied de l'enrochement est également recommandée pour protéger l'ouvrage contre l'affouillement. Cette butée serait aménagée avec des pierres de carapace. La récupération et la réutilisation des blocs en « Y » est quant à elle recommandée sur la crête de la coupe B, afin de maintenir la protection qu'offre ce parement de béton contre le franchissement par les vagues.

Les calculs de franchissement en conditions projetées indiquent que les résultats demeurent légèrement en excès des critères recommandés (**Tableau 3.2)**, mais les dépassements sont jugés peu significatifs. Selon les témoignages du maître de port rencontré lors de l'inspection visuelle, la problématique de franchissement est plus aigüe le long du chemin d'accès et dans le secteur de la guérite et du bureau que dans la zone de l'entrepôt. L'élévation de crête proposée pour faire face au climat futur demeure par ailleurs cohérente avec celle des autres infrastructures ceinturant le bassin portuaire, notamment celle du brise-lame est.

Advenant l'agrandissement de l'aire d'entreposage sur le côté ouest du brise-lame, la construction d'un nouvel enrochement serait requise en périphérie de la zone de remblayage proposée. Les coupe-types C et D sont donc recommandées si cette option est privilégiée (**Figure 3-18** et **Figure 3-19**). Les concepts conservent les mêmes calibres de pierres que les coupes A et B, mais proposent des dimensions plus structurées pour les sous-couches, entre les matériaux de remblayage et les pierres de carapace.

Les **Figure 3-20** et **Figure 3-21** illustrent l'étendue des zones de réfection recommandées, et les coupe-types applicables, pour les scénarios avec et sans agrandissement de l'aire d'entreposage.

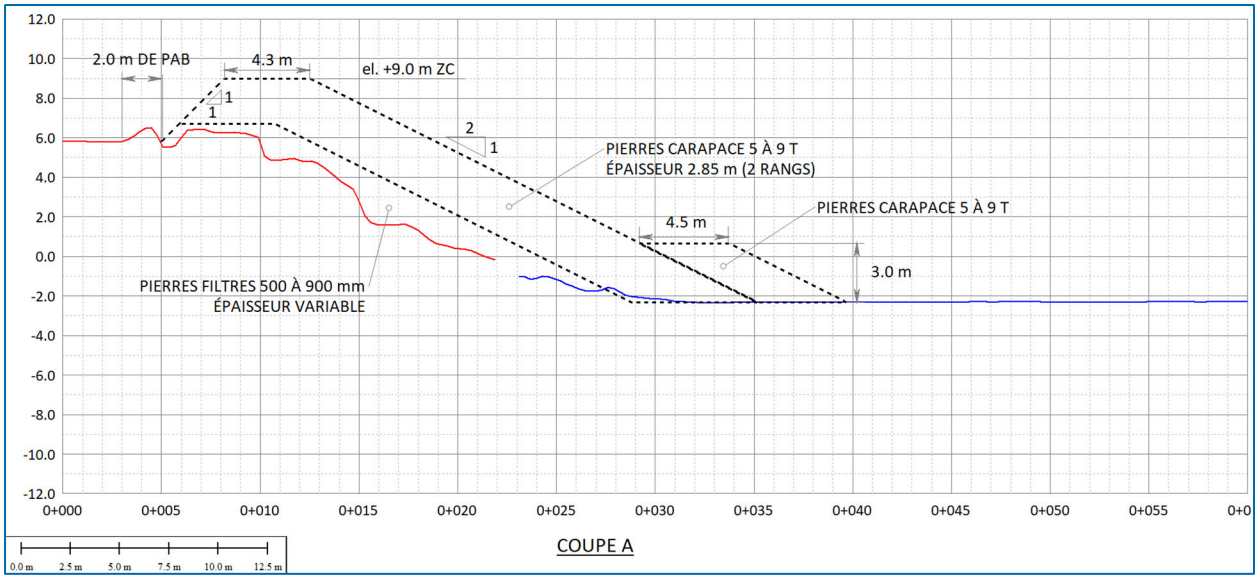


Figure 3-16 Coupe-type A recommandée pour la réfection de l'enrochement sur les segments 1 et 2

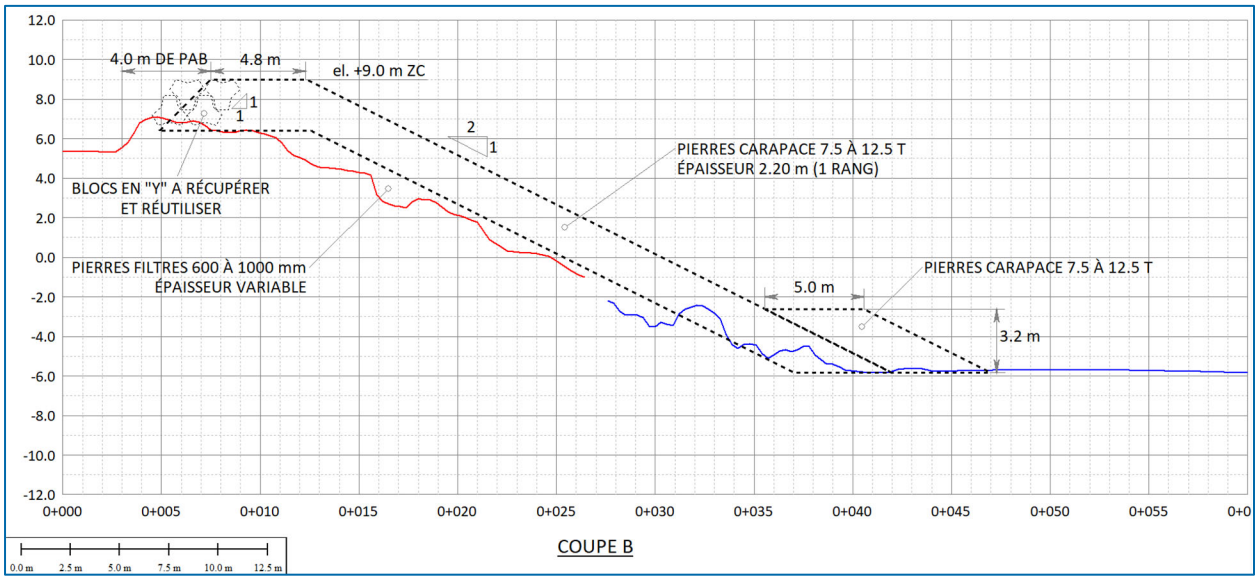


Figure 3-17 Coupe-type B recommandée pour la réfection de l'enrochement sur le segment 3

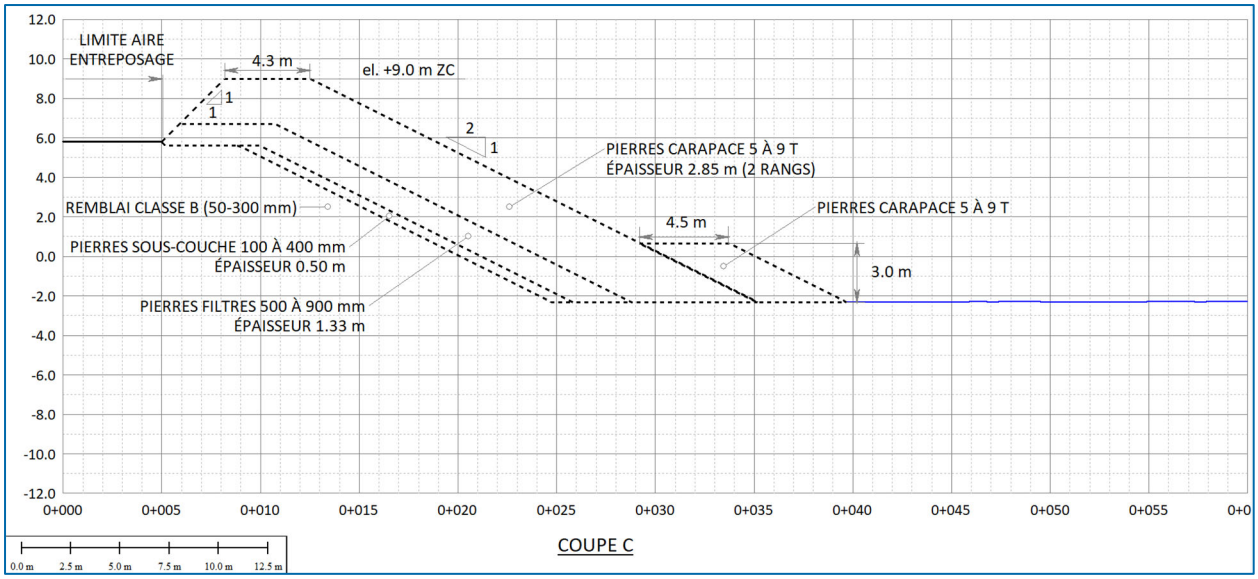


Figure 3-18 Coupe-type C recommandée pour la construction de l'enrochement ceinturant l'agrandissement de la zone d'entreposage proposé

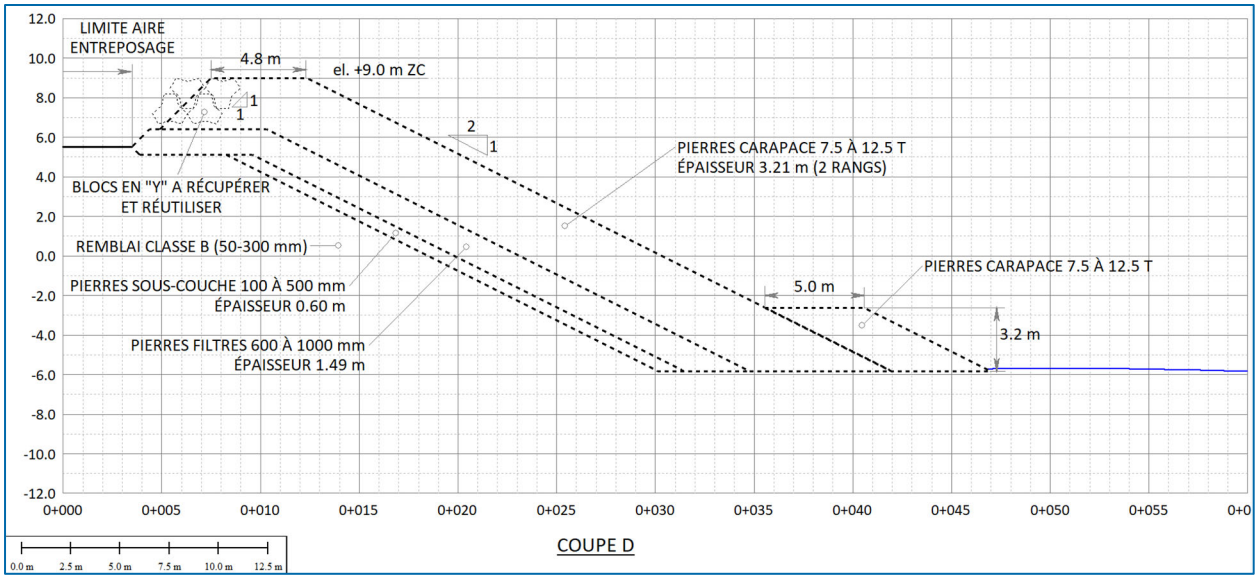


Figure 3-19 Coupe-type D recommandée pour la construction de l'enrochement ceinturant l'agrandissement de la zone d'entreposage proposé

Tableau 3.3 Débits et volumes de franchissement extrêmes anticipés pour les coupe-types A, B, C et D

Paramètre	Coupe-type	
	Coupes A et C	Coupes B et D
Conditions actuelles (2023, sans rehaussement du niveau moyen des mers)		
Hauteur de vague (m) [1]	2,5	3,1
Niveau d'eau (m, ZC) [2]	4,4	4,4
Débit de franchissement moyen, q (l/s/m) [3]	0,7	1,9
Volume maximal de franchissement, V_{max} (l/m) [3]	720	1 800
Conditions futures (2070, avec rehaussement de +0,32 m du niveau moyen des mers)		
Hauteur de vague (m) [1]	2,5	3,1
Niveau d'eau (m, ZC) [2]	4,7	4,7
Débit de franchissement moyen, q (l/s/m) [3]	1,6	3,5
Volume maximal de franchissement, V_{max} (l/m) [3]	1 100	2 500

Notes:
1. Récurrence approximative 50 ans et majorée pour fins de conception
2. Récurrence approximative 2 ans.
3. Récurrence conjointe 100 ans.

Tableau 3.4 Paramètres de conception considérés pour le dimensionnement des pierres et calibres recommandés sur les coupe-types A, B, C et D

Paramètre	Valeur	
	Coupes A et C	Coupes B et D
Paramètres de conception		
Hauteur de vague, H_s [1]	3,3	3,5
Pente transversale	2,0 H : 1 V	2,0 H : 1 V
Densité de la pierre, ρ_s	2 650 kg/m³	2 650 kg/m³
Densité de l'eau, ρ_w	1 025 kg/m³	1 025 kg/m³
Coefficient de forme	0,68	0,68
Coefficient de stabilité, K_D	2,0	2,0
Pierre de carapace		
Masse médiane, M_{50}	7 tonnes	10 tonnes
Calibre	5 à 9 tonnes	7,5 à 12,5 tonnes
Pierres filtres		
Masse médiane, M_{50} [2]	700 kg	1 000 kg
Calibre	500 à 900 mm	600 à 1 000 mm
Pierres de sous-couche		
Masse médiane, M_{50} [3]	35 kg	50 kg
Calibre	100 à 400 mm	100 à 500 mm

Notes:
1. Récurrence 100 ans et majorée pour fins de conception
2. $M_{50,filtre} = M_{50,carapace}/10$
3. $M_{50,sous\text{-}couche} = M_{50,filtre}/20$

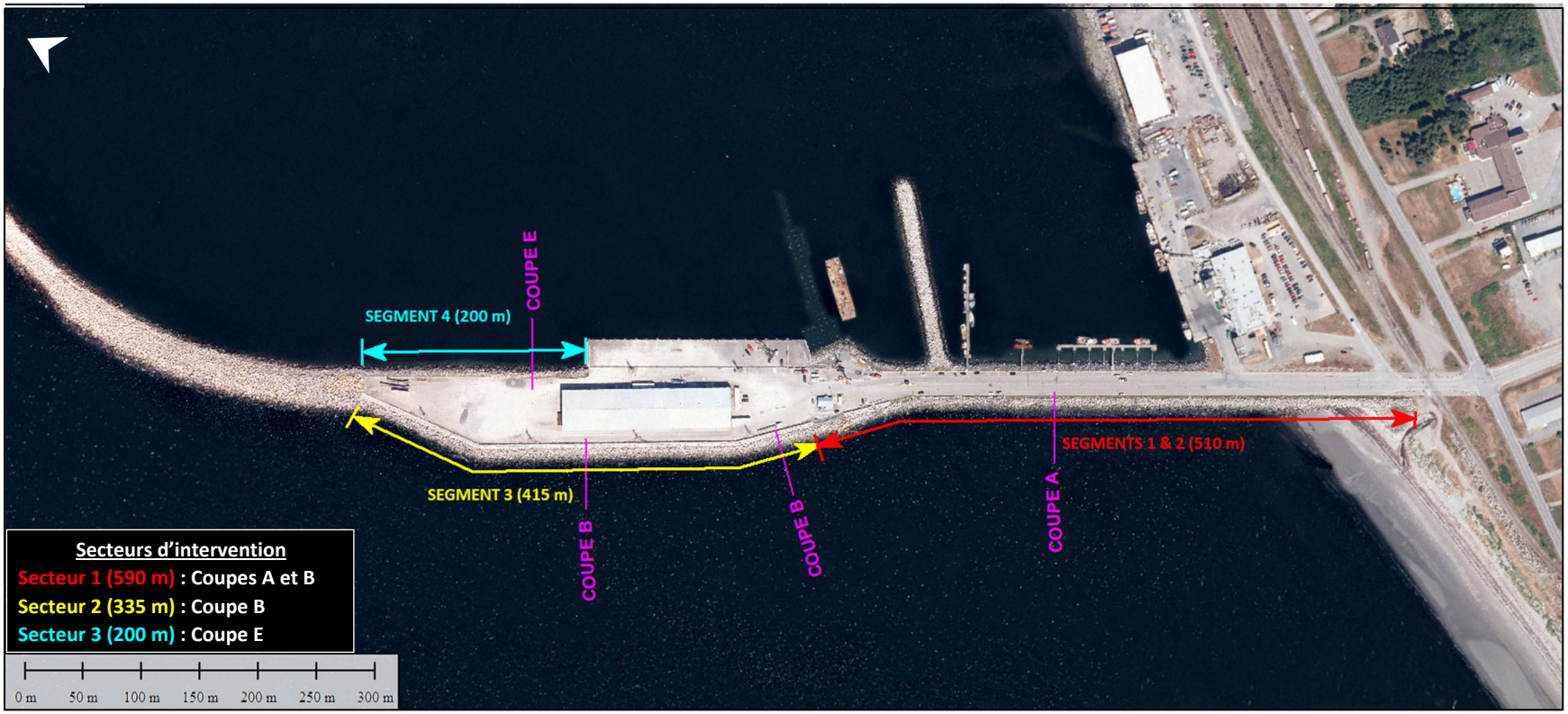


Figure 3-20 Enrochement ouest : Zones de réfection recommandées (sans agrandissement de l'aire d'entreposage)

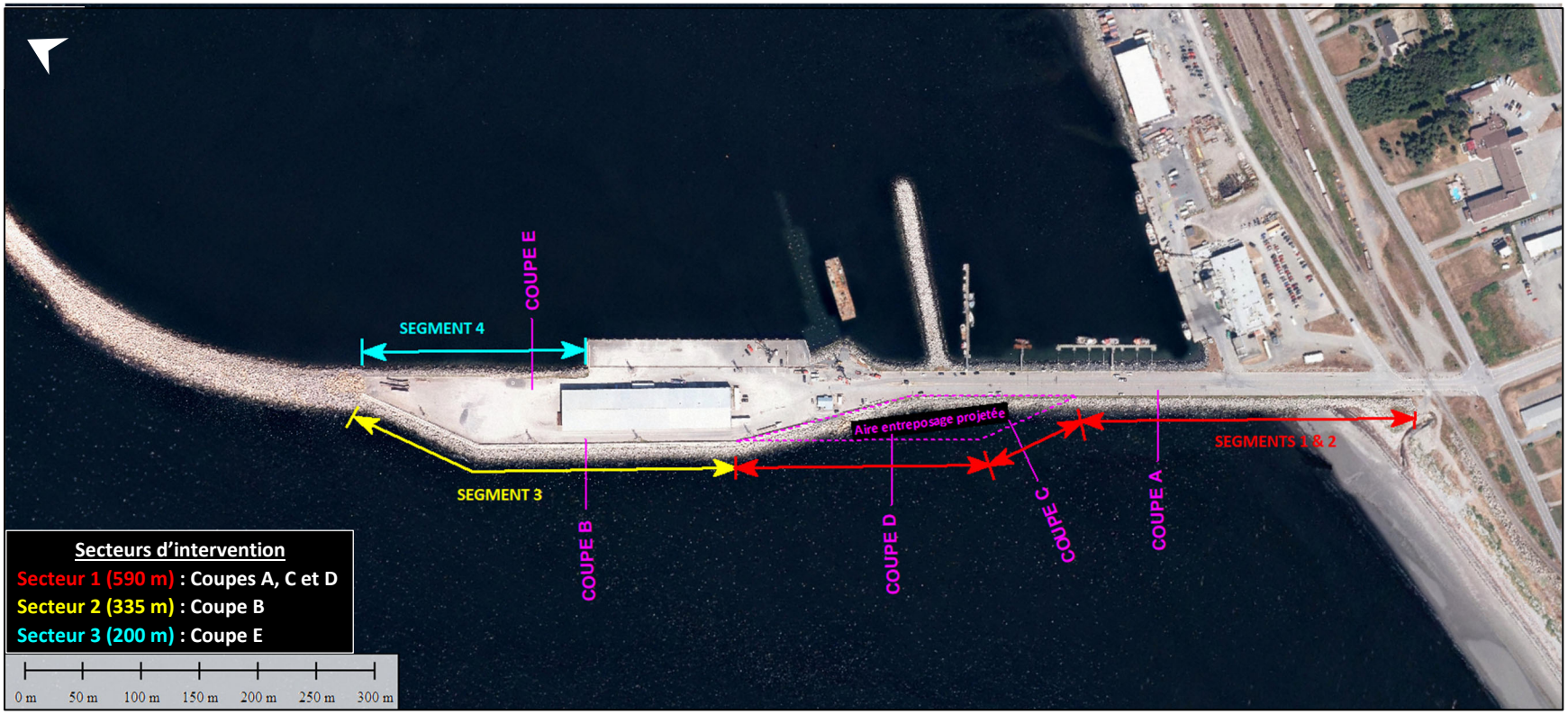


Figure 3-21 Enrochement ouest : Zones de réfection recommandées (avec agrandissement de l'aire d'entreposage)

3.5.2 Quai nord (segment 4)

La réfection de l'enrochement est également recommandée au nord du quai existant (segment 4), soit le segment situé du côté intérieur du havre. Un rehaussement de la crête à l'élévation +7,0 m ZC est proposé à cet endroit pour atténuer le franchissement par les vagues. La **Figure 3-22** illustre la coupe-type proposée pour la réfection (voir coupe E, **Figure 3-20**), alors que le **Tableau 3.5** présente les débits et les volumes de franchissement résultant en conditions projetées. Le **Tableau 3.6** synthétise pour sa part les paramètres de conception considérés pour le dimensionnement des pierres et les calibres recommandés.

À cet effet, il convient de souligner que l'étude d'agitation (section 5) dans le bassin portuaire indique que la hauteur de vague maximale pouvant atteindre ce segment d'enrochement est d'environ 1,5 m. Or, le dimensionnement effectué avec cette condition mène à un calibre de pierres plus petit que celui du revêtement existant. Dans ce contexte, il est probable que la glace soit l'élément prépondérant à considérer pour le dimensionnement des pierres. Un calibre équivalent à celui déjà en place est donc retenu pour la carapace proposée. À cet effet, l'inspection visuelle démontre que le revêtement existant conserve une stabilité acceptable.

Pour éviter l'empiètement dans le bassin portuaire et dans la zone potentiellement utilisée pour les manœuvres des navires, le concept proposé prévoit l'excavation et la reconstruction du revêtement dans l'empreinte existante. Une pente transversale de 4 H : 3 V est ainsi recommandée et permet du même coup d'atteindre le rehaussement proposé en crête.

Les calculs de franchissement en conditions projetées indiquent que les résultats demeurent légèrement en excès des critères recommandés, mais les dépassements sont jugés peu significatifs. Le rehaussement de la crête doit également éviter d'encombrer les opérations effectuées dans ce secteur des installations portuaire, telles que l'amarrage des navires.

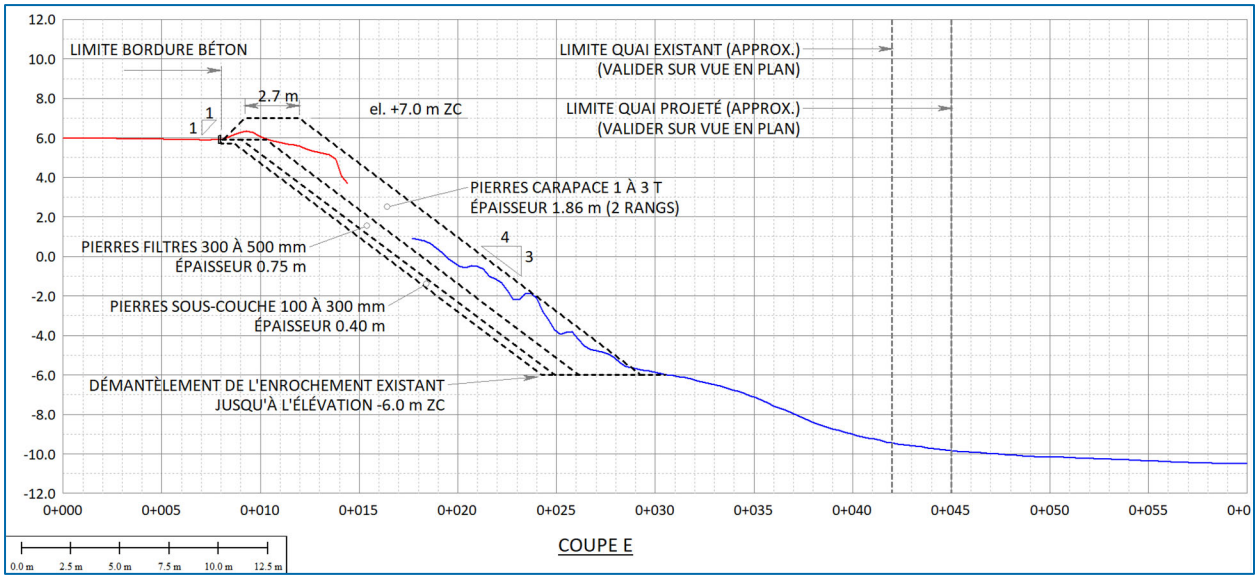


Figure 3-22 Coupe-type E recommandée pour la réfection de l'enrochement sur le segment 4

Tableau 3.5 Débits et volumes de franchissement extrêmes anticipés pour la coupe-type E

Paramètre	Coupe-type E
Conditions actuelles (2023, sans rehaussement du niveau moyen des mers)	
Hauteur de vague (m) [1]	1,2
Niveau d'eau (m, ZC) [2]	4,9
Débit de franchissement moyen, q (l/s/m) [3]	2,6
Volume maximal de franchissement, V_{max} (l/m) [3]	500
Conditions futures (2070, avec rehaussement de +0,32 m du niveau moyen des mers)	
Hauteur de vague (m) [1]	1,2
Niveau d'eau (m, ZC) [2]	5,3
Débit de franchissement moyen, q (l/s/m) [3]	9,4
Volume maximal de franchissement, V_{max} (l/m) [3]	1 300

Notes:
1. Récurrence approximative 1 ans.
2. Récurrence approximative 100 ans.
3. Récurrence conjointe 100 ans.

Tableau 3.6 Paramètres de conception considérés pour le dimensionnement des pierres et calibres recommandés sur la coupe-type E

Paramètre	Coupe-type E
Paramètres de conception	
Hauteur de vague, H_s [1]	1,5
Pente transversale	4 H : 3 V
Densité de la pierre, ρ_s	2 650 kg/m³
Densité de l'eau, ρ_w	1 025 kg/m³
Coefficient de forme	0,68
Coefficient de stabilité, K_D	2,0
Pierre de carapace (valeurs requises pour la résistance aux vagues)	
Masse médiane, M_{50}	0,8 tonnes
Calibre	0,6 à 1,0 tonnes
Pierre de carapace (valeurs retenues)	
Masse médiane, M_{50}	2 tonnes
Calibre	1 à 3 tonnes
Pierres filtres	
Masse médiane, M_{50} [2]	133 kg
Calibre	300 à 500 mm
Pierres de sous-couche	
Masse médiane, M_{50} [3]	9 kg
Calibre	100 à 300 mm

Notes:
1. Vague maximale observée dans l'analyse d'agitation.
2. $M_{50,filtre} = M_{50,carapace}/15$
3. $M_{50,sous\text{-}couche} = M_{50,filtre}/15$

3.5.3 Brise-lame (segments 5 à 7)

Au niveau du brise-lame, une intervention n'est pas jugée prioritaire ni urgente pour le moment. En effet, malgré les déficiences observées et la vulnérabilité au franchissement, particulièrement sur le tronçon central de l'ouvrage (segment 6), la structure conserve une géométrie régulière et ne présente pas de signes distinctifs ou précurseurs de glissement, d'affaissement ou de décrochement. Le parement extérieur en tétrapodes demeure également en relativement bon état, avec des unités bien enchevêtrées les unes avec les autres et peu d'entre-elles sont fissurées ou fracturées, tout comme la crête. Les segments ayant fait l'objet de travaux de réfection en 2008 (segments 5 et 7) sont quant à eux en excellente condition et n'ont visiblement pas subi de dégradations distinctives au cours des 15 dernières années.

Selon la documentation consultée dans le cadre de cette étude (rapports de Baird, notamment), la partie centrale du brise-lame présente un état « vulnérable » depuis plusieurs années. D'ailleurs, l'état observé lors de la récente inspection visuelle à l'automne 2023 ne parait pas foncièrement dissemblable à celui décrit dans le rapport de Baird en 2004. Il est donc difficile d'évaluer à quel rythme progressent les détériorations.

Bien que la réfection de la partie centrale du brise-lame semble inévitable à moyen ou long terme, elle parait prématurée dans l'immédiat, surtout en considérant l'envergure de travaux considérables que représente une intervention sur une structure de ce type. La mise en place d'un programme de contrôle et de suivi est plutôt privilégiée à ce moment pour surveiller la progression des dégradations et planifier les travaux de réfection à un moment ultérieur opportun. Ce programme devrait inclure, minimalement, la prise de photographies par drone selon une fréquence annuelle ou biannuelle (aux deux ans) et ainsi permettre de comparer l'état du brise-lame au fil des années. La réalisation de relevés lidar ou photogrammétriques selon cette même fréquence permettrait également d'identifier de façon plus précise les changements se produisant sur la structure. L'élaboration d'un programme plus détaillé par un professionnel spécialisé dans le domaine du génie côtier et l'inspection des ouvrages maritimes est recommandée.

4 CONDITIONS D'AGITATION DANS LE HAVRE

4.1 Contexte et objectifs

Le réaménagement des quais commerciaux du havre de Matane pourrait impacter les conditions d'agitation à l'intérieur du havre de Matane, plus particulièrement le long des postes à quai commerciaux. En effet, les différents scénarios d'aménagement à l'étude sont susceptibles d'influencer les interactions des vagues avec les structures rigides, notamment les patrons de réflexion et de diffraction des vagues.

L'étude d'agitation vise à évaluer, par modélisation numérique, les conditions d'agitation des vagues en conditions existantes (quai actuel) et selon les différents scénarios de réaménagement envisagés du havre de Matane (post-travaux). L'analyse des résultats de modélisation vise à identifier les enjeux reliés à la sécurité maritime, à la navigation et aux opérations portuaires de transbordement aux quais commerciaux, en incluant également une évaluation des conditions d'agitation au droit des autres postes à quai à l'intérieur du havre.

4.1.1 Géométries retenues

Le processus de conception du réaménagement des installations portuaires de Matane a nécessité le développement de plusieurs géométries de quai. La géométrie B17 a été recommandée à la suite de ce processus. D'autres géométries de quai ont tout de même été prises en compte dans les analyses hydrauliques, plus particulièrement en ce qui a trait à l'étude d'agitation.

L'étude d'agitation a inclus cinq (5) géométries de quai différentes incluant les conditions existantes et deux variantes pour la géométrie B16 (quai fermé avec murs verticaux et quai ouvert sur pieux), laquelle a donc exclue la géométrie B17 puisque celle-ci n'était pas encore développée lorsque l'étude d'agitation a été réalisée. Ceci dit, il est important de préciser que la géométrie B16 est très comparable à la géométrie B17 d'un point de vue de l'agitation portuaire (**Figure 4-1**), puisque la principale différence de géométrie entre ces deux variantes n'influence pas la configuration des murs de quais principaux où les sollicitations par les vagues sont les plus importantes (réflexion). De plus, le léger prolongement du quai #1 vers le nord est également non significatif en termes d'agitation par les vagues. **Ainsi, les résultats, les principaux constats et les recommandations présentés dans les prochaines sections pour la géométrie de quai B16 demeurent donc totalement applicables à la géométrie B17 également**. Sur cette base, il a été jugé non-pertinent de simuler et de produire des résultats d'agitation additionnels pour la géométrie B17.

Enfin, il est à noter que les géométries B4, B14 et B16 correspondent respectivement aux variantes 1, 2 et 3 présentées au rapport SRI-1 (Norda Stelo Englobe 2024).

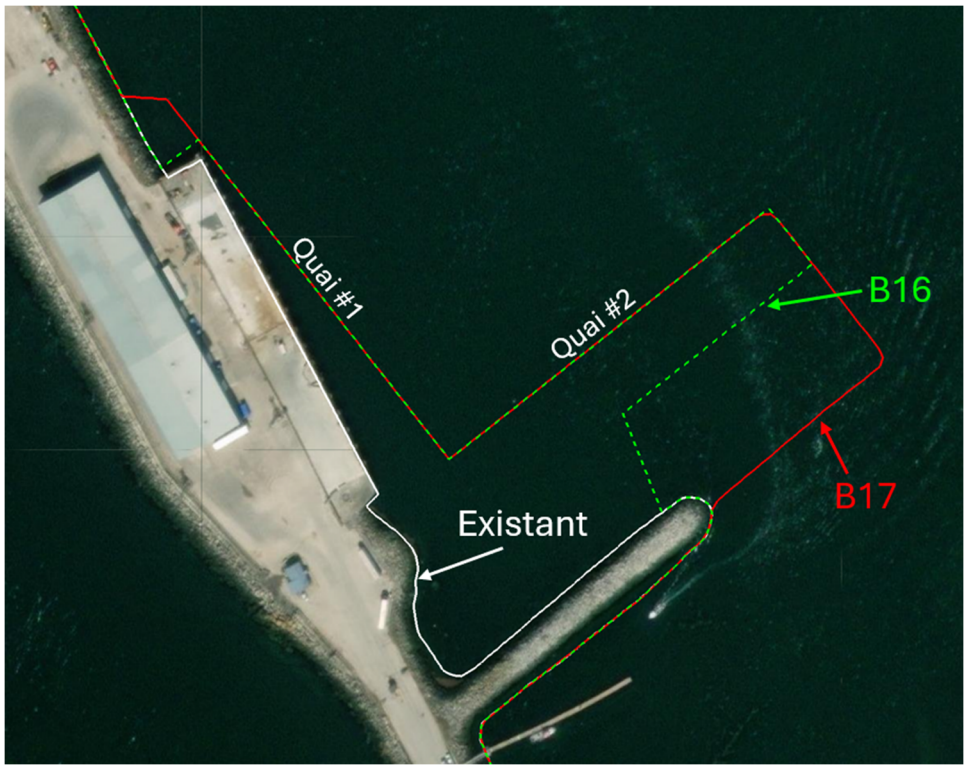


Figure 4-1 Comparaison des géométries de quai B17 et B16 – conditions post-travaux

4.1.2 Navires de conception

Dans le cadre du projet de réaménagement des installations portuaires de Matane, des navires de conception ont été sélectionnés en collaboration avec la SPBSG et le Centre de simulation et d'expertise maritime (CSEM) et ce, en fonction des opérations portuaires typiques effectuées au quai commercial de Matane. Les caractéristiques des navires de conception sont notamment utilisées pour la réalisation des études de navigation et la conception des aménagements portuaires. Les navires de conception ci-dessous ont été sélectionnés:

- Vraquier de 30 000 tonnes (Québec Arcturus, **Figure 4-2**);
- Navire-citerne de 6 046 tonnes (Bow Master, **Figure 4-3**).

Ces mêmes navires ont été considérés pour l'étude d'agitation des vagues, plus particulièrement pour établir des critères d'agitation adaptés aux utilisations et opérations à quai.

QUEBEC ARCTURUS



Modèle	BKCS01P
Type	Bulk Carrier
Disp. (t)	30 000
DWT (t)	30 000
Longueur (m)	200,00
Largeur (m)	23,80
Draft (m) / fwd	7,80
Draft (m) / aft	7,80
Condition	Partially loaded
Windage area (m²)	2 018
Vitesse	14,00
Propulsion / Main	Fix Pitch
Propulsion / Rotation	Right
Propulsion / Aux	1 Bow

Figure 4-2 Navire de conception Quebec Arcturus (vraquier)
Source : https://sim-pilot.com/modeles/bkcs01p/

BOW MASTER



Modèle	TANK09
Type	Tanker
Disp. (t)	8 690
DWT (t)	6 046
Longueur (m)	103,60
Largeur (m)	16,60
Draft (m) / fwd	7,10
Draft (m) / aft	7,10
Condition	Loaded
Windage area (m²)	633
Vitesse	14,60
Propulsion / Main	CPP
Propulsion / Rotation	Left
Propulsion / Aux	1 Bow

Figure 4-3 Navire de conception Bow Master (navire-citerne)
Source : https://sim-pilot.com/modeles/tank09-bow-master/

4.1.3 Conditions d'agitation configuration existante

Lors des simulations de pilotage sur simulateur de navigation au CSEM, des échanges ont eu lieu avec les pilotes d'expérience qui ont une fine connaissance des conditions de navigation à l'intérieur du havre de Matane. Ces discussions ont permis d'identifier les différents enjeux relatifs à la navigation, aux manœuvres d'accostage et de départ, ainsi qu'au niveau des opérations de transbordement. Il a été noté que les pilotes se fient davantage aux conditions de vent qu'au niveau d'agitation à l'intérieur du havre pour évaluer si les manœuvres de navigation sont sécuritaires. En effet, lorsque les vents soufflent autour du secteur nord-est (NE) ou nord-ouest (NO) à des vitesses supérieures à 20-25 nœuds, la poussée du vent sur les navires devient un enjeu qui peut notamment empêcher les pilotes d'accoster au quai commercial.

Dans ce contexte, le facteur limitant qui gouverne la navigation est alors le vent et non les vagues générées à l'intérieur du havre par ces mêmes vents. Il est à noter que les conditions de glaces peuvent également s'avérer un facteur limitant pour la navigation durant la saison froide.

En ce qui concerne les opérations portuaires au quai commercial comme le transbordement de marchandises, les discussions avec les pilotes et les représentants de la SPBSG ont révélé que les temps d'attente sont observés de façon courantes en raison de différents facteurs météorologiques (forts vents, pluie, neige, etc.) et rarement occasionnés par le niveau d'agitation par les vagues. Selon le type de marchandise, le type de navire et les équipements utilisés, il est normalement possible de maintenir les opérations de transbordement en présence de vagues d'une hauteur de l'ordre de 1 m (Hs) avec des navires de 100 à 200 m de longueur.

4.1.4 Critères d'agitation

L'étude d'agitation du havre de Matane réalisée par Yann Ropars (Consultants Ropars, 2019) recommande de respecter les critères d'agitation ci-dessous pour assurer les opérations portuaires au quai commercial (références non citées) :

- **Hauteur de vagues dépassée 144 heures par année inférieure à 0,6 m (porte-conteneur-feeder, Ro-Ro, postes de marchandise diverse);**

- **Hauteur de vagues dépassée 72 heures par année inférieure à 0,8 m (postes conteneur principaux, postes de vrac solide et postes pétroliers).**

À ces deux critères, un troisième critère a été retenu pour la présente étude afin d'évaluer la performance des différentes options d'aménagement des quais relativement à l'agitation des vagues. Ce critère est basé sur une interprétation des critères de vagues maximales pour le maintien des opérations à quai tirées de Thoresen (2003) :

- **Hauteur de vagues dépassée 12 heures par année inférieure à 1,0 m (postes de vrac solide, postes pétroliers et postes de marchandise diverse).**

4.1.5 Polygones d'extraction des résultats d'agitation

Dans le but de faciliter l'interprétation des résultats d'agitation, des polygones d'extraction des résultats ont été positionnés dans les différentes zones d'intérêt à l'intérieur du havre de Matane (**Tableau 4-1**). À titre indicatif, ces polygones sont représentés par des rectangles de couleur magenta sur chacune des figures de résultats (section 4.3). Les statistiques d'agitation applicables aux critères d'agitation ont été moyennés à l'intérieur de ces polygones.

Pour le quai commercial, le polygone *Quai 1* correspond au quai actuel en conditions existantes et au poste à quai dans le même axe en conditions projetées. Le polygone *Quai 2* correspond pour sa part au nouveau poste à quai proposé dans l'axe est-ouest en conditions projetées. Des polygones spécifiques pour les autres utilisateurs principaux du have de Matane ont également été considérés pour évaluer l'impact potentiel du réaménagement du quai commercial sur les conditions d'agitation aux autres sites d'amarrage (terminal de la traverse de la Société des traversiers du Québec (STQ), terminal du traversier-rail, zone d'amarrage et d'ancrage de barges (La Barges de Matane inc.) et le quai des pêcheurs).

Tableau 4-1 Polygones d'extraction des résultats d'agitation des vagues à l'intérieur du havre de Matane

Nom de la zone	Dimensions (longeur x largeur)	Utilisation
Quai 1	200 m x 30 m	Quai commercial (existant et projeté)
Quai 2	200 m x 30 m	Quai commercial (projeté)
STQ-1	135 m x 22 m	Terminal de la traverse de la STQ
STQ-2	135 m x 22 m	Poste d'amarrage de la STQ
Rail	125 m x 20 m	Terminal du traversier-rail
Pêche	160 m x 18 m	Quai des pêcheurs
Barges	230 m x 70 m	Zone d'amarrage et d'ancrage de barges (Les Barges de Matane inc.)
Entrée	155 m x 75 m	Entrée du havre de Matane

4.2 Modèle d'agitation

4.2.1 Stratégie de modélisation

L'approche de modélisation retenue pour caractériser les conditions d'agitation à l'intérieur du havre de Matane est basée sur l'utilisation du modèle de propagation de vagues à phase résolue ARTEMIS version 8.4 (Open-TELEMAC, 2022). Ce modèle est distribué via la suite de modèles numériques Open-TELEMAC développé par un consortium international.

Étant donné la nature même des modèles de vague à phase résolue comme ARTEMIS, il est irréaliste de modéliser une série historique complète du climat de vagues à long terme à cause des temps de calcul trop importants. Dans ce contexte, la stratégie la plus adaptée est de simplement reconstituer le climat de vagues à long terme à l'intérieur du havre de Matane en modélisant un nombre limité de scénarios de vagues (hauteur, période et direction), lequel est représentatif du régime des vagues tout juste au large du havre de Matane pour la période 1980-2023. Des vagues monochromatiques sont propagées et transformées (réfraction, réflexion, diffraction, dissipation par déferlement et friction sur le fond) avec le modèle ARTEMIS. Les résultats de modélisation pour chacun des scénarios sont ensuite employés pour développer une matrice de transformation des vagues multi-variables. Cette matrice permet de calculer, par interpolation linéaire multi-variables, un climat de vagues transformé complet (période 1980-2023) à l'intérieur du havre. Les statistiques de vagues (statistiques d'agitation) pour les secteurs d'intérêt sont finalement évalués à partir des courbes classées de hauteurs de vagues établies pour chaque nœud de calcul du modèle.

4.2.2 Mise en œuvre du modèle

Le domaine de calcul du modèle ARTEMIS développé pour le port de Matane s'étend jusqu'à environ 2 km au large du havre où les profondeurs d'eau sont de l'ordre de 50 m (**Figure 4-4**). Les frontières du modèle combinent une frontière semi-circulaire au large où les conditions de vagues incidentes uniformes sont imposées (hauteur de vagues significative (H_s), période de pointe (T_p) et direction) et deux frontières

latérales perméables où les vagues peuvent se propager librement hors du domaine de calcul. Le maillage triangulaire non-structuré a une résolution spatiale de 2 m et il est composé d'environ 1,76 millions de nœuds (légèrement variable selon la géométrie de quai étudiée). Cette résolution spatiale est adaptée pour permettre la résolution de la propagation des vagues ayant les longueurs d'onde plus courtes parmi les scénarios modélisés (période de pointe de l'ordre de 2,8 secondes).

Pour chaque variante de quai étudiée, le maillage du modèle a été ajusté pour incorporer les structures du quai projetées. Les parois solides du modèle ont pour leur part été paramétrisés en fonction de leur coefficient de réflexion de l'énergie vagues. Un coefficient de 0,95 pour les parois rigides verticales telles que les murs de quai en palplanches, 0,35 pour les parois en enrochement et 0,15 pour les sections de plage. En conditions existantes, le quai commercial est un quai construit sur pieux (quai ouvert) et enroché sous le tablier (coefficient de réflexion de 0,50). Pour les variantes B4 et B14 étudiées (se référer au rapport SR2 pour obtenir une description détaillée des configurations étudiées), les structures de quai sont fermées (murs verticaux avec coefficient de réflexion de 0,95). Finalement, pour la variante B16, une configuration fermée (murs verticaux avec coefficient de réflexion de 0,95) ainsi qu'une configuration ouverte (quai sur pieux avec coefficient de réflexion de 0,50) ont été étudiées.



Figure 4-4 Géométrie et maillage du modèle ARTEMIS pour le Havre de Matane - conditions existantes

4.2.3 Scénarios modélisés

Un total de 76 scénarios de vagues a été modélisé avec le modèle ARTEMIS (**Tableau 4-2**). Ces scénarios combinent des directions de vague (provenance), les hauteurs de vagues significatives (H_s), ainsi que les périodes de pointe (T_p) et représentent, dans leur ensemble, le climat de vagues au large du havre de Matane. À noter qu'un niveau d'eau moyen (+2,0 m, ZC) a été appliqué pour chaque scénario. Compte tenu des grandes profondeurs d'eau à l'intérieur du havre, il n'a pas été jugé nécessaire de faire varier ce paramètre pour établir les conditions d'agitation dans le havre.

Tableau 4-2 Scénarios de vagues modélisés avec le modèle ARTEMIS

# Scénario	Dir (°)	H_s (m)	T_p (s)	# Scénario	Dir (°)	H_s (m)	T_p (s)
1	40	0.56	2.8	**39**	281	1.15	5.1
2	41	0.51	4.8	**40**	279	1.10	6.6
3	44	0.62	6.8	**41**	277	1.11	9.7
4	42	0.56	9.6	**42**	281	1.82	5.4
5	40	0.06	13.7	**43**	275	2.02	7.7
6	36	1.12	5.2	**44**	282	2.54	5.9
7	41	1.16	7.1	**45**	279	2.57	7.0
8	42	1.20	11.4	**46**	277	3.28	7.1
9	35	1.79	5.6	**47**	275	4.19	7.6
10	39	1.89	7.1	**48**	303	0.50	2.8
11	42	1.90	11.3	**49**	302	0.58	4.3
12	32	2.43	5.9	**50**	301	0.61	6.8
13	38	2.58	7.4	**51**	307	0.54	11.4
14	40	2.64	9.6	**52**	301	1.12	4.8
15	36	2.76	13.2	**53**	297	1.12	7.4
16	36	3.24	8.1	**54**	300	1.02	9.8
17	37	3.34	9.5	**55**	300	1.80	5.2
18	35	3.66	13.3	**56**	300	1.69	7.4
19	35	4.26	8.6	**57**	303	1.55	10.0
20	35	4.06	11.6	**58**	300	2.57	5.8
21	33	4.73	9.8	**59**	299	2.63	8.0
22	247	0.19	2.9	**60**	299	3.57	6.9
23	247	0.24	4.1	**61**	352	0.59	2.8
24	246	0.49	7.3	**62**	347	0.55	4.4
25	247	0.79	5.7	**63**	2	0.62	6.7
26	261	0.38	2.8	**64**	11	0.62	9.7
27	263	0.53	4.7	**65**	13	0.07	12.5
28	262	0.64	6.3	**66**	346	1.10	4.8
29	248	0.34	9.0	**67**	3	1.13	7.1
30	265	1.05	5.4	**68**	9	1.13	11.2
31	263	1.02	7.9	**69**	347	1.77	5.2
32	268	2.22	5.7	**70**	5	1.84	7.1
33	267	1.89	6.5	**71**	8	1.86	9.7
34	269	2.65	6.6	**72**	340	2.59	5.8
35	281	0.48	2.8	**73**	359	2.57	7.4
36	280	0.58	4.5	**74**	4	2.66	10.6
37	280	0.62	6.9	**75**	10	3.36	7.9
38	282	0.67	11.2	**76**	19	3.04	9.7

4.3 Résultats de modélisation de l'agitation

À partir des résultats de modélisation du modèle ARTEMIS pour les 76 scénarios de vagues modélisés, des séries historiques de vagues sur la période 1980-2023 ont été reconstituées par interpolation linéaire multi-variables pour chaque nœud d'un maillage dont l'étendue est réduite à la zone d'intérêt (résolution spatiale entre 2 et 5 m). Les cartes d'agitation pour chaque configuration de quai étudiée ont ensuite été produites en compilant les statistiques d'agitation des séries de vagues (courbes classées). Les cartes d'agitation résultantes sont présentées pour les trois (3) critères d'agitation spécifiés : **Figure 4-5** (hauteur de vagues (H_s) dépassée 12 heures par année), **Figure 4-6** (hauteur de vagues (H_s) dépassée 72 heures par année) et **Figure 4-7** (hauteur de vagues (H_s) dépassée 144 heures par année). Le **Tableau 4-3** présente pour sa part une comparaison des statistiques d'agitation obtenues au quai commercial en conditions existantes, ainsi que pour les géométries projetées, le tout par rapport aux critères retenus.

De manière générale, il est possible de constater que le réaménagement du quai commercial engendre globalement une augmentation des conditions d'agitation localement le long des quais 1 et 2, ainsi que dans la zone centrale du havre jusqu'à l'entrée et ce, pour l'ensemble des géométries étudiées. En effet, l'ajout d'un nouveau quai dans l'axe est-ouest (géométries B4, B14 ou B16) engendre une légère augmentation de l'agitation par rapport aux conditions existantes, plus particulièrement pour les configurations proposant des quais fermés (augmentation de la réflexion des vagues). Les critères d'agitation sont toutefois rencontrés pour les géométries B4 (quai fermé) et B16 (quai ouvert). Toutefois, les géométries B14 (quai fermé) et B16 (quai fermé) ne permettent pas de rencontrer les critères d'agitation retenus.

La comparaison des conditions d'agitation pour les géométries de quais fermés (B4, B14 et B16) démontre que la géométrie B4 présente les conditions d'agitation les plus faibles localement le long des quais 1 et 2. L'angle plus ouvert entre les deux quais semble en effet contribuer à réduire l'agitation. La comparaison des conditions d'agitation pour les géométries B16 (quai fermé) et B16 (quai ouvert) démontre que la mise en place d'un quai ouvert (ex. quai sur pieux avec enrochement) par rapport à un quai fermé en palplanches favorise la diminution de l'agitation.

Le **Tableau 4-4** présente une synthèse des conditions d'agitation à l'intérieur des autres secteurs d'intérêt (polygones) du havre de Matane (terminal STQ, terminal de la traverse-rail, quai des pêcheurs, zone d'amarrage de barges et entrée du havre). Les résultats démontrent que pour les différentes options d'aménagement de quais étudiées, l'impact est négligeable (non-significatif) sur les conditions d'agitation locales au droit de ces divers terminaux (polygones). Une faible augmentation de l'agitation est tout de même observée au terminal de la traverse-rail ainsi qu'à l'entrée du havre, mais cela demeure tout de même non significatif (de l'ordre de quelques centimètres). Du côté du quai des pêcheurs, une légère réduction de l'agitation est anticipée le long du quai puisque le secteur est davantage abrité avec l'ajout du deuxième poste à quai. Il est toutefois important de mentionner que les différentes configurations de quais projetés tendent quand même à favoriser une légère augmentation des conditions d'agitation dans la zone centrale du havre, laquelle est nécessairement empruntée par les bateaux de pêches via l'axe de navigation reliant leurs quais à l'entrée du havre. Néanmoins, ces conditions d'agitation projetées dans la zone centrale du havre demeurent significativement inférieures à ce qui est déjà rencontré par les pêcheurs et autres utilisateurs en conditions existantes à l'entrée du havre. Ainsi, cela ne devrait pas constituer un facteur limitant pour la navigation dans ce secteur, ce qui devra cependant être confirmé par les pêcheurs eux-mêmes.

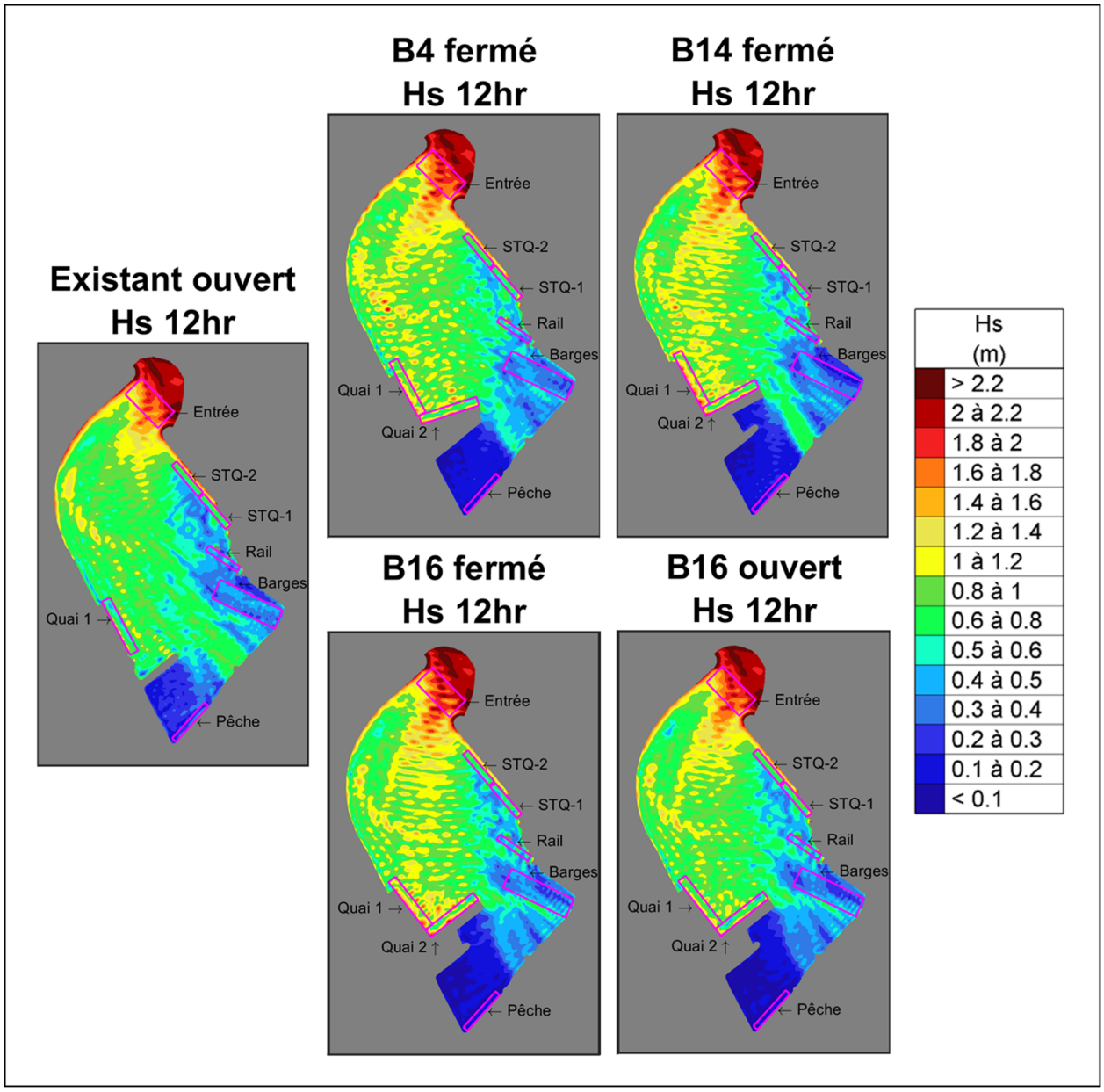


Figure 4-5 Comparaison des hauteurs de vagues dépassées 12 heures par année (critère Hs ≤ 1,0 m) à l'intérieur du havre de Matane en conditions existantes et pour les géométries de quai B4, B14 et B16.

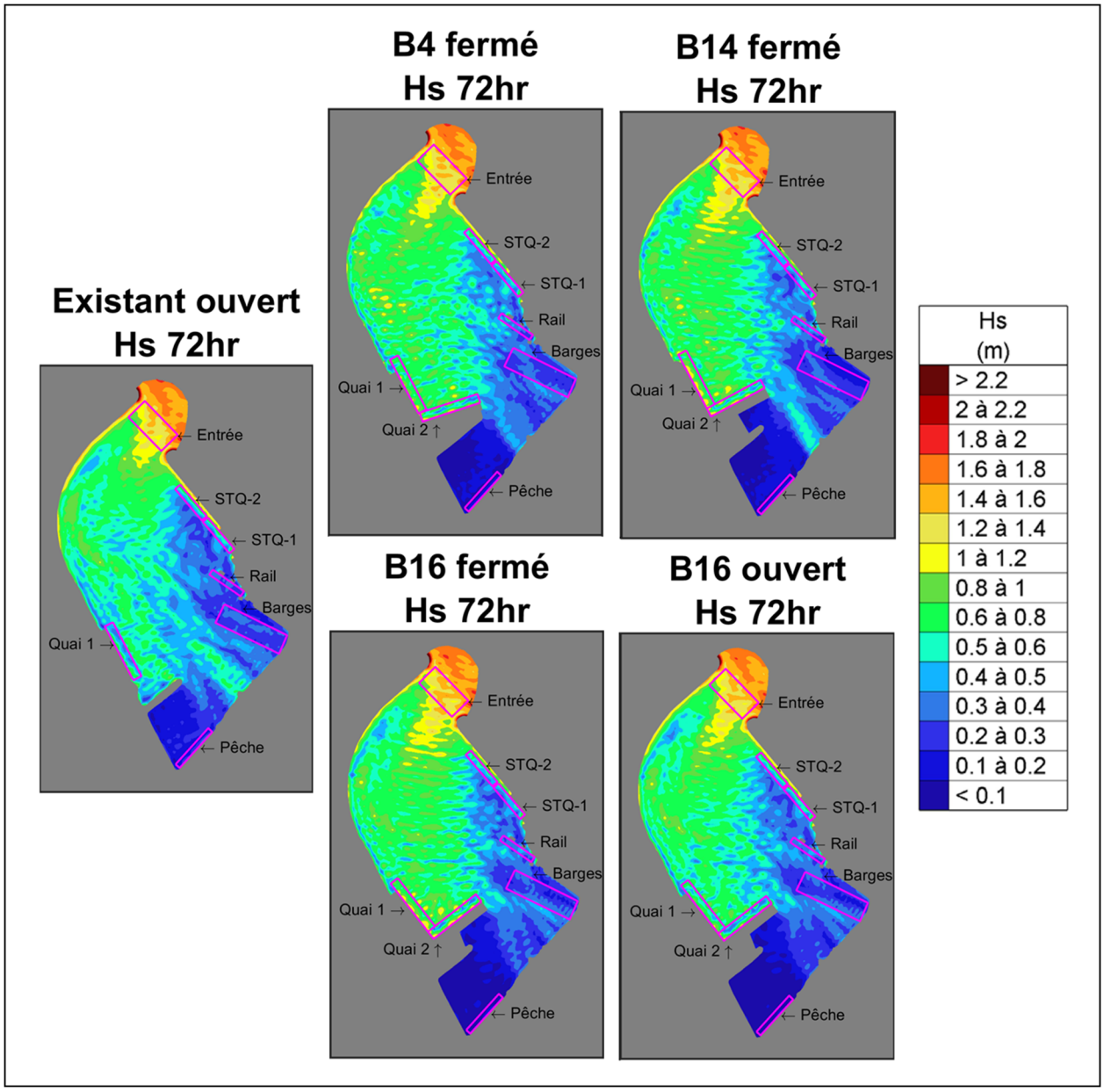


Figure 4-6 Comparaison des hauteurs de vagues dépassées 72 heures par année (critère Hs ≤ 0,8 m) à l'intérieur du havre de Matane en conditions existantes et pour les géométries de quai B4, B14 et B16.

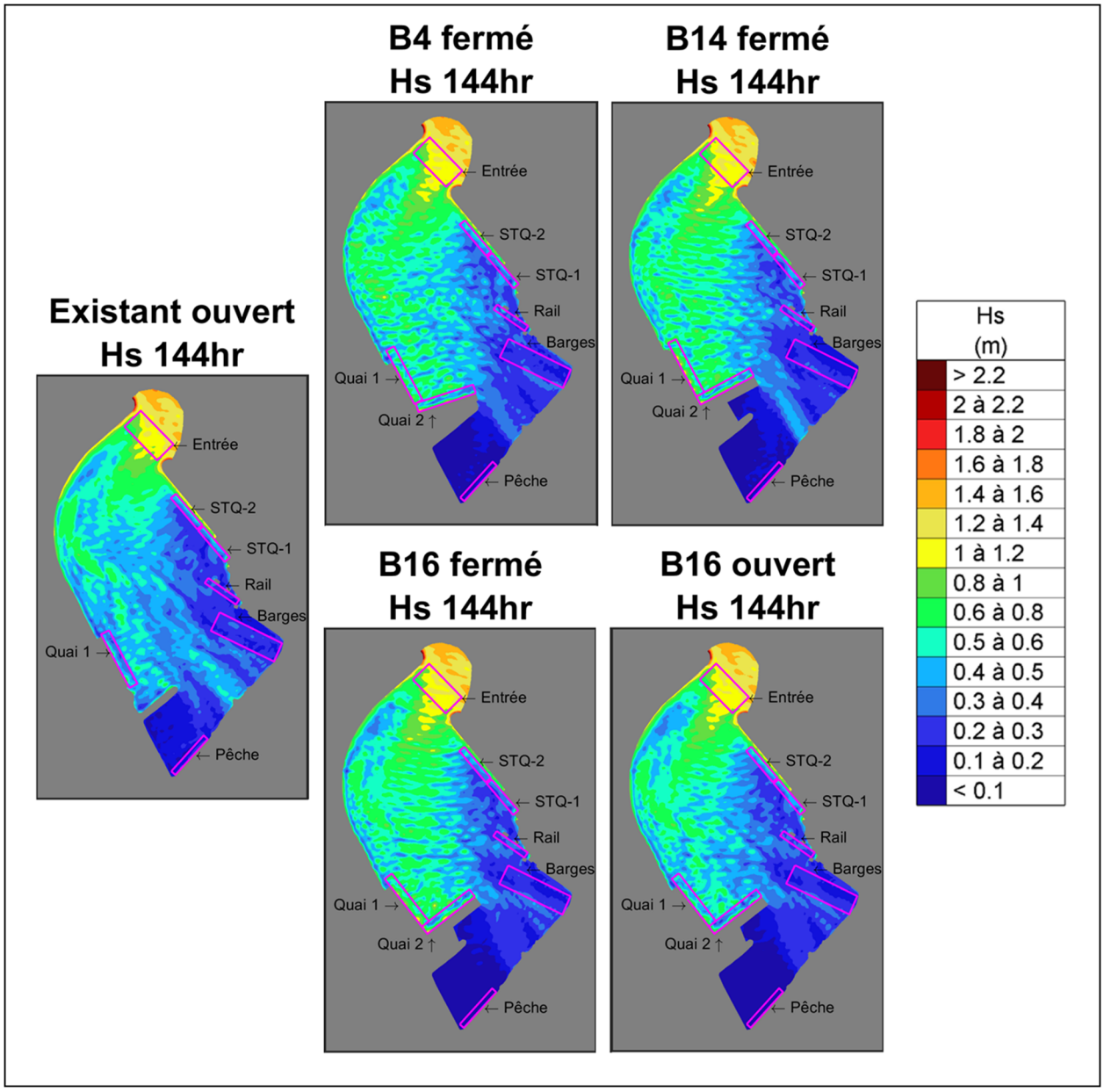


Figure 4-7 Comparaison des hauteurs de vagues dépassées 144 heures par année (critère Hs ≤ 0,6 m) à l'intérieur du havre de Matane en conditions existantes et pour les géométries de quai B4, B14 et B16.

Tableau 4-3 Comparaison des conditions d'agitation au quai commercial (quais 1 et 2) en conditions existantes et pour les différentes configurations de quai par rapport aux critères retenus

Geométrie	Polygone	Moyenne à l'intérieur du polygone			
		H_s 12 heures (m)	H_s 72 heures (m)	H_s 144 heures (m)	H_s > 1.0 m (heures)
		Critère : $H_s \leq 1.0$ m	*Critère : $H_s \leq 0.8$ m*	*Critère : $H_s \leq 0.6$ m*	*Critère : à minimiser*
Quai existant (quai ouvert)	**Quai 1**	**0.78**	**0.56**	**0.46**	**4**
Option B4 (quais fermés)	Quai 1	1.10	0.77	0.62	29
Option B14 (quais fermés)	Quai 1	1.34	0.95	0.77	69
Option B16 (quais fermés)	Quai 1	1.30	0.93	0.75	64
Option B16 (quais ouverts)	Quai 1	1.02	0.72	0.59	22
Option B4 (quais fermés)	Quai 2	1.06	0.76	0.62	34
Option B14 (quais fermés)	Quai 2	1.09	0.78	0.64	39
Option B16 (quais fermés)	Quai 2	1.20	0.84	0.69	55
Option B16 (quais ouverts)	Quai 2	0.95	0.68	0.55	20

* Les valeurs en gras sont les valeurs de référence (conditions existantes)

Tableau 4-4 Comparaisons des conditions d'agitation locales pour les autres secteurs d'intérêt en conditions existantes et pour les différentes configurations de quai étudiées en conditions projetées.

Geométrie	Polygone	Moyenne à l'intérieur du polygone		
		H_s 12 hrs (m)	H_s 72 hrs (m)	H_s 144 hrs (m)
		Critère : $H_s \leq 1.0$ m	*Critère : $H_s \leq 0.8$ m*	*Critère : $H_s \leq 0.6$ m*
Quai existant (quai ouvert)	**STQ-1**	**0.80**	**0.56**	**0.45**
Option B4 (quais fermés)	STQ-1	0.77	0.54	0.43
Option B14 (quais fermés)	STQ-1	0.69	0.51	0.43
Option B16 (quais fermés)	STQ-1	0.70	0.50	0.40
Option B16 (quais ouverts)	STQ-1	0.80	0.57	0.46
Quai existant (quai ouvert)	**STQ-2**	**0.78**	**0.57**	**0.46**
Option B4 (quais fermés)	STQ-2	0.80	0.58	0.48
Option B14 (quais fermés)	STQ-2	0.74	0.54	0.45
Option B16 (quais fermés)	STQ-2	0.72	0.53	0.44
Option B16 (quais ouverts)	STQ-2	0.79	0.58	0.47
Quai existant (quai ouvert)	**Rail**	**0.44**	**0.32**	**0.26**
Option B4 (quais fermés)	Rail	0.53	0.38	0.31
Option B14 (quais fermés)	Rail	0.49	0.35	0.30
Option B16 (quais fermés)	Rail	0.53	0.37	0.30
Option B16 (quais ouverts)	Rail	0.54	0.37	0.30
Quai existant (quai ouvert)	**Pêche**	**0.29**	**0.22**	**0.18**
Option B4 (quais fermés)	Pêche	0.15	0.12	0.10
Option B14 (quais fermés)	Pêche	0.18	0.13	0.10
Option B16 (quais fermés)	Pêche	0.12	0.09	0.07
Option B16 (quais ouverts)	Pêche	0.11	0.08	0.06
Quai existant (quai ouvert)	**Barges**	**0.38**	**0.28**	**0.23**
Option B4 (quais fermés)	Barges	0.38	0.28	0.23
Option B14 (quais fermés)	Barges	0.32	0.20	0.20
Option B16 (quais fermés)	Barges	0.38	0.28	0.23
Option B16 (quais ouverts)	Barges	0.37	0.27	0.22
Quai existant (quai ouvert)	**Entrée**	**1.70**	**1.27**	**1.07**
Option B4 (quais fermés)	Entrée	1.76	1.30	1.09
Option B14 (quais fermés)	Entrée	1.76	1.31	1.11
Option B16 (quais fermés)	Entrée	1.80	1.34	1.12
Option B16 (quais ouverts)	Entrée	1.74	1.30	1.10

* Les valeurs en gras sont les valeurs de référence (conditions existantes)

4.4 Discussion et recommandations

Les résultats de l'étude d'agitation confirment qu'en conditions existantes, les conditions d'agitation rencontrent les critères d'agitation qui ont été fixés. Néanmoins, en conditions projetées, selon l'ensemble des géométries étudiées, les résultats de l'étude d'agitation prédisent une augmentation de l'agitation des vagues par rapport aux conditions existantes et ce, principalement localement au niveau des quais 1 et 2, ainsi que dans la zone centrale du havre. Dans certains cas, le niveau d'agitation est même supérieur aux critères retenus pour le maintien des opérations avec des augmentations variant entre 5 et 35 %.

Sur la base de ces résultats, il pourrait donc être anticipé a priori que le réaménagement du quai commercial puisse engendrer une augmentation des temps d'arrêt au niveau des opérations portuaires dans ce secteur. Toutefois, parallèlement à l'effet des vagues et des conditions d'agitation, d'autres facteurs impactent également l'évaluation des temps d'arrêt et les opérations de transbordement. À cet effet, la présentation des résultats de l'étude d'agitation à des pilotes d'expérience ayant une fine connaissance des enjeux de navigation à l'intérieur du havre de Matane a permis de mieux comprendre, dans leur ensemble, les conséquences possibles de l'augmentation de l'agitation au quai commercial. Malgré l'augmentation de l'agitation au-delà des critères pour certaines options étudiées, les pilotes ont confirmé qu'ils demeurent confortables avec les résultats, puisque en fait, l'ajout d'un deuxième quai dans l'axe est-ouest leur apportera plus de flexibilité pour manœuvrer par mauvais temps (vents et/ou vagues). Il a été mentionné par exemple qu'il serait en effet plus sécuritaire d'accoster au quai 2 (axe est-ouest) en présence de forts vents du nord-est ou de l'ouest, ce qui est considéré, selon les pilotes, comme une amélioration par rapport aux conditions existantes. De plus, considérant que les temps d'arrêts des opérations sont déjà fréquents à Matane pour diverses raisons autre que les conditions d'agitation par les vagues, ils anticipent que le deuxième quai permettra globalement d'augmenter en efficacité, d'autant plus s'il y a redondance des équipements de transbordement à chacun des quais. Également, le nombre d'heures anticipé avec des hauteurs de vagues supérieures à 1 m (**Tableau 4-3**) à chacun des quais demeure faible et jugé raisonnable par les pilotes pour les différentes options étudiées.

Par ailleurs, selon les différentes configurations étudiées, le réaménagement du quai commercial contribue à abriter davantage le quai des pêcheurs des vagues, mais tend, en contrepartie, à augmenter quelque peu le niveau d'agitation le long du chenal de navigation utilisé par les pêcheurs pour entrer ou sortir du havre de Matane (axe de navigation entre l'entrée et leurs quais). À l'entrée du havre, là où les conditions de vagues sont déjà les plus sévères (en conditions existantes ou projetées) et gouvernent par rapport aux conditions observées ailleurs à l'intérieur du havre, l'impact du réaménagement du quai sur l'agitation est peu significatif avec une augmentation maximale par rapport aux conditions existantes de l'ordre de 3 à 5 % (**Tableau 4-4**). Toutefois, sur la base de ces résultats, il serait tout de même souhaitable de partager ces observations avec les pêcheurs afin d'obtenir leur avis à ce sujet.

Enfin, les résultats de l'étude d'agitation ont également démontré que l'ajout d'un deuxième poste à quai a un impact négligeable et ce, localement à l'intérieur des zones d'amarrage (polygones) appartenant aux autres utilisateurs présents dans le havre de Matane (**Tableau 4-4**). En revanche et tel que discuté ici-haut, l'agitation des vagues est toutefois légèrement augmentée le long du chenal de navigation utilisé par les pêcheurs pour entrer ou sortir du havre de Matane (axe de navigation entre l'entrée et leurs quais). Toutefois, sachant que ce sont généralement les vents, les glaces ou les conditions de vagues à l'entrée ou à l'extérieur du havre qui s'avèrent être les facteurs limitant pour la navigation, cela ne constitue en

aucun cas un enjeu pour le maintien des activités de pêche à l'intérieur du havre de Matane. Dans tous les cas, une présentation et une discussion de ces résultats avec les pêcheurs est souhaitable afin de recevoir leurs commentaires à ce sujet.

5 MODÉLISATION HYDROSÉDIMENTAIRE DE LA QUALITÉ D'EAU DURANT LES ACTIVITÉS DE DRAGAGE

5.1 Approche de modélisation

5.1.1 Modélisation hydrodynamique

La modélisation hydrodynamique a été réalisée à l'aide du modèle TELEMAC-2D version 8.4 (Open TELEMAC-MASCARET, 2022). Il s'agit d'un modèle hydrodynamique bidimensionnel qui résout les équations de Saint-Venant (écoulements à surface libre) par éléments finis. Pour le présent mandat, le modèle TELEMAC-2D est couplé en série avec le modèle lagrangien de transport sédimentaire PSED qui utilise les niveaux d'eau et les vitesses de courants 2D (vitesses moyennées sur la verticale) comme intrants hydrodynamiques (régime non permanent). À noter que malgré le forçage avec des vitesses 2D, le modèle PSED (*Particle-based SEDiment transport model)* calcule le transport sédimentaire en mode quasi-3D, c'est-à-dire qu'il établit une distribution des vitesses de courant sur la verticale selon une loi logarithmique. Dans ce contexte, l'utilisation d'un modèle hydrodynamique 3D n'aurait pas apporté de valeur ajoutée considérant l'impossibilité de forcer le modèle PSED avec des courants 3D.

Géométrie retenue

Pour la modélisation hydrosédimentaire de la qualité de l'eau durant les activités de dragage, celle-ci a pour sa part été réalisée pour la géométrie existante puisqu'il est prévu que le dragage des sédiments soit fait avant le réaménagement et la construction du nouveau poste à quai.

Géométrie et maillage

Le modèle TELEMAC-2D utilisé pour la présente étude couvre une portion du fleuve Saint-Laurent et de l'estuaire du Saint-Laurent entre Neuville et Rivière-au-Tonnerre et intègre également la rivière Saguenay à partir de la ville de Saguenay. Le trait de côte utilisé pour définir les limites du modèle provient de la base de données CanVec de Ressources naturelles Canada. La géométrie du havre de Matane a été intégrée au modèle à partir des plans des infrastructures portuaires fournis par la SPBSG.

Le modèle numérique d'élévation a été élaboré en combinant diverses sources d'information géographique. Les données bathymétriques du havre de Matane et du site d'immersion proviennent des relevés bathymétriques les plus récents transmis par la SPBSG. Les données NONNA-10 du SHC ont été utilisées pour compléter la couverture bathymétrique dans la zone d'étude, notamment à l'embouchure de la rivière Matane. Pour les secteurs du modèle en dehors de la zone d'étude où résolution du maillage est plus faible, les données NONNA-100 ont été utilisées. La **Figure 5-1** présente le domaine de calcul complet du modèle hydrodynamique TELEMAC-2D. La **Figure 5-2** présente plus en détails la géométrie et la bathymétrie dans la zone d'étude (havre de Matane, site d'immersion et embouchure de la rivière Matane).

Le domaine de calcul a été discrétisé sur un maillage triangulaire à résolution variable. À l'intérieur du havre de Matane et à l'embouchure de la rivière Matane, la résolution du maillage varie entre 5 et 10 m. À l'extérieur du havre et de la rivière Matane, dans la zone d'étude où le site d'immersion est localisé, la résolution spatiale de la grille varie entre 15 à 30 m jusqu'à une distance d'environ 5 km de la côte. Sur le

reste du domaine de calcul, le modèle hydrodynamique a une résolution variable adaptée à la géométrie du modèle qui varie entre 50 et 2500 m.

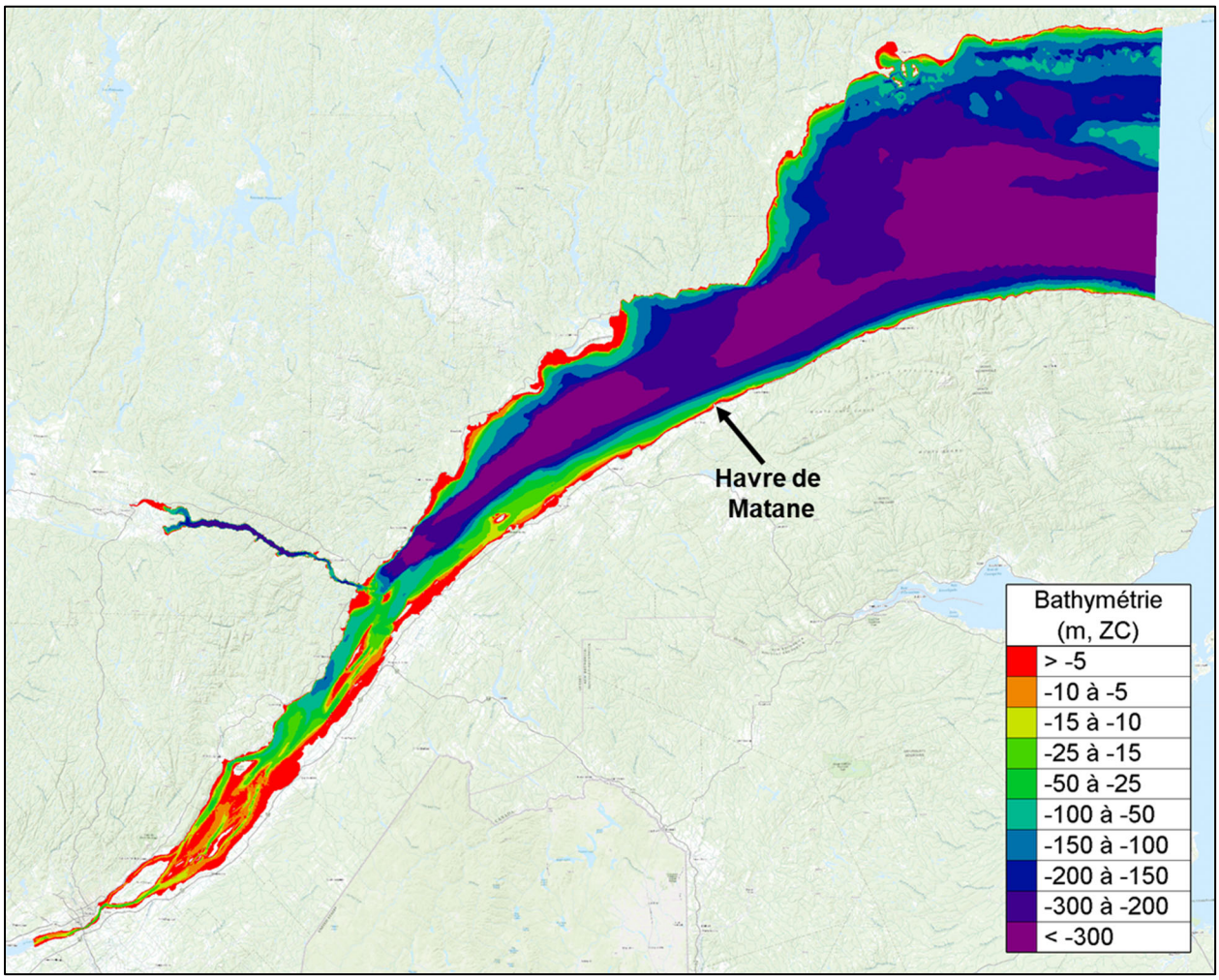


Figure 5-1 Domaine de calcul complet du modèle hydrodynamique TELEMAC-2D

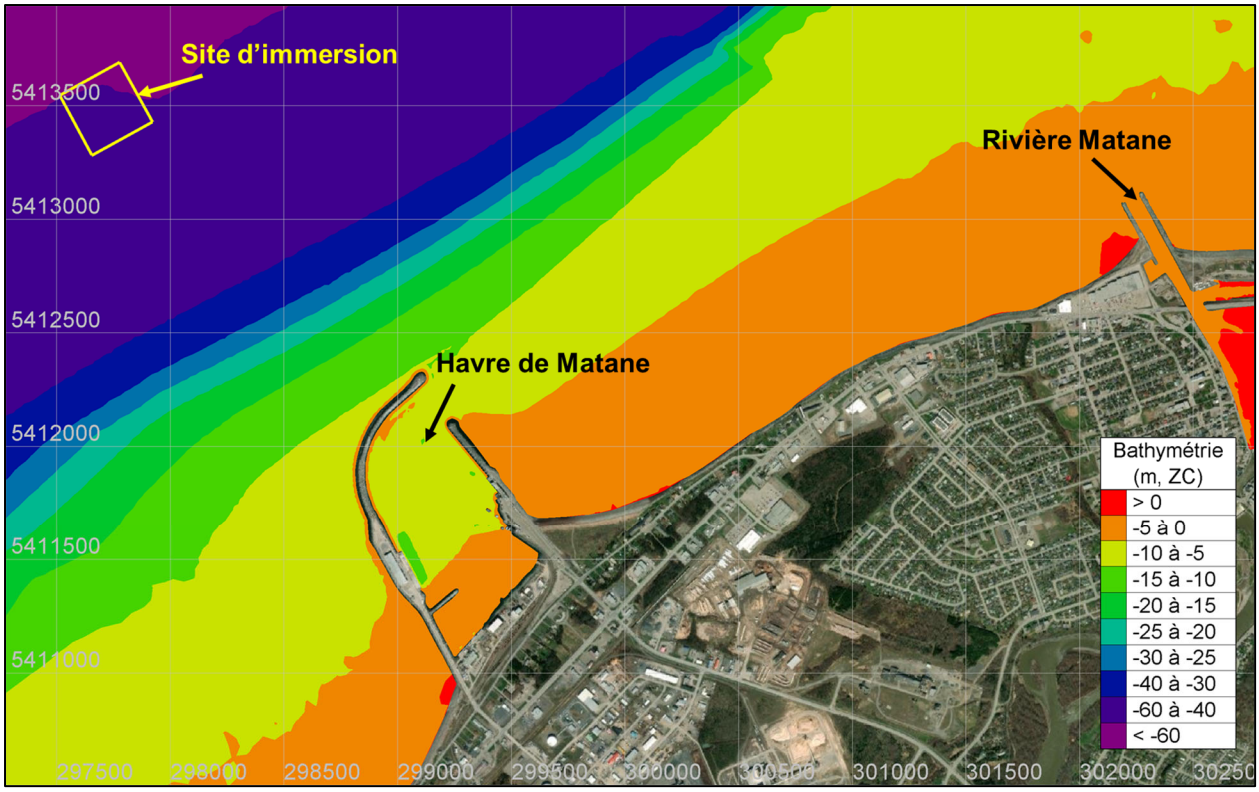


Figure 5-2 Bathymétrie du modèle hydrodynamique TELEMAC-2D dans la zone d'étude (havre de Matane, site d'immersion et embouchure de la rivière Matane)

Paramétrisation et conditions limites du modèle

Le modèle hydrodynamique TELEMAC-2D a été employé avec trois (3) frontières liquides où des conditions limites sont imposées. Pour la frontière amont du fleuve Saint-Laurent (Neuville) les niveaux d'eau mesurés à la station marégraphique de Neuville du SHC (station #03280) ont été imposés comme condition limite. À la frontière aval (estuaire du Saint-Laurent), les constituants majeurs et mineurs issus de la base de données du modèle marégraphique global TPXO9.V1 (Egbert et al., 1994; Egbert et Erofeeva, 2002) ont été imposés (niveaux d'eau et vitesses). Finalement, pour la frontière liquide située sur la rivière Saguenay, un débit a été imposé.

Pour les scénarios de modélisation qui intègrent l'influence du vent, un forçage atmosphérique a été imposé au modèle TELEMAC-2D en intégrant un vent constant dans l'espace et le temps (magnitude et direction) sur l'ensemble du domaine de calcul.

La résolution des bancs découvrant a été activée dans le modèle considérant l'importance de la marée et des zones intertidales à l'intérieur domaine de calcul. L'influence de la force de Coriolis a également été activée dans le modèle avec un coefficient variable en fonction de la latitude. Finalement, un schéma de turbulence horizontal de type K-Epsilon a été employé dans le modèle.

La rugosité du fond selon l'équation de Manning a été prise en compte dans le modèle TELEMAC-2D. Un coefficient de rugosité uniforme de 0,02 a été employé. Cette paramétrisation a été jugée satisfaisante à la suite du travail de calibration et de validation du modèle.

Calibration et validation

Le modèle hydrodynamique 2D du Saint-Laurent et du Saguenay a été validé par Lasalle|NHC dans le cadre de précédents mandats en comparant des séries de niveaux d'eau modélisés avec des séries de niveaux d'eau mesurés à différentes stations marégraphiques du SHC. Le modèle TELEMAC-2D arrive à reproduire adéquatement les signaux de marées sur l'ensemble du domaine modélisé avec la paramétrisation retenue et les conditions limites imposées. Aucune donnée de niveaux d'eau n'est disponible à Matane pour la période de validation considérée, mais la comparaison des niveaux d'eau modélisés avec les niveaux d'eau mesurés aux stations marégraphiques permanentes les plus près de Matane (Rimouski et Sept-Îles, **Figure 5-3**) confirme la capacité du modèle à bien reproduire les fluctuations de niveaux d'eau dans l'estuaire du Saint-Laurent.

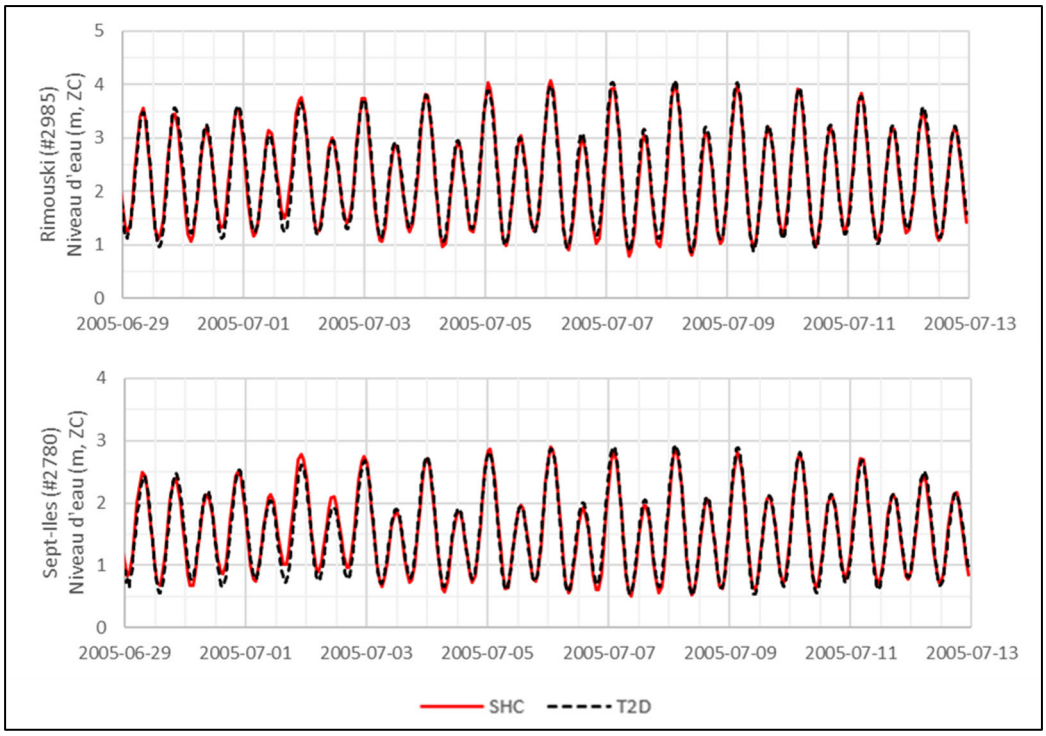


Figure 5-3 Comparaison des niveaux d'eau mesurés (SHC) aux stations marégraphiques de Rimouski et de Sept-Îles avec les niveaux d'eau modélisés avec le modèle TELEMAC-2D (T2D)

5.1.2 Modélisation de la dispersion des sédiments en suspension

La modélisation de la dispersion des sédiments en suspension associés aux travaux de dragage dans le havre de Matane et de relargage des sédiments dragués au site d'immersion est effectuée en combinant le modèle hydrodynamique (TELEMAC-2D) au modèle lagrangien de transport sédimentaire PSED. Le modèle PSED a été développé par le Centre d'Hydraulique Canadien (CHC) en collaboration avec la Garde Côtière Canadienne et Environnement Canada pour étudier le transport sédimentaire sur le Saint-Laurent,

notamment pour caractériser les panaches de sédiments dragués (CHC, 2006). PSED calcule la mobilité, l'advection, la dispersion et la sédimentation dans la colonne d'eau des sédiments en fonction des conditions hydrodynamiques (permanentes ou non permanentes) selon une approche quasi-3D où les vitesses de courant 2D sont distribuées sur la verticale selon une loi logarithmique. L'approche lagrangienne permet de représenter la masse de sédiments en suspension via des particules distinctes ayant chacune leurs propres propriétés physique (masse, granulométrie, vitesse de chute dans la colonne d'eau, position (X, Y, Z), etc.) et ce, selon la fraction sédimentaire qui leur est associée. Les particules sont injectées à l'intérieur du domaine de calcul et advectées en fonction des courants ambiants. Elles peuvent se déposer sur le fond marin lorsque les conditions hydrauliques le permettent et être réentraînées dans la colonne d'eau si le critère de mobilité (contrainte de cisaillement au fond) est rencontré. Les concentrations de sédiments en suspension dans la colonne d'eau (moyennées sur la verticale) sont alors calculées en fonction de la distribution spatiale des particules sédimentaires à un instant donné et de la masse de sédiments associées à chacune d'elles.

Pour la présente étude, le modèle PSED est utilisé avec les conditions hydrodynamiques calculées par le modèle hydrodynamique TELEMAC-2D comme forçage pour chacun des scénarios. Les particules sédimentaires lagrangiennes sont injectées dans le modèle à un taux représentatif de l'intervention étudiée (dragage mécanique ou hydraulique, dragage continu ou cyclique, relargage des sédiments dragués). Les caractéristiques des sédiments injectés dans PSED correspondent donc aux caractéristiques des sédiments dragués (granulométrie et masse volumique). La position où les particules lagrangiennes sont injectées dans le modèle correspond soit à une position à l'intérieur du polygone de dragage ou à une position à l'intérieur du site d'immersion.

Dans le cas du dragage mécanique, l'injection des particules lagrangiennes dans PSED est distribuée sur toute la colonne d'eau puisque des sédiments dragués sont remis en suspension à mesure que la benne est remontée vers la surface. En ce qui concerne le dragage hydraulique, les perturbations dans la colonne d'eau sont limitées à la portion inférieure à proximité du fond marin. Ainsi, les particules lagrangiennes sont injectées dans PSED à 0,5 m au-dessus du fond marin pour ce type de dragage.

Pour ce qui est du relargage des sédiments dragués au site d'immersion, la distribution verticale de l'injection des particules dans PSED est plus complexe considérant le comportement fortement dynamique du relargage et de la grande quantité de sédiments impliquée à chaque relargage. Le comportement des sédiments suivant le relargage peut être défini selon trois phases distinctes (Raymond, 1986) :

1) La descente convective durant laquelle une fraction importante du mélange fluide sédiment-eau descend dans la colonne d'eau sous la forme d'un jet de densité sous l'effet de la gravité. Le jet de densité peut inclure des mottes de sédiments cohésifs agglomérés à l'intérieur du mélange sédiment-eau. Une partie des sédiments peut se séparer du jet de densité et être dispersée par les courants ambiants.

2) L'effondrement dynamique du jet de densité (mélange sédiment-eau et mottes de sédiments cohésifs agglomérés) sur le fond marin qui stoppe la descente convective et occasionne la dispersion horizontale des matériaux en suspension près du fond marin à mesure que l'énergie est dissipée.

3) La diffusion passive qui disperse les sédiments qui demeurent en suspension dans la colonne d'eau jusqu'à leur sédimentation sur le fond marin en fonction des courants ambiants.

La **Figure 5-4** présente une schématisation du comportement des sédiments relargués en eau libre. La descente convective et l'effondrement dynamique incluant la dispersion horizontale près du fond marin sont des processus court-terme qui peuvent être modélisés à l'aide du modèle STFATE (Johnson et al. 1993, Johnson et Fong 1995). Le modèle est en mesure d'évaluer mathématiquement la quantité de sédiments qui demeurent en suspension dans la colonne d'eau suivant le relargage, ainsi que la quantité qui se dépose sur le fond marin à court-terme en fonction des caractéristiques du relargage (volume, granulométrie, fraction de sédiments agglomérés, teneur en eau, densité, type de barge, etc.). Pour la présente étude, le modèle STFATE a été utilisé pour établir la distribution verticale des concentrations de sédiments en suspension dans la colonne d'eau à injecter dans le modèle PSED pour ainsi évaluer la dispersion à long-terme des sédiments dans l'environnement marin en fonction des courants ambiants. Par la suite, les particules lagrangiennes sont injectées dans PSED en fonction du profil de concentrations de sédiments en suspension estimé par STFATE.

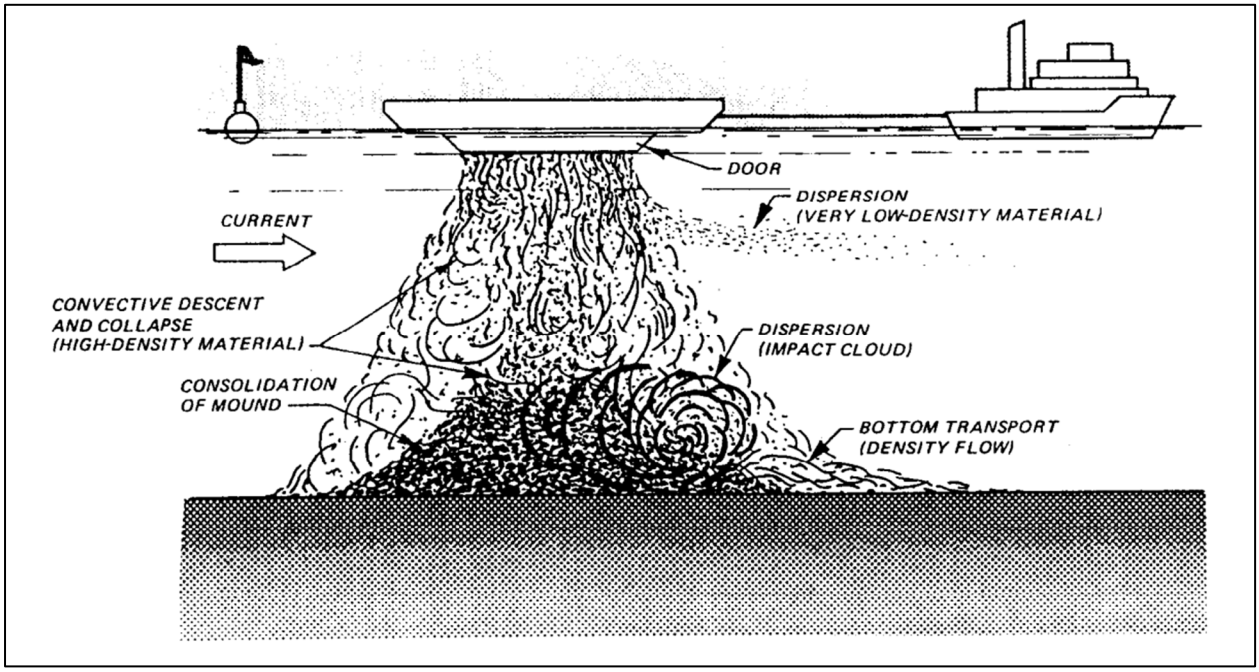


Figure 5-4 Comportement des sédiments relargués en eau libre (source : Moritz, 1994)

5.2 Intrants et hypothèses

5.2.1 Caractéristiques des sédiments dragués

La caractérisation des sédiments marins à l'intérieur du havre de Matane effectuée par Englobe (2021, 2023, 2024) a permis d'établir que deux types de sédiments devront être dragués lors du réaménagement des installations portuaires. La couche de surface (quelques dizaines de centimètres d'épaisseur en moyenne) est non consolidée et se caractérise par des sédiments marins saturés contenant de la matière organique. Sous la couche de sédiments de surface, une couche de dépôt cohésif naturel consolidé de consistance raide à très raide est présente.

Dans le but d'évaluer le comportement des sédiments remis en suspension dans la colonne d'eau lors des travaux de dragage dans le havre et de relargage des sédiments au site d'immersion en conditions

défavorables, seuls les sédiments de surface ont été considérés dans les analyses. Cela se justifie parce que les sédiments de surface ne sont pas consolidés et donc davantage susceptibles d'être entraînés dans la colonne d'eau et de générer des MES lors du dragage et du relargage comparativement aux sédiments sous-jacents qui devraient pouvoir être en grande partie excavés en blocs consolidés. Lors du relargage, ces blocs consolidés ont le potentiel de se déposer directement sur le fond marin au site d'immersion avec un minimum de sédiments dispersés dans la colonne d'eau.

Les analyses granulométriques des sédiments de surface du havre de Matane (Englobe, 2023) situés à l'intérieur de la zone à draguer ont été regroupées en deux sous-échantillons pour bien différencier les caractéristiques des sédiments rencontrés dans le secteur du quai par rapport aux sédiments localisés plus près de l'entrée du havre (chenal de navigation). Il a en effet été jugé pertinent d'évaluer le comportement des sédiments remis en suspension par les travaux de dragage autant dans le secteur principal à draguer (secteur du quai) que près de l'entrée du havre où les sédiments en suspension pourraient possiblement être plus facilement transportés à l'extérieur du havre. Le **Tableau 5-1** présente les granulométries considérées pour ces deux secteurs. Le secteur du quai est caractérisé par une granulométrie plus fine (D_{50} de l'ordre de 0,02 mm) relativement au secteur de l'entrée du havre (D_{50} de l'ordre de 0,05 mm) où le sable est plus présent.

Tableau 5-1 Granulométrie des sédiments dragués

Paramètres	Secteur du quai	Secteur de l'entrée du havre
Gravier (2-32 mm)	2%	0%
Sable (0,062-2 mm)	17%	41%
Limon (0,0039-0,063 mm)	54%	38%
Argile (< 0,0039 mm)	27%	21%
D_{50} (mm)	0,018	0,046

En complément à la granulométrie, la masse volumique des sédiments dragués, plus particulièrement la masse de sédiments secs par mètre cube brut de sédiments dragués est une caractéristique importante à définir pour les analyses subséquentes. O'Bourke et al. (2008) présente des valeurs typiques de masse volumique en place de sédiments dragués en fonction de leur description qualitative tirées du USACE. Pour des sédiments boueux composés essentiellement d'argile et de silt, les masses volumiques en place (sédiment saturé) sont comprises entre 1200 et 1400 kg/m³. En considérant une masse volumique saturée en place de 1350 kg/m³, il est possible d'estimer la masse de sédiments secs par mètre cube brut de sédiments dragués à 530 kg en considérant une masse volumique de 2650 kg/m³ pour les grains de sédiments et de 1025 kg/m³ pour l'eau. À titre indicatif, O'Bourke et al. (2008) présente un tableau synthèse des propriétés des sols produit par le USACE où les argiles organiques (30-50% d'argile) de consistance molle sont caractérisées par une masse volumique saturée de 1300 kg/m³ équivalant à 480 kg de sédiments secs par mètre cube de sédiments en place.

La valeur de 530 kg de sédiments secs par mètre cube de sédiments en place a également été comparée à une relation empirique établie par van Rijn & Barth (2019) à partir de mesures expérimentales. Cette relation adaptée aux mélanges de boue et de sable de consistance molle contenant 10 à 35% d'argile

permet d'estimer la masse de sédiments secs par mètre cube de sédiment en place suivant le processus de consolidation primaire. Sur la base de la granulométrie des sédiments de surface pour le secteur du quai (**Tableau 5-1**) où se situe la majorité de la surface à draguer, l'estimation de la masse de sédiments secs par mètre cube de sédiment en place serait de l'ordre de 450 kg selon cette relation empirique. La valeur de 530 kg est plus conservatrice et est retenue pour les analyses.

5.2.2 Paramètres d'opération retenus (dragage mécanique ou hydraulique)

Les principaux paramètres physiques du milieu imposés dans PSED pour la modélisation hydrosédimentaire des panaches de sédiments dragués et relargués sont présentés au **Tableau 5-2**. La température de l'eau correspond à des conditions typiques pour la période visée pour les travaux de dragage (octobre-novembre). Il est à noter par contre qu'advenant des travaux de dragage plus tôt à l'été ou l'automne ou plus trad en hiver, la température de l'eau demeure non-significative sur le comportement des courants et par conséquent sur l'évolution spatio-temporelle de la dilution et dispersion du panache de sédiments dragués et relargués. Les sections suivantes présentent les paramètres d'opération retenus pour le dragage des sédiments du havre de Matane et pour leur relargage au site d'immersion.

Tableau 5-2 Paramètres physiques du milieu

Paramètres	Valeurs
Température de l'eau (°C)	4
Salinité de l'eau (PSU)	29
Densité de l'eau (kg/m^3)	1023
Viscosité cinématique de l'eau (m^2/s)	1.53E-6
Rugosité du fond	0,02
Vitesse de courant	TELEMAC-2D
Profondeur d'eau	TELEMAC-2D

Dragage du havre de Matane

Les taux de production de dragage retenus pour la présente étude correspondent aux taux spécifiés pour l'étude d'impact sur l'environnement, soit 2000 m^3/jour pour le dragage mécanique et 4000 m^3/jour pour le dragage hydraulique. Dans tous les cas, une période de travail continue de 24h par jour est considérée.

Les taux de remise en suspension ont été établis en fonction des taux observés dans la littérature (Burt *et al.*, 2007; Schroeder, 2009; Fissel *et al.*, 2018; van Rijn, 2023). Comme ces taux présentent une grande variabilité, des taux de remise en suspension plus conservateurs ont été retenus dans le but de représenter des conditions relativement défavorables. Ainsi, une valeur de 8 % a été retenue pour le dragage mécanique et une valeur de 2 % a été retenue pour le dragage hydraulique. Ces valeurs correspondent à des taux de remise en suspension ayant une probabilité de non-dépassement de 90 % selon van Rijn (2023).

En considérant que les sédiments dragués constituent 530 kg de sédiments sec par mètre cube brut de sédiments dragués, le débit des solides relâchés dans la colonne d'eau est de 0,98 kg/s pour le dragage

mécanique et 0,49 kg/s pour le dragage hydraulique (**Tableau 5-3**). Le taux de remise en suspension est distribué sur l'ensemble de la colonne d'eau pour le dragage mécanique et concentré près du fond marin pour le dragage hydraulique.

Tableau 5-3 Paramètres de modélisation selon les méthodes de dragage mécanique et hydraulique

Paramètre	Mécanique	Hydraulique
Taux de production (m^3/jour)	2000	4 000
Durée d'une journée de travail (h)	24	24
Taux de remise en suspension (%)	8	2
D50 des sédiments (mm)	0,018 (secteur quai) 0,046 (secteur entrée)	0,018 (secteur quai) 0,046 (secteur entrée)
Masse de sédiment sec par m^3 brut dragué (kg)	530	530
Densité des sédiments (kg/m^3)	2 650	2 650
Débit des solides (kg/s)	0,98	0,49
Position injection remise en suspension	Ensemble de la colonne d'eau	Près du fond

Relargage au site d'immersion

Le relargage des sédiments dragués au site d'immersion a été effectué dans le modèle PSED selon les résultats obtenus par le modèle STFATE suivant la descente convective des sédiments et de l'effondrement dynamique sur le fond. Les cas de relargage ont été regroupés dans STFATE selon quatre (4) scénarios distincts combinant le type de dragage (mécanique ou hydraulique) et le type de marée (mortes-eaux ou vives-eaux). Le principal paramètre qui varie pour chacun des scénarios est la vitesse de courant du milieu ambiant. Le volume du mélange sédiments-eau relargué et les fractions volumétriques de chaque classe de sédiments prennent indirectement en compte la teneur en eau des sédiments relargués (**Tableau 5-4**). À noter que les conditions ambiantes de vitesses de courant et les profondeurs d'eau utilisées sont représentatives des conditions moyennes sur un cycle de marée typique en marée de mortes-eaux ou de vives-eaux.

La **Figure 5-5** illustre la distribution verticale de la masse de sédiments en suspension dans la colonne d'eau pour un relargage unique évalué par le modèle STFATE pour chacun des scénarios modélisés. Il est possible de constater que malgré les différences entre les scénarios, les sédiments en suspension sont majoritairement concentrés près du fond marin sur une couche de quelques mètres.

Tableau 5-4 Paramètres de modélisation STFATE associés au relargage des sédiments

Paramètres	Mécanique		Hydraulique	
	Marée de mortes-eaux	Marée de vives-eaux	Marée de mortes-eaux	Marée de vives-eaux
Type de barge	Fond ouvrant, capacité de 150 m³		Drague hydraulique à fond ouvrant, capacité de 1 180 m³	
Volume in-situ de sédiment dragués relargué (m^3)	125		640	
Masse de sédiments relargués (masse à l'état sec, kg)	65 970		337 767	
Fraction de sédiments cohésifs agglomérés (%)	20		0	
Fraction volumétrique de sable (%)	3,19		2,16	
Fraction volumétrique de silt (%)	6,88		5,83	
Fraction volumétrique d'argile (%)	3,31		2,81	
Fraction volumétrique de sédiments cohésifs agglomérés (%)	16,00		0	
Profondeur d'eau (m)	60	60	60	60
Vitesse de courant (m/s)	0,08	0,14	0,08	0,14

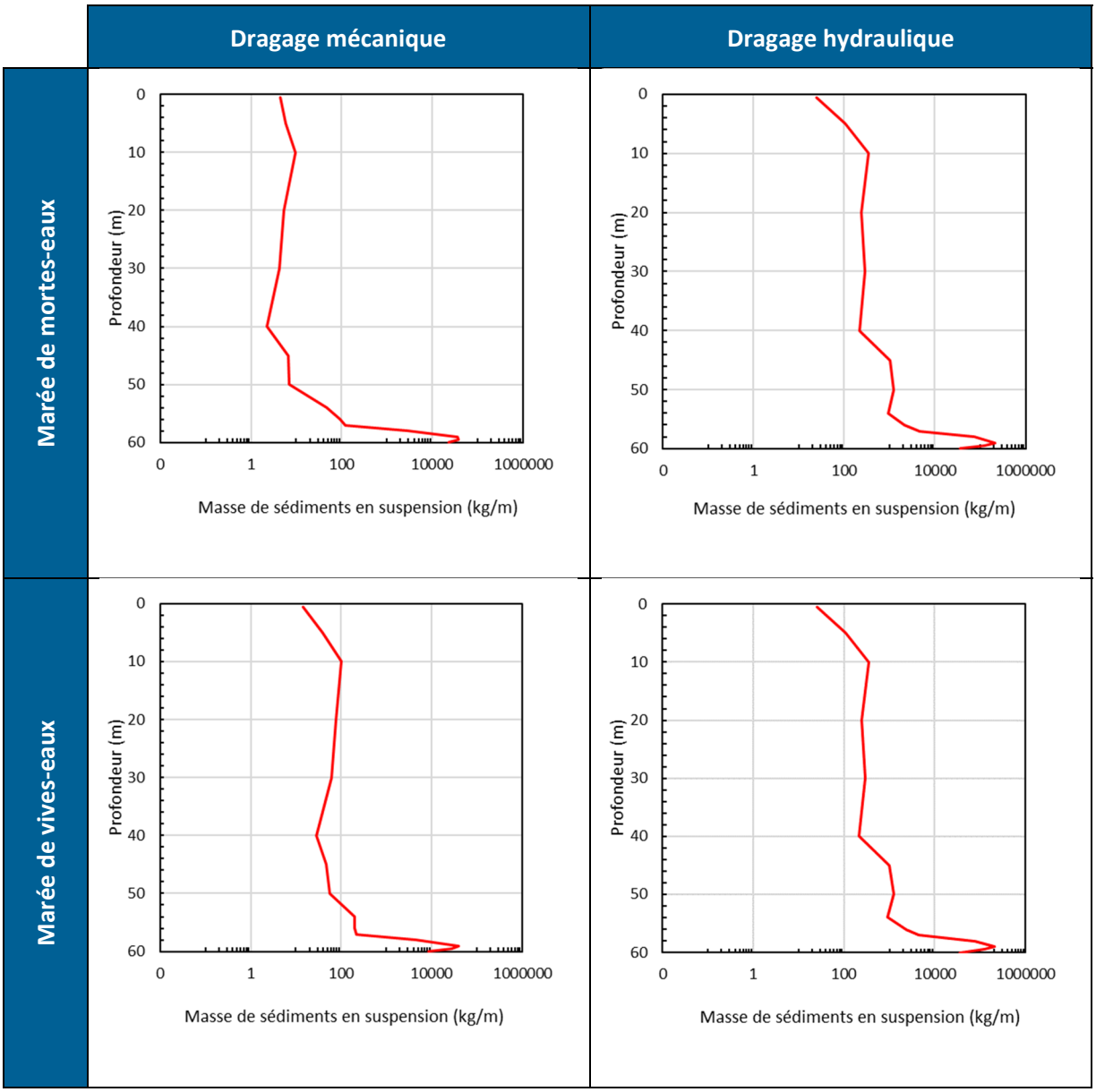


Figure 5-5 Distribution verticale de la masse de sédiments en suspension dans la colonne d'eau suivant un relargage unique tel qu'évalué par le modèle STFATE selon le type de dragage et le type de marée

Les profils verticaux des masses de sédiments en suspension évalués par le modèle STFATE ont été utilisés pour répartir les sédiments injectés dans PSED sur l'ensemble de la colonne d'eau pour chaque relargage selon le scénario applicable. Une succession de relargages sur une période de 48 h a été modélisée dans PSED afin de capter, le cas échéant, l'effet d'accumulation des sédiments en suspension associé à plusieurs relargages successifs. Le **Tableau 5-5** présente les paramètres de modélisation employés dans PSED pour simuler le comportement des sédiments en suspension suivant le relargage des sédiments.

Tableau 5-5 Paramètres de modélisation PSED pour le relargage des sédiments

Paramètres	Mécanique		Hydraulique	
	Marée de mortes-eaux	Marée de vives-eaux	Marée de mortes-eaux	Marée de vives-eaux
Taux de production (m^3/jour)	2 000		4 000	
Durée d'une journée de travail (h)	24		24	
Nombre de relargage par jour	16		6	
Volume in-situ de sédiment dragués relargué (m^3)	125		640	
Masse de sédiments en suspension par relargage (masse à l'état sec, kg)	55 073	55 097	335 730	335 986
D50 des sédiments (mm)	0,018		0,018	
Densité des sédiments (kg/m^3)	2 650		2 650	
Profil vertical des sédiments relargués en suspension dans la colonne d'eau	Profil STFATE		Profil STFATE	
Position du relargage	Site d'immersion (distribué à l'intérieur d'un cercle de 200 m de diamètre)		Site d'immersion (distribué à l'intérieur d'un cercle de 200 m de diamètre)	

5.3 Critères de qualité d'eau à respecter

Le site à l'étude se situe dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent et est considéré comme un milieu où les eaux sont limpides (teneurs ambiantes de matières en suspension (MES) inférieures à 25 mg/l). Ainsi, selon le MDDELCC et ECCC (2016), les critères de qualité de l'eau à respecter lors de travaux de dragage et de rejet en eau libre sont :

1. À 100 m de la drague et du point de rejet, augmentation moyenne* maximale de la concentration de MES de 25 mg/l par rapport aux teneurs ambiantes, sur la période de dragage quotidienne ou sur une période de 6 heures consécutive si le dragage est continu
2. À 300 m de la drague et du point de rejet, augmentation moyenne* maximale de la concentration de MES de 5 mg/l par rapport aux teneurs ambiantes, sur la période de dragage quotidienne ou sur une période de 6 heures consécutive si le dragage est continu.

*** Il est recommandé d'utiliser une moyenne géométrique.**

À noter que les concentrations de MES considérées pour les analyses correspondent à des valeurs moyennées sur l'ensemble de la colonne d'eau (critères de qualité de l'eau et résultats de modélisation).

5.4 Scénarios de modélisation retenus (cas défavorables)

Étant donné que la présente étude vise à caractériser le comportement des panaches de dragage et de relargage des sédiments dragués pour des conditions dites défavorables, il est impératif d'étudier de

multiples scénarios représentatifs de la variabilité des conditions hydrodynamiques pouvant être rencontrées en combinant différentes conditions de marées et de vents. À noter que la présence de vagues a été négligée pour l'ensemble des scénarios. L'absence de vagues peut être considérée comme défavorable, puisque que les vagues ont le potentiel de favoriser une augmentation de la dilution et de la dispersion des sédiments en suspension dans l'environnement marin (augmentation de la dilution). De plus, étant donné que les travaux de dragage sont généralement interrompus lorsque la présence de vagues est trop importante, le fait de négliger les vagues s'avère une simplification de modélisation réaliste.

Les scénarios étudiés sont des combinaisons de conditions de marée (marées de vives-eaux ou de mortes-eaux) et de conditions de vents spécifiques (absence ou présence de vent). Le choix des conditions de vent vise à représenter des vents typiques (direction dominante) ayant le potentiel de pousser le panache de sédiments vers les zones sensibles, notamment l'embouchure de la rivière Matane. L'analyse des données de vents enregistrées à la station météorologique de l'aéroport de Mont-Joli (station #7055121) a permis d'établir que les vents soufflant de l'ouest sont dominants durant la période des travaux (octobre et novembre) avec une vitesse moyenne annuelle de l'ordre de 21 km/h. Cette condition de vent a été retenue pour les scénarios de modélisation qui intègrent la présence de vent (vent constant et continu sur l'ensemble de la période modélisée). Les vents extrêmes n'ont pas été considérés dans l'élaboration des scénarios, puisque les travaux de dragage seraient susceptibles d'être interrompus en présence de forts vents. Ces vents extrêmes (supérieur ou égal à 46 km/h ou 25 nœuds), pour le secteur de Matane, représentent 55 % du temps pour les mois d'octobre et novembre. Le type de dragage (mécanique ou hydraulique) est également pris en compte dans les scénarios étudiés. Enfin, il est à noter que si la période de dragage est modifiée (ex. été ou hiver), les conditions rencontrées ne seront pas plus défavorables que celles retenues ici-haut et par conséquent, ne nécessitent pas d'être modélisées et interprétées.

Pour les scénarios associés aux travaux de dragage (**Tableau 5-6**), deux positions de dragage ont été considérées à l'intérieur du havre de Matane (**Figure 5-6**). La première position (secteur du quai) est localisée dans le secteur de l'expansion du quai où la plupart des matériaux à draguer sont situés. Le second site (secteur de l'entrée) est situé plus près de l'entrée du havre où un peu de dragage est prévu pour élargir le chenal de navigation. Bien que le site près de l'entrée soit représentatif d'une faible proportion des sédiments à draguer, il a été tout de même et intégré aux analyses puisque sa proximité avec l'entrée du havre pourrait favoriser davantage la dispersion du panache de sédiments en suspension à l'extérieur du havre et donc être un cas plus défavorable pour certains habitats.

L'ensemble des scénarios de modélisation hydrosédimentaire pour le relargage des sédiments dragués au site d'immersion situé au large du havre de Matane (**Figure 5-6**) sont présentés au **Tableau 5-7.** La position du relargage est située au centre du site d'immersion. Compte-tenu de la relative uniformité du site d'immersion en termes de profondeur d'eau (~60 m) et de conditions hydrodynamiques, il n'a pas été nécessaire d'inclure plusieurs positions de relargage à l'intérieur de ce dernier.

Tableau 5-6 Liste de scénarios de modélisation hydrosédimentaire pour les travaux de dragage dans le havre de Matane

Numéro de scénario	Type de dragage	Position du dragage	Conditions de vent	Marnage de la marée
DM-QUAI-1.1	Mécanique	Secteur quai	Aucun	Vives-eaux
DH-QUAI-1.1	Hydraulique			
DM-QUAI-1.2	Mécanique			Mortes-eaux
DH-QUAI-1.2	Hydraulique			
DM-QUAI-2.1	Mécanique		Ouest / 21 km/h	Vives-eaux
DH-QUAI-2.1	Hydraulique			
DM-QUAI-2.2	Mécanique			Mortes-eaux
DH-QUAI-2.2	Hydraulique			
DM-ENT-1.1	Mécanique	Secteur entrée	Aucun	Vives-eaux
DH-ENT-1.1	Hydraulique			
DM-ENT-1.2	Mécanique			Mortes-eaux
DH-ENT-1.2	Hydraulique			
DM-ENT-2.1	Mécanique		Ouest / 21 km/h	Vives-eaux
DH-ENT-2.1	Hydraulique			
DM-ENT-2.2	Mécanique			Mortes-eaux
DH-ENT-2.2	Hydraulique			

Tableau 5-7 Liste de scénarios de modélisation hydrosédimentaire pour le relargage des sédiments dragués au site d'immersion localisé au large du havre de Matane

Numéro de scénario	Type de dragage	Point de relargage	Conditions de vent	Marnage de la marée
RM-1.1	Mécanique	Centre du site d'immersion	Aucun	Vives-eaux
RH-1.1	Hydraulique			
RM-1.2	Mécanique			Mortes-eaux
RH-1.2	Hydraulique			
RM-2.1	Mécanique		Ouest / 21 km/h	Vives-eaux
RH-2.1	Hydraulique			
RM-2.2	Mécanique			Mortes-eaux
RH-2.2	Hydraulique			

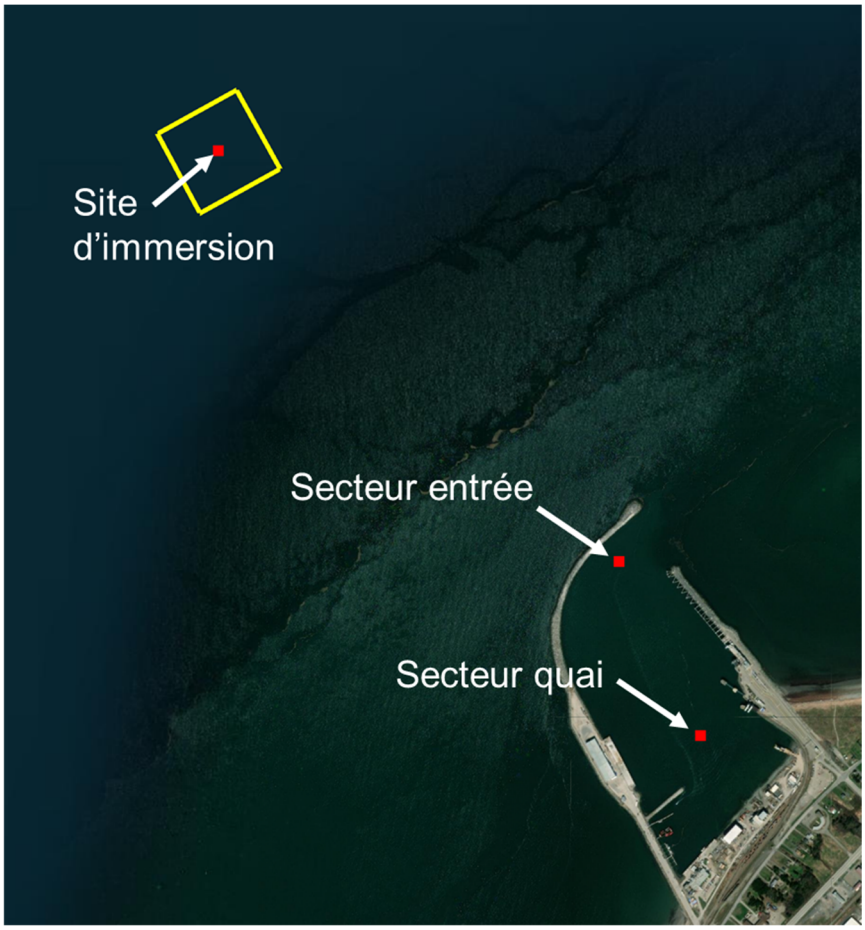


Figure 5-6 Position des sites de dragage et d'immersion retenus pour les scénarios de modélisation

5.5 Résultats de modélisation du panache de dilution et de dispersion des sédiments en suspension

Les travaux de dragage sont planifiés en continu donc les critères de qualité de l'eau à rencontrer sont applicables aux moyennes géométriques sur 6 heures des concentrations de sédiments en suspension (c.f. 5.3). Le post-traitement des résultats de modélisation a été nécessaire pour produire des cartes résultantes qui synthétisent l'ensemble des scénarios modélisés pour chacun des groupes de paramètres retenus. Pour ce faire, les moyennes mobiles sur 6 heures ont été calculées sur l'ensemble des périodes modélisées (120 heures pour le dragage et 48 jours pour le relargage) afin de bien capter les effets cumulatifs éventuels, et ce, pour chacun des scénarios de modélisation. À chaque nœud du maillage de calcul, le maximum des concentrations moyennées sur 6 heures parmi chaque scénario est ensuite identifié et appliqué à la carte résultante. Les deux sous-sections suivantes présentent les résultats de modélisation pour le dragage et le relargage respectivement.

5.5.1 Dilution et dispersion des sédiments en suspension associés au dragage à l'intérieur du havre de Matane (secteur quai et secteur entrée)

Afin de synthétiser les résultats obtenus pour l'ensemble des scénarios de dragage, quatre (4) cartes résultantes ont été produites de manière à regrouper l'information selon le site de dragage (secteur du quai ou de l'entrée du havre) et la méthode de dragage (mécanique ou hydraulique). La **Figure 5-7** présente les maximums des concentrations de sédiments en suspension moyennées sur 6 heures pour le dragage mécanique dans le secteur du quai (scénarios DM-QUAI-1.1, DM-QUAI-1.2, DM-QUAI-2.1 et DM-QUAI-2.2) alors que la **Figure 5-8** présente les résultats pour le dragage hydraulique dans le même secteur (scénarios DH-QUAI-1.1, DH-QUAI-1.2, DH-QUAI-2.1 et DH-QUAI-2.2). Les résultats pour le dragage dans le secteur de l'entrée du havre sont pour leur part présentés aux **Figure 5-9** (dragage mécanique, scénarios DM-ENT-1.1, DM- ENT -1.2, DM- ENT -2.1 et DM- ENT -2.2) et **Figure 5-10** (dragage hydraulique, scénarios DH-ENT-1.1, DH- ENT -1.2, DH- ENT -2.1 et DH- ENT -2.2).

L'analyse des résultats présentés sur les différentes cartes résultantes permet d'établir les constats suivants :

- Les concentrations de sédiments en suspension sont plus élevées et plus étendues pour le dragage mécanique comparativement au dragage hydraulique malgré un taux de production inférieur (2000 m³/jour pour le dragage mécanique vs 4000 m³/jour pour le dragage hydraulique). Cela s'explique par le taux de remise en suspension des sédiments plus élevé pour le dragage mécanique en plus d'être distribué sur l'ensemble de la colonne d'eau.
- Le dragage dans le secteur du quai génère plus de sédiments en suspension par rapport au dragage dans le secteur de l'entrée du havre. La présence de sédiments plus grossiers près de l'entrée du havre favorise la sédimentation plus rapide des sédiments remis en suspension par le dragage.
- Seul le dragage hydraulique à l'entrée du havre rencontre l'ensemble des critères de qualité de l'eau. Pour les autres cas, les critères sont légèrement dépassés.
- Les concentrations de sédiments en suspension supérieures à 5 mg/l demeurent complètement à l'intérieur des limites du havre pour le dragage hydraulique et s'étendent légèrement à l'extérieur de l'entrée du havre pour le dragage mécanique.
- La comparaison des résultats de dilution et de dispersion du panache de MES en conditions de mortes et de vives-eaux à l'intérieur du havre ne présente pas de différences notables en raison des profondeurs d'eau et des vitesses de courant qui demeurent très similaires selon ces deux conditions hydrauliques.
- L'influence d'un vent typique de l'ouest (21 km/h) sur la variation des conditions de dilution et de dispersion du panache de MES à l'intérieur du havre influence légèrement la direction de dispersion sans par contre venir modifier les principaux constats mentionnés ici-haut quant aux concentrations maximales rencontrées et critères de qualité d'eau.
- L'enveloppe du panache de sédiments en suspension ne rejoint pas l'embouchure de la rivière Matane pour aucun des scénarios de dragage simulés.

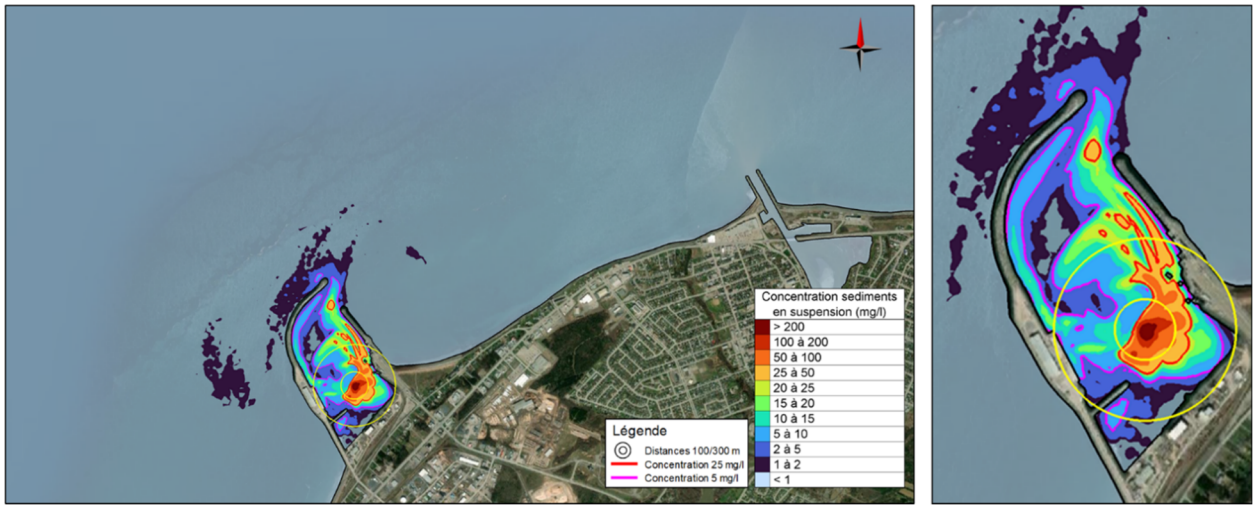


Figure 5-7 Maximum de la moyenne géométrique sur 6 heures de l'augmentation des concentrations de sédiments en suspension associée au dragage mécanique dans le secteur du quai

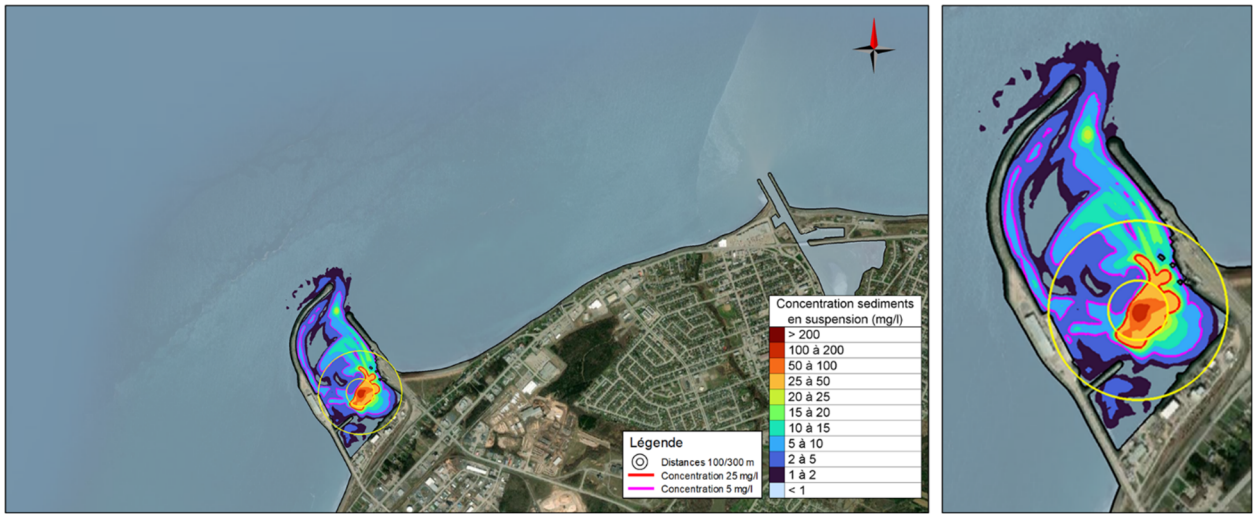


Figure 5-8 Maximum de la moyenne géométrique sur 6 heures de l'augmentation des concentrations de sédiments en suspension associée au dragage hydraulique dans le secteur du quai

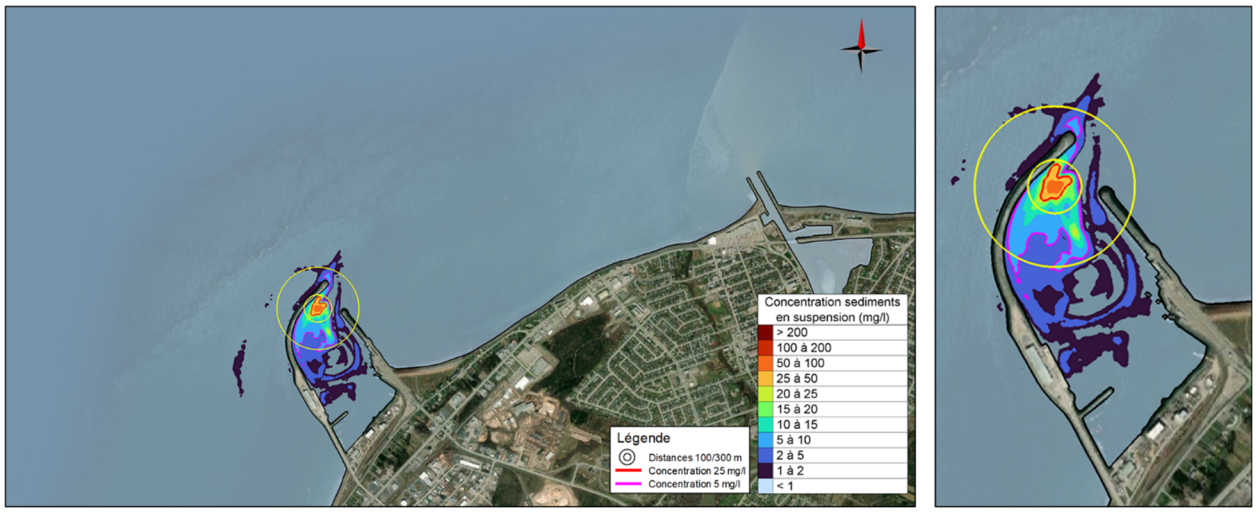


Figure 5-9 Maximum de la moyenne géométrique sur 6 heures de l'augmentation des concentrations de sédiments en suspension associée au dragage mécanique dans le secteur de l'entrée du havre

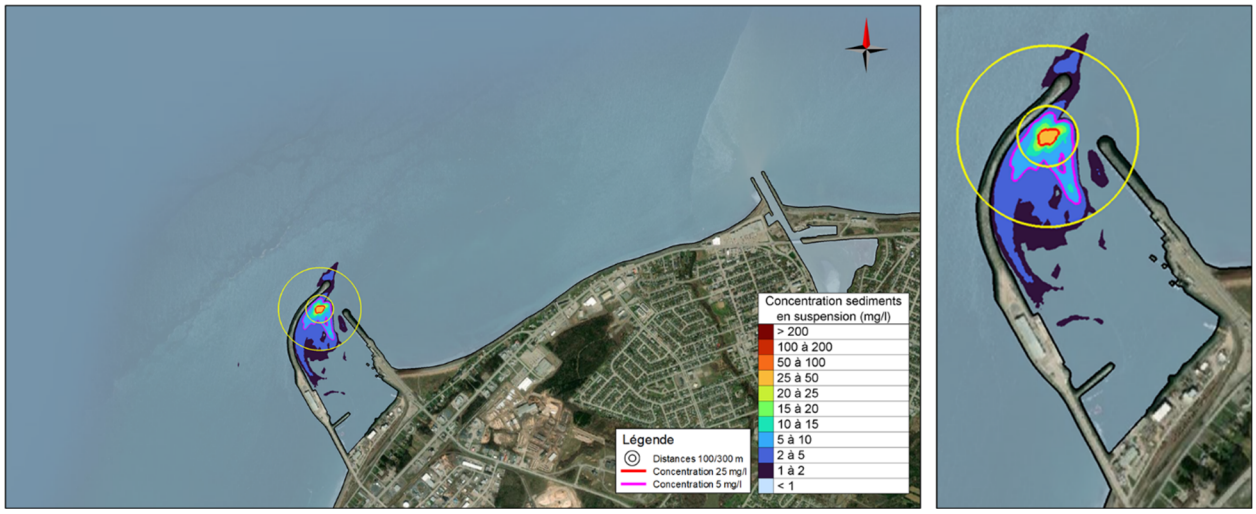


Figure 5-10 Maximum de la moyenne géométrique sur 6 heures de l'augmentation des concentrations de sédiments en suspension associée au dragage hydraulique dans le secteur de l'entrée du havre

5.5.2 Dilution et dispersion des sédiments en suspension associés au relargage des sédiments dragués au site d'immersion au large de Matane

Deux (2) cartes résultantes ont été produites pour synthétiser les résultats obtenus pour les scénarios de relargage des sédiments au site d'immersion en les regroupant en fonction de la méthode de dragage (mécanique ou hydraulique). La **Figure 5-11** présente les maximums des concentrations de sédiments en suspension moyennées sur 6 heures pour le relargage des sédiments dragués mécaniquement (scénarios RM-1.1, RM-1.2, RM-2.1 et RM-2.2). Les résultats pour le relargage des sédiments dragués

hydrauliquement sont pour leur part présentés sur la **Figure 5-12** (scénarios RH-1.1, RH-1.2, RH-2.1 et RH-2.2).

Les cartes résultantes des concentrations moyennées sur la colonne d'eau mettent en lumière les constats suivants concernant le relargage des sédiments dragués au site d'immersion :

- Le relargage de sédiments dragués mécaniquement minimise les concentrations de sédiments en suspension par rapport au relargage des sédiments dragués hydrauliquement. Cela s'explique en grande partie parce que les volumes journaliers relargués sont plus faibles et répartis sur un plus grand nombre de relargages avec le dragage mécanique. De plus, avec le dragage mécanique, une portion des sédiments cohésifs demeure agglomérée en mottes, favorisant la sédimentation directement sur le fond marin.
- Le relargage des sédiments dragués mécaniquement ne génère pas des concentrations de sédiments en suspensions supérieures à 25 mg/l (moyennées sur la colonne d'eau) donc le critère de qualité de l'eau à 100 m est rencontré. Toutefois, des concentrations de sédiments en suspension supérieures à 5 mg/l (moyennées sur la colonne d'eau) s'étendent jusqu'à 500 m du site d'immersion (directions nord-est et sud-ouest). Le critère de qualité de l'eau à 300 m est donc légèrement dépassé en conditions défavorables.
- Le relargage des sédiments dragués hydrauliquement engendre des concentrations de sédiments en suspension supérieures à 25 mg/l (moyennées sur la colonne d'eau) à l'extérieur du rayon de 100 m du site d'immersion. De plus, des concentrations de sédiments en suspension supérieures à 5 mg/l (moyennées sur la colonne d'eau) s'étendent jusqu'à 4 km du site d'immersion (direction nord-est). Les critères de qualité de l'eau à 100 et à 300 m ne sont donc pas respectés en conditions défavorables.
- La comparaison des résultats de dilution et de dispersion du panache de MES en conditions de mortes et de vives-eaux au site d'immersion révèle que la dispersion du panache est plus significative en conditions de vives-eaux, ce qui par conséquent augmente également la dilution des concentrations de MES. Ce même constat est également observé avec un vent typique de l'ouest (21 km/h), lequel accentue également la dispersion et donc l'empreinte du panache de MES. Par contre, pour ces deux cas où l'étendue du panache est augmentée, l'empreinte résultante et la dilution obtenue demeure à l'intérieur et inférieure aux valeurs maximales présentées sur les **figures 5-11 et 5-12** qui présentent les conditions limites défavorables.
- L'enveloppe du panache de sédiments en suspension ne rejoint pas l'embouchure de la rivière Matane pour aucun des scénarios de relargage simulés.

Considérant les profondeurs d'eau relativement importantes au site d'immersion (de l'ordre de 60 m) et le fait que les concentrations de sédiments en suspension ne sont pas distribuées uniformément sur l'ensemble de la colonne d'eau suivant le relargage, il est pertinent de prendre en considération la répartition verticale des sédiments en suspension pour l'analyse des résultats. La **Figure 5-13** illustre la distribution verticale de l'ensemble des sédiments relargués à différents instants suivant le début du relargage pour quatre (4) des scénarios modélisés. Les sédiments relargués sont essentiellement concentrés sur la portion inférieure de la colonne d'eau (premiers 10 m au-dessus du fond marin), plus particulièrement sur une couche de 1 à 2 m au-dessus du fond marin. Une portion significative des sédiments se dépose sur le fond marin (davantage pour les sédiments dragués mécaniquement). Ces résultats de modélisation sont cohérents avec l'information présentée dans la revue de littérature effectuée par Environnement Canada (1994). En effet, lors d'un relargage de sédiments marins en mer,

un courant de densité (mélange eau-sédiments) est généralement observé directement au-dessus du fond marin sur une épaisseur équivalente à 15 à 2 0% de la profondeur d'eau. La quantité de sédiments en suspension sur le reste de la colonne d'eau (au-dessus du courant de densité) demeure très faible en général (estimé à environ 1 à 5 % des sédiments relargués).

Les concentrations de sédiments en suspension moyennées sur la colonne d'eau telles que représentées sur les cartes de résultats demeurent un bon indicateur pour l'interprétation des résultats et pour l'évaluation des impacts du relargage des sédiments sur les habitats aquatiques et les zones sensibles en illustrant l'étendue générale du panache de sédiments relargués. Il demeure tout de même souhaitable d'également prendre en considération la répartition verticale des sédiments en suspension dans la colonne d'eau pour l'évaluation et l'interprétation des impacts sur les habitats aquatiques. En effet, des concentrations largement supérieures aux valeurs moyennées peuvent être observées sur les premiers mètres au-dessus du fond marin. Inversement, des concentrations de sédiments en suspension significativement plus faibles que les valeurs moyennées peuvent généralement être rencontrées sur la portion supérieure de la colonne d'eau.

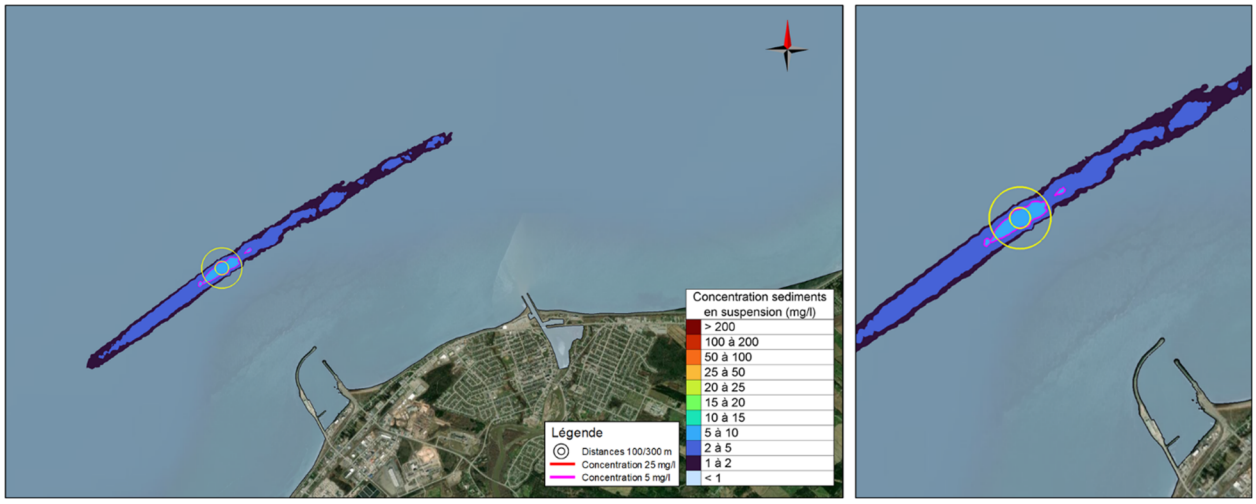


Figure 5-11 Maximum de la moyenne géométrique sur 6 heures de l'augmentation des concentrations de sédiments en suspension associée au relargage au site d'immersion des sédiments dragués mécaniquement

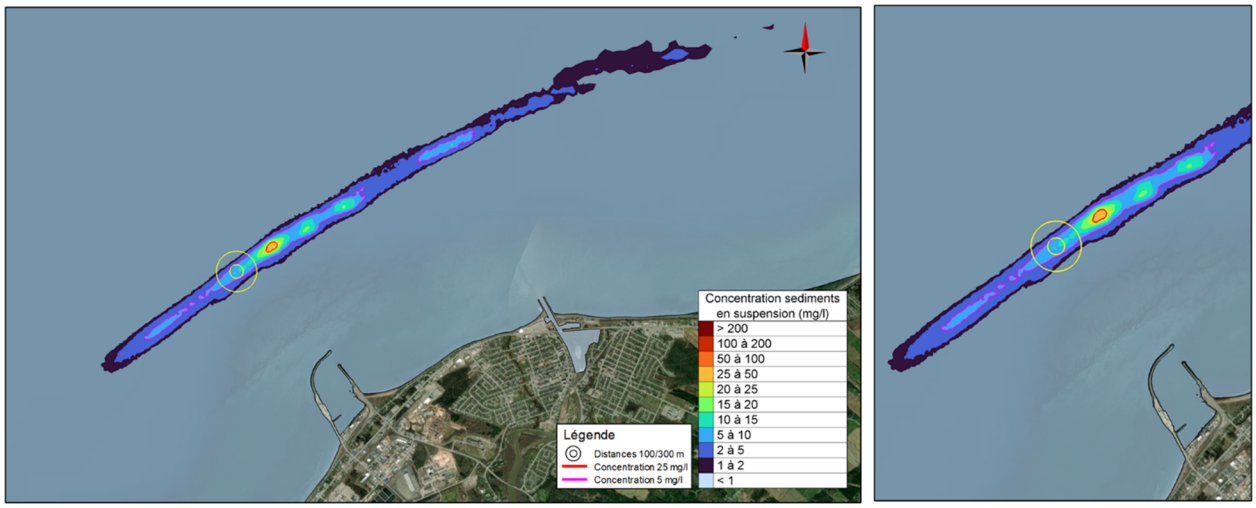


Figure 5-12 Maximum de la moyenne géométrique sur 6 heures de l'augmentation des concentrations de sédiments en suspension associée au relargage au site d'immersion des sédiments dragués hydrauliquement

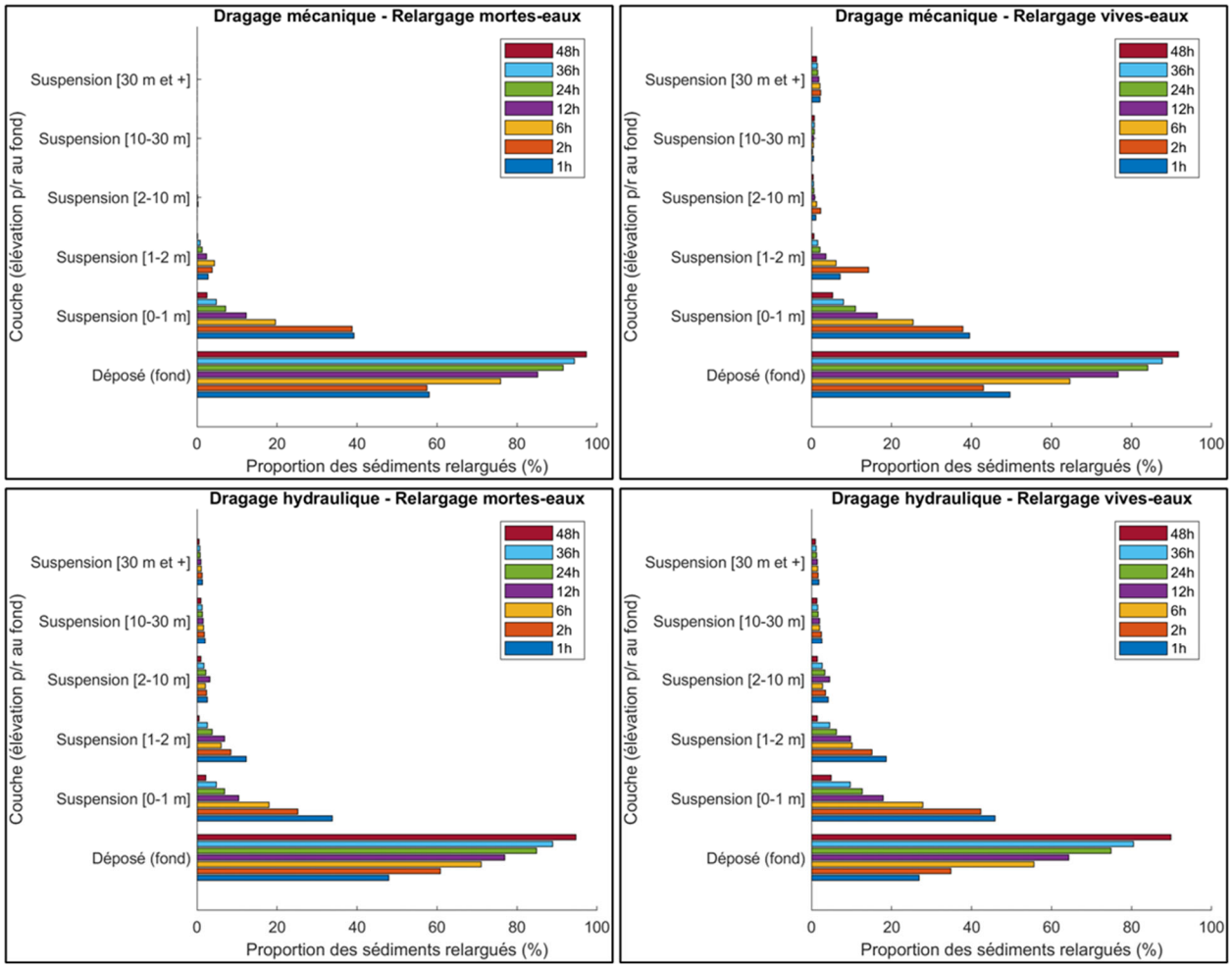


Figure 5-13 Répartition verticale dans la colonne d'eau des sédiments relargués à différents instants suivant le début des relargages successifs pour différent scénarios de relargage simulés (information tirée des résultats de modélisation STFATE-PSED)

6 MODÉLISATION HYDROSÉDIMENTAIRE DES PATRONS D'ÉROSION ET DE SÉDIMENTATION À L'INTÉRIEUR DU HAVRE

6.1 Objectifs et hypothèses

L'objectif principal de la modélisation hydrosédimentaire des patrons d'érosion et de sédimentation est d'évaluer quantitativement si l'ajout du nouveau poste à quai a le potentiel ou non de venir modifier significativement la dynamique sédimentaire du fond marin à l'intérieur du havre de Matane. Idéalement, il serait souhaitable que l'ajout et la nouvelle géométrie du quai n'engendre aucun impact notable, notamment sur les taux de sédimentation à l'intérieur du havre.

La modélisation hydrosédimentaire est complexe puisqu'une multitude de facteurs peuvent influencer les processus de transport sédimentaire en milieu côtier au fil du temps (marée, vagues, vent, tempêtes, navigation, interventions anthropiques, etc.). De plus, les sédiments sont eux-mêmes fortement hétérogènes et leurs caractéristiques physiques influencent directement leur comportement en réponse aux sollicitations hydrodynamiques et forces de cisaillement sur le fond marin. Des hypothèses de modélisation simplificatrices sont généralement requises pour pallier le manque de données historiques et de données in-situ précises (mesures terrain) relativement à certains paramètres de modélisation, ainsi que pour parvenir à une stratégie de modélisation qui soit jugée raisonnable en termes d'effort et de temps de calcul. L'interprétation des résultats de modélisation hydrosédimentaire doit conséquemment être réalisée de manière prudente, idéalement sur une base comparative, et en considérant les limites induites par la stratégie de modélisation employée.

Les phénomènes de sédimentation à l'intérieur du havre de Matane peuvent être répartis en deux groupes distincts. Une partie de la sédimentation peut être associée à la déposition sur le fond marin des matières en suspension ambiantes dans ce secteur de l'estuaire du Saint-Laurent. Le principal apport extérieur en sédiments à l'intérieur du havre provient en effet des échanges de masses d'eau en fonction des marées via l'entrée du havre. Il s'agit donc d'une composante importante et nécessaire devant être inclue dans la stratégie de modélisation. Par ailleurs, un autre apport en sédiments peut provenir de la remobilisation des sédiments déjà présents à l'intérieur du havre par les opérations anthropiques, notamment les manœuvres des navires et de leurs hélices qui peuvent remettre en suspension des sédiments et ainsi les transporter dans des zones adjacentes. Cet aspect de la dynamique sédimentaire à l'intérieur du havre de Matane a toutefois été exclus dans l'élaboration de la stratégie de modélisation, puisque ces phénomènes demeurent très difficiles à modéliser et à quantifier de par la nature des opérations qui les génèrent, en plus qu'aucune observation ou donnée mesurée localement sur le site permet de confirmer les volumes en transit et par conséquent les impacts des opérations sur la dynamique hydrosédimentaire locale à l'intérieur du havre. Pour toutes ces raisons, cette composante a donc été exclue, laquelle aurait également complexifiée de façon notable le travail de modélisation tout en augmentant significativement le niveau d'incertitude sur les résultats.

Enfin, la modélisation hydrosédimentaire des patrons d'érosion et de sédimentation présentée dans les prochaines sections a été réalisée pour la géométrie de quai B17, laquelle a été comparée à la géométrie de quai existante (état de référence) pour ces analyses.

6.2 Historique de sédimentation et de dragage du havre de Matane

Dans l'ensemble, le havre de Matane ne présente pas une problématique de sédimentation importante. Les données historiques consultées ont révélé que seulement deux dragages d'entretien ont été effectués depuis 2000, soit en 2008 et en 2015 (aucune information antérieure à l'année 2000 n'est disponible). La **Figure 6-1** présente les zones draguées en 2008 et en 2015. Quant aux superficies et volumes dragués, les valeurs suivantes ont été obtenues de la part de la SPBSG :

- Dragage 2008
  - Superficie : **33 211 m^2**
  - Volume : **16 168 m^3**
- Dragage 2015
  - Superficie : **20 720 m^2**
  - Volume : **9 225 m^3**

Dans les deux cas, l'essentiel du dragage a été effectué de part et d'autre du chenal de navigation à l'entrée du havre, le long de la limite ouest du chenal de navigation jusqu'au quai commercial, ainsi que le long des quais commerciaux (à noter qu'un deuxième quai perpendiculaire au quai actuel était présent à l'époque). De plus, selon l'information transmise par la SPBSG, aucun dragage ne semble avoir été effectué depuis 2000 au quai des pêcheurs ni aux quais des traversiers (terminal de la STQ et terminal du traversier-rail).

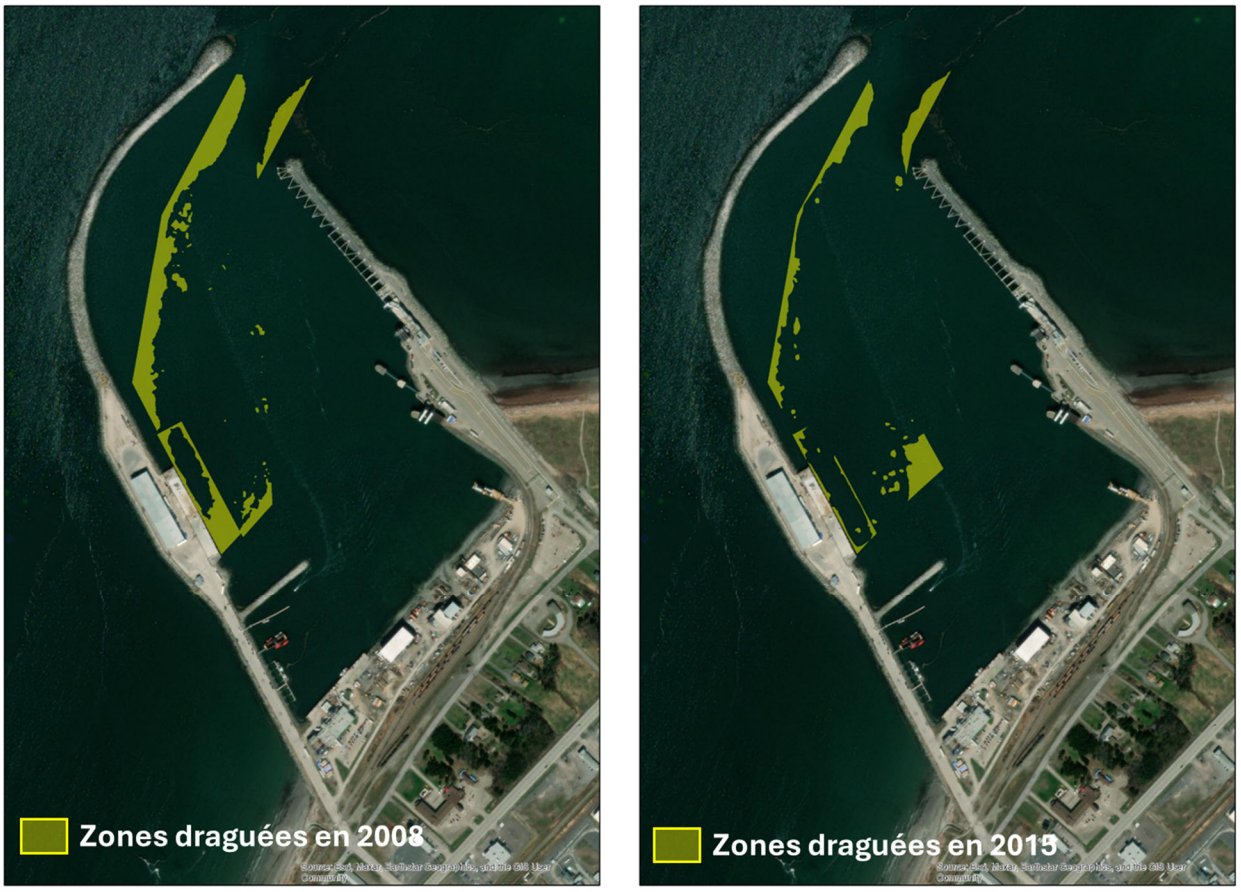


Figure 6-1 Zones draguées à l'intérieur du havre de Matane en 2008 (gauche) et en 2015 (droite)

Les relevés bathymétriques historiques rendus disponibles par la SPBSG couvrent la période de septembre 2000 à mai-juin 2023. L'intervalle de temps entre les relevés et l'étendue spatiale de chaque relevé sont variables. À l'exception des relevés de 2022 et de 2023, seuls des fichiers PDF des relevés étaient disponibles dont les profondeurs d'eau étaient arrondies aux 10 cm, limitant ainsi le niveau d'interprétation qui a pu être réalisé. Les taux historiques de sédimentation du fond marin à l'intérieur du havre de Matane ont donc été évalués à partir de ces relevés bathymétriques, lesquels sont énumérés au **Tableau 6-1**.

Pour ce faire, 45 points de référence ont été répartis à l'intérieur des secteurs couverts par les relevés (**Figure 6-2**). Pour chaque relevé, une élévation bathymétrique a été attribuée manuellement par interpolation visuelle du relevé bathymétrique PDF (préalablement géoréférencé) aux différents points de référence retenus (selon la couverture spatiale du relevé). Ainsi, en évaluant l'évolution bathymétrique à chaque point entre deux relevés successifs tout en considérant l'intervalle de temps entre ceux-ci, il a été possible d'estimer approximativement les taux de sédimentation en vigueur à l'intérieur du havre de Matane. Les taux moyens de sédimentation (exprimés en cm/an) ont donc été estimés pour chaque point de référence en prenant soin de retirer de l'analyse l'impact des travaux de dragage de 2008 et de 2015, ainsi que l'ensemble du relevé de 2019 puisqu'il semblait incohérent avec les autres relevés (possiblement un problème de référencement vertical). Ces taux de sédimentation annuels moyens sont présentés à la **Figure 6-3.** Il est important de préciser qu'une grande variabilité dans les taux de sédimentation d'un

relevé à l'autre relativement aux valeurs moyennes a été observée. Les taux annuels moyens doivent donc être interprétés comme des tendances générales pouvant évoluer dans le temps en fonction de différents facteurs naturels et anthropiques.

L'interprétation des taux de sédimentation annuels moyens estimés (**Figure 6-3**) permet de constater que la sédimentation est très variable à l'intérieur du havre de Matane et qu'il y a même des secteurs où le taux de sédimentation moyen est négatif (faible érosion du fond marin). Trois (3) secteurs spécifiques présentent des taux de sédimentation plus élevés :

1. De part et d'autre du chenal de navigation à l'entrée du havre;
2. Le long du brise-lame ouest;
3. Dans la zone du quai commercial

Fait intéressant, ces trois secteurs correspondent aux zones draguées en 2008 et en 2015. À l'entrée du havre, les profondeurs d'eau au centre du chenal semblent se maintenir (point de référence #19), logiquement en raison des passages fréquents des navires qui limitent la sédimentation et donc permettent de maintenir les profondeurs d'eau sans la nécessité de procéder à des dragages de maintenance. C'est par conséquent une partie de ces sédiments remobilisés par les navires qui se dépose de part et d'autre du chenal où des taux de sédimentation de l'ordre de 10 à 20 cm/an sont observés (points de références #21, 22, 10 et 37). L'exposition plus directe de l'entrée du havre aux vagues est potentiellement un autre facteur qui rend ce secteur particulièrement dynamique d'un point de vue du transport sédimentaire (diffraction des vagues au musoir des brise-lames). Le pied du brise-lame ouest est un secteur où il y a absence de navigation ce qui explique en partie pourquoi les taux de sédimentation à cet endroit sont relativement uniformes sur une base historique (5 à 10 cm/an, points de référence #5, 6, 7, 9, 35, 36 et 37). Quant à l'approche du quai commercial, l'influence de la navigation sur la dynamique sédimentaire est plus perceptible (érosion du fond marin en moyenne aux points de référence #3 et 4.). Dans le secteur plus local en devant du quai commercial, les taux d'érosion/sédimentation sont relativement variables avec des taux compris entre -5 cm/an (point de référence #25) et 13 cm/an (point de référence #13). La variation spatiale des taux d'érosion/sédimentation dans ce secteur est probablement associée, du moins en partie, aux manœuvres des navires et opérations à quai qui causent la remobilisation des sédiments dans la colonne d'eau et leur redistribution sur le fond marin.

Les autres secteurs d'intérêt localisés à l'intérieur du havre de Matane (terminaux des traversiers [points de référence #43 et 44], quai des pêcheurs [points de référence #27, 28 et 29], zone d'amarrage de barges [points de référence #32, 33 et 34]) ne présentent pas, quant à eux, des taux de sédimentation significatifs selon l'analyse des relevés bathymétriques historiques. À noter toutefois que ce constat est basé sur un nombre plus limité de relevés par rapport aux autres secteurs discutés précédemment (**Figure 6-2**). Il est également intéressant de constater la présence de deux zones à l'intérieur du havre où une tendance à l'érosion du fond marin est observée de manière plus significative (points bleus sur la **Figure 6-3**). Ceci s'explique probablement par les impacts de la navigation le long de ces deux axes. En effet, le premier axe (points de référence #18 et 23), correspond en fait au chenal de navigation qui relie l'entrée du havre aux terminaux des traversiers, lequel assure au minimum quelques passages de navires au quotidien. Le second axe (points de référence #40, 25 et 26) correspond quant à lui au chenal d'accès au quai des pêcheurs. Il s'agit donc d'un secteur davantage exposé aux sollicitations et passages des bateaux de pêche, plus particulièrement durant la saison d'opération.

Tableau 6-1 Liste des relevés bathymétriques historiques utilisés pour évaluer les taux de sédimentation/érosion à l'intérieur du havre de Matane

Date du relevé bathymétrique	Nombre de mois depuis relevé précédent	Secteurs relevés	Type de relevé bathymétrique
Septembre 2000	-	Chenal de navigation et quai commercial	Sondage de vérification
Juillet 2005	58	Chenal de navigation, quai commercial et pied du brise-lame ouest	Sondage de vérification
Novembre 2005	4	Quai des pêcheurs et chenal de navigation des pêcheurs	Sondage de vérification
Septembre/octobre 2008	34	Chenal de navigation et quai commercial	Sondage avant dragage
Novembre 2008	2	Chenal de navigation et quai commercial	Sondage après dragage
Juin 2009	7	Chenal de navigation, quai commercial et pied du brise-lame ouest	Sondage de vérification
Novembre 2011	19	Chenal de navigation, quai commercial et pied du brise-lame ouest	Sondage de vérification
Août-septembre 2013	21	Chenal de navigation, quai commercial et pied du brise-lame ouest	Sondage de vérification
Septembre 2014	13	Chenal de navigation et quai commercial	Sondage pour prévision de dragage
Juillet 2015	10	Chenal de navigation, quai commercial, approches terminaux traversiers	Sondage avant dragage
Décembre 2015	5	Chenal de navigation et quai commercial	Sondage après dragage
		Limite sud du havre	Sondage de vérification
Décembre 2016	12	Chenal de navigation, quai commercial et pied du brise-lame ouest	Sondage de vérification*
Juin 2018	18	Chenal de navigation, quai commercial et pied du brise-lame ouest	Sondage de vérification*
Juillet 2019	13	Chenal de navigation, quai commercial et pied du brise-lame ouest	Sondage de vérification*
Mai 2022	34	Chenal de navigation, quai commercial, pieds des brise-lames est/ouest et terminal STQ	Sondage de vérification
Mai-juin 2023	12	Chenal de navigation, quai commercial, pieds des brise-lames est/ouest et terminal STQ	Sondage de vérification

* Quai commercial en démolition

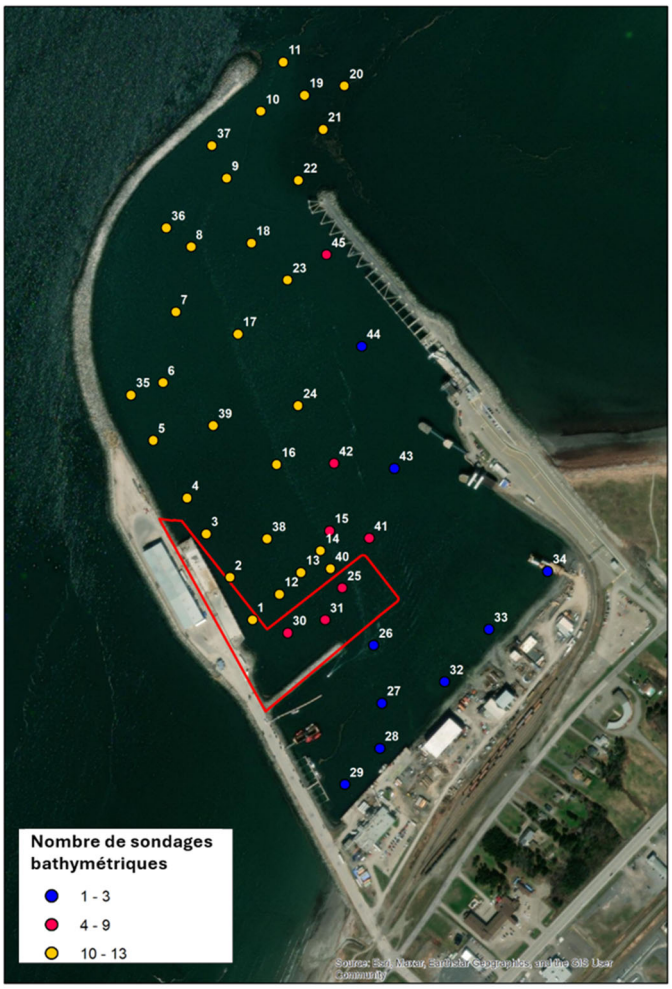


Figure 6-2 Identifiant des points de référence à l'intérieur du havre de Matane utilisés pour estimer les taux de sédimentation historiques à partir des relevés bathymétriques disponibles entre 2000 et 2023. Le trait rouge représente la géométrie projetée B17 pour les nouveaux postes à quai



Figure 6-3 Évolution du fond marin (taux annuels moyens d'érosion - / sédimentation +) à l'intérieur du havre de Matane (aux points de référence) estimée à partir des relevés bathymétriques réalisés entre 2000 et 2023 en excluant l'influence des travaux de dragage de 2008 et de 2015, ainsi que le relevé bathymétrique de 2019. Le trait rouge représente la géométrie projetée B17 pour les nouveaux postes à quai

6.3 Patrons d'érosion/sédimentation en conditions existantes

6.3.1 Modèle GAIA

Le modèle de transport sédimentaire GAIA (Open TELEMAC-MASCARET, 2022) a été couplé au modèle hydrodynamique TELEMAC-2D pour étudier les processus de transport sédimentaire à l'intérieur du havre de Matane en conditions existantes et projetées (post-construction). Dans le but d'optimiser les temps de calcul, les conditions hydrodynamiques ont été préalablement simulées sur le domaine de calcul élargie du fleuve et de l'estuaire du Saint-Laurent (section 5.1.1) sur une période de 30 jours consécutifs afin d'inclure des cycles de marée typiques de mortes-eaux et de vives-eaux. Des maillages de calcul locaux ont ensuite été développés spécifiquement pour les simulations couplées TELEMAC-2D/GAIA en conditions existantes et projetée (géométrie de quais B17) tel que présenté sur la **Figure 6-4**. La bathymétrie du modèle en conditions projetées prend en considération les travaux de dragage du fond

marin pour l'aménagement des quais (post-construction), ainsi que la reconfiguration du chenal de navigation pour l'accès au quai des pêcheurs. Les conditions limites de ces modèles (niveaux d'eau et vitesses de courant) ont été extraites du modèle TELEMAC-2D élargie et répétées successivement de manière à obtenir un forçage équivalent à une année complète pour la modélisation hydrosédimentaire.

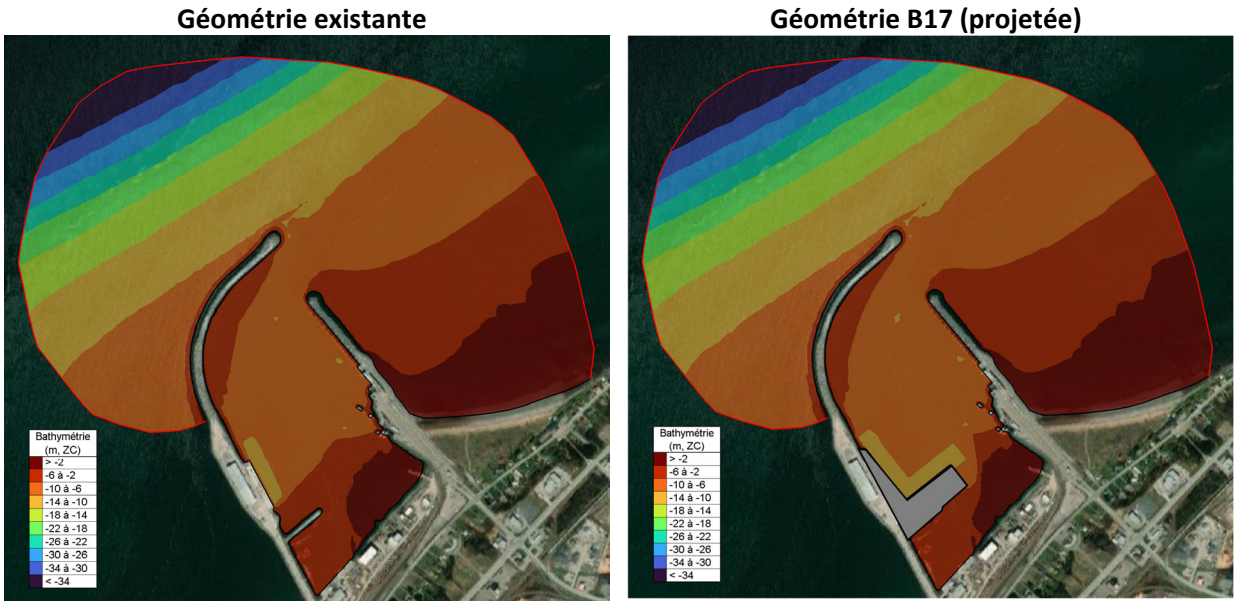


Figure 6-4 Géométrie du modèle hydrosédimentaire couplé TELEMAC-2D/GAIA en conditions existante et projetée (géométrie B17). Les conditions limites du modèle sont imposées à la frontière au large (trait rouge)

6.3.2 Paramétrisation et calibration

Compte-tenu de la nature des sédiments marins présents en surface et rencontrés à l'intérieur du havre de Matane qui se composent principalement de sédiments cohésifs (limon et argile), le modèle GAIA a été paramétré de manière à modéliser uniquement les processus de sédimentation et d'érosion des sédiments cohésifs. Une seule classe de sédiments a donc été considérée avec une vitesse de chute propre à ce type de sédiments plus fins. De plus, les sédiments marins ont été représentés dans GAIA en une seule couche homogène. Le flux de déposition des sédiments est calculé dans GAIA en fonction des concentrations de sédiments en suspension ambiantes, de la vitesse de chute dans l'eau de chaque classe de sédiment et des contraintes de cisaillement sur le fond marin. Le phénomène d'érosion des sédiments cohésifs est pour sa part modélisé dans GAIA selon la formule de Partheniades.

Le forçage du modèle GAIA inclus les niveaux d'eau et les vitesses de courant calculées par le module hydrodynamique TELEMAC-2D sur l'ensemble du domaine de calcul, ainsi que les concentrations de sédiments en suspension ambiantes imposées directement à la frontière au large du modèle. Un fond marin non érodable a été utilisé à l'extérieur du havre de Matane pour prévenir les instabilités du modèle en évitant l'érosion du fond marin.

Le travail de calibration du modèle hydrosédimentaire couplé TELEMAC-2D/GAIA a été effectué en comparant l'évolution du fond marin sur une année complète tel que calculé par GAIA avec les taux de

sédimentation annuels moyens estimés à partir des relevés bathymétriques historiques du havre de Matane (c.f. section 6.2). Les paramètres suivants ont été ajustés pour obtenir une paramétrisation satisfaisante du modèle GAIA :

- Concentration ambiante de sédiments en suspension imposées à la frontière du modèle;
- Vitesse de chute des sédiments dans l'eau;
- Contrainte de cisaillement critique pour l'érosion des sédiments cohésifs;
- Concentration de sédiments cohésifs dans la couche de sédiment marin.

La **Figure 6-5** présente l'évolution du fond marin en conditions existantes après 1 an de sollicitations suite à la calibration du modèle GAIA. Bien que l'approche employée pour la modélisation hydrosédimentaire comporte plusieurs simplifications, notamment le fait que l'influence des vagues et de la navigation (particulièrement les jets d'hélice) sur le transport sédimentaire soient négligées, les résultats obtenus pour une durée correspondant à une année complète sont jugés satisfaisants. Les principaux patrons de sédimentation identifiés à partir des relevés bathymétriques sont relativement bien reproduits.

L'entrée du havre est la zone où la modélisation présente une plus forte sédimentation (de l'ordre de 10 cm/an), ce qui correspond bien aux observations basées sur les relevés bathymétriques historiques. Quant à l'axe de navigation reliant l'entrée du havre au quai commercial, le modèle se limite à présenter une très faible sédimentation, laquelle en réalité n'est pas présente en raison de l'impact de la navigation qui favorise le maintien du chenal et des profondeurs d'eau, voire même mener à une très faible érosion tel que présentée sur la **Figure 6-3** (taux annuels légèrement négatifs).

Le long du brise-lame ouest entre l'entrée du havre et le quai commercial, la modélisation suggère une sédimentation à un taux de l'ordre de 5 à 8 cm/an. Cela est expliqué par le fait que les masses d'eau chargées en sédiments tendent à entrer à l'intérieur du havre lors du flot (marée montante) et à longer le brise-lame ouest jusqu'au quai commercial. Au cours de ce processus, il y a sédimentation sur le fond marin d'une fraction des sédiments en suspension, ce qui est d'ailleurs bien observé sur la base des relevés bathymétriques historiques. Les faibles courants à l'intérieur du havre sont certes favorables à cette sédimentation naturelle.

Dans le secteur du quai commercial, la sédimentation prédite par le modèle GAIA varie entre 1 et 5 cm/an ce qui demeure en grande partie dans les mêmes ordres de grandeur que ce qui a été observé historiquement, mis à part quelques exceptions où le modèle ne parvient pas à reproduire localement les faibles taux négatifs (érosion) ou les taux de sédimentation plus significatifs, fort probablement et tel que mentionné ici-haut, une conséquence directe des opérations de navigation et des manœuvres des navires (hélices) près des quais, soit des processus pouvant mener localement, à une variabilité morphologique du fond marin, mais exclus de la modélisation GAIA qui se limite uniquement aux processus naturels.

Ailleurs à l'intérieur du havre de Matane, les taux annuels moyens de sédimentation historiques sont très faibles, voire négatifs (tendance à l'érosion du fond marin). Le modèle GAIA prédit pour sa part des taux de sédimentation de l'ordre de 1 cm/an le long des terminaux des traversiers et des taux de sédimentation nuls dans le secteur sud du havre (quai des pêcheurs et secteur d'amarrage de barges), ce qui s'avère tout à fait raisonnable compte tenu des hypothèses simplificatrices et inhérentes à la modélisation hydro sédimentaire.

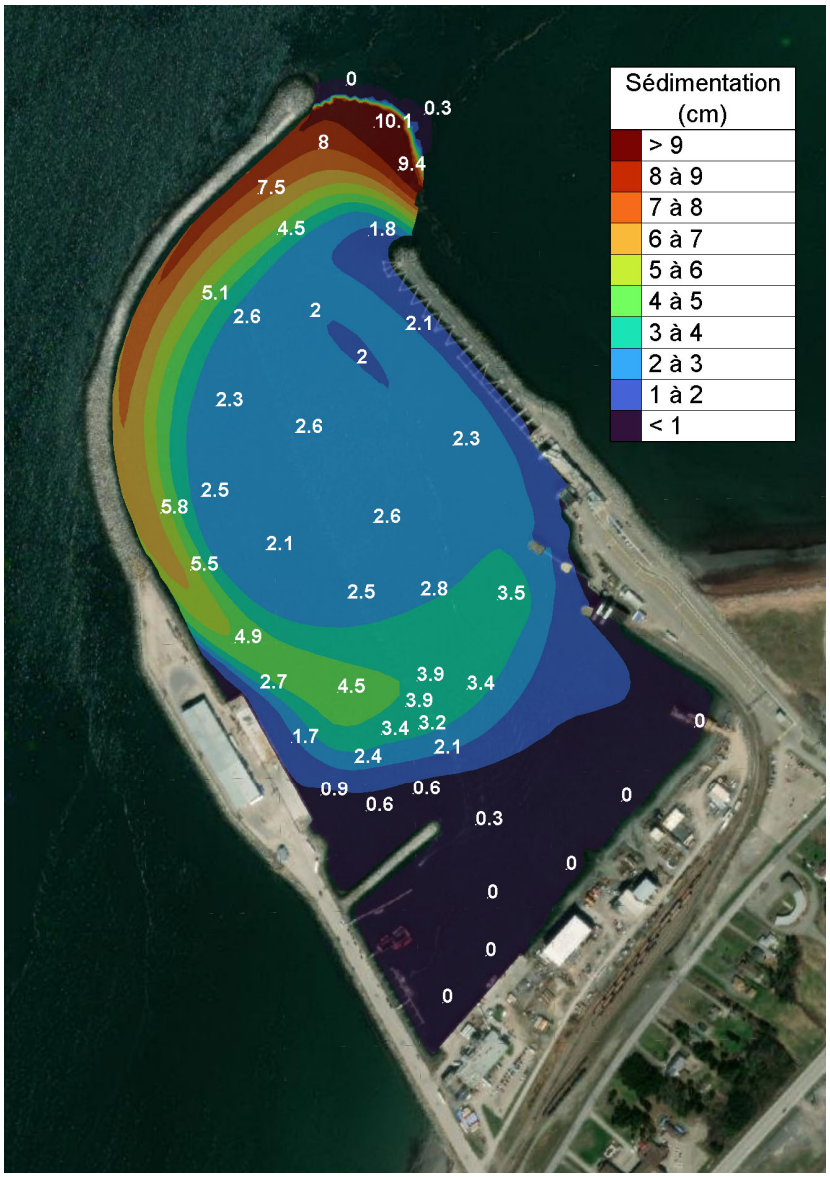


Figure 6-5 Évolution du fond marin (taux annuels moyens d'érosion - / sédimentation +) sur une année complète en conditions existantes obtenu du modèle GAIA avec comme forçage un signal de marée et une concentration ambiante de sédiments en suspension. L'évolution annuelle aux points de référence (c.f. section 6.2) est présentée pour faciliter la comparaison avec les taux de sédimentation historiques

6.4 Patrons d'érosion/sédimentation en conditions projetées

Une simulation hydrosédimentaire en conditions projetées (géométrie B17) équivalent également à une année complète de sollicitations a été réalisée selon la même paramétrisation et le même forçage du modèle TELEMAC-2D/GAIA que ceux employés pour la calibration du modèle en conditions existantes. La **Figure 6-6-A** présente l'évolution du fond marin obtenue suite à cette simulation avec la géométrie B17. La **Figure 6-6-B** montre pour sa part les différences (cm/an) quant aux patrons d'érosion/sédimentation

obtenus lorsque comparé à ceux associés à la géométrie existante. Le patron général d'érosion/sédimentation en conditions projetées est relativement similaire à celui obtenue en conditions existantes (**Figure 6-5**), soit dans les deux cas, des taux de sédimentation plus élevés à l'entrée du havre et le long du brise-lames ouest, des taux de sédimentation plus faibles au centre du havre et près des terminaux des traversiers, ainsi que des taux de sédimentation négligeables dans le secteur sud du havre (quai des pêcheurs).

Par rapport aux conditions existantes, les résultats obtenus pour le nouveau poste à quai B17 ne suggèrent pas des changements notables en termes de patrons d'érosion et de sédimentation à l'intérieur du havre de Matane en considérant l'effet des courants de marées sur le transport sédimentaire (exclus l'impact de la navigation sur la dynamique sédimentaire). La mise en place du nouveau poste à quai ajoute un nouvel obstacle aux courants de marée, lesquels demeurent très faibles dans tous les cas (**Figure 2-16** et **Figure 2-17)**, ce qui suggère un léger déplacement du patron de sédimentation vers le nord. Ainsi, la sédimentation est légèrement augmentée à cet endroit par rapport aux conditions existantes, mais demeure dans tous les cas non-significative avec une variation très faible par rapport aux conditions existantes (**Figure 6-6-B,** zones en tons de rose pâle, soit 0,2 à 0,5 cm/année)

En contrepartie, la sédimentation est légèrement réduite ailleurs à l'intérieur du havre (zones en tons de bleu sur la **Figure 6-6-B**), notamment dans le secteur à l'extrémité du nouveau quai (section perpendiculaire au quai existant). Dans la portion sud du havre au niveau du quai des pêcheurs et zones adjacentes, aucune augmentation de la sédimentation n'est observée, de même que le long du nouveau tracé délimitant le chenal d'accès permettant d'accéder au quai des pêcheurs. Ce même constat est observé au niveau des terminaux des traversiers, quoiqu'une légère augmentation est observée le long du brise-lame est, mais demeure non-significative.

Sur la base des résultats produits, il est important de souligner que dans l'ensemble, les taux de sédimentation demeurent faibles dans le havre de Matane et ce, que ce soit en conditions existantes (l'historique de dragage en témoigne), ou en conditions projetées avec l'ajout du nouveau poste à quai qui résulte en un très faible impact sur la dynamique sédimentaire générale. Par ailleurs, une incertitude inhérente à ce type de modélisation doit être pris en compte dans l'interprétation des résultats, dans la mesure où les faibles taux observés et simulés demeurent à l'intérieur de la précision du modèle, lequel a été calibré sur la base des données bathymétriques rendus disponibles, sans toutefois reposer sur un historique de mesures in-situ précises visant à documenter les taux d'érosion/sédimentation dans le havre. Enfin, il est également important de rappeler que la dynamique sédimentaire induite par les opérations de navigation et manœuvres à quai n'ont pu être prises en compte dans cet exercice de modélisation pour les raisons évoquées ici-haut, laquelle pourrait représenter une composante aussi importante que la dynamique sédimentaire induite par les courants de marée (processus naturel). Ainsi, les patrons d'érosion/sédimentation en conditions projetées avec l'ajout du nouveau poste à quai pourraient être quelque peu différents par rapport aux résultats produits dans le cadre de la présente étude en raison des multiples opérations de navigation et manœuvres à quai dans le havre, justifiant la nécessité de procéder à des relevés bathymétriques multifaisceaux sur une base régulière post-travaux dans l'ensemble du havre afin de documenter et confirmer les résultats produits.

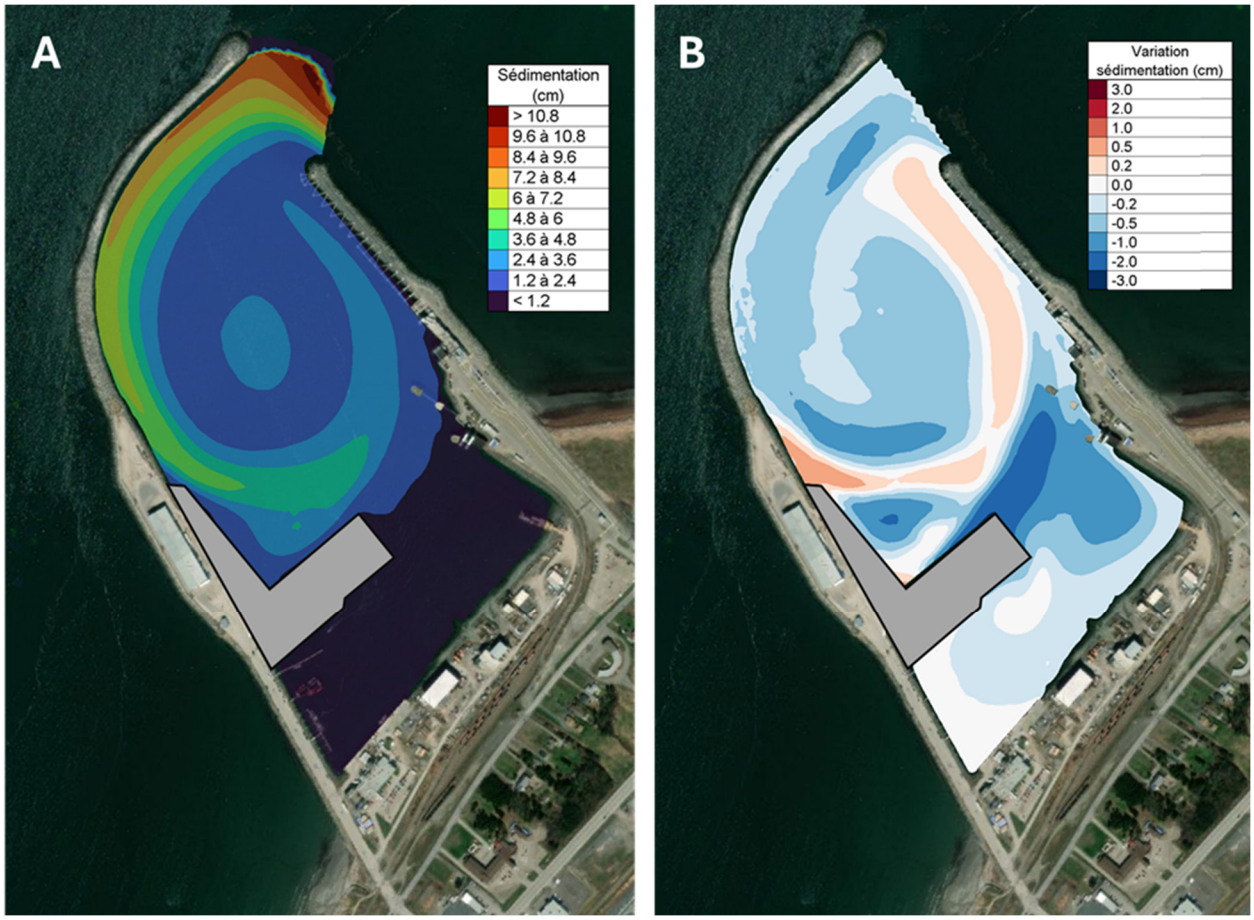


Figure 6-6 **A) Évolution du fond marin (taux annuels moyens d'érosion - / sédimentation +) sur une année complète en conditions projetées (géométrie B17) modélisée par le modèle GAIA avec comme forçage un signal de marée et une concentration ambiante de sédiments en suspension. B) Variation de la sédimentation modélisée sur une année complète en conditions projetées (géométrie B17) par rapport aux conditions existantes**

7 SOMMAIRE DES RÉSULTATS D'ANALYSE ET DES IMPACTS DU RÉAMÉNAGEMENT DES INSTALLATIONS PORTUAIRES DANS LE HAVRE DE MATANE

Le présent rapport d'étude visait à caractériser le climat maritime au large de Matane et à l'approche du havre portuaire, de réaliser la conception préliminaire pour la réfection du brise-lame ouest, d'évaluer les conditions hydrodynamiques et les conditions d'agitation à l'intérieur du havre, ainsi que la dynamique hydrosédimentaire dans un contexte d'évaluation des impacts post-travaux par l'ajout et la modification des installations portuaires (construction d'un deuxième poste à quai). Ces activités visaient à la fois à caractériser les conditions existantes, ainsi que les conditions projetées (post-travaux) et ce, autant dans le but de supporter la conception des travaux en génie maritime, notamment les travaux de dragage, de construction d'un nouveau poste à quai, ainsi que la réfection/reconstruction du brise-lame ouest, que pour supporter la réalisation de l'étude d'impact sur l'environnement et l'évaluation des impacts environnementaux pendant la durée des travaux, incluant la gestion des matières en suspension (MES) pour fin d'autorisation environnementale.

Dans l'ensemble, différents constats ont été émis sur la base des analyses et travaux de modélisation réalisés, lesquels se résument ainsi pour chacune des composantes analysées.

Régime hydrodynamique et dynamique des glaces à l'intérieur du havre

Les principaux constats qui découlent de cette analyse tels que présentés aux **Figure 2-16** et **Figure 2-17** sont :

- L'intensité des courants demeure très faible (voir quasi nulle) dans tout le havre de Matane en condition actuelle et projetée, à l'exception de l'entrée du havre où les courants de marée sont relativement plus élevés. Aucune modification de l'intensité et directions de ces courants est à prévoir en conditions futures avec la construction du nouveau poste à quai et ce, autant pour des conditions de marée montante que descendante.

- Plus localement, dans le secteur du nouveau poste à quai, l'ajout de cette nouvelle structure ne permet pas de constater un impact significatif sur les patrons de courants, ni l'apparition de gyres ou de contre-courants plus significatifs. Ailleurs dans le havre au niveau des autres infrastructures et postes à quai (quai des pêcheurs, quai ferroviaire, quai de la STQ), ce même constat est observé avec aucune modification notable des patrons de courants.

- Sur la base des deux constats précédents, il est anticipé que la dynamique des glaces demeure, en conditions projetées, très similaire à ce qui est observé depuis des années dans le havre en raison de cet impact non-significatif de la nouvelle structure de quai sur les patrons de courants, lesquels demeurent pratiquement nuls dans le havre de Matane. Il est vrai par contre que la présence de cette nouvelle structure de quai pourrait agir comme obstacle et limiter localement le mouvement et la sortie des glaces durant la période hivernale ou de dégel, mais pourrait également, à l'inverse, mieux protéger le secteur sud du havre en limitant une trajectoire qui favoriserait l'empilement de glace dans ce secteur. Il très difficile de se prononcer davantage sur cette question sachant que la dynamique des glaces dans le havre est principalement gouvernée

par les vents et les mouvements de navires (génération de courants locaux par les hélices) et donc difficilement prévisible. Un suivi de la dynamique des glaces par caméra en conditions post-construction serait à privilégier pour permettre de mieux anticiper l'impact de la nouvelle structure de quai sur la dynamique locale.

- Typiquement, les très faibles courants retrouvés dans un havre enclavé comme celui de Matane sont susceptibles de favoriser la sédimentation sur le fond marin si la charge de sédiments est suffisamment présente par l'échange des eaux de marées et selon la dynamique induite par les opérations de navigation et manœuvres à quai. L'historique de dragage du havre de Matane confirme par contre que la sédimentation demeure faible avec des dragages d'entretien qui semble être requis uniquement à tous les 10 ans sachant que le dernier remonte à 2015.

Réfection du brise-lame ouest

Segments 1 à 3

À la lumière des déficiences notées dans le cadre de l'inspection visuelle et de la vulnérabilité constatée à l'égard du franchissement, une réfection complète du revêtement est recommandée sur les segments 1 à 3 (**Figure 3-6)**. Pour réduire le franchissement à des niveaux acceptables, un rehaussement de la crête jusqu'à l'élévation +9,0 m ZC est requise. Les **Figure 3-16** et **Figure 3-17** illustrent les coupe-types proposées pour la réfection (coupes A et B), alors que le **Tableau 3.3** présente les débits et les volumes de franchissement résultant en conditions projetées. Le **Tableau 3.4** synthétise pour sa part les paramètres de conception considérés pour le dimensionnement des pierres et les calibres recommandés.

Les concepts proposés permettent le recouvrement du revêtement existant avec deux rangs de pierres de carapace sur les segments 1 et 2 (coupe A) et un rang de pierres de carapace sur le segment 3 (coupe B). Un nivèlement préalable avec des pierres filtres pourrait par ailleurs être requis. Une pente transversale de 2 H : 1 V est recommandée pour favoriser une meilleure stabilité des pierres et s'ajuster à la pente de l'ouvrage existant. La mise en place d'une butée au pied de l'enrochement est également recommandée pour protéger l'ouvrage contre l'affouillement. Cette butée serait aménagée avec des pierres de carapace. La récupération et la réutilisation des blocs en « Y » est quant à elle recommandée sur la crête de la coupe B, afin de maintenir la protection qu'offre ce parement de béton contre le franchissement par les vagues.

Segment 4

La réfection de l'enrochement est également recommandée au nord du quai existant (segment 4, **Figure 3-6**), soit le segment situé du côté intérieur du havre. Un rehaussement de la crête à l'élévation +7,0 m ZC est proposé à cet endroit pour atténuer le franchissement par les vagues. La **Figure 3-22** illustre la coupe-type proposée pour la réfection (coupe E), alors que le **Tableau 3.5** présente les débits et les volumes de franchissement résultant en conditions projetées. Le **Tableau 3.6** synthétise pour sa part les paramètres de conception considérés pour le dimensionnement des pierres et les calibres recommandés.

À cet effet, il convient de souligner que l'étude d'agitation dans le bassin portuaire indique que la hauteur de vague maximale pouvant atteindre ce segment d'enrochement est d'environ 1,5 m. Or, le dimensionnement effectué avec cette condition mène à un calibre de pierres plus petit que celui du

revêtement existant. Dans ce contexte, il est probable que la glace soit l'élément prépondérant à considérer pour le dimensionnement des pierres. Un calibre équivalent à celui déjà en place est donc retenu pour la carapace proposée. À cet effet, l'inspection visuelle démontre que le revêtement existant conserve une stabilité acceptable.

Segments 5 à 7

Au niveau du brise-lame, une intervention n'est pas jugée prioritaire ni urgente pour le moment. En effet, malgré les déficiences observées et la vulnérabilité au franchissement, particulièrement sur le tronçon central de l'ouvrage (segment 6), la structure conserve une géométrie régulière et ne présente pas de signes distinctifs ou précurseurs de glissement, d'affaissement ou de décrochement. Le parement extérieur en tétrapodes demeure également en relativement bon état, avec des unités bien enchevêtrées les unes avec les autres et peu d'entre-elles sont fissurées ou fracturées, tout comme la crête. Les segments ayant fait l'objet de travaux de réfection en 2008 (segments 5 et 7) sont quant à eux en excellente condition et n'ont visiblement pas subi de dégradations distinctives au cours des 15 dernières années.

Conditions d'agitation à l'intérieur du havre

Les résultats de l'étude d'agitation confirment qu'en conditions existantes, les conditions d'agitation rencontrent les critères d'agitation qui ont été fixés. Cependant, en conditions projetées, selon l'ensemble des géométries étudiées, les résultats de l'étude d'agitation prédisent une augmentation de l'agitation des vagues par rapport aux conditions existantes et ce, principalement localement au niveau des quais 1 et 2, ainsi que dans la zone centrale du havre. Dans certains cas, le niveau d'agitation est même supérieur par rapport aux critères d'agitation retenus (**Tableau 4-3**).

Sur la base de ces résultats, il pourrait donc être anticipé a priori que le réaménagement du quai commercial puisse engendrer une augmentation des temps d'arrêt au niveau des opérations portuaires dans ce secteur. Toutefois, parallèlement à l'effet des vagues et des conditions d'agitation, d'autres facteurs impactent également l'évaluation des temps d'arrêt et les opérations de transbordement. À cet effet, la présentation des résultats de l'étude d'agitation à des pilotes d'expérience ayant une fine connaissance des enjeux de navigation à l'intérieur du havre de Matane a permis de mieux comprendre, dans leur ensemble, les conséquences possibles de l'augmentation de l'agitation au quai commercial. Malgré l'augmentation de l'agitation au-delà des critères pour certaines options étudiées, les pilotes ont confirmé qu'ils demeurent confortables avec les résultats et que l'ajout d'un deuxième quai dans l'axe est-ouest leur apportera plus de flexibilité pour manœuvrer par mauvais temps (vents et/ou vagues). De plus, considérant que les temps d'arrêts des opérations sont déjà fréquents à Matane pour diverses raisons autre que les conditions d'agitation par les vagues, ils anticipent que le deuxième quai permettra globalement d'augmenter en efficacité, d'autant plus s'il y a redondance des équipements de transbordement à chacun des quais. Également, le nombre d'heures anticipé avec des hauteurs de vagues supérieures à 1 m (**Tableau 4-3**) à chacun des quais demeure faible et jugé raisonnable par les pilotes pour les différentes options étudiées.

Par ailleurs, selon les différentes configurations étudiées, le réaménagement du quai commercial contribue à abriter davantage le quai des pêcheurs des vagues, mais tend, en contrepartie, à augmenter quelque peu le niveau d'agitation le long du chenal de navigation utilisé par les pêcheurs pour entrer ou

sortir du havre de Matane (axe de navigation entre l'entrée et leurs quais). À l'entrée du havre, là où les conditions de vagues sont déjà les plus sévères (en conditions existantes ou projetées) et gouvernent par rapport aux conditions observées ailleurs à l'intérieur du havre, l'impact du réaménagement du quai sur l'agitation est non-significative (**Tableau 4-4**). Toutefois, sur la base de ces résultats, il serait tout de même souhaitable de partager ces observations avec les pêcheurs afin d'obtenir leur avis à ce sujet.

Enfin, les résultats de l'étude d'agitation ont également démontré que l'ajout d'un deuxième poste à quai a un impact négligeable et ce, localement à l'intérieur des zones d'amarrage (polygones) appartenant aux autres utilisateurs présents dans le havre de Matane (**Tableau 4-4**). En revanche et tel que discuté, l'agitation des vagues pourrait toutefois être augmentée lors de la navigation entre l'entrée du havre et les postes d'accostage. Toutefois, sachant que ce sont généralement les vents, les glaces ou les conditions de vagues à l'entrée ou à l'extérieur du havre qui s'avèrent être les facteurs limitant pour la navigation, cela ne constitue pas un enjeu pour le maintien des activités par les autres utilisateurs à l'intérieur du havre de Matane, à l'exception des pêcheurs qui devront être consultés pour s'en assurer.

Évaluation de la qualité de l'eau durant les opérations de dragage (havre et site d'immersion)

Afin de synthétiser les résultats obtenus pour l'ensemble des scénarios de dragage, quatre (4) cartes résultantes ont été produites de manière à regrouper l'information selon le site de dragage (secteur du quai ou de l'entrée du havre) et la méthode de dragage (mécanique ou hydraulique). L'analyse des résultats (**Figure 5-7 à Figure 5-10)** présentés sur les différentes cartes résultantes permet d'établir les constats suivants :

- Les concentrations de sédiments en suspension sont plus élevées et plus étendues pour le dragage mécanique comparativement au dragage hydraulique malgré un taux de production inférieur (2000 m³/jour pour le dragage mécanique vs 4000 m³/jour pour le dragage hydraulique). Cela s'explique par le taux de remise en suspension des sédiments plus élevé pour le dragage mécanique en plus d'être distribué sur l'ensemble de la colonne d'eau (remontée du godet).
- Le dragage dans le secteur du quai génère plus de sédiments en suspension par rapport au dragage dans le secteur de l'entrée du havre. La présence de sédiments plus grossiers près de l'entrée du havre favorise la sédimentation plus rapide des sédiments remis en suspension par le dragage.
- Seul le dragage hydraulique à l'entrée du havre rencontre l'ensemble des critères de qualité de l'eau. Pour les autres cas, les critères sont légèrement dépassés.
- Les concentrations de sédiments en suspension supérieures à 5 mg/l demeurent complètement à l'intérieur des limites du havre pour le dragage hydraulique et s'étendent légèrement à l'extérieur de l'entrée du havre pour le dragage mécanique.
- La comparaison des résultats de dilution et de dispersion du panache de MES en conditions de mortes et de vives-eaux à l'intérieur du havre ne présente pas de différences notables en raison des profondeurs d'eau et des vitesses de courant qui demeurent très similaires selon ces deux conditions hydrauliques.
- L'influence d'un vent typique de l'ouest (21 km/h) sur la variation des conditions de dilution et de dispersion du panache de MES à l'intérieur du havre influence légèrement la direction de dispersion sans par contre venir modifier les principaux constats mentionnés ici-haut quant aux concentrations maximales rencontrées et critères de qualité d'eau.

- L'enveloppe du panache de sédiments en suspension ne rejoint pas l'embouchure de la rivière Matane pour aucun des scénarios de dragage simulés.

Quant au site d'immersion, deux (2) cartes résultantes (**Figure 5-11 et Figure 5-12**) ont été produites pour synthétiser les résultats obtenus pour les scénarios de relargage des sédiments en les regroupant en fonction de la méthode de dragage (mécanique ou hydraulique). Les cartes résultantes des concentrations moyennées sur la colonne d'eau mettent en lumière les constats suivants concernant le relargage des sédiments dragués au site d'immersion :

- Le relargage de sédiments dragués mécaniquement minimise les concentrations de sédiments en suspension par rapport au relargage des sédiments dragués hydrauliquement. Cela s'explique en grande partie parce que les volumes journaliers relargués sont plus faibles et répartis sur un plus grand nombre de relargages avec le dragage mécanique. De plus, avec le dragage mécanique, une portion des sédiments cohésifs demeure agglomérée en mottes, favorisant la sédimentation directement sur le fond marin.
- Le relargage des sédiments dragués mécaniquement ne génère pas des concentrations de sédiments en suspension supérieures à 25 mg/l (moyennées sur la colonne d'eau), faisant en sorte que le critère de qualité de l'eau à 100 m est rencontré. Toutefois, des concentrations de sédiments en suspension supérieures à 5 mg/l (moyennées sur la colonne d'eau) s'étendent jusqu'à 500 m du site d'immersion (directions nord-est et sud-ouest). Le critère de qualité de l'eau à 300 m est donc légèrement dépassé en conditions défavorables.
- Le relargage des sédiments dragués hydrauliquement engendre des concentrations de sédiments en suspension supérieures à 25 mg/l (moyennées sur la colonne d'eau) à l'extérieur du rayon de 100 m du site d'immersion. De plus, des concentrations de sédiments en suspension supérieures à 5 mg/l (moyennées sur la colonne d'eau) s'étendent jusqu'à 4 km du site d'immersion (direction nord-est). Les critères de qualité de l'eau à 100 et à 300 m ne sont donc pas respectés en conditions défavorables.
- La comparaison des résultats de dilution et de dispersion du panache de MES en conditions de mortes et de vives-eaux au site d'immersion révèle que la dispersion du panache est plus significative en conditions de vives-eaux, ce qui par conséquent augmente également la dilution des concentrations de MES. Ce même constat est également observé avec un vent typique de l'ouest (21 km/h), lequel accentue également la dispersion et donc l'empreinte du panache de MES. Par contre, pour ces deux cas où l'étendue du panache est augmentée, l'empreinte résultante et la dilution obtenue demeure à l'intérieur et inférieure aux valeurs maximales présentées sur les **figures 5-11 et 5-12** qui présentent les conditions limites défavorables.
- L'enveloppe du panache de sédiments en suspension ne rejoint pas l'embouchure de la rivière Matane pour aucun des scénarios de relargage.

Caractérisation de la dynamique sédimentaire et de l'effort en dragage d'entretien à l'intérieur du havre

Par rapport aux conditions existantes, les résultats obtenus pour le nouveau poste à quai B17 ne suggèrent pas des changements notables en termes de patrons d'érosion et de sédimentation à l'intérieur du havre de Matane en considérant l'effet des courants de marées sur le transport sédimentaire (exclus l'impact de la navigation sur la dynamique sédimentaire). La mise en place du nouveau poste à quai ajoute un nouvel obstacle aux courants de marée, lesquels demeurent très faibles dans tous les cas (**Figure 2-16** et

Figure 2-17), ce qui suggère un léger déplacement du patron de sédimentation vers le nord. Ainsi, la sédimentation est légèrement augmentée à cet endroit par rapport aux conditions existantes, mais demeure dans tous les cas non-significative avec une variation très faible par rapport aux conditions existantes (**Figure 6-6-B,** zones en tons de rose pâle, soit 0,2 à 0,5 cm/année)

En contrepartie, la sédimentation est légèrement réduite ailleurs à l'intérieur du havre (zones en tons de bleu sur la **Figure 6-6-B**), notamment dans le secteur à l'extrémité du nouveau quai (section perpendiculaire au quai existant). Dans la portion sud du havre au niveau du quai des pêcheurs et zones adjacentes, aucune augmentation de la sédimentation n'est observée, de même que le long du nouveau tracé délimitant le chenal d'accès permettant d'accéder au quai des pêcheurs. Ce même constat est observé au niveau des terminaux des traversiers, quoiqu'une légère augmentation est observée le long du brise-lame est, mais demeure non-significative.

Sur la base des résultats produits, il est important de souligner que dans l'ensemble, les taux de sédimentation demeurent faibles dans le havre de Matane et ce, que ce soit en conditions existantes (l'historique de dragage en témoigne), ou en conditions projetées avec l'ajout du nouveau poste à quai qui résulte en un très faible impact sur la dynamique sédimentaire. Par ailleurs, une incertitude inhérente à ce type de modélisation doit être pris en compte dans l'interprétation des résultats, dans la mesure où les faibles taux observés et simulés demeurent à l'intérieur de la précision du modèle, lequel a été calibré sur la base des données bathymétriques rendus disponibles, sans toutefois reposer sur un historique de mesures in-situ précises visant à documenter les taux d'érosion/sédimentation dans le havre. Enfin, il est également important de rappeler que la dynamique sédimentaire induite par les opérations de navigation et manœuvres à quai n'ont pu être prises en compte dans cet exercice de modélisation pour les raisons évoquées ici-haut, laquelle pourrait représenter une composante aussi importante que la dynamique sédimentaire induite par les courants de marée (processus naturel). Ainsi, les patrons d'érosion/sédimentation en conditions projetées avec l'ajout du nouveau poste à quai pourraient être quelque peu différents par rapport aux résultats produits dans le cadre de la présente étude en raison des multiples opérations de navigation et manœuvres à quai dans le havre, justifiant la nécessité de procéder à des relevés bathymétriques multifaisceaux sur une base régulière post-travaux dans l'ensemble du havre afin de documenter et confirmer les résultats produits.

8 RÉFÉRENCES

- BAIRD (2004) Breakwater Damage Assessment, Matane New Harbour, PQ. Final Report. W.F. Baird & Associates Coastal Engineers Ltd. Prepared for Travaux publics et services gouvernementaux Canada, Région du Québec, 38 pages.
- BAIRD (2006) West breakwater repairs Port of Matane, PQ. Interim report N°2. – Draft. Design Development, W.F. Baird & Associates Coastal Engineers Ltd. Prepared for Travaux publics et services gouvernementaux Canada, Région du Québec, 47 pages + annexes.
- BAIRD, Consultants Ropars inc. & CIMA+ (2009). Réparations au brise-lames ouest, Plans tel que construit, Dessins RM-06019-M, 17 feuilles.
- BURT, N., LAND, J., OTTEN, H. (2007) Measurement of Sediment Release from a Grab Dredge in the River Tees, UK, for the Calibration of Turbidity Prediction Software.
- CIRIA. 2007. The Rock Manual: The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). C683, London.
- CHC (2006) PSed4.3 - A Lagrangian Sediment Transport Model - Technical Documentation. Canadian Hydraulic Center, National Research Council of Canada, 77 pages.
- EGBERT, G.D., BENNETT, A.F. & FOREMAN, M.G.G. (1994) TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. Journal of Geophysical Research: Oceans, 99 (C12), 2156-2202.
- EGBERT, G.D. & EROFEEVA, S.Y. (2002) Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 19, 183-204.
- ENGLOBE. 2021. Aménagement du port de Matane (Québec). Rapport final d'étude géotechnique. N/Réf. : 07-0023399.000-0100-GS-R-0001-01, Mars 2021, 30 pages + annexes.
- ENVIRONNEMENT CANADA (1994) Répercussions environnementales du dragage et de la mise en dépôt des sédiments. Section du développement technologique. Direction de la protection de l'environnement. Régions du Québec et de l'Ontario, préparé par les consultants Jacques Bérubé inc., septembre 1994.
- EUROTOP (2018) Manual on wave overtopping of sea defences and related structures: An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application, Second Edition, 258 pages.
- FISSEL, D.B., LIN, Y. (2018) Modeling the Transport and Fate of Sediments Released from Marine Construction Projects in the Coastal Waters of British Columbia, Canada. *J. Mar. Sci. Eng.*, *6*, 103.
- JOHNSON, B.H., McComas, D.N., McVan, D.C. & TRAWLE M.J. (1993) Development and verification of numerical models for predicting the initial fate of dredged material disposed in open water. Report 1, Physical model tests of dredged material disposal from a split-hull barge and a multiple bin vessel. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- JOHNSON, B.H. & FONG, M.T. (1995) Development and verification of numerical models for predicting the initial fate of dredged material disposed in open water. Report 2, Theoretical developments and verification results. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- KAMPHUIS, J.W. 2010. Introduction to Coastal Engineering and Management. 2nd Edition. Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 30. World Scientific Publishing Co. 525 pages.
- LELEIÈVRE 2020 LELIEVRE, G. 2020. Description de la dynamique des glaces à l'embouchure du port de Matane. Communication par courriel avec M. Guillaume Lelièvre. 7 décembre 2020.

- MDDELCC et ECCC (2016) Recommandations pour la gestion des matières en suspension (MES) lors des activités de dragage. Québec. 64 p. et annexes
- MPO (2021) Table des marées et des courants du Canada - Volume 3 - Fleuve Saint-Laurent et Fjord du Saguenay. Pêches et océans Canada (MPO), Service hydrographique du Canada, 63 pages.
- MORITZ, H.R. (1994) Users guide for the multiple dump fate model, Report prepared for U.S. Army Corps of Engineers, Contract DACW39-94-M-1304, 43 pages.
- O'BOURKE, N.C., HARTMAN, G. & FUGLEVAND, P. 2008. In Situ Specific Gravity vs. Grain Size: A Better Method to Estimate New Work Dredging Production, Proceedings of 28th Western Dredging Association Technical Conference 2008 and 39th Texas A&M Dredging Seminar, pp. 215-223.
- OPEN TELEMAC-MASCARET (2022) TELEMAC-2D – User Manual – Version v8p4, 131 pages.
- RAYMOND, L (1986) Fate of dredged material during open-water disposal, Environmental Effects of dredging technical notes. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Technical Report EEDP-01-2.
- SCHROEDER, P. R. (2009) USACE Technical Guidelines for Predicting the 3rs of Environmental Dredging.
- USACE (2011) Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100 du U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. 6 volumes. Mise à jour n° 3, 28 septembre 2011.
- VAN RIJN, L.C. (2023) *Turbidity due to dredging and dumping sediments*. https://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Turbiditydredging2020.pdf
- VAN RIJN, L.C. & BARTH, R. (2019) Settling and Consolidation of Soft Mud–Sand Layers. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 145(1), 04018028(1-14).
- ZHAI, L., GREENAN, B.J.W & PERRIE, W. (2023) The Canadian Extreme Water Level Adaptation Tool (CAN-EWLAT). Bedford Institute of Oceanography, Fisheries and Oceans Canada, Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences 348, 15 pages.

ANNEXE A

Répertoire photographique Inspection du 03-10-2023

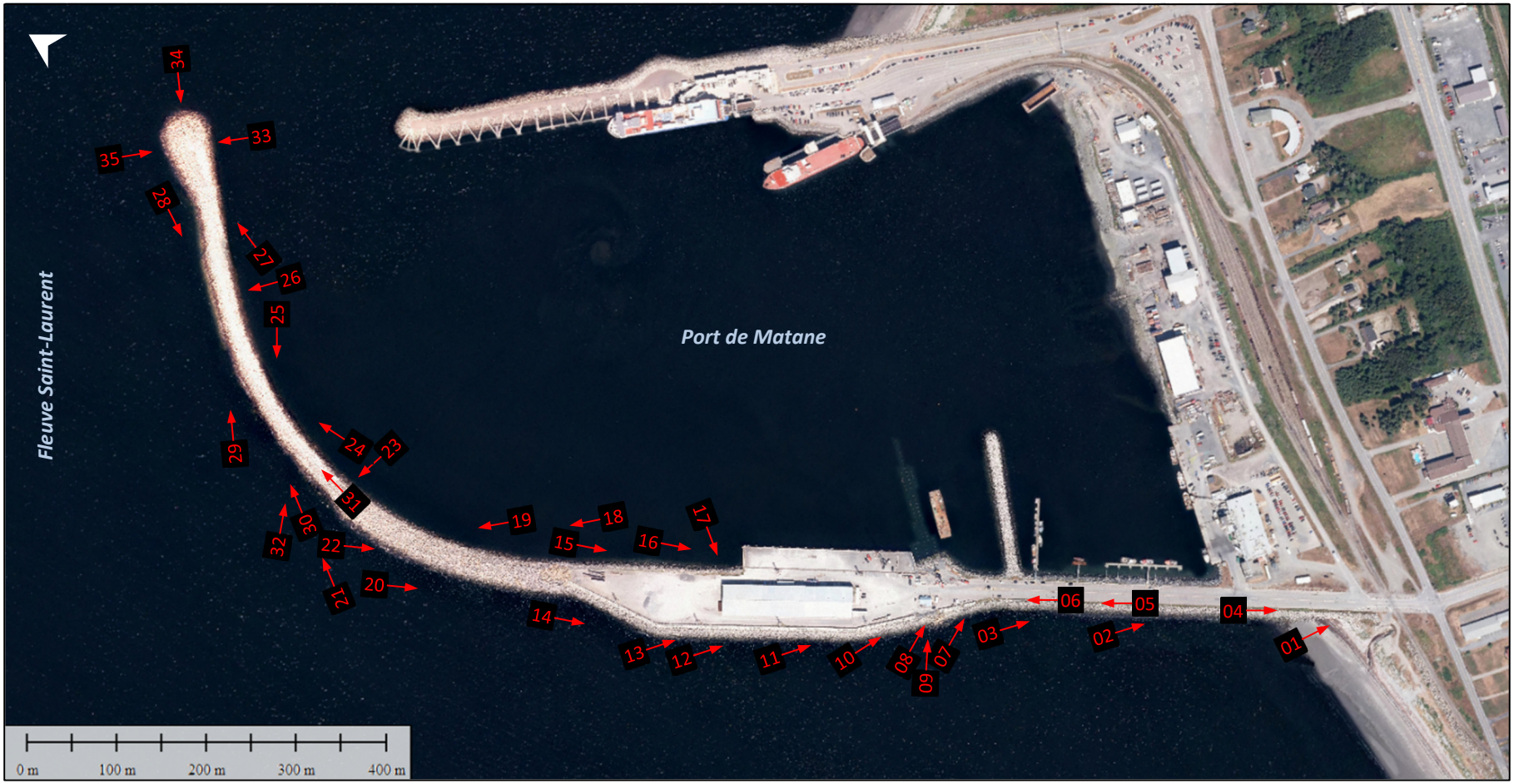
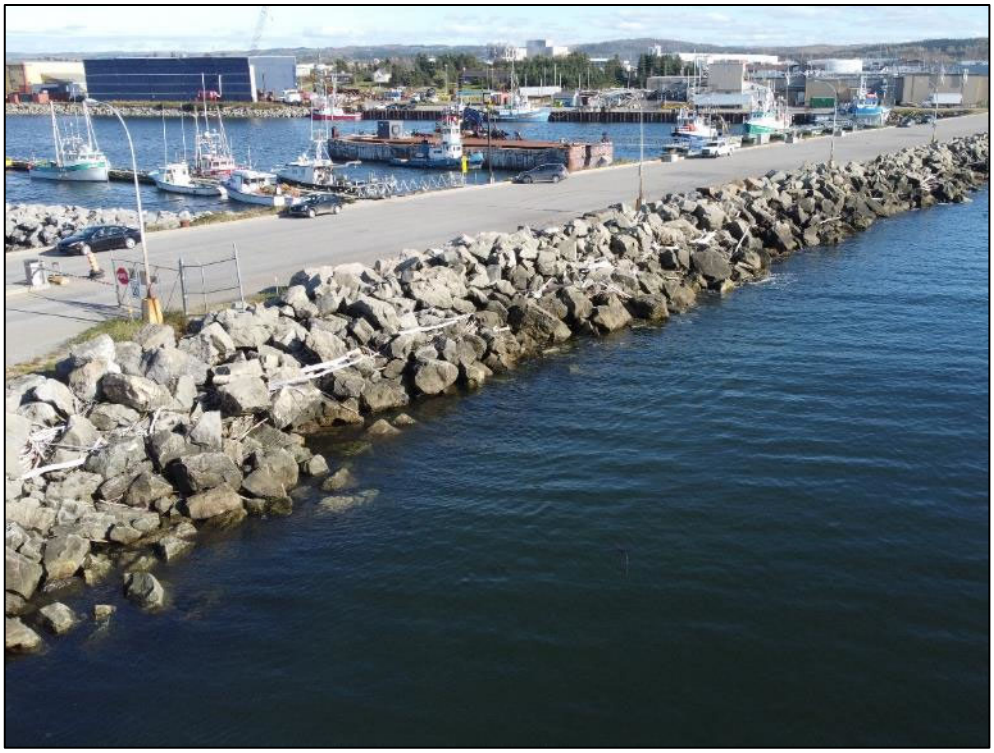


Figure A1.1 Localisation des photographies

N° : 01 Enrochement ouest (0315) **Date :** 2023-10-03 15h13 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 2,7 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection le long du chemin d'accès **Localisation :** Vue aérienne vers le sud	

N° : 02 Enrochement ouest (0312) **Date :** 2023-10-03 15h12 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 2,7 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection le long du chemin d'accès **Localisation :** Vue aérienne vers le sud	

N° : 03 Enrochement ouest (0310) **Date :** 2023-10-03 15h12 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 2,7 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection le long du chemin d'accès **Localisation :** Vue aérienne vers le sud	

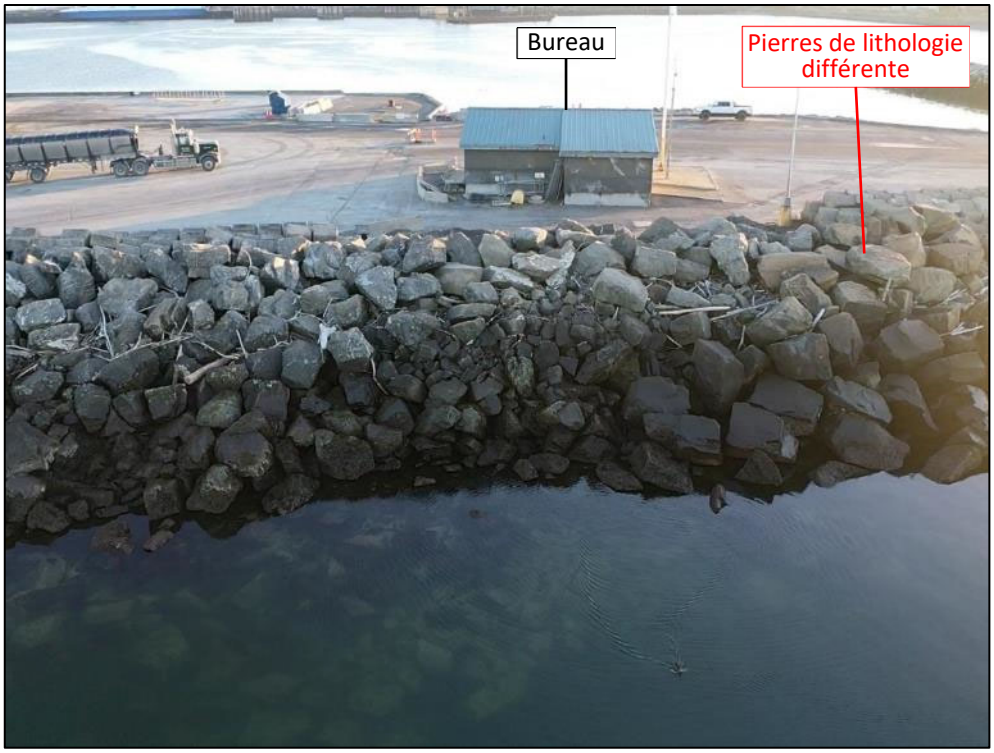
N° : 04 Enrochement ouest (2654) **Date :** 2023-10-03 10h48 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection le long du chemin d'accès **Localisation :** Crête de l'enrochement, vue vers le sud	

N° : 05 Enrochement ouest (2655) **Date :** 2023-10-03 10h52 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection le long du chemin d'accès **Localisation :** Crête de l'enrochement, vue vers le nord	

N° : 06 Enrochement ouest (2661) **Date :** 2023-10-03 11h00 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** Rangée de grosses pierres ajoutées sur l'accotement du chemin d'accès **Localisation :** Crête de l'enrochement, vue vers le nord	

N° : 07 Enrochement ouest (0298) **Date :** 2023-10-03 15h08 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 2,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection à la guérite d'entrée aux installations portuaires **Localisation :** Vue aérienne vers l'est	

N° : 08 Enrochement ouest (0296) **Date :** 2023-10-03 15h07 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 2,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection devant le bureau du maître de port **Localisation :** Vue aérienne vers l'est	

N° : 09 Enrochement ouest (0101)	
Date : 2022	
Niveau d'eau : n/d	
Description : État de l'enrochement de protection devant le bureau du maître de port **Localisation :** Vue aérienne vers l'est	

N° : 10 Enrochement ouest (0292)	
Date : 2023-10-03 15h06 HAE	
Niveau d'eau (ZC) * : 2,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane)	
Description : État de l'enrochement de protection le long des installations portuaires **Localisation :** Vue aérienne vers le sud	

N° : 11 Enrochement ouest (0291) **Date :** 2023-10-03 15h05 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 2,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection le long des installations portuaires **Localisation :** Vue aérienne vers le sud	

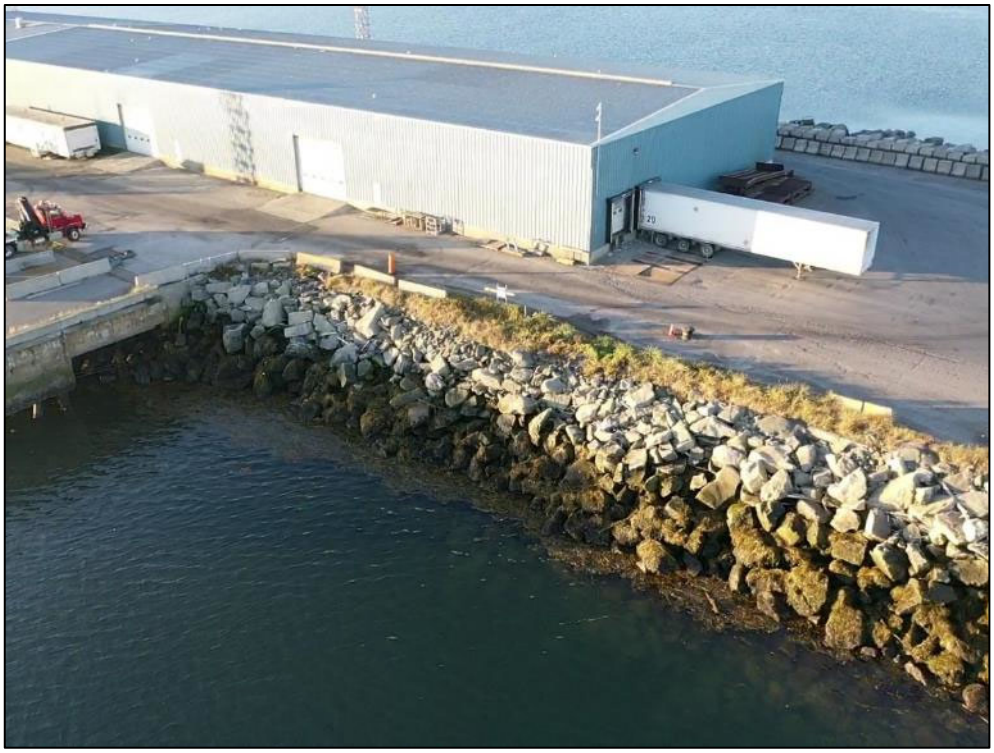
N° : 12 Enrochement ouest (0289) **Date :** 2023-10-03 15h05 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 2,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection le long des installations portuaires **Localisation :** Vue aérienne vers le sud	

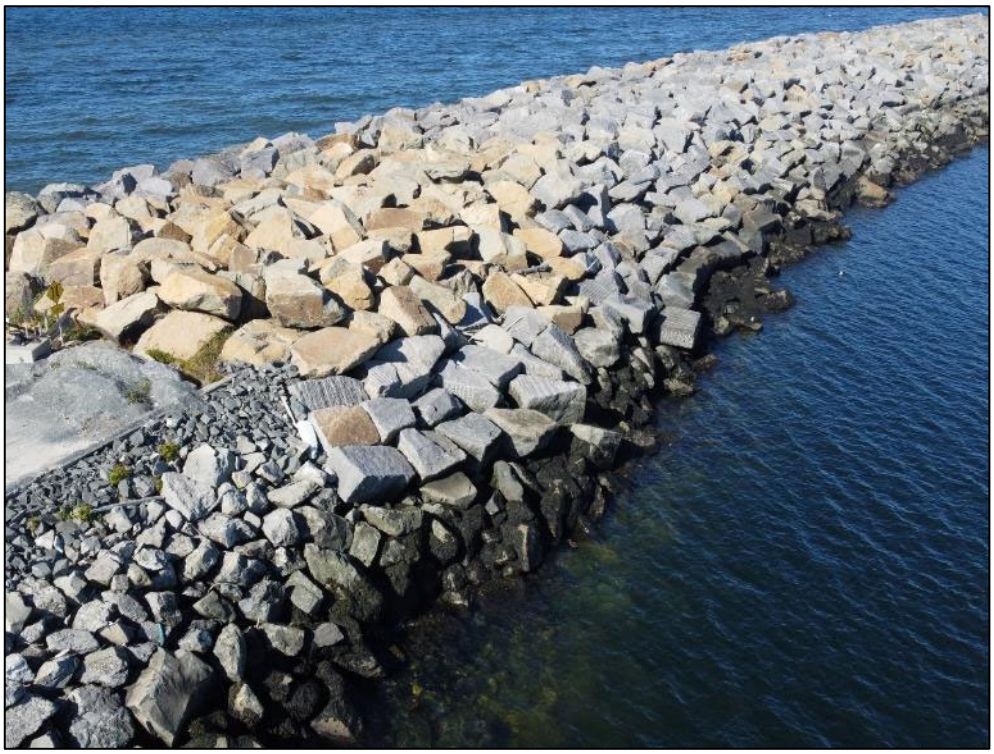
N° : 13 Enrochement ouest (0285) **Date :** 2023-10-03 15h04 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 2,5 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection le long des installations portuaires **Localisation :** Vue aérienne vers le sud	

N° : 14 Enrochement ouest (0273) **Date :** 2023-10-03 15h00 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 2,5 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection le long des installations portuaires **Localisation :** Vue aérienne vers le sud	

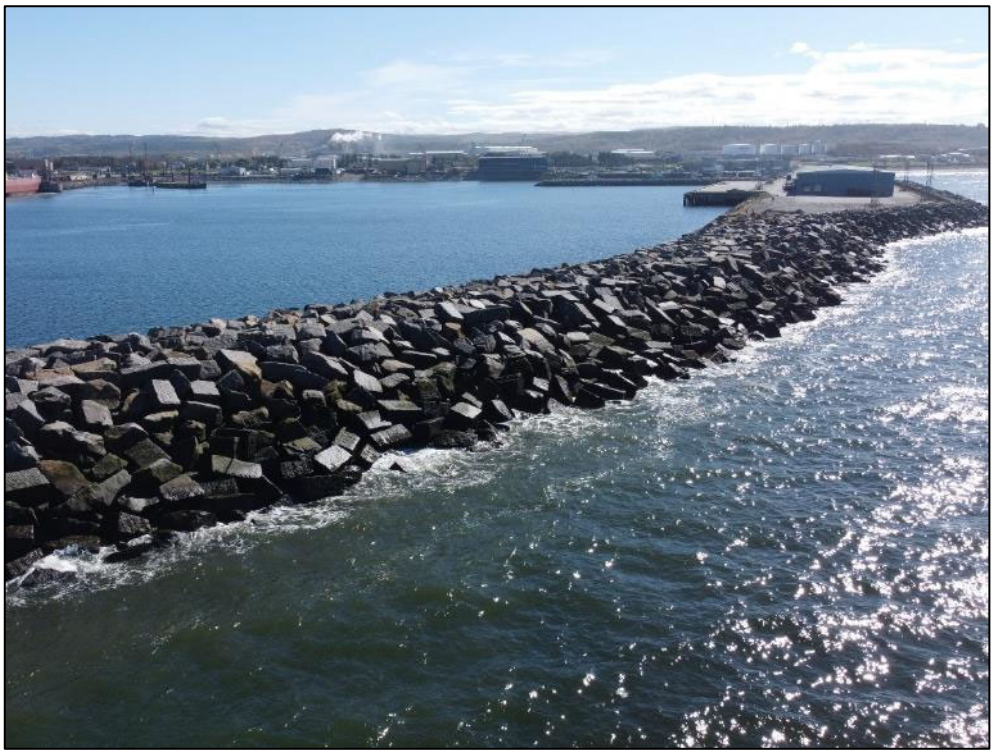
N° : 15 Enrochement quai (0275) **Date :** 2023-10-03 15h01 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 2,5 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection le long des installations portuaires, au nord du quai existant **Localisation :** Vue aérienne vers l'ouest	

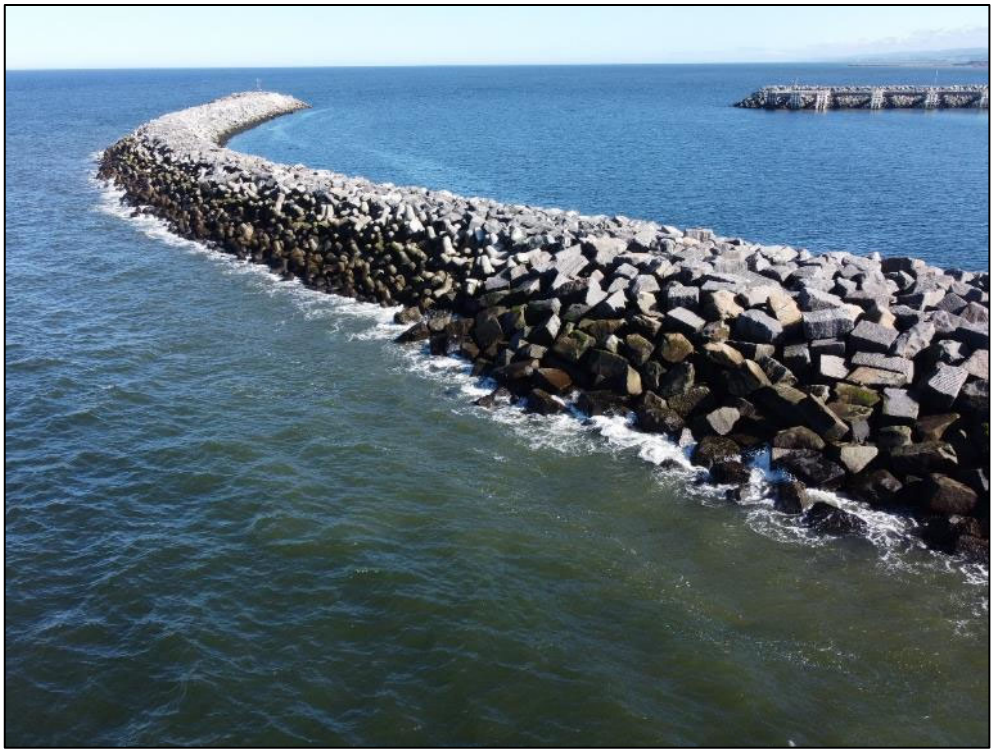
N° : 16 Enrochement quai (0278) **Date :** 2023-10-03 15h02 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 2,5 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection le long des installations portuaires **Localisation :** Vue aérienne vers le sud	

N° : 17 Enrochement quai (0053) **Date :** 2022 **Niveau d'eau :** n/d **Description :** Crête déficiente et végétation apparente le long de l'enrochement situé au nord du quai **Localisation :** Vue aérienne vers l'ouest	

N° : 18 Brise-lame ouest (0215) **Date :** 2023-10-03 11h25 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection sur le côté intérieur du brise-lame (zone de réparation 2008) **Localisation :** Vue aérienne vers le nord	

N° : 19 Brise-lame ouest (0217) **Date :** 2023-10-03 11h26 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection sur le côté intérieur du brise-lame (zone de réparation 2008) **Localisation :** Vue aérienne vers le nord	

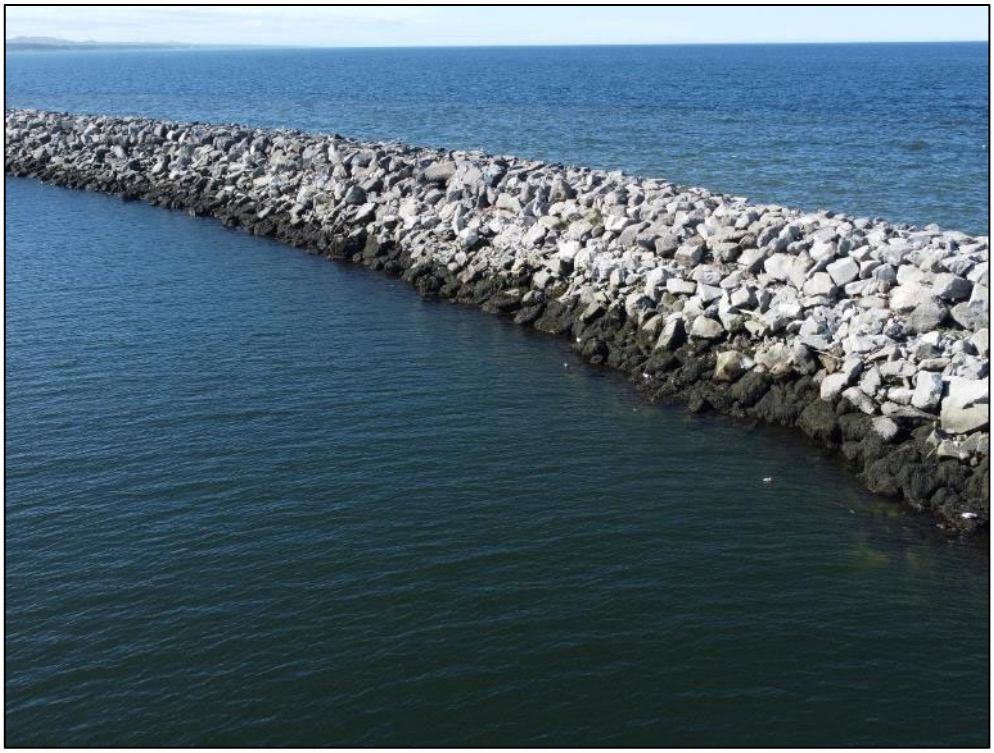
N° : 20 Brise-lame ouest (0262) **Date :** 2023-10-03 11h38 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection sur le côté extérieur du brise-lame (zone réparée) **Localisation :** Vue aérienne vers le sud	

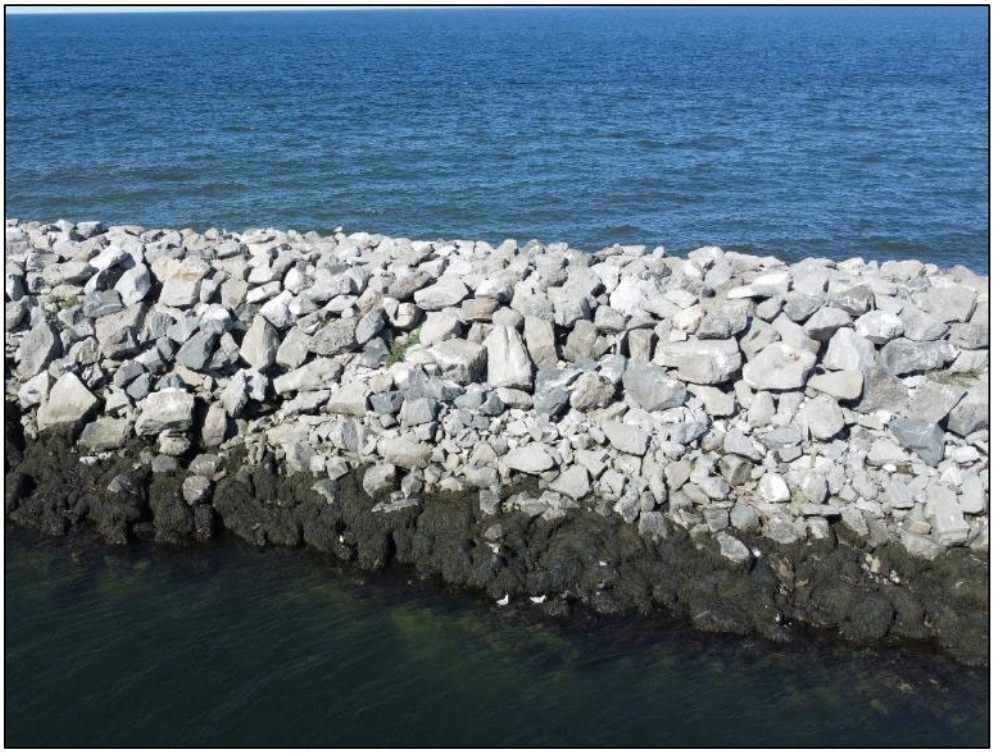
N° : 21 Brise-lame ouest (0258) **Date :** 2023-10-03 11h37 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement à la jonction entre les zones en tétrapodes et en pierres (côté extérieur) **Localisation :** Vue aérienne vers l'est	

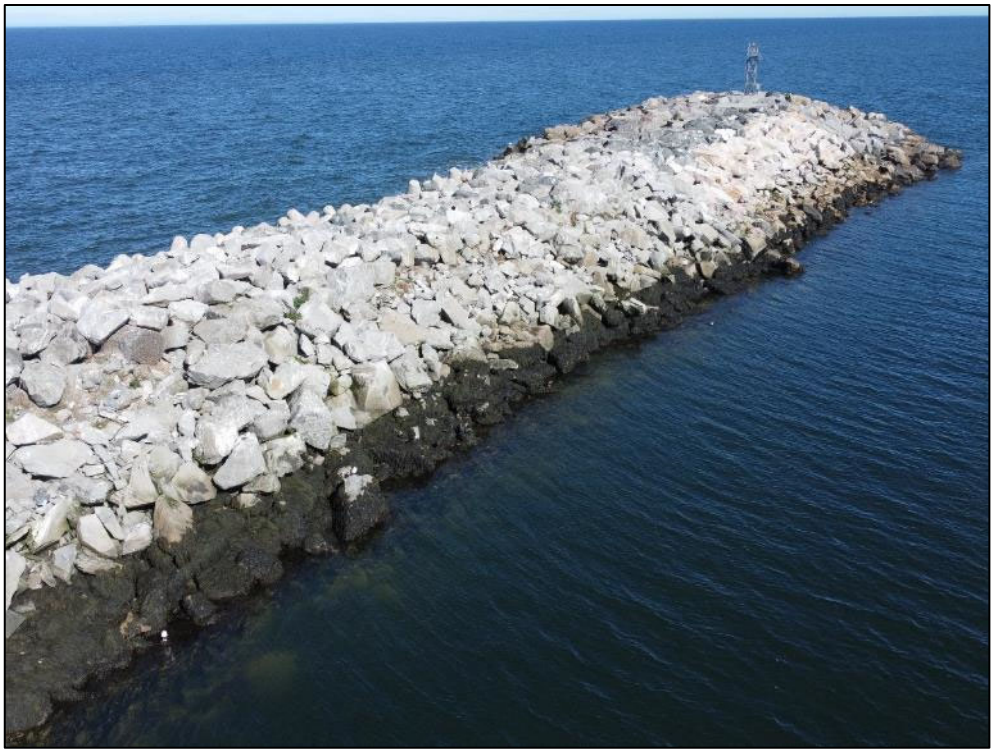
N° : 22 Brise-lame ouest (0261) **Date :** 2023-10-03 11h38 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** Élévation de la crête du brise-lame (zone en enrochement) **Localisation :** Vue aérienne vers le sud	

N° : 23 Brise-lame ouest (0220) **Date :** 2023-10-03 11h27 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** Noyau et pierres de petites tailles apparentes à la jonction entre les zones réparées et non réparées en 2008 **Localisation :** Vue aérienne vers le nord	

N° : 24 Brise-lame ouest (0221) **Date :** 2023-10-03 11h27 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection sur le côté intérieur du brise-lame (zone non réparée) **Localisation :** Vue aérienne vers le nord	

N° : 25 Brise-lame ouest (0228) **Date :** 2023-10-03 11h29 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection sur le côté intérieur du brise-lame (zone non réparée) **Localisation :** Vue aérienne vers l'ouest	

N° : 26 Brise-lame ouest (0229) **Date :** 2023-10-03 11h29 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** Noyau et pierres de petites tailles apparentes sur la paroi intérieure du brise-lame **Localisation :** Vue aérienne vers le nord	

N° : 27 Brise-lame ouest (0231) **Date :** 2023-10-03 11h29 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection sur le côté intérieur du brise-lame (zone non réparée) **Localisation :** Vue aérienne vers l'est	

N° : 28 Brise-lame ouest (0246) **Date :** 2023-10-03 11h34 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État du revêtement en tétrapodes sur le côté extérieur du brise-lame (zone non réparée) **Localisation :** Vue aérienne vers l'ouest	

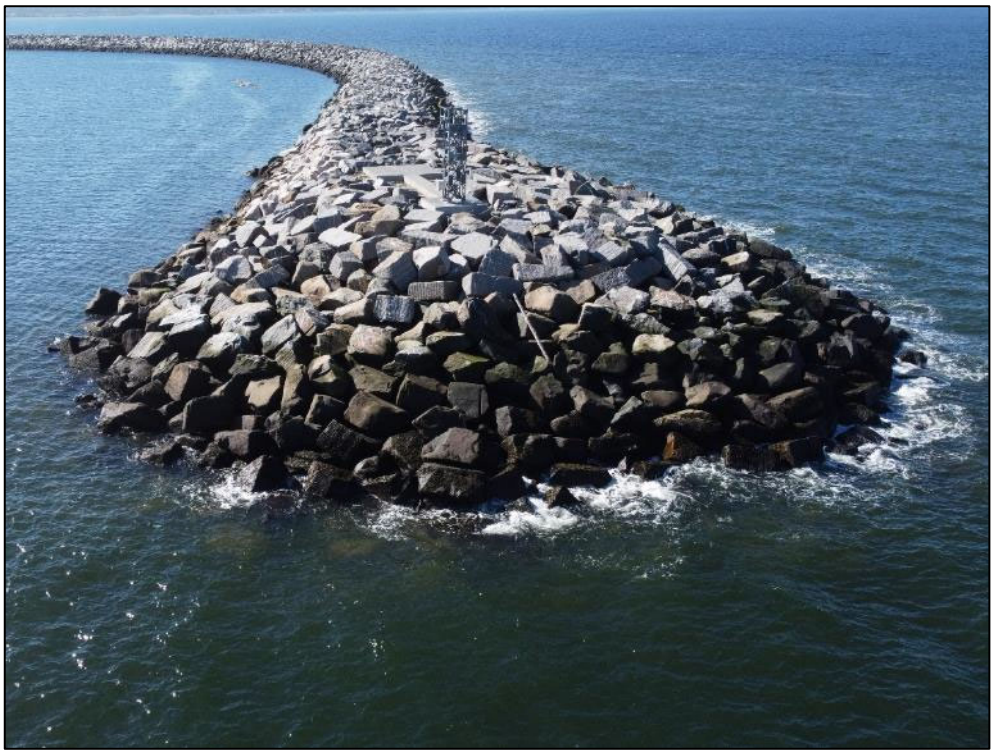
N° : 29 Brise-lame ouest (0253) **Date :** 2023-10-03 11h36 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État du revêtement en tétrapodes sur le côté extérieur du brise-lame (zone non réparée) **Localisation :** Vue aérienne vers l'est	

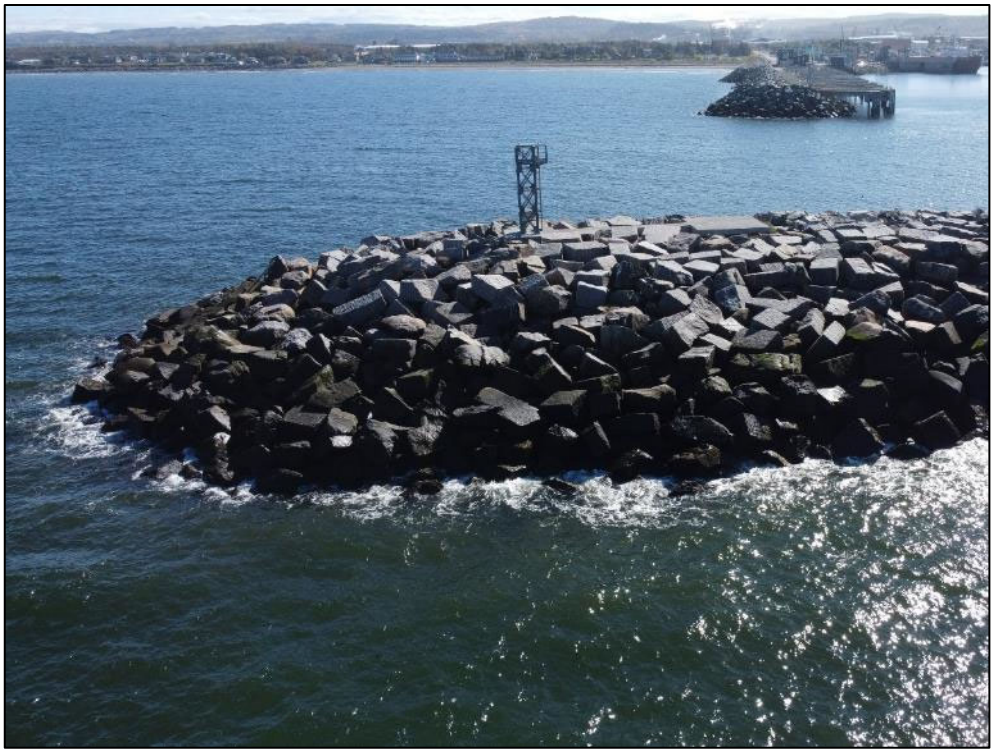
N° : 30 Brise-lame ouest (0260) **Date :** 2023-10-03 11h38 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** Élévation de la crête du brise-lame (zone en tétrapodes) **Localisation :** Vue aérienne vers l'est	

N° : 31 Brise-lame ouest (2692) **Date :** 2023-10-03 12h19 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,8 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** Pierre fracturée sur la crête du brise-lame **Localisation :** Crête de l'enrochement, vue vers l'est	

N° : 32 Brise-lame ouest (0082) **Date :** 2022 **Niveau d'eau :** n/d **Description :** Perte localisée de tétrapodes sur le revêtement extérieur **Localisation :** Vue aérienne vers l'est	

N° : 33 Brise-lame ouest (0234) **Date :** 2023-10-03 11h30 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection au musoir du brise-lame (côté intérieur) **Localisation :** Vue aérienne vers le nord	

N° : 34 Brise-lame ouest (0241) **Date :** 2023-10-03 11h33 HAE **Niveau d'eau (ZC) * :** 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane) **Description :** État de l'enrochement de protection au musoir du brise-lame **Localisation :** Vue aérienne vers l'ouest	

N° : 35 Brise-lame ouest (0243)	
Date : 2023-10-03 11h33 HAE	
Niveau d'eau (ZC) * : 0,6 m (approx.) * prévision de la marée astronomique à la station marégraphique #2955 (Matane)	
Description : État de l'enrochement de protection au musoir du brise-lame (côté extérieur) **Localisation :** Vue aérienne vers le sud	