



Matane
Secteur de Matane-sur-Mer
Protection des berges
Projet MSP : CPS 22-23-04



Rapport technique FINAL

10 décembre 2025



3643, Chemin Saint-Louis, Québec (Québec) G1W 1T2
yann_ropars@videotron.ca

TABLES DES MATIÈRES

TABLES DES MATIÈRES	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
1 Introduction	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Objectifs de la présente étude	2
2 Données de base	3
2.1 Généralités	3
2.2 Niveaux d'eau	3
2.3 Influence des changements climatiques	5
2.4 Recommandations de niveaux d'eau – Conception d'infrastructures côtières	6
2.5 Vagues au large de la zone à protéger	7
2.6 Topo-bathymétrie des rives	11
2.7 Transects	14
2.8 Calcul de l'élévation des crêtes des ouvrages	15
3 Conception d'une protection de berge en enrochement	16
3.1 Démarche de dimensionnement	16
3.2 Série temporelle de vagues et de niveaux d'eau	16
3.3 Remontée des vagues sur un enrochement	17
3.4 Grosseur des enrochements de protection	19
3.5 Coupes-types d'une protection linéaire en enrochement standard	20
3.6 Vue en plan d'une protection linéaire en enrochement standard	21
3.7 Coupes-types d'une protection linéaire en enrochement surbaissé	22
3.8 Protection ponctuelle en enrochement sous-dimensionné	23
3.9 Protection par brise-lames placé au large de la rive	25
3.10 Protection par champ d'épis le long de la rive	27
4 Conception d'une protection de berge en riprap	29
4.1 Démarche de dimensionnement	29
4.2 Remontée des vagues sur un riprap	29
4.3 Coupes-types d'une protection linéaire en riprap	31
5 Conception d'une protection de berge en recharge de plage	33
5.1 Série temporelle de vagues et de niveaux d'eau	33
5.2 Remontée des vagues sur une plage	33
5.3 Vues en coupe de la recharge de plage	38

5.4	Recharge avec déménagement des bâtiments.....	40
5.5	Évolution temporelle de la recharge de plage	41
6	Options de protection des berges envisagées	42
6.1	Enrochement classique	42
6.2	Riprap	44
6.3	Brise-lames détachés	45
6.4	Recharge de plage.....	46
6.5	Plage suspendue.....	47
6.6	Champ d'épis.....	48
6.7	Mur vertical	49
7	Conclusion et recommandations.....	50
7.1	Conclusion	50
7.2	Recommandations	52

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Matane – Localisation du secteur de Matane-sur-Mer à l'étude (Source : Google Earth)	2
Figure 2.1	Matane – Fréquence de dépassement des niveaux d'eau horaires extrêmes hauts....	4
Figure 2.2	Matane – Période de retour des niveaux d'eau annuels extrêmes hauts	5
Figure 2.3	Hausse du niveau moyen des mers – GIEC/IPCC-2021 (« 2 » = SSP2-4.5, « 5 » = SSP5-8.5)	6
Figure 2.4	Direction des vagues au large de Matane-sur-Mer – Lasalle NHC, 2025	8
Figure 2.5	Localisation des points d'extraction des vagues – Lasalle NHC, 2025	9
Figure 2.6	Hauteurs significative des vagues au point M3 – Fréquence de dépassement.....	10
Figure 2.7	Relation entre le Hs des grandes vagues et le niveau d'eau (point M3).....	11
Figure 2.8	Relevés photogrammétriques de la zone d'étude (Source : MRN, septembre 2022)	12
Figure 2.9	Relevés bathymétriques de la zone d'étude (Source : MRN, mai 2023)	13
Figure 2.10	Localisation des transects dans la zone d'étude (bathymétrie mai 2023).....	14
Figure 3.1	Remontée des vagues sur un enrochement à Matane-sur-Mer ($R_{2\%}$, $R_{5\%}$ et $R_{10\%}$ - M2).....	18
Figure 3.2	Hs des vagues réfractées devant un enrochement à Matane-sur-Mer (fond à -2,0 m)20	
Figure 3.3	Coupe-type d'un enrochement de protection de berge standard à Matane-sur-Mer (Transect Ms24).....	21
Figure 3.4	Coupe-type d'un enrochement de protection de berge standard à Matane-sur-Mer (Transect Ms58).....	21
Figure 3.5	Vue en plan d'un enrochement de protection de berge standard à Matane-sur-Mer (moitié est)	22

Figure 3.6	Coupe-type d'un enrochement de protection de berge surbaissé à Matane-sur-Mer (Transect Ms24).....	23
Figure 3.7	Coupe-type d'un enrochement de protection de berge ponctuel à Matane-sur-Mer (Transect Ms58).....	24
Figure 3.8	Vue en plan d'un enrochement de protection de berge ponctuel à Matane-sur-Mer (Transect Ms33).....	24
Figure 3.9	Coupe-type d'un brise-lames détaché à 75 m de la rive – Matane-sur-Mer	25
Figure 3.10	Modification d'un rivage derrière un brise-lames détaché segmenté (Source : SCME ¹⁸).....	27
Figure 4.1	Remontée des vagues sur un riprap à Matane-sur-Mer (R _{2%} , R _{5%} et R _{10%} - M2).....	31
Figure 4.2	Coupe-type d'un riprap de protection de berge à Matane-sur-Mer (Transect Ms24). 32	
Figure 4.3	Coupe-type d'un riprap de protection de berge à Matane-sur-Mer (Transect Ms58). 32	
Figure 5.1	Remontée des vagues M2 – R _{2%} Stockdon-2006 – Conditions actuelles – Fond à -2,5 m	35
Figure 5.2	Remontée des vagues M3 – R _{2%} Poate-2016 – Conditions actuelles – Fond à -2,7 m	36
Figure 5.3	Résultats des calculs de remontée des vagues sur une plage – Matane-sur-Mer – Fond à -2,7 m (climat actuel).....	37
Figure 5.4	Vue en coupe de la recharge de plage de Matane-sur-Mer (Transect Ms30 – Maintien en place des bâtiments).....	39
Figure 5.5	Vue en coupe de la recharge de plage de Matane-sur-Mer (Transect Ms30 – Déménagement des bâtiments)	39
Figure 5.6	Vue en plan d'une recharge de plage dans la partie nord-est de Matane-sur-Mer....	40
Figure 6.1	Coupe-type d'une plage suspendue	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Fréquence de dépassement des niveaux d'eau à Matane	7
Tableau 6.1	Quantités estimatives de pierres – Enrochement classique à Matane-sur-Mer.....	44

CLAUDE DE LIMITATION DE RESPONSABILITÉ

Ce document a été préparé par Consultants Ropars Inc. de façon conforme aux bonnes pratiques d'ingénierie et est destiné à l'usage exclusif du ministère de la Sécurité publique (**MSP**) et de leurs représentants autorisés dans le cadre spécifique de l'étude de **la protection des berges de Matane-sur-Mer**. 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 Consultants Ropars Inc. Aucune autre garantie, expresse ou tacite, n'est accordée.

Consultants Ropars Inc. n'assument aucune responsabilité quant à l'utilisation ou au recours du présent document ou de son contenu par d'autres parties que le MSP.

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

La ville de Matane a été marquée par plusieurs tempêtes majeures, dont celles du 17 décembre 2007, du 6 décembre 2010, du 5 janvier 2018 et du 24 décembre 2022, qui ont provoqué des dommages importants aux résidences et aux infrastructures côtières. La récurrence des ondes de tempête affectant le site d'étude s'est accélérée au cours de la période récente.

Depuis 2022, plusieurs campagnes d'acquisitions de données et travaux de recherche ont eu lieu à Matane afin de mieux comprendre la situation relative aux aléas côtiers. Ces acquisitions découlent de projets du MSP et du MTMD, ainsi que de projets de recherche universitaires.

En mars 2023, une entente de financement a été conclue entre le MSP et la ville de Matane afin de réaliser des travaux d'atténuation des risques liés à l'érosion et à la submersion côtières dans le secteur de Matane-sur-Mer (voir figure 1.1).

En 2023, le MSP a mandaté Consultants Ropars Inc. pour évaluer les conditions hydrodynamiques dans lesquelles les épisodes d'érosion et de submersion côtières se produisent afin d'évaluer différentes solutions de protection des berges. En parallèle, le MSP a également mandaté Lasalle|NHC afin de modéliser les conditions hydro-sédimentaires spécifiques aux sites visés et la ville a mandaté Lasalle|NHC afin de modéliser les risques de submersion. La présente étude s'appuie en partie sur ces modélisations.

Une appréciation de risques produite en 2025 par les experts en géomorphologie côtière du MSP brosse un portrait de l'intensité des aléas côtiers et de la vulnérabilité des infrastructures du secteur visé à Matane-sur-Mer.

Le MSP souhaite que les solutions d'atténuation des risques d'érosion et de submersion côtières financées par le Cadre pour la prévention de sinistres (CPS) répondent en priorité aux objectifs suivants:

- Protéger durablement les populations et les biens face aux risques identifiés;
- Viser une pérennité des mesures sur une période minimale de 30 ans, en intégrant les effets des changements climatiques;
- S'assurer de la faisabilité technique des solutions proposées;
- Impliquer des investissements inférieurs ou égaux à la valeur des enjeux exposés, dans le respect des capacités financières des parties prenantes prévues dans l'entente;
- Adapter les solutions aux spécificités du territoire;
- Limiter les impacts environnementaux;
- Favoriser l'acceptabilité sociale.

Cette analyse de solutions présente les options de protection de berges étudiées pour le secteur de Matane-sur-Mer ainsi que les recommandations quant à leur capacité de répondre aux objectifs du MSP.

1.2 Objectifs de la présente étude

Les objectifs du mandat confié par le MSP à Consultants Ropars Inc. sont de :

- Analyser les informations topo-bathymétriques concernant les berges du secteur de Matane-sur-Mer;
- Analyser les données de vagues et de niveaux d'eau (données fournies par Lasalle|NHC);
- Calculer la remontée des vagues sur le rivage actuel et sur les protections de berge envisagées à l'aide des équations paramétriques;
- Valider les résultats des équations paramétriques avec les résultats de calculs de submersion effectués par Lasalle|NHC;
- Proposer, présenter et analyser différentes options de protection de la berge;
- Définir les caractéristiques techniques des différentes options de protection de berge proposées;
- Estimer les quantités de matériaux impliqués pour certaines solutions mieux adaptées aux conditions hydro-sédimentaires du milieu;
- Recommander la ou les solutions qui répondent le mieux aux objectifs du MSP dans le Cadre pour la prévention de sinistres.



Figure 1.1 Matane – Localisation du secteur de Matane-sur-Mer à l'étude (Source : Google Earth)

2 Données de base

2.1 Généralités

De nombreuses données ont été consultées et analysées avant d'en arriver à dimensionner, avec une précision variable, les différentes options qui sont présentées dans la suite de ce rapport. Certaines options ont fait l'objet d'évaluations plus précises que d'autres étant donné leur intérêt par rapport aux objectifs du CPS. Les options qui ont été retenues en vue de leur éventuelle mise en œuvre ont été évaluées en fonction des données les plus récentes et les plus représentatives de la topographie du rivage et de l'impact des vagues sur ce rivage (tempêtes récentes, changements climatiques, diminution du couvert de glace, etc.).

Toutes les solutions analysées sont techniquement réalisables, cependant, certaines d'entre elles posent des enjeux de faisabilité majeurs, à la fois techniques, économiques et environnementaux, les rendant irréalistes. De plus, certaines de ces solutions nécessiteraient des modélisations plus poussées si elles étaient retenues, vu leur impact sur la dynamique côtière et leur complexité de mise en œuvre. Ces études particulières n'ont pas été réalisées à cette étape de l'analyse.

Les prochains paragraphes présentent le détail des données utilisées. Il s'agit dans toute la mesure du possible des données les plus récentes. Il est cependant important de noter que, surtout pour la topographie de la plage, les changements sont constants et qu'une mise à jour de ces données pourrait être requise avant la mise en œuvre d'un projet de protection des berges à Matane-sur-Mer.

2.2 Niveaux d'eau

Très peu de donnée de niveaux d'eau sont disponibles pour Matane sur le site du ministère des Pêches et Océans Canada (MPO – Service hydrographique du Canada¹). Environ deux semaines de mesures² sont disponibles en 1963 à la station du SHC N° 2955. Cette série de données étant nettement insuffisante dans le cadre d'un projet de protection de berge, la série temporelle horaire des niveaux d'eau modélisés par Lasalle|NHC (2025) a servi à l'analyse des niveaux d'eau à Matane. La série temporelle des niveaux d'eau modélisés par Lasalle|NHC a été validée sur les données de stations du SHC situées dans l'estuaire du Saint-Laurent.

Le SHC donne en 2025 une différence de 1,98 m entre le Zéro des cartes marines (ZC) et le zéro géodésique CGVD28 à Matane, le ZC se situant sous le Zéro CGVD28 dans cette région du Québec.

¹ <https://marees.gc.ca/fr/stations>

² <https://www.isdm-gdsi.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/inventory-inventaire/sd-ds-fra.asp?no=2955&user=isdm-gdsi®ion=PAC>

La figure 2.1 présente la courbe de fréquence de dépassement des niveaux d'eau extrêmes hauts à Matane (données horaires modélisées de 1980 à 2022). Selon la régression logarithmique utilisée dans ce graphique, le niveau d'eau dépassé une heure tous les 50 ans est de +2,88 m CGVD28. L'analyse faite par Lasalle|NHC (2025) en utilisant une méthode statistique différente propose une valeur très similaire, soit +2,87 m.

La figure 2.2 présente l'analyse statistique des maximums annuels sur la même période. Les résultats sont très similaires avec les deux méthodes statistiques pour la période de retour de 50 ans (+2,88 m versus +2,91 m CGVD28).

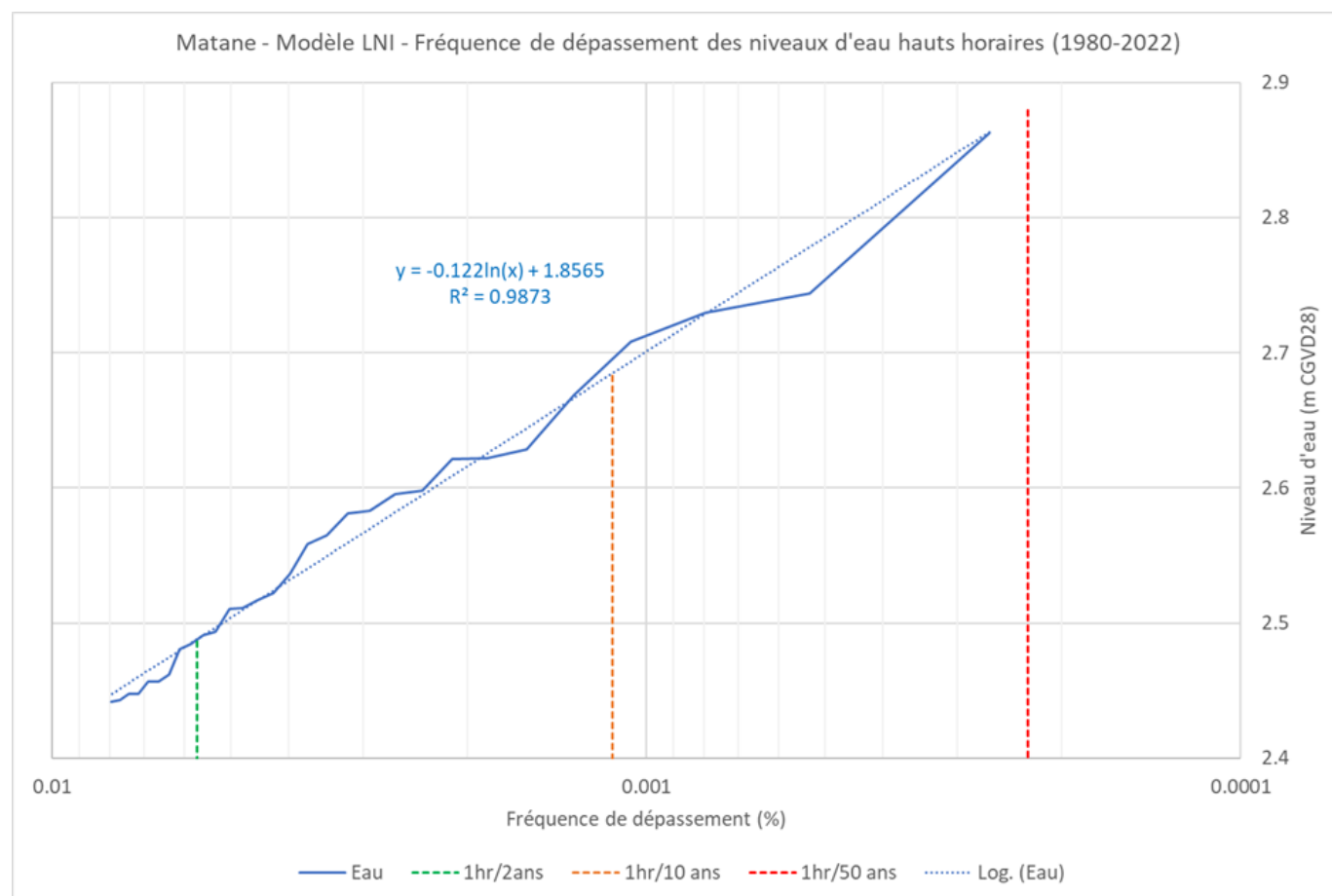


Figure 2.1 Matane – Fréquence de dépassement des niveaux d'eau horaires extrêmes hauts

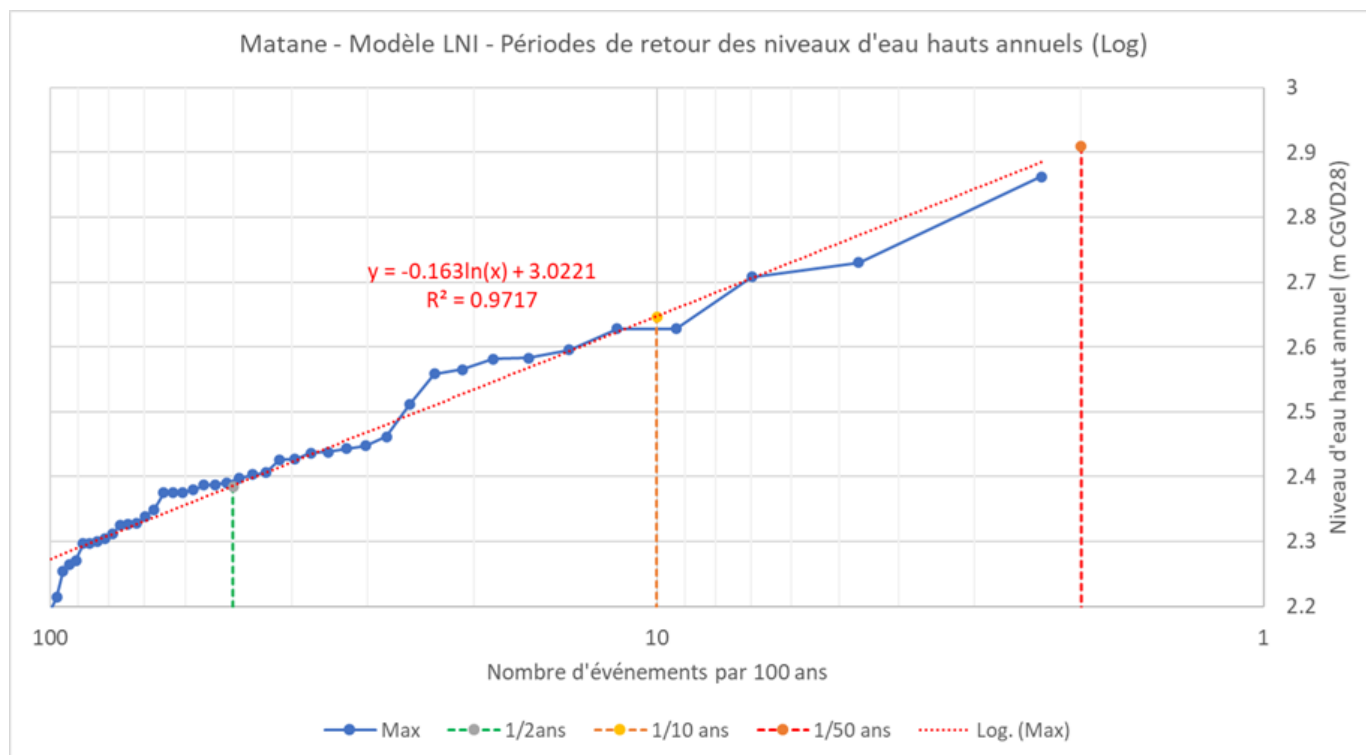


Figure 2.2 Matane – Période de retour des niveaux d’eau annuels extrêmes hauts

2.3 Influence des changements climatiques

La hausse du niveau moyen des mers³ selon le GIEC (IPCC)⁴ et le calcul de l’ajustement isostatique selon NRCan⁵ ont été utilisés en vue d’obtenir une évaluation des niveaux d’eau extrêmes dans le futur.

Ressources naturelles Canada donne pour Matane une remontée de la croute terrestre de 1,8 mm/an.

Les données du rapport du GIEC en 2023 (scénario SSP5-8.5⁶ – Voir figure 2.3) tendent à indiquer une hausse du niveau d’eau de 0,33 à 0,48 m (fourchette probable) lors des 50 prochaines années (prévision de 0,39 m). La hausse du niveau d’eau selon ce scénario serait de 0,16 m dans 20 ans et de 0,23 m dans 30 ans.

³ IPCC AR6 WGI: “It is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land. Global mean sea level increased by 0.20 [0.15 to 0.25] m between 1901 and 2018. The average rate of sea level rise was 1.3 [0.6 to 2.1] mm yr⁻¹ between 1901 and 1971, increasing to 1.9 [0.8 to 2.9] mm yr⁻¹ between 1971 and 2006, and further increasing to 3.7 [3.2 to 4.2] mm yr⁻¹ between 2006 and 2018 (high confidence).”

⁴ Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat / Intergovernmental Panel on Climate Change

⁵ Ressources naturelles Canada <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/trx.php>

⁶ IPCC AR6 WGI: “Throughout this report, the five illustrative scenarios are referred to as SSPx-y, where ‘SSPx’ refers to the **Shared Socio-economic Pathway** or ‘SSP’ describing the socio-economic trends underlying the scenario, and ‘y’ refers to the approximate level of radiative forcing (in W m⁻²) resulting from the scenario in the year 2100. A detailed comparison to scenarios used in earlier IPCC reports is provided in Section TS1.3 and 1.6 and 4.6. The SSPs that underlie the specific forcing scenarios used to drive climate models are not assessed by WGI. Rather, the SSPx-y labelling ensures traceability to the underlying literature

La combinaison de la hausse du niveau moyen des mers et du relèvement isostatique à **Matane** donne une **hausse effective du niveau d'eau par rapport au niveau moyen des mers de 2025** de :

- **0,11 m dans 20 ans,**
- **0,18 m dans 30 ans,**
- **0,30 m dans 50 ans.**

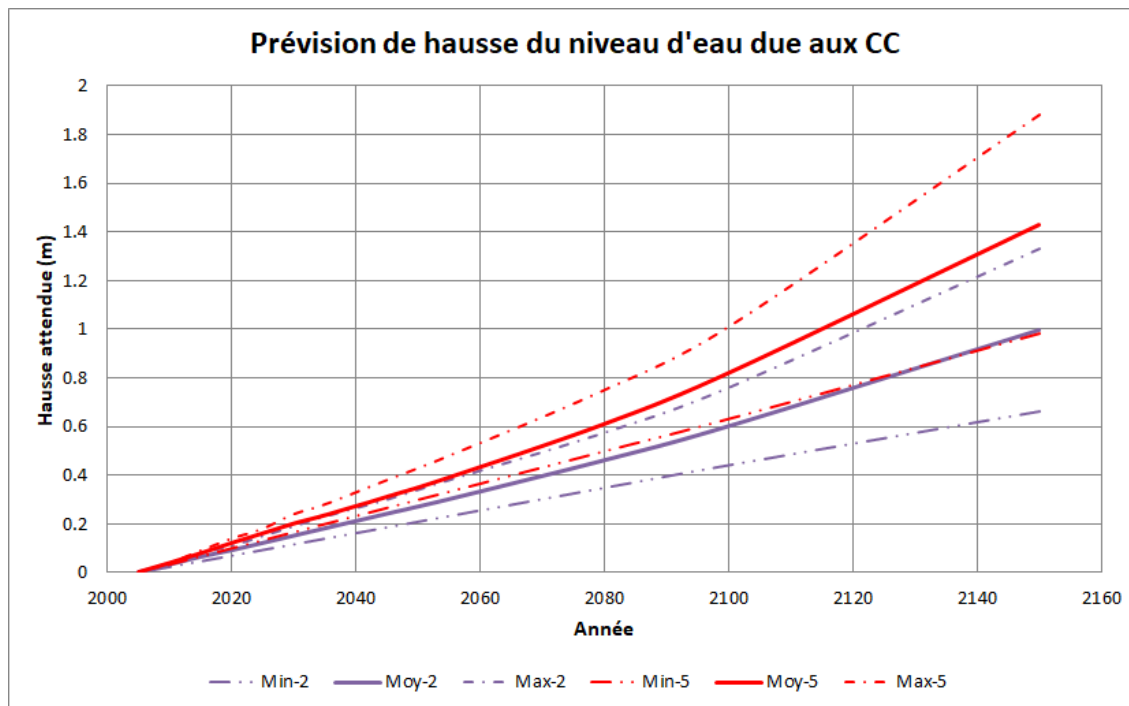


Figure 2.3 Hausse du niveau moyen des mers – GIEC/IPCC-2021 (« 2 » = SSP2-4.5, « 5 » = SSP5-8.5)

2.4 Recommandations de niveaux d'eau – Conception d'infrastructures côtières

Selon la base de données de Lasalle|NHC, les niveaux d'eau présentés au tableau 2.1 devraient être retenus dans le dimensionnement des infrastructures côtières. Il est recommandé de prendre en compte l'influence sur les niveaux d'eau des changements climatiques et de l'ajustement isostatique spécifique à la région de Matane. À l'échéance de 50 ans, on s'attend à ce que les niveaux d'eau moyens soient 30 cm plus haut qu'aujourd'hui.

in which specific forcing pathways are used as input to the climate models. IPCC is neutral with regard to the assumptions underlying the SSPs, which do not cover all possible scenarios. Alternative scenarios may be considered or developed.”

Tableau 2.1 Fréquence de dépassement des niveaux d'eau à Matane

Niveau d'eau	Fréquence de dépassement	Élévation (m GVD28)	Remarque
Haut	1 heure / 2 ans	+2,5	
Très haut	1 heure / 10 ans	+2,7	
Extrême actuel	1 heure / 50 ans	+2,9	Sans influence des changements climatiques ni ajustement isostatique
Extrême futur	1 heure / 50 ans	+3,2	Avec influence des changements climatiques et de l'ajustement isostatique

La limite d'**empiètement sur l'habitat du poisson** est définie par le ministère des Pêches et Océans Canada comme correspondant à la pleine mer supérieure de grande marée (PMSGM). Selon les données fournies par Pêches et Océans Canada⁷ pour la station de Matane, les informations suivantes s'appliqueraient à la zone de Matane-sur-Mer :

- Pleine Mer Supérieure de Grande Marée (PMSGM) : +4,21 m ZC / **+2,23 m** CGVD28
- Pleine Mer Supérieure de Marée Moyenne (PMSMM) : +3,40 m ZC / +1,42 m CGVD28
- Niveau moyen de l'eau : +1,98 m ZC / 0,00 m CGVD28
- Basse Mer Inférieure de Marée Moyenne (BMIMM) : +0,76 m ZC / -1,22 m CGVD28
- Basse Mer Inférieure de Grande Marée (BMIGM) : +0,01 m ZC / -1,97 m CGVD28

2.5 Vagues au large de la zone à protéger

Les modélisations de vagues⁸ faites par Lasalle|NHC entre 1980 et 2022 (en se servant des données climatiques disponibles dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent) ont été utilisées pour dimensionner les protections de berge de Matane-sur-Mer. Ces modélisations de vagues ont été validées sur des données enregistrées par l'UQAR dans l'estuaire du Saint-Laurent, en particulier à Saint-Ulric.

⁷ <https://marees.gc.ca/fr/stations>

⁸ Lasalle|NHC – « Matane-sur-Mer – Submersion – Modélisation de la submersion côtière » - Rapport technique final du 12 novembre 2025, préparé pour la Ville de Matane

Les données climatiques utilisées par Lasalle|NHC sont les données de forçage CFSR (grille de 36 km – entre 1980 et 2022). Les validations faites sur les données enregistrées par l’UQAR au large de Saint-Ulric⁹ ont permis de montrer que l’utilisation du forçage CFSR nécessitait l’utilisation de facteurs de correction de biais pour représenter de façon satisfaisante le régime de vagues avec ce forçage.

Le forçage HRDPS a été utilisé pour générer les vagues au large de Matane entre 2018 et 2022. Ces données ont été systématiquement utilisées lorsqu’elles étaient disponibles.

Il faut noter que l’utilisation du forçage CFSR (1980-2022) pourrait avoir induit une légère sous-estimation des hauteurs de vagues extrêmes dans le secteur de Matane entre 1980 et 2018, malgré l’effort de correction fait par Lasalle|NHC pour débiaiser ces données.

On distingue deux orientations principales des grandes vagues au large de Matane, soit le nord-est et l’ouest (figure 2.4). Les vagues de l’ouest dominant en termes de fréquence mais ce sont les vagues du nord-est qui dominant en termes de hauteur.

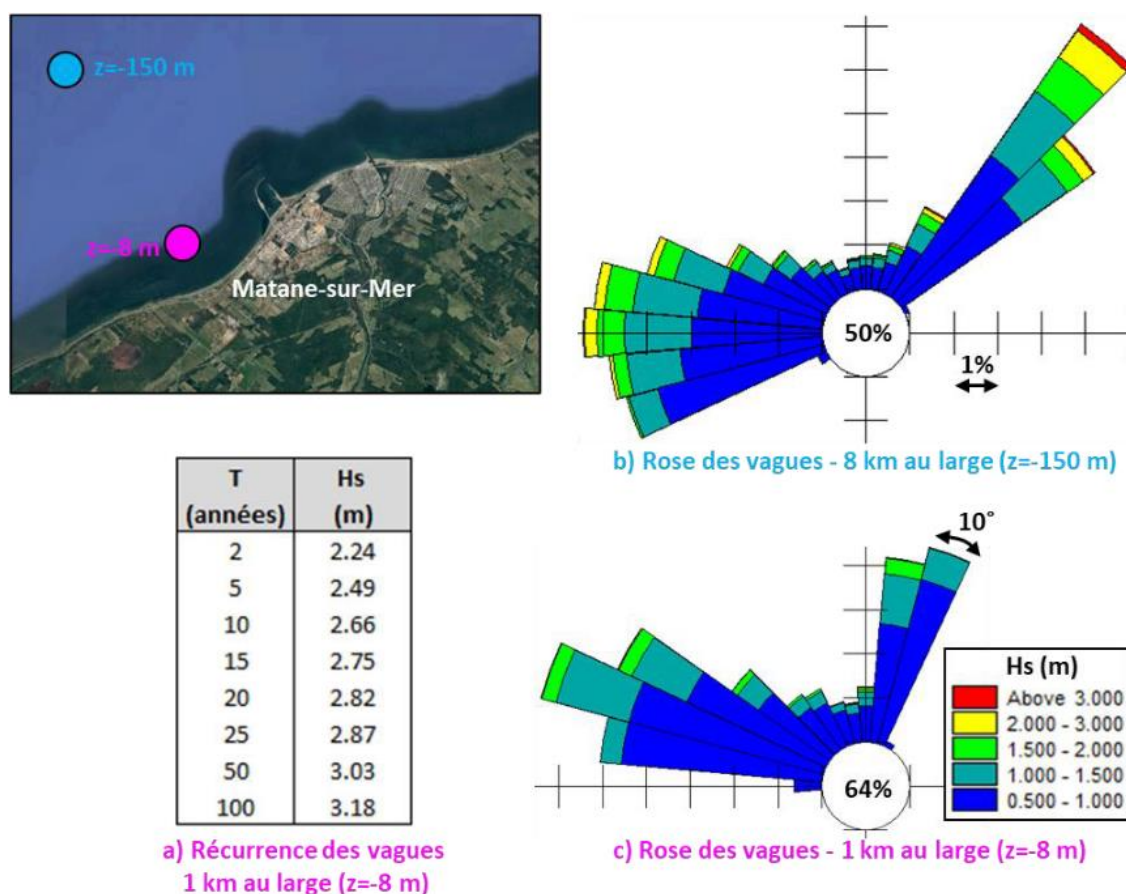


Figure 2.4 Direction des vagues au large de Matane-sur-Mer – Lasalle|NHC, 2025

⁹ Localisation de la bouée : 48° 48' N / 67° 44,6' W, profondeur d'eau de 32 m – 2010 à 2024 (discontinu)

Les vagues au large ont été réfractées en plusieurs points et des séries chronologiques ont été produites pour différents points d'extraction. La figure 2.5 illustre la position des points d'extraction des vagues fournis par Lasalle|NHC le long du rivage de Matane-sur-Mer. Ces quatre points (M1 à M4) sont positionnés le long de l'isobathe -4 m CGVD28.

Les coordonnées (MTM6) des points sont :

- M1 : 298792,43 / 5410559,55
- M2 : 298366,72 / 5410015,04
- M3 : 297802,41 / 5409503,54
- M4 : 296888,30 / 5409054,73

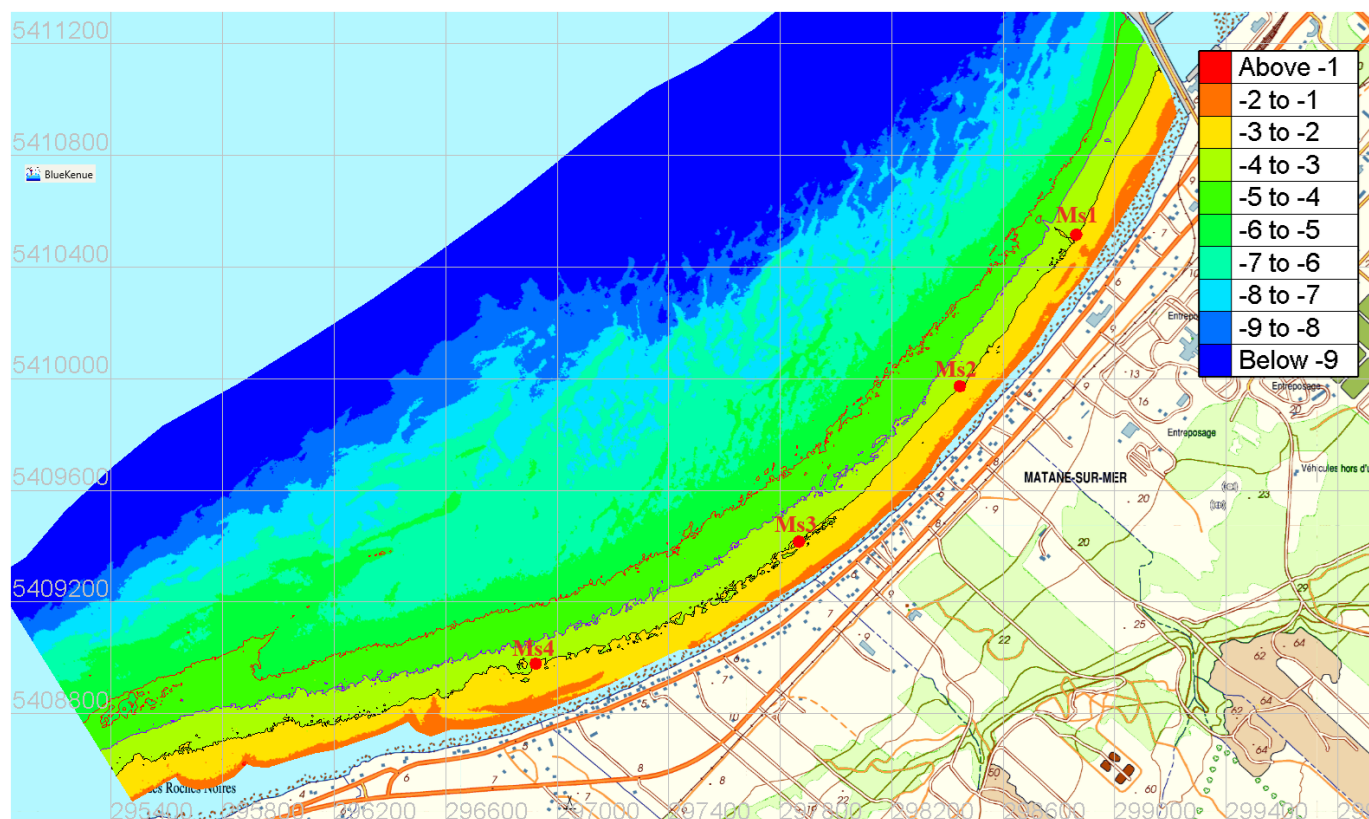


Figure 2.5 Localisation des points d'extraction des vagues – Lasalle|NHC, 2025

Les hauteurs significatives des fortes vagues à environ 130 mètres de la rive de Matane-sur-Mer sont illustrées sur la figure 2.6 qui montre la fréquence de dépassement des plus grandes vagues de la série au point M3. Pour une fréquence de dépassement d'une heure en 50 ans, la hauteur de vague significative varie de près de 2,35 m (point M1) à 2,8 m (point M4) et les grandes vagues proviennent en moyenne de l'ouest-nord-ouest (point M1) au nord (point M4).

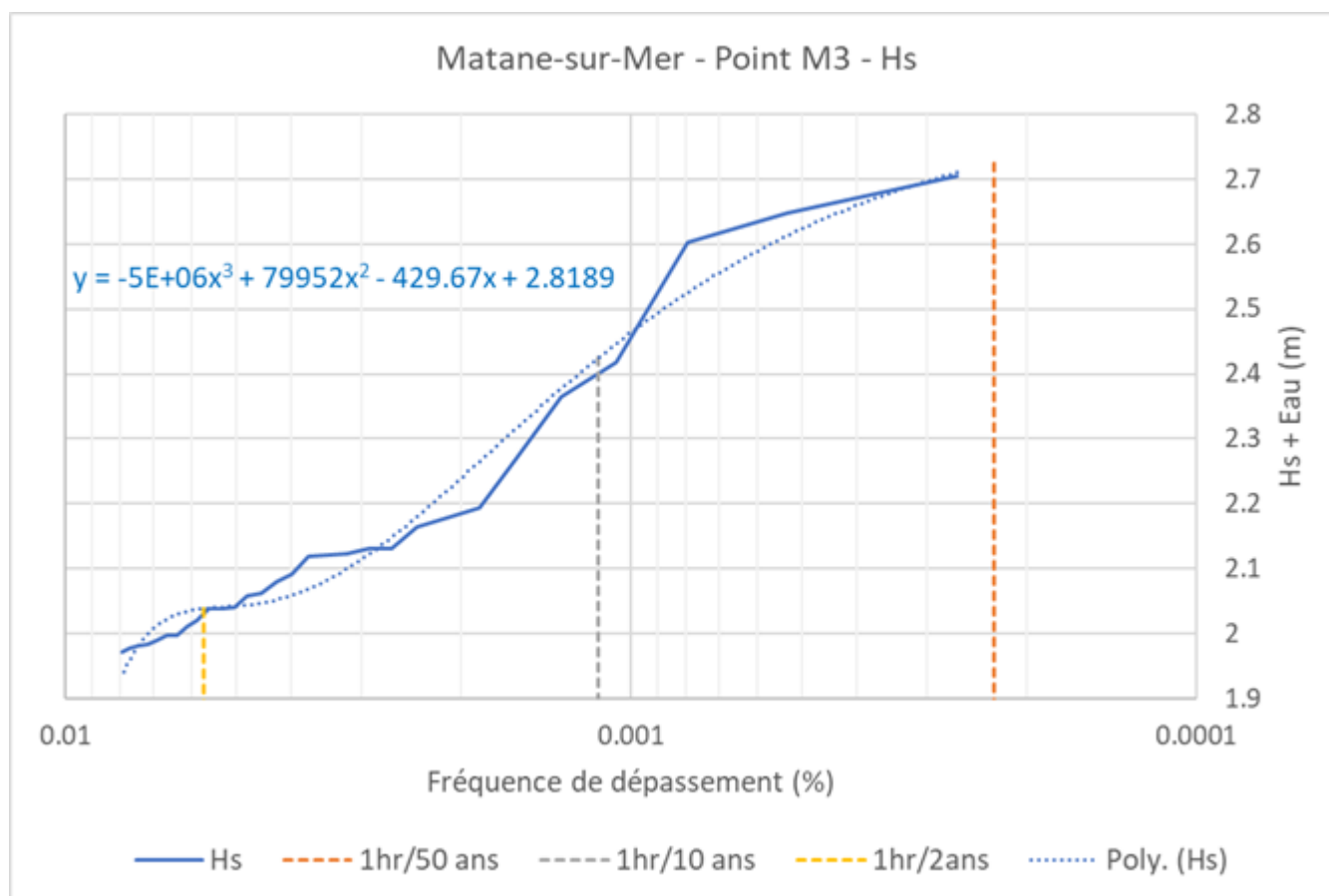


Figure 2.6 Hauteurs significative des vagues au point M3 – Fréquence de dépassement

Des séries temporelles synchrones de vagues / niveaux d'eau ont été produites pour les quatre points d'extraction des vagues de Lasalle|NHC à partir de la base de données de Lasalle|NHC. Ces séries temporelles comprennent chacune 376 944 données horaires. La figure 2.7 illustre la relation entre la hauteur significative des plus fortes vagues de la série temporelle du point M3 et les niveaux d'eau. On constate sur ces figures que :

- Des vagues de 2,7 m de Hs se sont produites avec des niveaux d'eau de 2,4 m CGVD28 (5 janvier 2018),
- Des vagues de 1,3 m de Hs se sont produites avec des niveaux d'eau de plus de 2,8 m CGVD28.

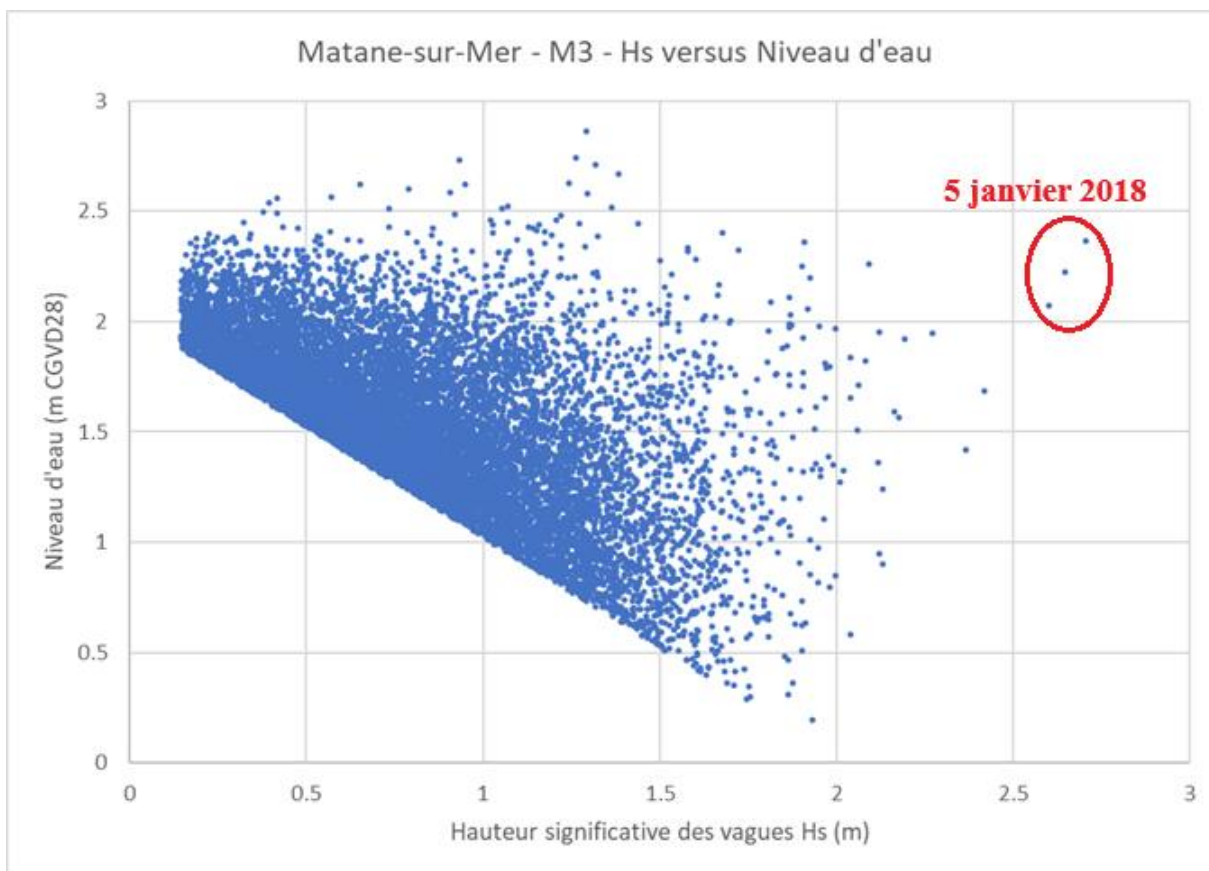


Figure 2.7 Relation entre le Hs des grandes vagues et le niveau d'eau (point M3)

2.6 Topo-bathymétrie des rives

Toutes les données altimétriques apparaissant dans ce rapport (sauf indication contraire) sont en géodésique (CGVD28). Les coordonnées des points sont en projection cartographique conique conforme de Lambert : NAD 1983 CSRS MTM 6 (SCOPQ).

Les données topographiques retenues dans l'étude des différentes options de protection des berges de Matane-sur-Mer sont des données récentes, soit :

- Relevés photogrammétriques de septembre 2022 (figure 2.8),
- Relevés bathymétriques de mai 2023 (figure 2.9).

Les données des relevés photogrammétriques situées dans la zone des relevés bathymétriques ont dû être épurées, car elles fournissaient l'élévation du plan d'eau et non l'élévation du sol.

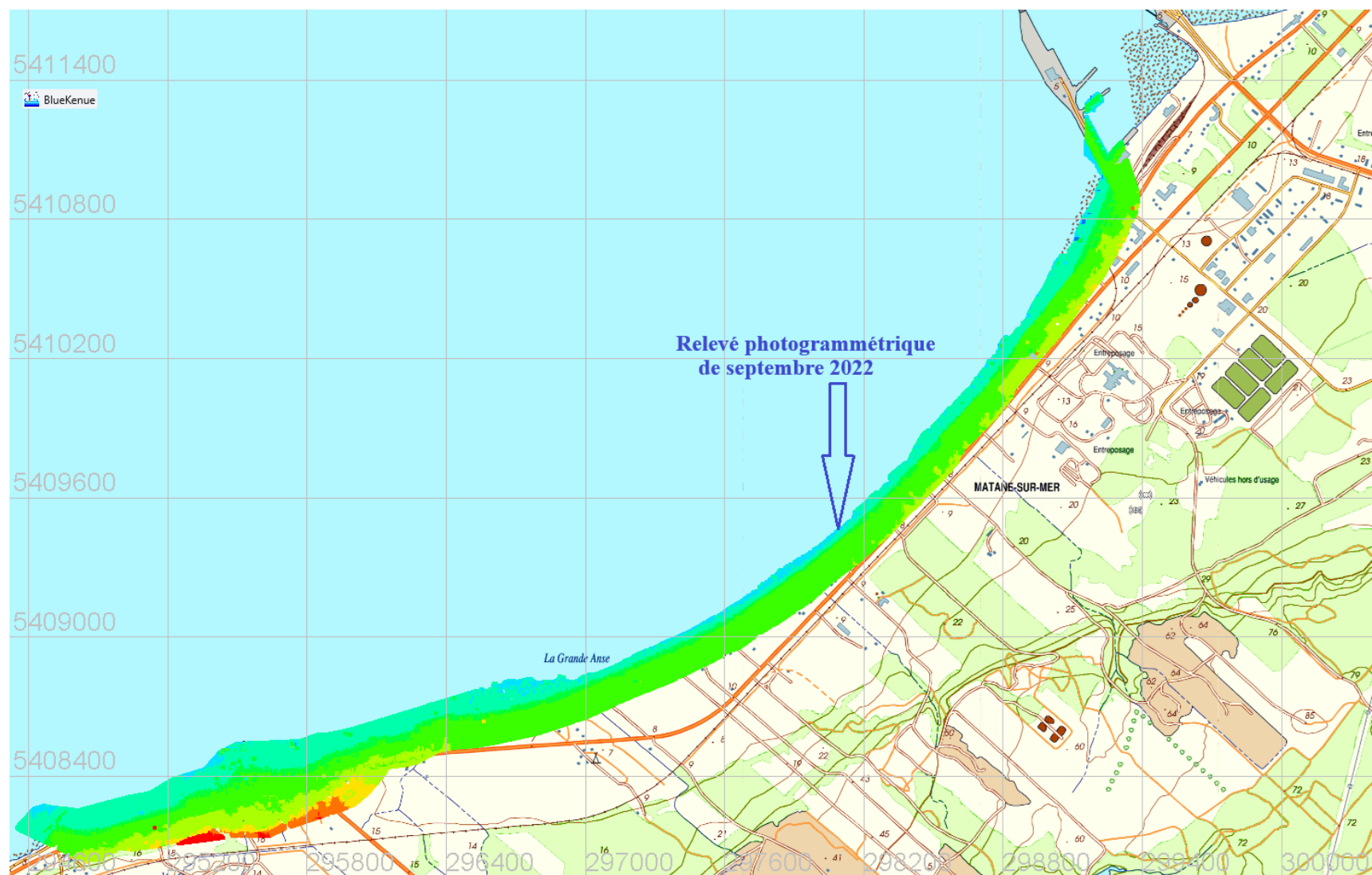


Figure 2.8 Relevés photogrammétriques de la zone d'étude (Source : MRN, septembre 2022)

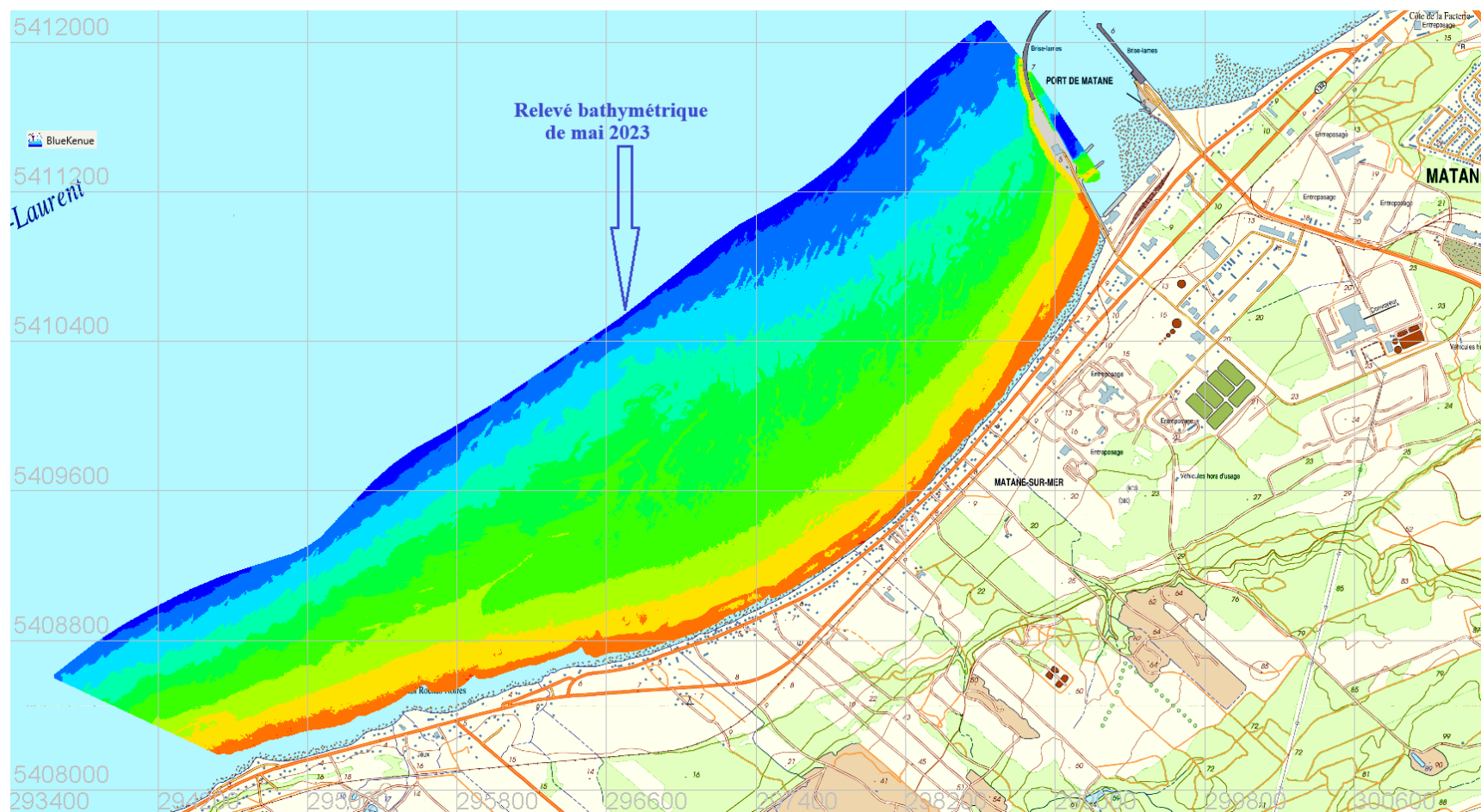


Figure 2.9 Relevés bathymétriques de la zone d'étude (Source : MRN, mai 2023)

2.7 Transects

Une série de 106 transects a été définie le long de la berge de Matane-sur-Mer en vue de dimensionner les différentes protections de berge.

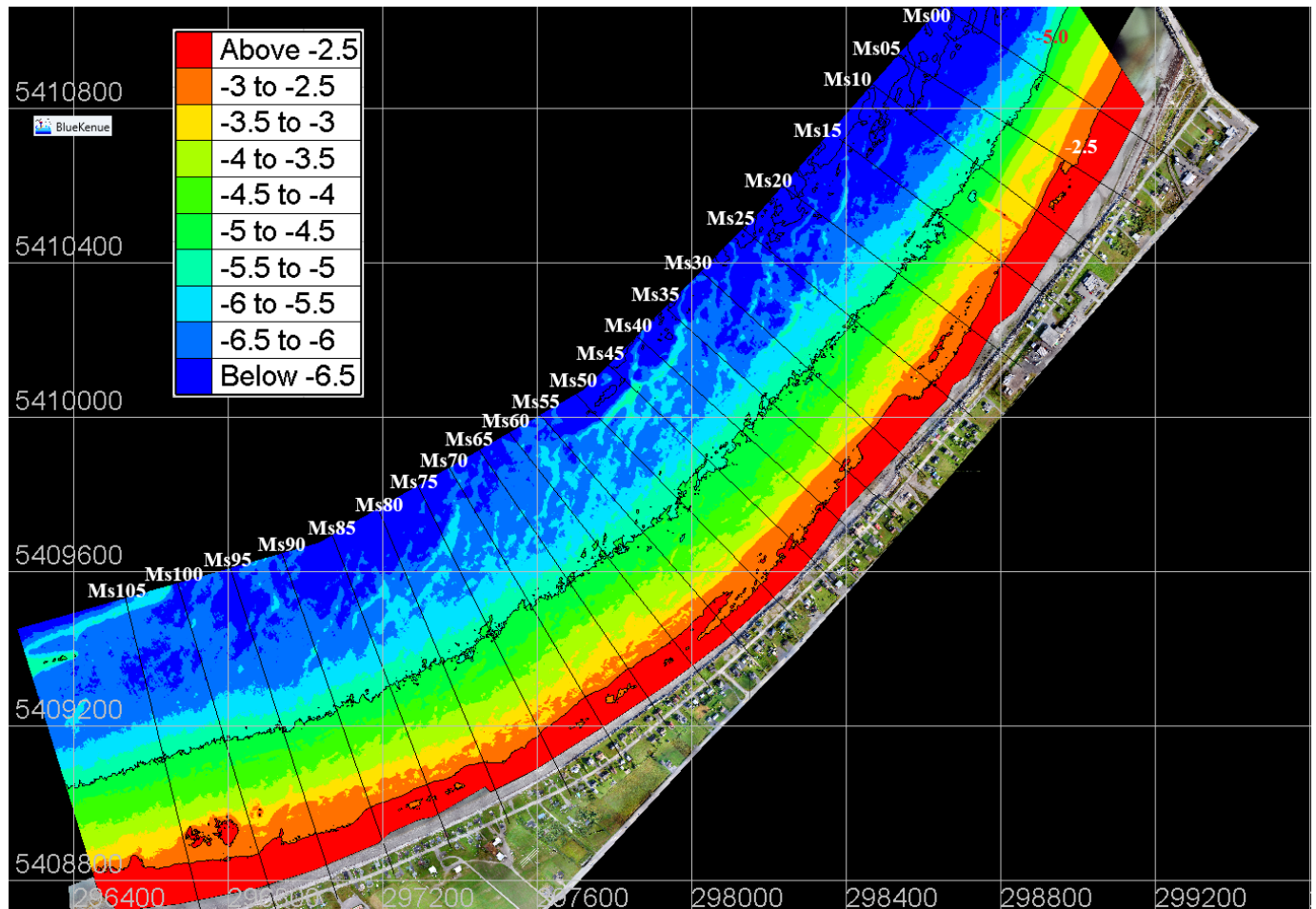


Figure 2.10 Localisation des transects dans la zone d'étude (bathymétrie mai 2023)

2.8 Calcul de l'élévation des crêtes des ouvrages

En se basant sur les informations fournies dans le Coastal Engineering Manual (C.E.M.)¹⁰, sur les travaux de Didier et al., 2016¹¹ ainsi que sur d'autres publications scientifiques, plusieurs équations de la remontée des vagues sur le rivage de Matane-sur-Mer et sur les ouvrages de protection ont été utilisées pour établir l'élévation de crête d'ouvrages permettant de protéger adéquatement les infrastructures situées près du rivage (routes, maisons, services, etc.).

Des modélisations numériques (X-Beach) ont été réalisées par Lasalle|NHC pour confirmer les élévations de crête obtenues par des méthodes paramétriques. Ces modélisations sont présentées dans le rapport de Lasalle|NHC¹².

¹⁰ U.S. Army Corps of Engineers – Coastal Engineering Manual <https://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/u43544q/636F617374616C20656E67696E656572696E67206D616E75616C/>

¹¹ Didier, D. et al., “Wave runup estimations on platform-beaches for coastal flood hazard assessment”, Nat Hazards, Springer Science+Business Media Dordrecht, 2016

¹² Lasalle|NHC, « Matane-sur-Mer – Modélisation de la submersion côtière », Rapport 8009526, Version finale datée du 12 novembre 2025.

3 Conception d'une protection de berge en enrochement

3.1 Démarche de dimensionnement

Le dimensionnement d'une protection en enrochement des berges de Matane-sur-Mer s'est fait pour plusieurs options.

- Protection des berges sans déplacement des résidences et en fonction d'un franchissement raisonnable de la protection par les vagues (pas d'impact anticipé sur les résidences pour les tempêtes de conception). Deux sous-options ont été analysées, soit
 - o Une option standard avec une crête étroite (largeur minimale requise par les recommandations du C.E.M¹³) et
 - o Une option surbaissée avec une crête élargie en fonction de la diminution de l'élévation de cette crête,
- Protection des berges avec déplacement des résidences, ce qui permet de remonter l'enrochement standard sur la berge et de diminuer les quantités de pierre requises,
- Protection de trois encoches actuellement sans protection (absence ou forte détérioration de la protection en enrochement existante), à l'aide d'un enrochement minimal, similaire aux enrochements adjacents et ne répondant pas aux critères de dimensionnement recommandés par le C.E.M.,
- Protection des berges par mise en place de brise-lames au large de la berge.

Seule la première option a fait l'objet d'un dimensionnement complet de ses caractéristiques (élévation de la crête, taille des pierres, quantités). Cette analyse a permis d'estimer des ordres de grandeur des caractéristiques des autres options d'enrochement.

3.2 Série temporelle de vagues et de niveaux d'eau

La première étape des calculs de remontée des vagues sur une protection de berge en enrochement à Matane-sur-Mer a consisté à établir une série temporelle synchrone de vagues et de niveaux d'eau à partir des données disponibles (modélisation des vagues et niveaux d'eau de Lasalle|NHC – 1980-2022). Les 376 944 ensembles de données de cette série temporelle synchrone ont ensuite été classés de façon à retenir les événements les plus susceptibles de provoquer de fortes remontées des vagues sur la rive. Ce classement s'est fait en ordonnant les données par ordre décroissant de la somme du niveau d'eau et de la hauteur

¹³ Coastal Engineering Manual du U.S. Army Corps of Engineers

significative des vagues après avoir retiré les hauteurs de vagues inférieures à 0,3 m et les niveaux d'eau inférieurs +0,0 m CGVD28 (exemple représenté sur la figure 2.7).

Cette démarche permet d'établir la fréquence de dépassement des remontées des vagues sur une base statistique. Elle permet également de définir la fréquence de dépassement des hauteurs de vagues à la côte, ce qui permet de dimensionner les enrochements en fonction d'événements statistiquement représentatifs (exemple représenté sur la figure 2.6).

La modélisation des conditions en climat futur a été faite en augmentant les niveaux d'eau de la valeur correspondant à la période de retour d'événements considérée pour ce climat futur et en intégrant la hausse du niveau marin relatif attendue.

3.3 Remontée des vagues sur un enrochement

Les calculs de remontée des vagues sur la rive ont été faits dans le cadre de la mise en place d'ouvrages de protection de berge sous forme d'enrochements avec une pente de 1,5H/1V. Dans ce cas, ce sont les équations du Coastal Engineering Manual¹⁴ qui ont été utilisées. Ces équations sont :

- $R_{u\%} = H_s * A * \xi_{om}$ lorsque $1 < \xi_{om} < 1,5$
- $R_{u\%} = H_s * B * \xi_{om}^C$ lorsque $1,5 < \xi_{om}$

Où :

H_s est la hauteur significative des vagues,

ξ_{om} est le paramètre de déferlement (surf similarity parameter),

A, B et C sont des coefficients dépendant du pourcentage de dépassement de la remontée.

Les calculs ont été faits pour des remontées $R_{2\%}$, $R_{5\%}$, et $R_{10\%}$. Compte tenu de la proximité de certaines maisons près de l'enrochement, il serait recommandé de limiter à 5% le franchissement des vagues et il n'est pas recommandé d'accepter plus que 10% de franchissement lors des événements de tempêtes accompagnées de hauts niveaux d'eau. Une analyse des résultats obtenus pour $R_{5\%}$, et $R_{10\%}$ a été faite tout au long de la zone afin d'arriver à une recommandation d'élévation de la crête des enrochements.

Si la mise en place d'enrochements était retenue comme solution de protection des berges de Matane-sur-Mer, il serait requis de valider les quantités d'eau franchissant les enrochements par des modèles comme X-Beach avant de finaliser l'élévation de la crête de ces enrochements.

La figure 3.1 présente un exemple des résultats des calculs de remontée des vagues sur un enrochement classique pour la zone centrale de la plage en climat actuel (secteur du point M2 - fond à l'élévation -2,0 m

¹⁴ C.E.M. Part VI, Change 3 (28 Sep 11), Équation VI-5-12, page VI-5-18

CGVD28). Pour une remontée limitant à 5% le franchissement, il faudrait dans ce cas considérer une élévation de crête des enrochements de +7,5 m CGVD28. L'élévation recommandée pour la crête passerait à +6,8 m pour une limite de franchissement de 10%. Des calculs similaires ont été faits pour les différents secteurs en fonction des données de vagues et des profondeurs d'eau au large de la plage.

Les prévisions de hausse de niveaux d'eau due aux changements climatiques à Matane sont de 0,30 m en 50 ans (voir chapitre 2.3). En considérant la vie utile d'une protection en enrochement de 50 ans, une remontée moyenne des niveaux d'eau de 0,25 m a été prise en compte de façon à obtenir une évaluation de l'élévation de la crête de l'enrochement. La recommandation d'élévation de la **crête d'un enrochement** protégeant le rivage de Matane-sur-Mer varierait donc de **+6,9 m** (extrémité nord-est) à **+7,4 m** (extrémité sud-ouest) CGVD28. Cette recommandation d'élévation de crête d'enrochement fait en sorte que des franchissements de l'enrochement devraient être observés au cours de sa vie utile (hausse progressive des niveaux d'eau, tempêtes de période de retour supérieures à 50 ans). Ces franchissements par les vagues devraient avoir des conséquences limitées pour les tempêtes de conception (période de retour de 50 ans).

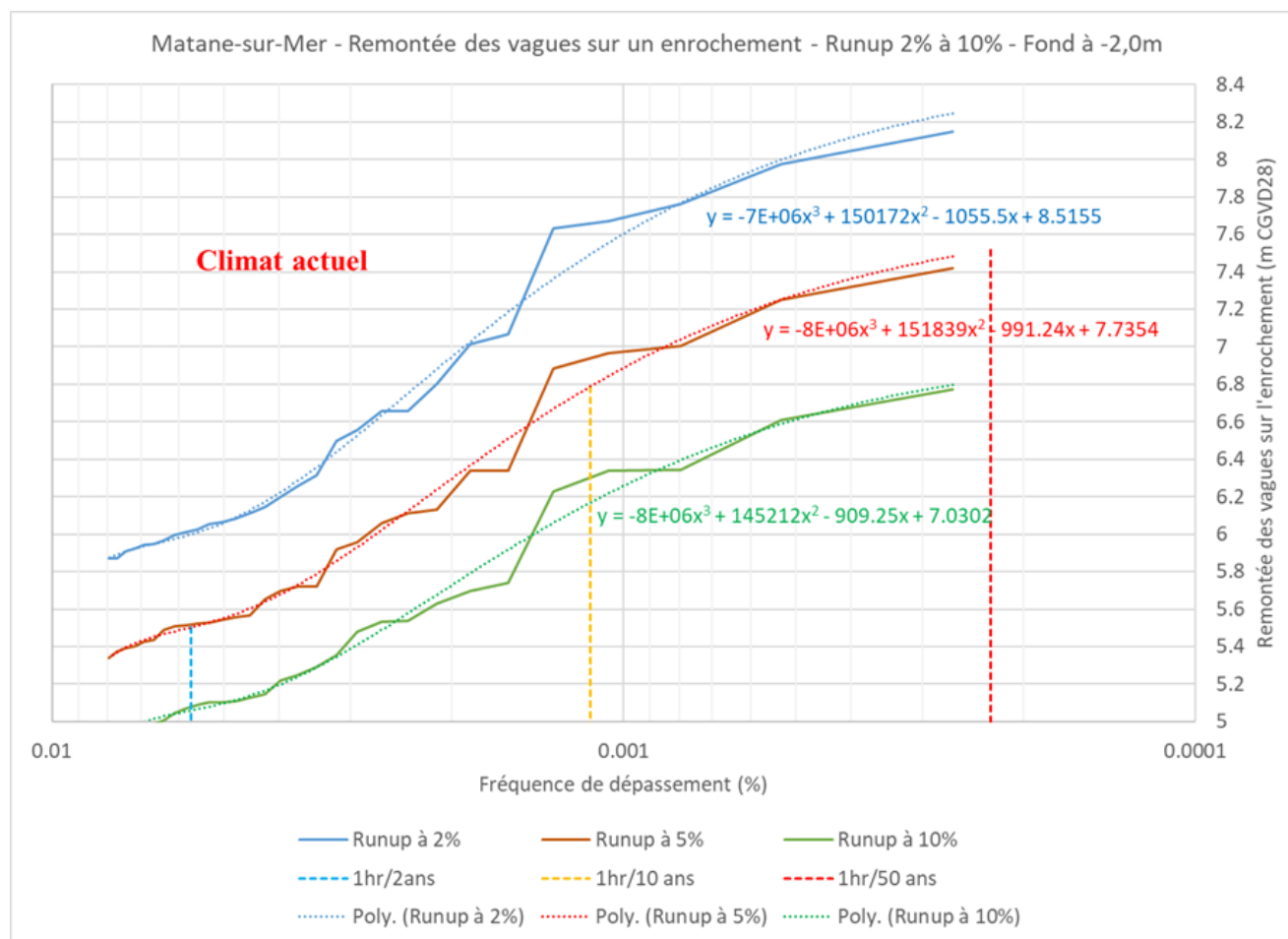


Figure 3.1 Remontée des vagues sur un enrochement à Matane-sur-Mer ($R_{2\%}$, $R_{5\%}$ et $R_{10\%}$ - M2)

3.4 Grosseur des enrochements de protection

Les calculs de grosseur des enrochements requis pour rester stables en fonction des vagues ont été faits dans le cadre de la mise en place d'ouvrages de protection de berge avec une pente de 1,5H/1V. Dans ce cas, ce sont les équations de Hudson (1974) présentées dans le Coastal Engineering Manual¹⁵ qui ont été utilisées.

La dimension des pierres a été calculée à l'aide de l'équation VI-5-115, page VI-5-125 du C.E.M.

La figure 3.2 présente un exemple de calcul de fréquence de dépassement des hauteurs significatives de vagues réfractées devant de la plage de Matane-sur-Mer. Pour une fréquence de dépassement d'une heure en 50 ans, le Hs à retenir serait de 2,65 m selon la régression polynomiale de l'exemple de la figure 3.2. La même analyse s'est faite sur l'ensemble de la zone à l'étude et des Hs variant de 2,4 m (extrémité nord-est) à 2,8 m (extrémité sud-ouest) ont été obtenus. C'est un Hs de 2,75 m qui a été retenu pour un dimensionnement préliminaire des pierres de protection. Comme les plus grandes vagues déferlent avant d'atteindre les enrochements, c'est la hauteur significative des vagues Hs qui a été retenue dans les calculs de grosseur de pierres au lieu de $H_{1/10}$ recommandé pour des enrochements placés en eau profonde.

La recommandation obtenue pour un Hs de 2,75 m est de mettre en place des pierres de 3,6 à 6,2 tonnes (1,3 à 1,55 m de diamètre équivalent) comme pierres de carapace (épaisseur de 2,5 m, crête d'une largeur minimale de 3,7 m). La pierre-filtre requise avec cette carapace est une pierre de 350 à 650 kg (0,6 à 0,75 m de diamètre équivalent) à placer sur 1,3 m d'épaisseur. Le noyau de cet enrochement (si requis) devrait être un tout-venant de 0 à 150 kg (0 à 0,45 m de diamètre équivalent).

¹⁵ C.E.M. Part VI, Change 3 (Sep 11), Table VI-5-22, page VI-5-73

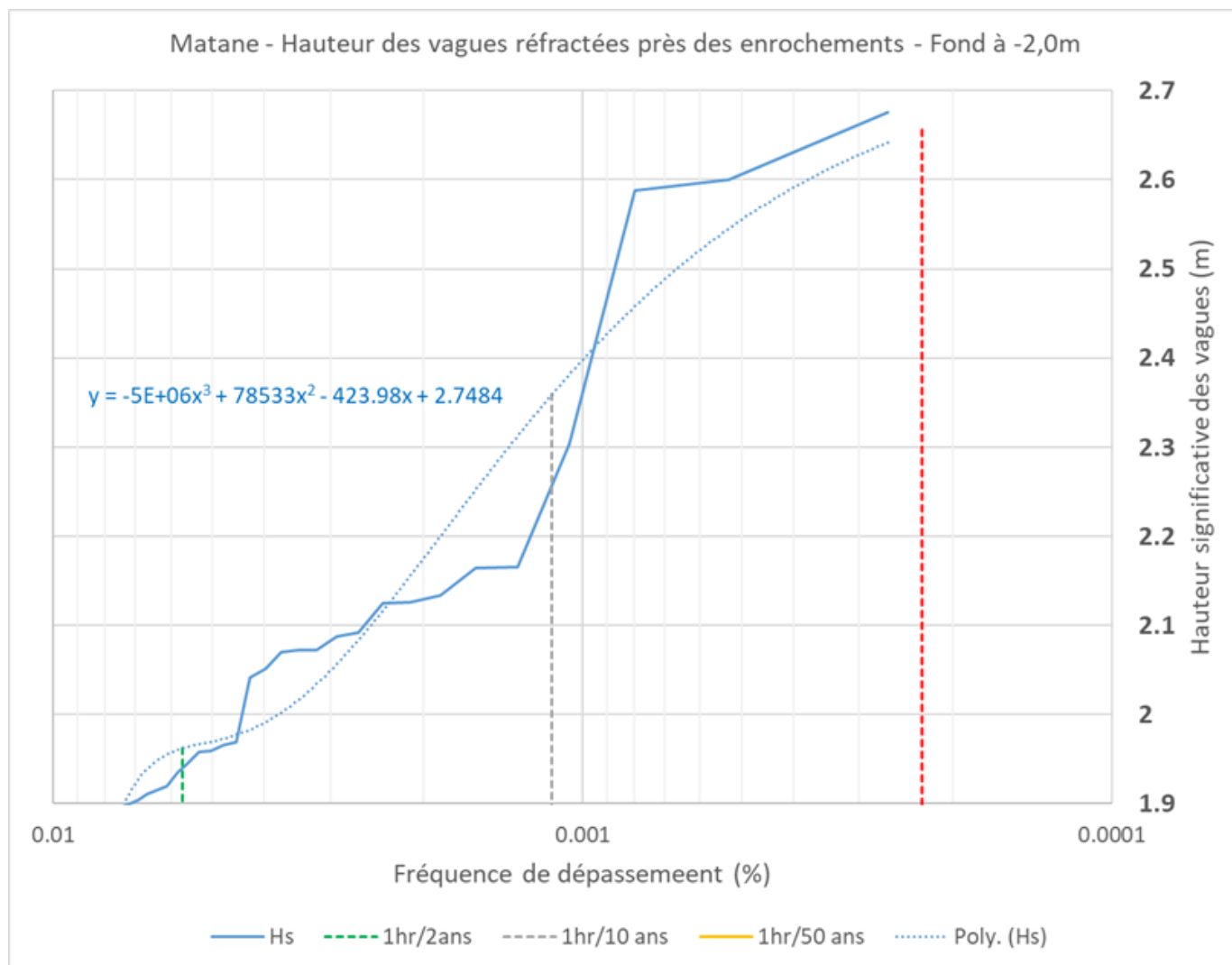


Figure 3.2 Hs des vagues réfractées devant un enrochement à Matane-sur-Mer (fond à -2,0 m)

3.5 Coupes-types d'une protection linéaire en enrochement standard

Les figures 3.3 et 3.4 illustrent une vue en coupe de l'enrochement de protection de berge proposé (la localisation des transects est présentée sur la figure 2.10).

Dans les zones où l'on retrouve des bâtiments, l'élévation de la berge varie généralement entre +4,4 m et +5,0 m. La crête de l'enrochement se retrouverait donc en moyenne à deux mètres et demi (2,5 m) au-dessus de la rive dans ces zones.

La figure 3.4 illustre le cas d'un enrochement sans déménagement de bâtiments alors que la figure 3.5 illustre le cas d'un enrochement impliquant le déménagement de certains bâtiments.

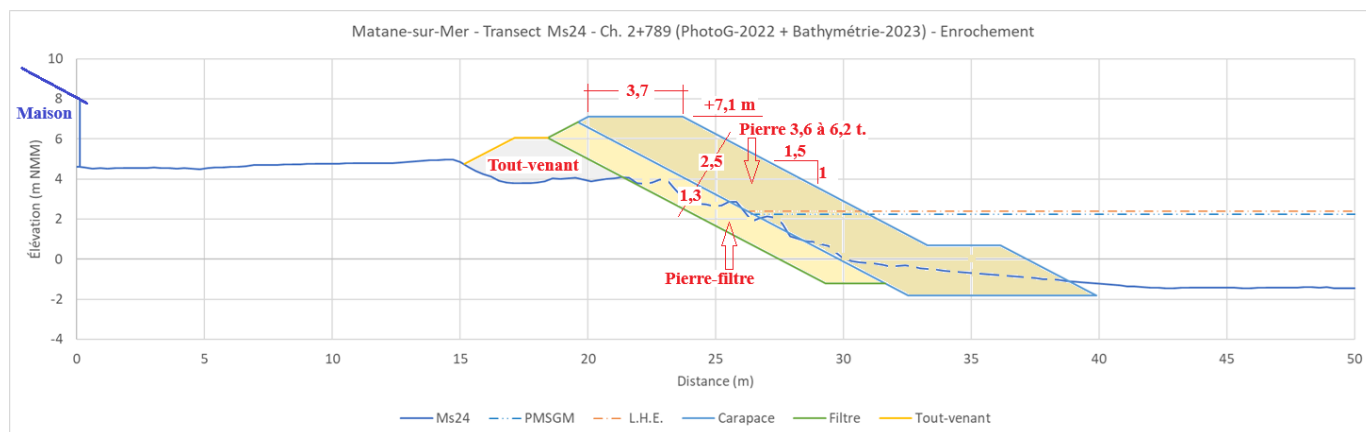


Figure 3.3 Coupe-type d'un enrochement de protection de berge standard à Matane-sur-Mer (Transect Ms24)

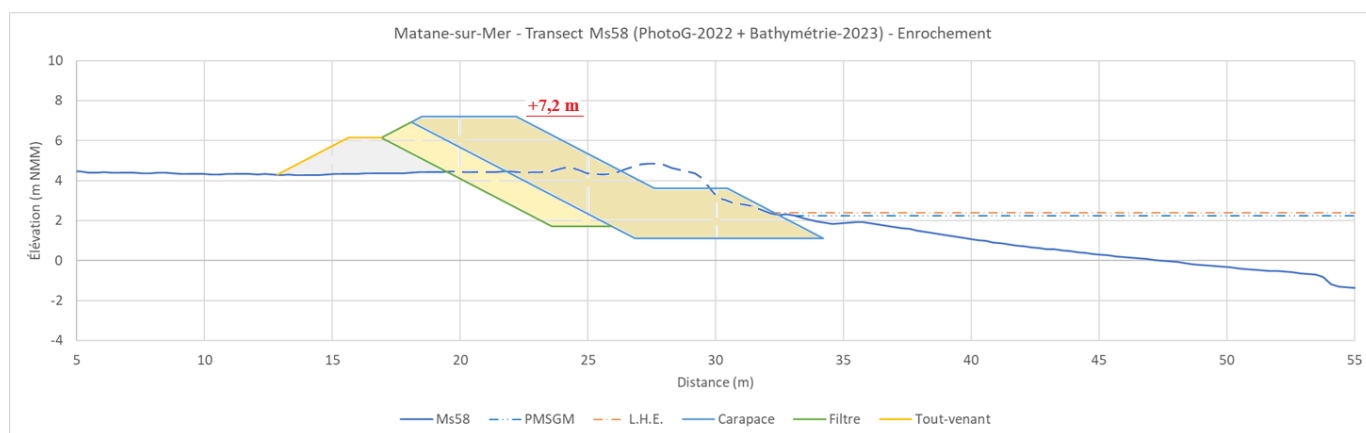


Figure 3.4 Coupe-type d'un enrochement de protection de berge standard à Matane-sur-Mer (Transect Ms58)

3.6 Vue en plan d'une protection linéaire en enrochement standard

La figure 3.5 illustre en plan l'enrochement de protection de berge proposé dans la moitié nord-est de la zone à l'étude, selon l'option avec déplacement de bâtiments.

Il est possible de constater sur la figure que l'enrochement empiète sur certains bâtiments et que l'arrière de l'enrochement se retrouve très près d'autres bâtiments.

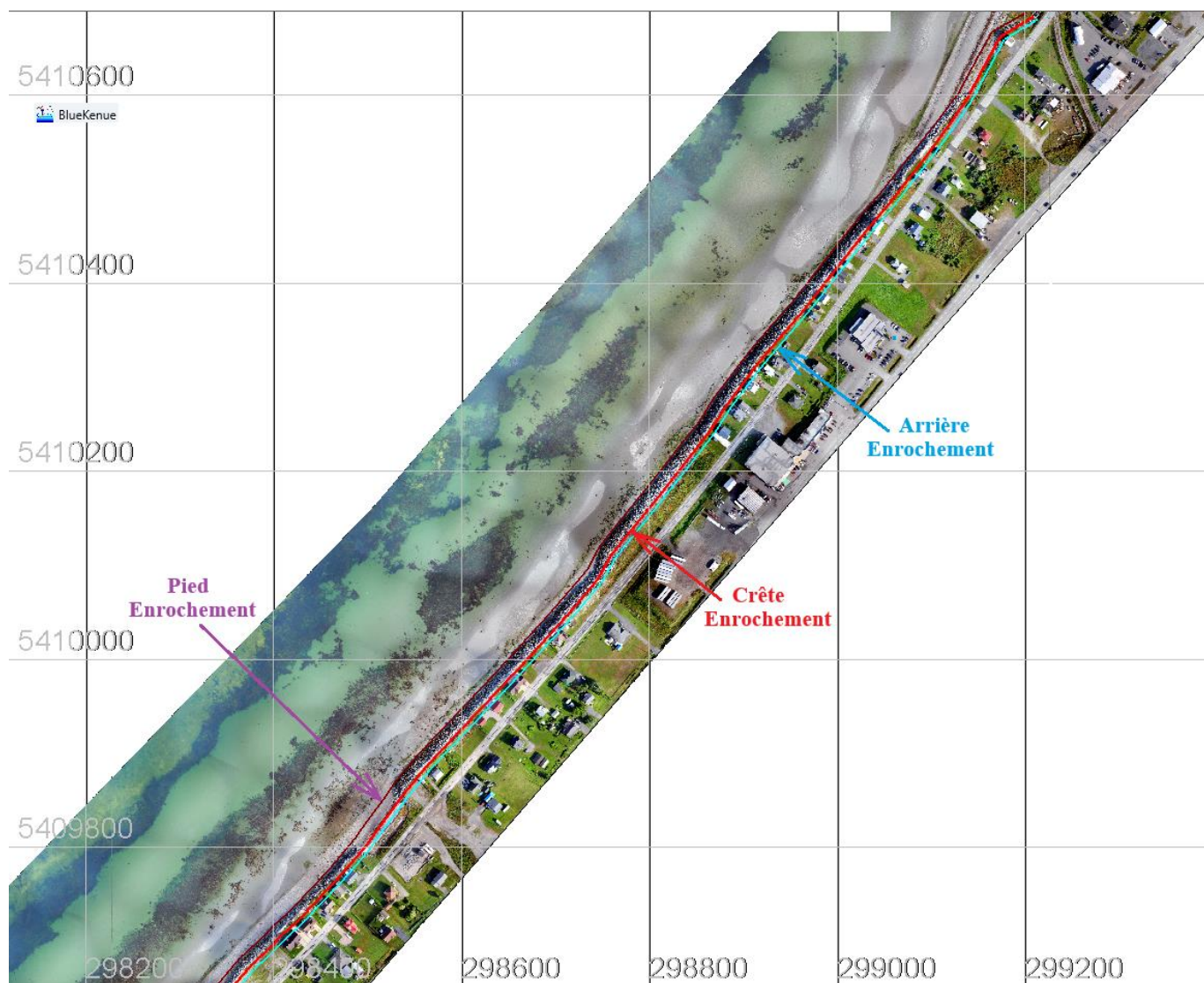


Figure 3.5 Vue en plan d'un enrochement de protection de berge standard à Matane-sur-Mer (moitié est)

3.7 Coupes-types d'une protection linéaire en enrochement surbaissé

Dans le but de limiter l'impact de l'élévation de la crête des enrochements sur la vue vers le fleuve, une option d'enrochement surbaissé a été analysée comme protection des berges de Matane-sur-Mer. La figure 3.6 illustre en coupe une option dans laquelle l'élévation de la crête de l'enrochement est inférieure d'un mètre et la largeur de cette crête est supérieure de 7 m à celles d'un enrochement standard.

Dans les zones où l'on retrouve des bâtiments, l'élévation de la berge varie généralement entre +4,4 m et +5,0 m. La crête de l'enrochement surbaissé se retrouverait donc jusqu'à un mètre soixante-dix (1,70) au-dessus de la rive dans ces zones.

La finalisation du dimensionnement de cette option devrait passer par des essais en modèle réduit qui permettraient de tenir compte du franchissement plus important de cet enrochement par les vagues.

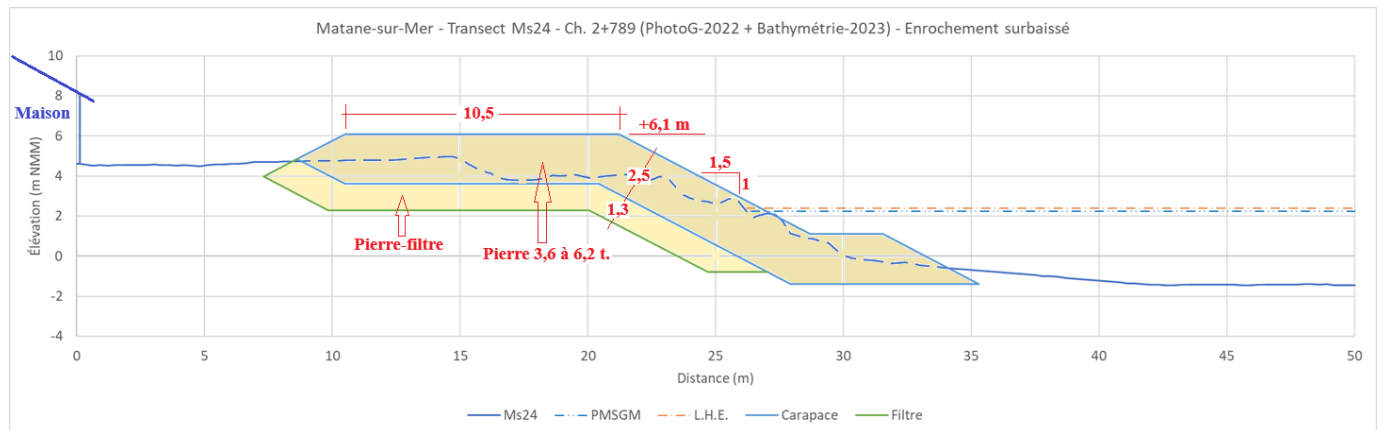


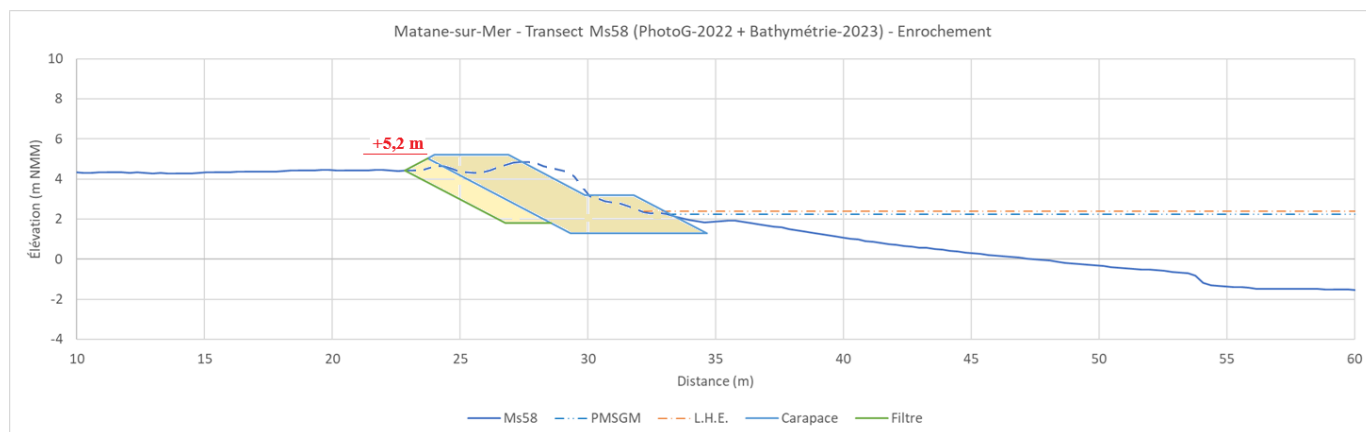
Figure 3.6 Coupe-type d'un enrochement de protection de berge surbaissé à Matane-sur-Mer (Transect Ms24)

3.8 Protection ponctuelle en enrochement sous-dimensionné

Quatre zones de Matane-sur-Mer sont dépourvues de protection de type enrochement (absence, délabrement avancé). Pour trois de ces zones, l'absence de protection met en péril les infrastructures (routes, services) qui se trouvent au droit de ces zones.

À des fins de protection de l'intégrité structurelle des infrastructures publiques, une option d'enrochement limitée aux trois zones actuellement problématiques a été évaluée. Aucune amélioration de la protection contre la submersion du rivage de Matane-sur-Mer n'est acquise à l'aide de ce genre d'intervention, sauf très spécifiquement et de façon partielle à l'endroit des interventions ponctuelles. Des franchissements de l'enrochement devraient être observés au cours de sa vie utile lors des tempêtes.

La figure 3.7 illustre en coupe une option dans laquelle l'enrochement est reculé pour ne protéger (partiellement) qu'une zone actuellement sans protection. L'élévation de crête de +5,2 m retenue correspond à l'élévation des enrochements adjacents. La figure 3.8 illustre en plan l'une des zones actuellement sans protection qui pourrait faire l'objet d'une intervention ponctuelle.



3.9 Protection par brise-lames placé au large de la rive

Une option de brise-lames positionné au large de la rive de Matane-sur-Mer a également été évaluée. La figure 3.9 illustre en coupe cette option qui n'a pas fait l'objet d'un dimensionnement. Il s'agit d'un concept qui évite de détruire directement la plage par empiètement avec des enrochements.

Des calculs sommaires de la résistance aux franchissements par les vagues d'un brise-lames détaché ont été faits pour s'assurer d'une part que ces franchissements ne détruiront pas le brise-lames et d'autre part que ces franchissements ne provoqueront pas une telle agitation du côté de la plage qu'elle induirait l'érosion de celle-ci. En première approximation, une crête de 6 m de largeur à une élévation minimale de +6,5 m pourrait éventuellement répondre à ces deux critères. Les risques d'endommagement de la crête d'un brise-lames ayant une crête à une élévation de +6,5 m sont importants (sans parler des risques induits par les blocs de glaces qui seront projetés sur et par-dessus cette crête). Si le concept d'un brise-lames détaché devait être retenu, il faudrait impérativement le valider avec des modélisations numériques et au strict minimum des essais en canal à houle (comme le canal de l'INRS à Québec).

En fonction de l'exposition d'un brise-lames aussi souvent franchi par les vagues, la grosseur de pierre de carapace retenue de façon préliminaire a été de 3,6 à 6,2 tonnes (1,3 à 1,55 m de diamètre équivalent) comme pierres de carapace (épaisseur de 2,5 m, crête d'une largeur de 6 m). Cette grosseur de pierres devra être validée en modèle réduit à cause des importants franchissements prévus.

La figure 3.9 illustre un concept d'un brise-lames détaché dont l'arrière serait situé à environ 55 m au large de la rive, soit à l'endroit où la pente du fond devient quasi-horizontale.

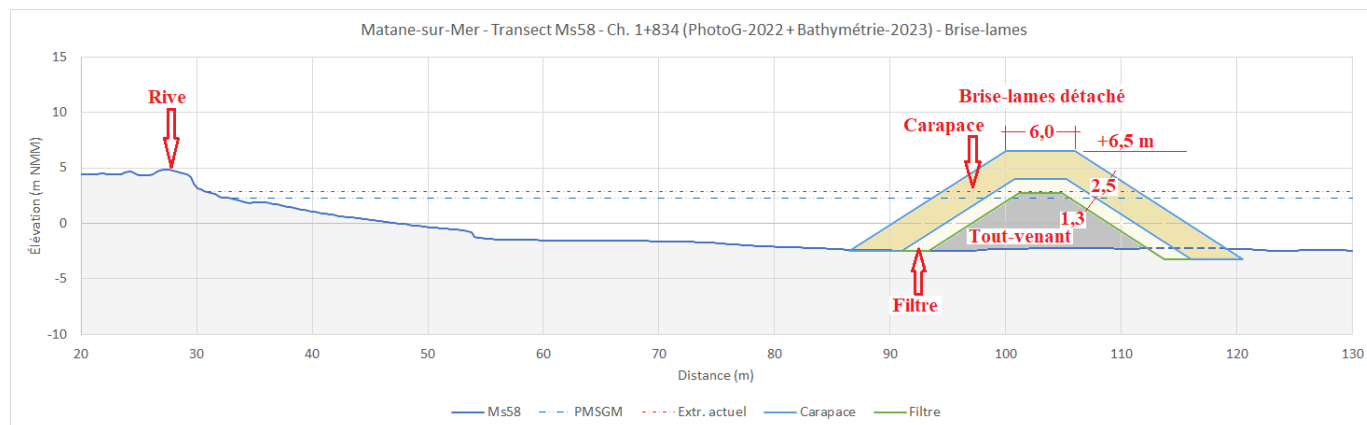


Figure 3.9 Coupe-type d'un brise-lames détaché à 75 m de la rive – Matane-sur-Mer

Le premier inconvénient de cet ouvrage serait son empiètement important sur le milieu hydrique et par conséquent l'importance des impacts environnementaux. Le ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) exigera un ou des **projets de compensation pour la destruction de l'habitat du poisson**. Le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP)

exigera pour sa part des **compensations financières pour l’empiètement** sur le milieu hydrique. Ces deux exigences réglementaires vont représenter des coûts supplémentaires importants pour le projet.

Un deuxième inconvénient serait l’**imposant obstacle visuel** que créerait le brise-lames pour les gens qui se trouvent sur la rive. Dans les zones où l’on retrouve des bâtiments, l’élévation de la berge varie généralement entre +4,4 m et +5,0 m. L’élévation de la crête du brise-lames se retrouverait en moyenne à deux (2) mètres au-dessus de la rive, ce qui aurait pour effet d’obstruer la vue sur le large.

Un troisième inconvénient serait l’effet de barrière ou d’obstacle presque infranchissable pour les usagers de la plage que l’ouvrage créerait entre la rive et le fleuve Saint-Laurent, le brise-lames ayant une hauteur au-dessus du sol de près de neuf (9) mètres et une largeur de 35 mètres. C’est pour ces raisons que les brise-lames détachés sont habituellement envisagés dans des environnements où l’amplitude des marées est plus faible qu’à Matane.

Avant de s’avancer plus loin dans ce concept de brise-lames détaché, il serait requis de réaliser des modélisations hydrodynamiques et hydro-sédimentaires pour s’assurer que les vagues de tempête ne provoquent pas de courants entre la rive et l’arrière du brise-lames ainsi qu’aux extrémités des sections de brise-lames, courants qui pourraient être dangereux pour les usagers de la plage et du plan d’eau et qui pourraient provoquer l’érosion de la plage. Ce genre d’effet néfaste des brise-lames détachés est bien documenté dans la littérature^{16, 17}.

Il faudrait également statuer sur la longueur de ce brise-lames détaché, sur le morcellement du brise-lames en plusieurs sections (ou non). Toutes ces options devraient être évaluées à travers des modélisations hydro-sédimentaires et des modèles réduits qui auraient pour but d’éviter que ce ou ces brise-lames n’engendrent plus d’inconvénients que de bénéfices pour la plage, ses usagers et les infrastructures situées à proximité de la rive.

La figure 3.10¹⁸ illustre les recommandations du England & Wales Environment Agency (EWEA¹⁷) concernant les brise-lames détachés segmentés en milieu macro-tidal. Ce type d’aménagement doit s’accompagner de recharge de plage à cause de l’érosion qui se produit en face des ouvertures entre les segments de brise-lames. Ces aménagements sont reconnus pour provoquer de forts courants, lesquels sont dangereux pour les baigneurs et causent des impacts hydro-sédimentaires importants, entre les portions successives de brise-lames.

¹⁶ https://www.marinespecies.org/introduced/wiki/Applicability_of_detached_breakwaters

¹⁷

https://assets.publishing.service.gov.uk/media/602e9ce28fa8f54334a5a644/_Guidance_for_outline_design_of_nearshore_detached_breakwaters_on_sandy_macro-tidal_coasts.pdf

¹⁸ <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/7/6218>

Figure 1. Tombolo formation in the lee of detached breakwaters.

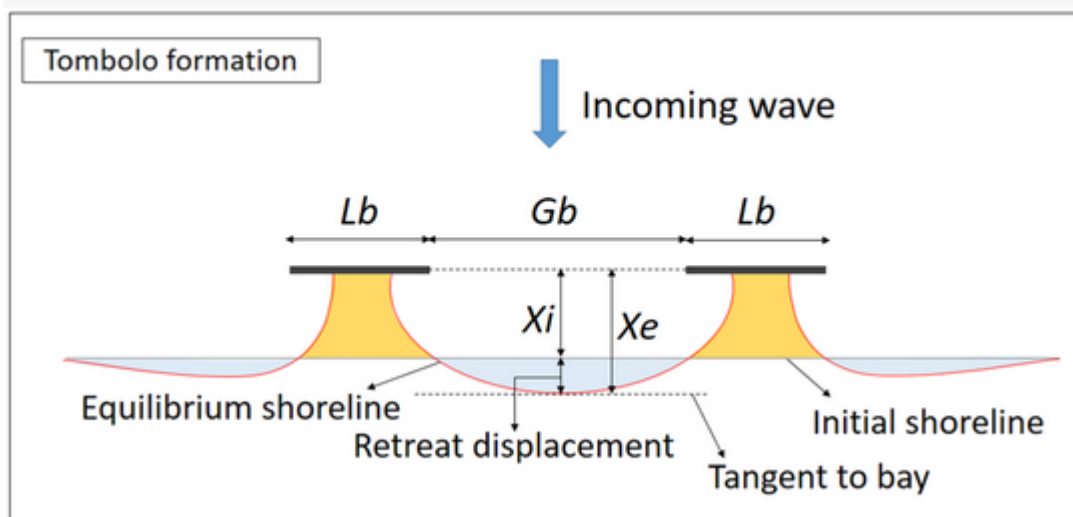


Figure 3.10 Modification d'un rivage derrière un brise-lames détaché segmenté (Source : SCME¹⁸)

Si l'option d'un brise-lames détaché segmenté était retenue, chaque secteur de plage en face des ouvertures entre les segments de brise-lames serait affecté par l'érosion (voir figure 3.10). Ces nouvelles zones d'érosion nécessiteraient de nouvelles interventions pour protéger ces secteurs. Pour limiter ces effets néfastes, les segments de brise-lames détachés successifs devraient présenter un recouvrement pour limiter la propagation des vagues vers la rive, ce qui augmenterait significativement l'empiètement des brise-lames sur le milieu hydrique. De plus, il est plus que probable qu'une recharge de plage devrait être intégrée au projet pour limiter la submersion et l'érosion en cours.

Considérant les éléments d'information présentés plus haut et au regard des objectifs poursuivis par le CPS, cette solution de brise-lames détaché n'est pas recommandée à Matane-sur-Mer.

3.10 Protection par champ d'épis le long de la rive

Une option de protection de la rive de Matane-sur-Mer par champs d'épis aurait pu être envisagée si la plage de Matane-sur-Mer n'était pas en situation de déficit important d'apport sédimentaire. Les infrastructures du nouveau havre de Matane sont venues interrompre un transit sédimentaire qui était déjà insuffisant avant la construction de ce havre.

Une option de champ d'épis le long de la plage de Matane-sur-Mer ne pourrait donc s'envisager sans une importante intervention de recharge de plage pour éviter que la mise en place des épis ne vienne exacerber l'érosion des berges. Une telle option de champ d'épi combiné à une recharge de plage avait été analysée pour le site de Pointe-aux-Outardes. Cette analyse avait conclu que la solution de recharge de plage à l'aide

de matériaux granulaires était la solution la plus économique et celle qui entraînait le moins d'impacts négatifs sur les côtes adjacentes, soit la côte située entre les épis et celle située au sud-ouest de la zone d'étude de Matane-sur-Mer.

Considérant ces éléments d'information et au regard des objectifs poursuivis par le CPS, cette solution de champ d'épis conjuguée à une recharge de plage n'est pas recommandée à Matane-sur-Mer et n'a pas été dimensionnée.

4 Conception d'une protection de berge en riprap

4.1 Démarche de dimensionnement

Le dimensionnement d'une protection des berges de Matane-sur-Mer en riprap s'est fait de manière similaire à celle utilisée pour les enrochements classiques. Les différences principales entre un enrochement classique et un riprap sont :

- La granulométrie des pierres d'un enrochement classique est serrée (entre 0,75 et 1,25 fois le poids médian) alors que la granulométrie d'un riprap est étalée (généralement entre 0,125 et 4 fois le poids médian),
- La pente d'un enrochement classique est raide (généralement 1,5H/1V) alors que la pente d'un riprap est plus douce (4H/1V retenue dans le cas de Matane).

Une note dans le C.E.M. précise qu'un riprap ne se révèle économiquement intéressant par rapport à un enrochement classique que si la hauteur de vague de dimensionnement est inférieure à 1,5 m¹⁹, ce qui n'est pas le cas à Matane-sur-Mer (hauteur de vague de conception de l'ordre de 2,7 m).

Les calculs recommandés par le C.E.M. utilisant les mêmes données de vagues que celles ayant permis de dimensionner l'enrochement classique indiquent qu'il faudrait retenir des pierres de 0,5 à 12 tonnes comme pierres de carapace de ce riprap.

Les calculs utilisant les recommandations de la SEBJ pour les réservoirs hydro-électriques donneraient des pierres de 2 à 6 tonnes, mais il n'est pas vraiment recommandé d'utiliser des équations développées pour des milieux relativement calmes (réservoirs) dans un milieu aussi exposé que les rives de Matane-sur-Mer.

Une seule option de riprap a fait l'objet d'un dimensionnement de ses caractéristiques (élévation de la crête, taille des pierres). Cette analyse a permis de mettre en lumière le peu d'intérêt de ce type d'option par rapport aux autres options d'enrochement classique.

4.2 Remontée des vagues sur un riprap

Les calculs de remontée des vagues sur la rive ont été faits dans le cadre de la mise en place d'ouvrages de protection de berge sous forme d'enrochements avec une pente de 4H/1V. Dans ce cas, ce sont les équations du Coastal Engineering Manual²⁰ qui ont été utilisées. Ces équations sont :

¹⁹ Coastal Engineering Manual, Chapitre VI-5-3-7, page VI-5-84 : *“A limitation on the use of graded riprap is that the design wave height should be less than about 1.5 m. At higher design wave heights uniform-size armor units are usually more economical”*

²⁰ C.E.M. Part VI, Change 3 (28 Sep 11), Équation VI-5-12, page VI-5-18

- $R_{u\%} = H_s * A * \xi_{om}$ lorsque $1 < \xi_{om} < 1,5$
- $R_{u\%} = H_s * B * \xi_{om}^C$ lorsque $1,5 < \xi_{om}$

Où :

H_s est la hauteur significative des vagues,

ξ_{om} est le paramètre de déferlement (surf similarity parameter),

A, B et C sont des coefficients dépendant du pourcentage de dépassement de la remontée.

Les calculs ont été faits pour des remontées $R_{2\%}$, $R_{5\%}$, et $R_{10\%}$. Compte tenu de la proximité de certaines maisons près de l'enrochement, il serait recommandé de limiter à 5% le franchissement des vagues et il n'est pas recommandé d'accepter plus que 10% de franchissement lors des événements de tempêtes accompagnées de hauts niveaux d'eau. Une analyse des résultats obtenus pour $R_{5\%}$, et $R_{10\%}$ a été faite tout au long de la zone afin d'arriver à une recommandation d'élévation de la crête du riprap.

Si la mise en place d'un riprap était retenue comme solution de protection des berges de Matane-sur-Mer, il serait requis de valider les quantités d'eau franchissant les enrochements par des modèles comme X-Beach avant de finaliser l'élévation de la crête de ce riprap.

La figure 4.1 présente un exemple des résultats des calculs de remontée des vagues sur un riprap pour la zone centrale de la plage en climat actuel (secteur du point M2 - fond à l'élévation -2,0 m CGVD28). Pour une remontée limitant à 5% le franchissement, il faudrait dans ce cas considérer une élévation de crête des enrochements de +5,7 m CGVD28. L'élévation recommandée pour la crête passerait à +5,4 m pour une limite de franchissement de 10%. Des calculs similaires ont été faits pour les différents secteurs en fonction des données de vagues et des profondeurs d'eau au large de la plage.

Les prévisions de hausse relative des niveaux d'eau due aux changements climatiques à Matane sont de 0,30 m en 50 ans (voir chapitre 2.3). En considérant la vie utile d'une protection en enrochement de 50 ans, une remontée moyenne des niveaux d'eau de 0,25 m a été prise en compte de façon à obtenir une évaluation raisonnable de l'élévation de la crête du riprap. La recommandation d'élévation de la **crête d'un riprap** protégeant le rivage de Matane-sur-Mer serait donc de **+5,7 m** (extrémité nord-est) à **+6,2 m** (extrémité sud-ouest) CGVD28. Cette recommandation d'élévation de crête d'enrochement fait en sorte que des franchissements du riprap devraient être observés au cours de sa vie utile (hausse progressive des niveaux d'eau, tempêtes de période de retour supérieures à 50 ans). Ces franchissements par les vagues devraient avoir des conséquences limitées pour les tempêtes de conception (période de retour de 50 ans).

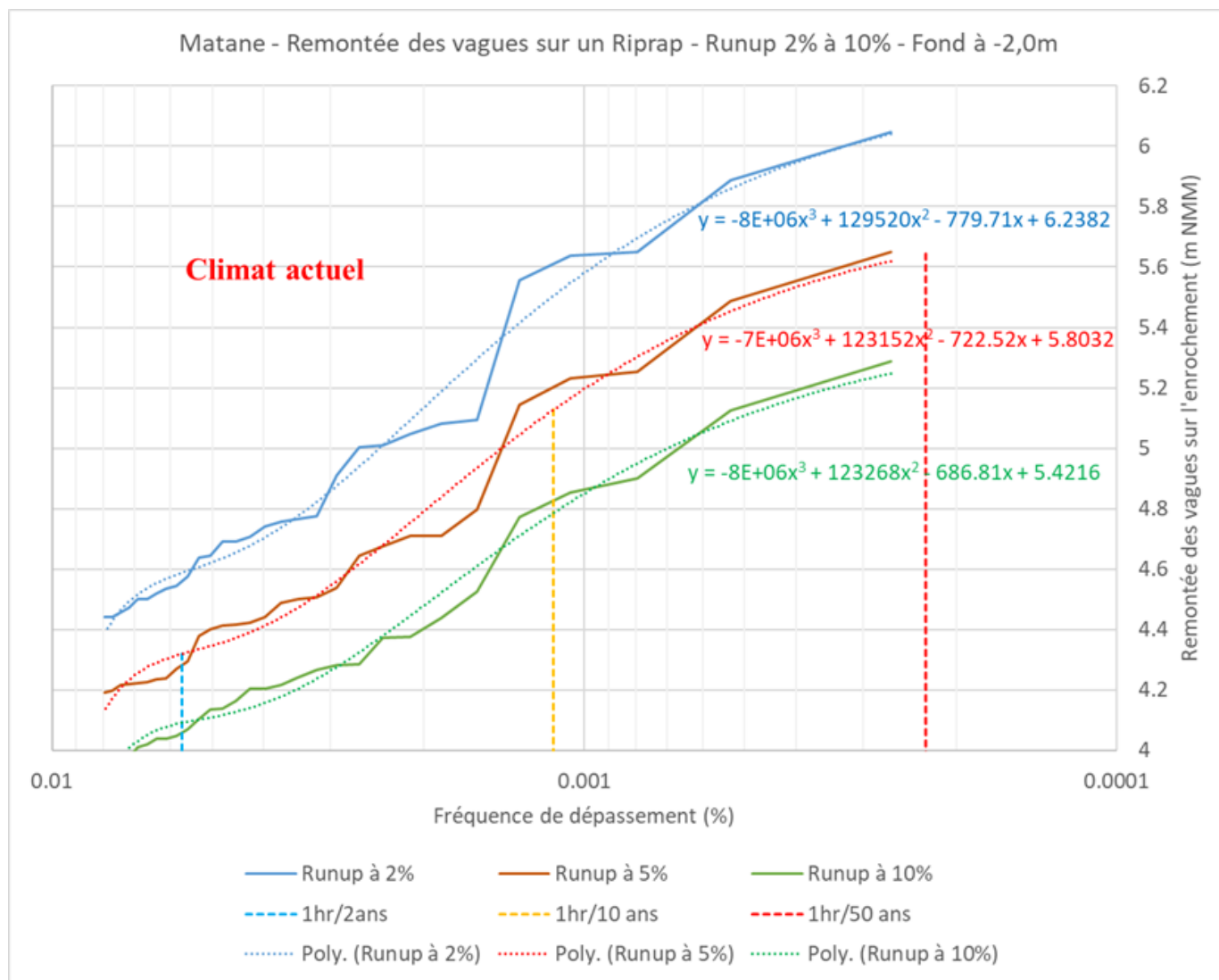


Figure 4.1 Remontée des vagues sur un riprap à Matane-sur-Mer ($R_{2\%}$, $R_{5\%}$ et $R_{10\%}$ - M2)

4.3 Coupes-types d'une protection linéaire en riprap

Les figures 4.2 et 4.3 illustrent en coupe un riprap de protection de berge recommandé (la localisation des transects est présentée sur la figure 2.10).

Dans les zones où l'on retrouve des bâtiments, l'élévation de la berge varie généralement entre +4,4 m et +5,0 m. La crête du riprap se retrouverait donc à en moyenne 1,5 m au-dessus de la rive dans ces zones. Elle engendrerait donc un obstacle visuel légèrement moindre que celui de la variante d'enrochement surbaissé évaluée.

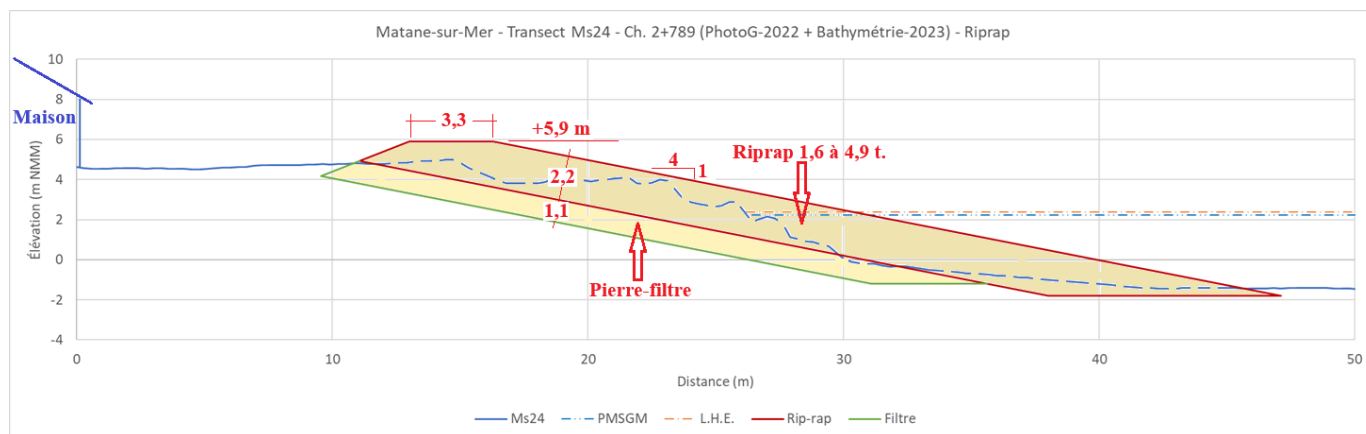


Figure 4.2 Coupe-type d'un riprap de protection de berge à Matane-sur-Mer (Transect Ms24)

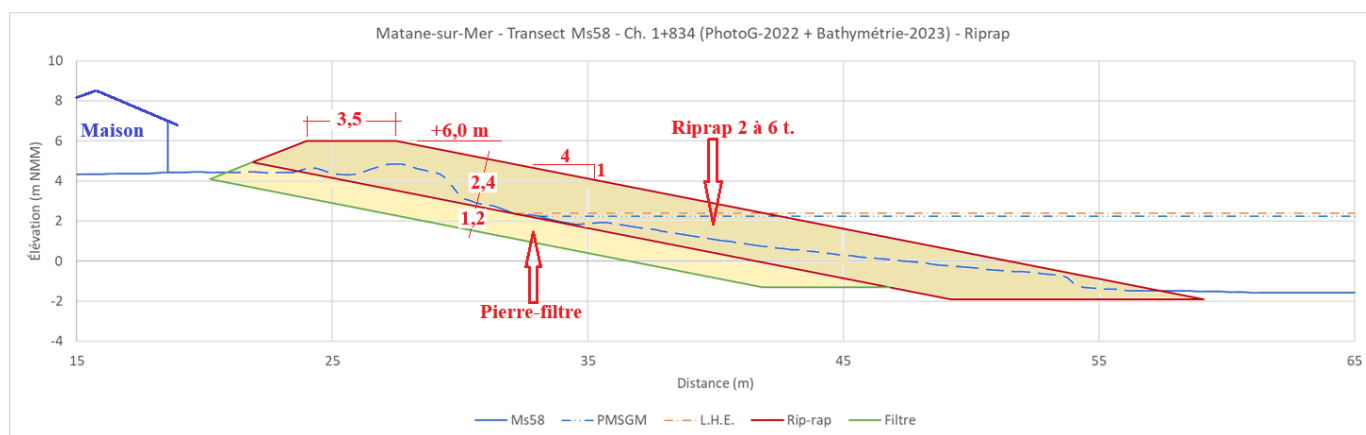


Figure 4.3 Coupe-type d'un riprap de protection de berge à Matane-sur-Mer (Transect Ms58)

5 Conception d'une protection de berge en recharge de plage

5.1 Série temporelle de vagues et de niveaux d'eau

La série temporelle synchrone de vagues et de niveaux d'eau obtenue à partir des données disponibles (modélisation des vagues et niveaux d'eau de Lasalle|NHC – 1980-2022) a été utilisée pour calculer la remontée des vagues sur une recharge de plage (voir chapitre 2.4). Une plage a une pente plus douce et une largeur plus grande qu'un enrochement, ce qui permet d'éloigner la zone de déferlement de la rive et d'atténuer plus efficacement le déferlement des vagues et leur remontée sur la plage. Ainsi, une hauteur de crête de recharge de plage peut être plus basse que celle d'un enrochement et limiter aussi efficacement le franchissement par les vagues de tempête.

Les prévisions de hausse relative des niveaux d'eau due aux changements climatiques à Matane-sur-Mer sont de 0,30 m en 50 ans (voir chapitre 2.3). En considérant la vie utile d'une protection en recharge de plage de 30 ans, une remontée moyenne des niveaux d'eau de 0,20 m a été prise en compte de façon à obtenir une évaluation raisonnable de l'élévation de la crête de la recharge de plage (le même raisonnement a été appliqué à la crête de l'enrochement – Chapitre 3.2). La série temporelle synchrone de 1980 à 2022 a été modifiée en ajoutant ces 20 cm à tous les niveaux d'eau de la série pour simuler un régime de vagues et de niveaux d'eau en conditions futures.

5.2 Remontée des vagues sur une plage

La remontée des vagues sur les rives de Matane-sur-Mer a été calculée pour chacun des 4 000 ensembles de valeurs de la série temporelle synchrone de vagues et de niveaux d'eau les plus susceptibles de provoquer une forte remontée des vagues sur la rive. Ces calculs ont été effectués pour :

- 4 points d'extraction des données de vagues (point M1 à M4 – voir figure 2.5),
- 6 pentes de plage (de 8% à 25%),
- 5 configurations de rivage (élévation du fond au déferlement de -1,7 à -2,7 m CGVD28),
- Chacune des 4 équations retenues pour calculer la remontée des vagues (Poate 2016, Stockdon 2006 générale, Ruggiero 2001 pour une remontée à 2% - Battjes 1971 ajustée pour la remontée maximale).

De plus, ces calculs ont été faits en conditions actuelles (série temporelle 1980-2022) et en conditions futures (2053). Pour ce faire, les niveaux d'eau de la série temporelle ont été rehaussés de 20 cm afin de prendre en compte le rehaussement moyen du niveau marin relatif jusqu'en 2053.

Les résultats de chacun de ces calculs ont ensuite été classés par ordre décroissant pour définir les récurrences des événements extrêmes (50 ans) de remontée des vagues sur le rivage. Pour la partie centrale

de la plage, la figure 5.1 illustre les résultats obtenus pour l'équation de Stockdon-2006 (runup à 2%) en conditions actuelles (fond à -2,5 m) et la figure 5.2 ceux pour l'équation de Poate-2016 (runup à 2%) en conditions actuelles (fond à -2,7 m). La récurrence d'une heure en 50 ans correspond à la ligne pointillée verticale à droite sur les figures. La régression polynomiale du 3^e degré a été retenue comme plus représentative des tendances indiquées par les courbes. Ce choix évite d'exagérer les valeurs extrêmes (qui seraient obtenues par exemple avec la régression logarithmique).

La pente de 25% correspond à la pente de construction de la recharge. Cette pente est transitoire et, normalement, ne devrait pas être utilisée dans le dimensionnement de la crête de la recharge de plage. Par contre, cette information permet de visualiser le risque associé à une tempête importante qui frapperait la recharge peu de temps après sa mise en place.

La pente de 15% correspond à la pente de la partie supérieure de la recharge à l'équilibre avec un D_{50} des matériaux granulaires de 15 mm.

La pente de 12% correspond à la pente moyenne à l'équilibre de la partie de la recharge frappée par les vagues lors d'événements de tempête accompagnés de hauts niveaux d'eau (D_{50} de 15 mm).

L'équation de Poate 2016 a spécifiquement été développée dans le contexte de plages de gravier, ce qui n'est pas le cas des autres équations. Les résultats de cette équation ont été privilégiés par rapport aux autres résultats puisque les matériaux envisagés pour la recharge seraient relativement grossiers ($D_{50} = 15$ mm).

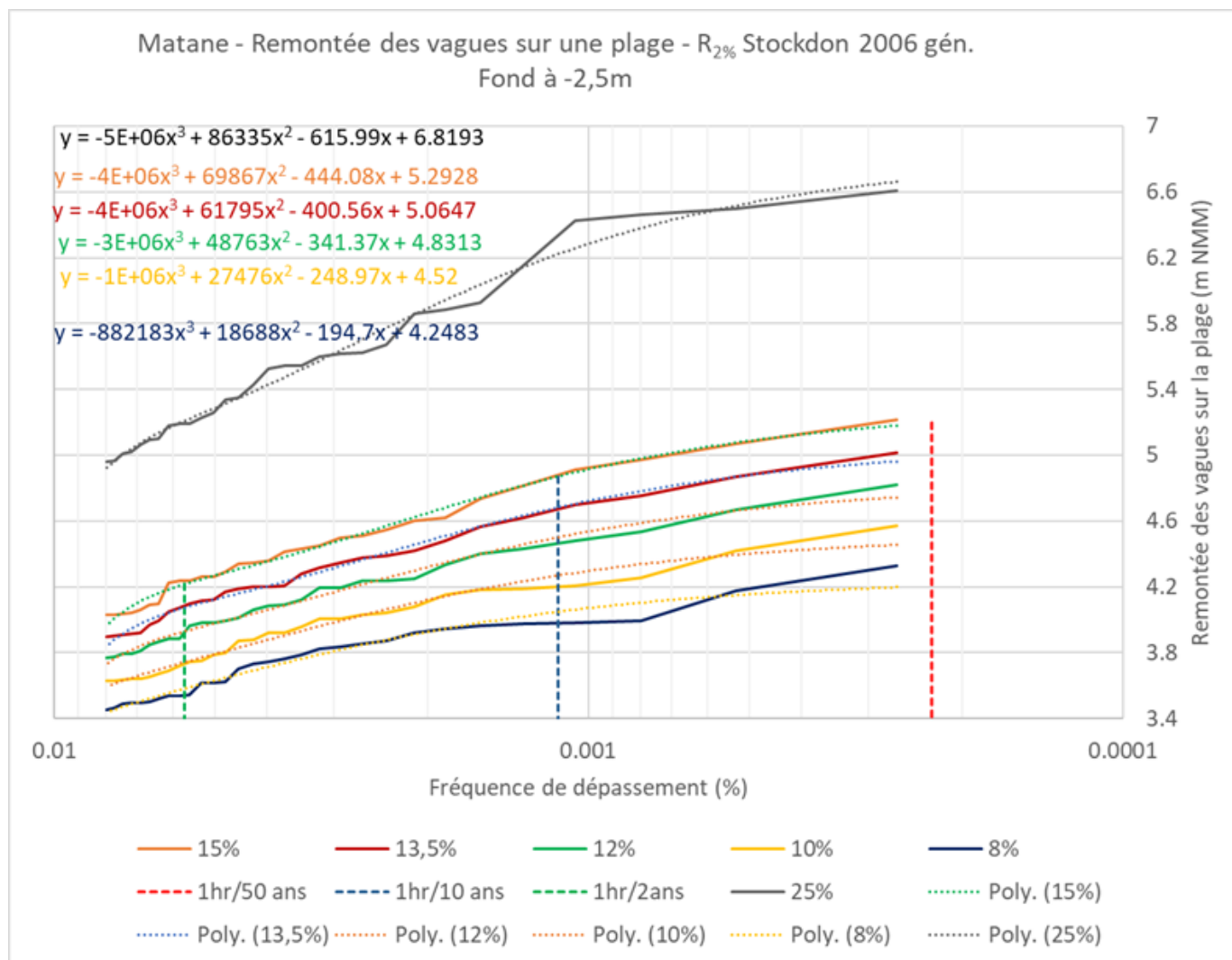


Figure 5.1 Remontée des vagues M2 – R_{2%} Stockdon-2006 – Conditions actuelles – Fond à -2,5 m

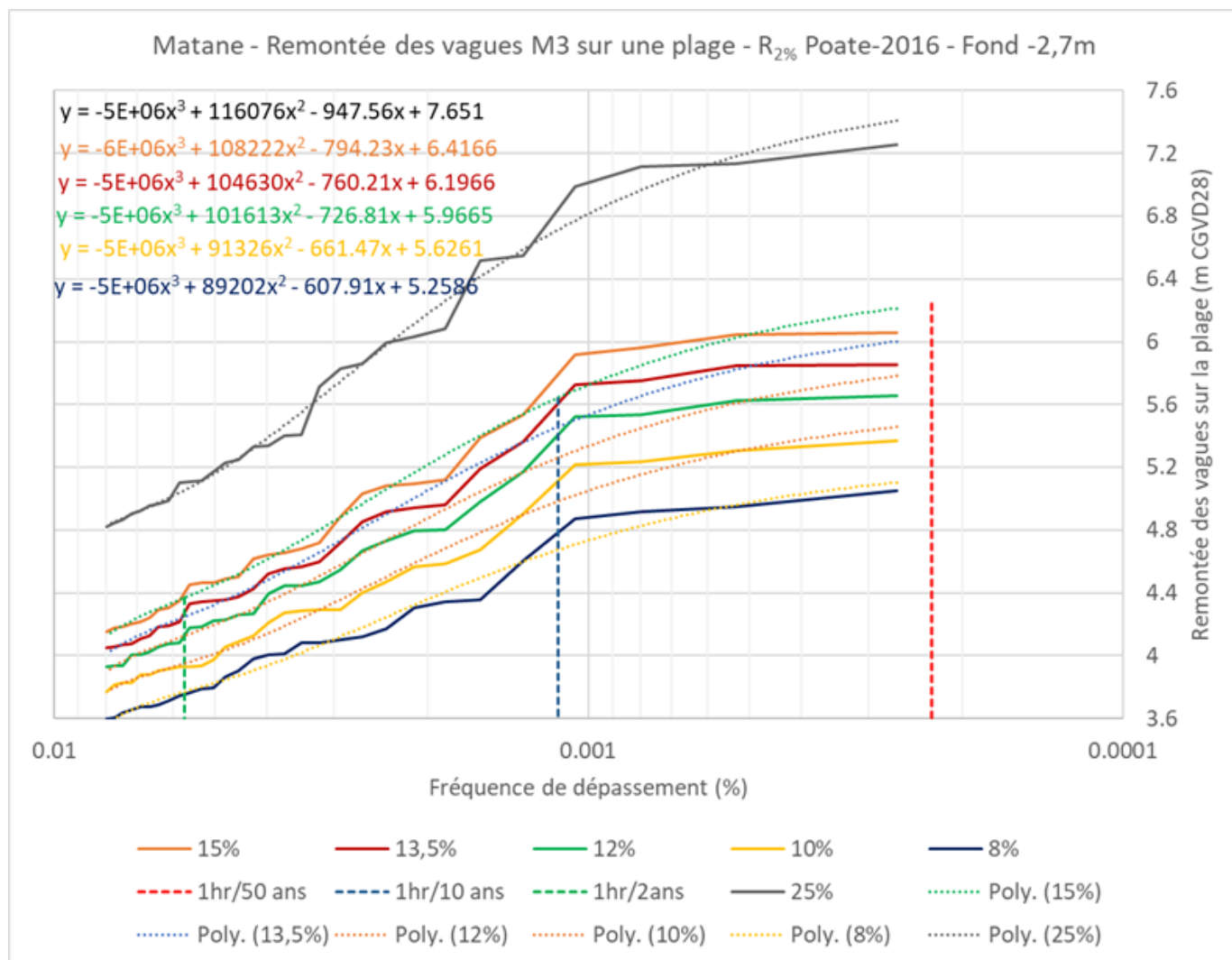


Figure 5.2 Remontée des vagues M3 – R_{2%} Poate-2016 – Conditions actuelles – Fond à -2,7 m

La figure 5.3 (fond à -2,7 m - Actuel) présente les résultats de calcul de remontée des vagues pour une fréquence de dépassement de 1 heure / 50 ans pour les équations de Poate, Stockdon et Ruggiero (R_{2%}) ainsi que ceux pour l'équation de Battjes (R_{max}) pour la rive à protéger. Des vérifications ont été faites pour des élévations différentes (fond de -1,7 à -2,7 m) et fournissent des résultats similaires.

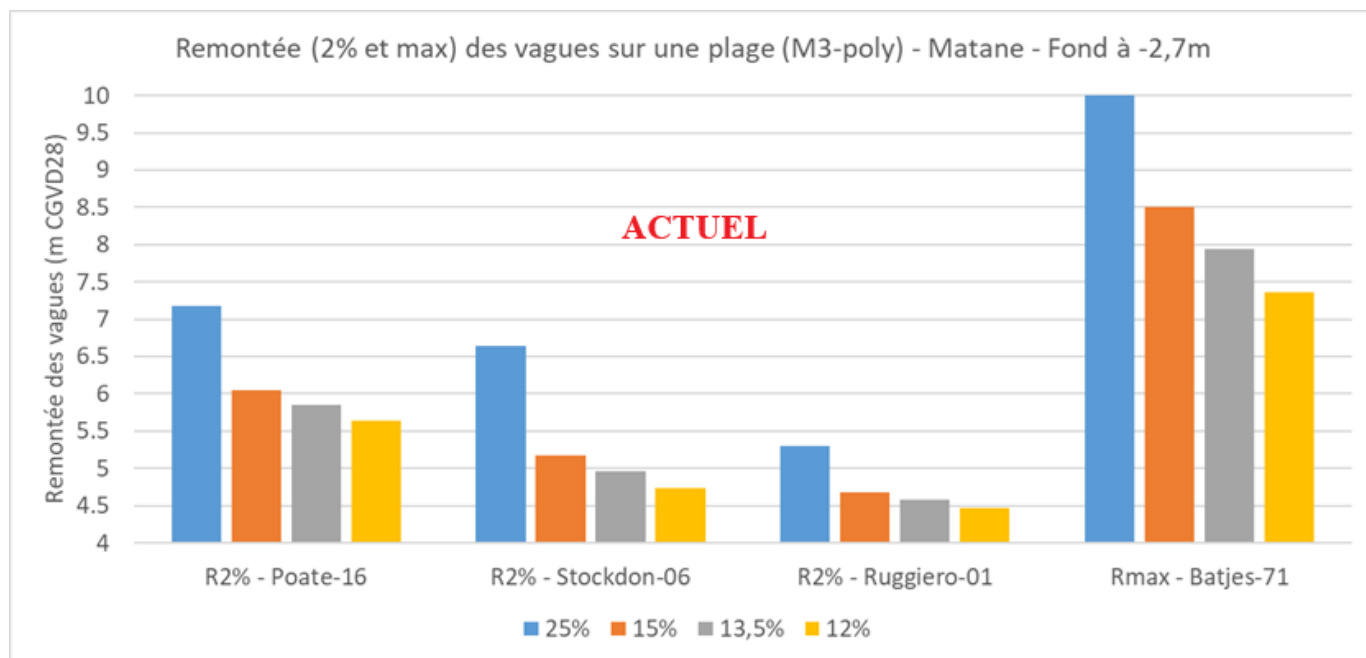


Figure 5.3 Résultats des calculs de remontée des vagues sur une plage – Matane-sur-Mer – Fond à -2,7 m (climat actuel)

Il est important de noter que si une tempête se produit peu de temps après la mise en place de la recharge de plage et que c'est sur une pente de 25% que se produit la remontée des vagues, du franchissement de la crête de la recharge sera observé. C'est ce qui s'est passé sur la recharge de plage du site de La Grave (Îles-de-la-Madeleine) lorsque la tempête Fiona l'a frappé six mois après la fin des travaux. Des dommages à la crête de la nouvelle recharge pourraient être constatés si un tel événement se produisait.

Le dimensionnement de la recharge de plage se fait en considérant une plage ayant atteint progressivement sa pente d'équilibre lorsqu'une première tempête importante se produit. L'atteinte de la pente d'équilibre prenant normalement de 2 à 3 ans. Un risque subsiste que les critères de conception retenus soient dépassés avant l'atteinte de la pente d'équilibre de la plage. La recommandation d'utiliser les résultats de remontée des vagues à 2% pour une pente de 15% ne garantit donc pas que des franchissements de la recharge dépassant les 2% de conception ne se produiront pas lors d'un événement de tempête frappant la recharge quelques mois après sa construction. **La figure 5.3 indique clairement que pour se prémunir contre tout franchissement excessif tout au long de la vie de la recharge, des élévations de crête significativement supérieures à la recommandation devraient être retenues.**

De plus, le régime des tempêtes ne semble plus aussi prévisible qu'auparavant. Plusieurs tempêtes de périodes de retour supérieures à 50 ans (période de retour retenue pour le dimensionnement) ont frappé certaines côtes du Québec depuis 2010. Un suivi régulier de la recharge de plage est recommandé pendant

les 5 à 10 ans suivant sa mise en place de façon à intervenir en cas de détérioration de la crête de la recharge ou de mouvement important des matériaux granulaires.

Il est également recommandé de réviser les critères de conception de la recharge de plage à la fin de la période « sans entretien » de trente ans, en vue d'optimiser l'intervention de la recharge d'entretien et de s'assurer que les paramètres de conception n'ont pas varié de façon trop importante depuis la conception originale (niveaux d'eau et régime de tempêtes).

5.3 Vues en coupe de la recharge de plage

Selon les résultats qui incluent la hausse des niveaux d'eau avec les changements climatiques, les recommandations d'élévation de la crête de la recharge passent de +5,9 m à l'extrémité est à +6,5 m à l'extrémité ouest du secteur à l'étude.

Dans les zones où l'on retrouve des bâtiments, l'élévation de la berge varie généralement entre +4,4 m et +5,0 m. La crête de la recharge de plage se retrouverait donc en moyenne un mètre et demi (1,5 m) au-dessus de la rive dans ces zones.

La figure 2.10 présente la position des différents transects utilisés lors du dimensionnement de la recharge de plage.

Les figures 5.4 et 5.5 présentent des vues en coupe de la recharge de plage au transect Ms30 à Matane-sur-Mer.

- La figure 5.4 présente l'option d'une recharge sans interférence avec les bâtiments actuellement en place,
- La figure 5.5 présente une recharge avec déménagement des bâtiments et enlèvement des enrochements de protection présents sur la rive.

Le déplacement des bâtiments et le recul de la recharge vers l'intérieur des terres permet de diminuer significativement les quantités de matériaux granulaires requis par la recharge et de diminuer légèrement l'élévation de la crête de la recharge.

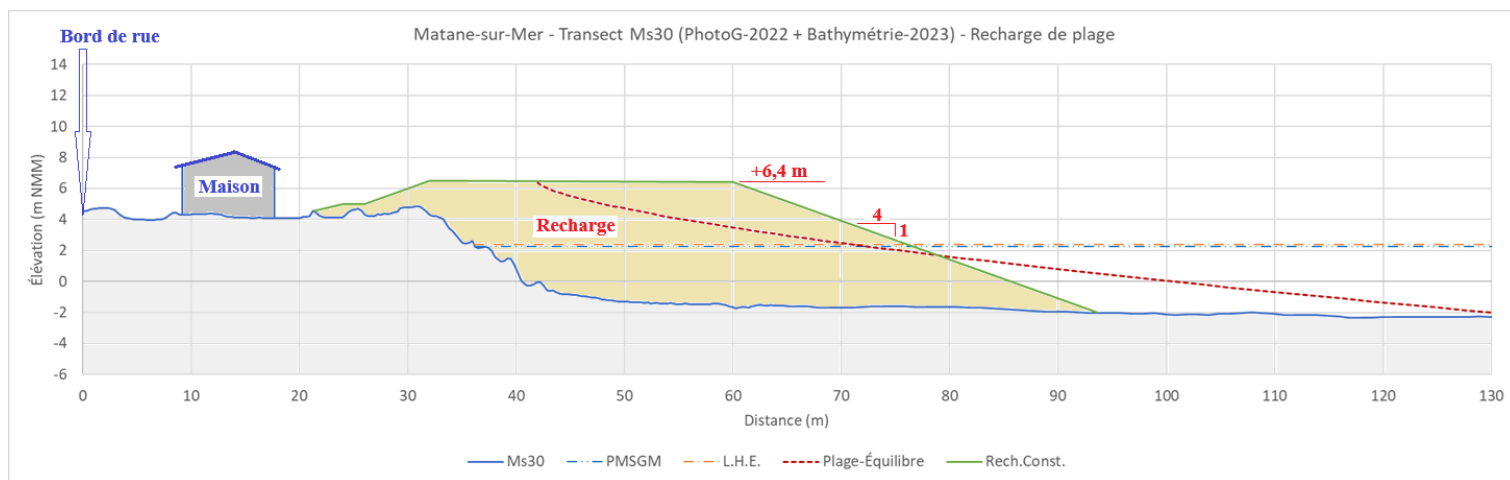


Figure 5.4 Vue en coupe de la recharge de plage de Matane-sur-Mer (Transect Ms30 – Maintien en place des bâtiments)

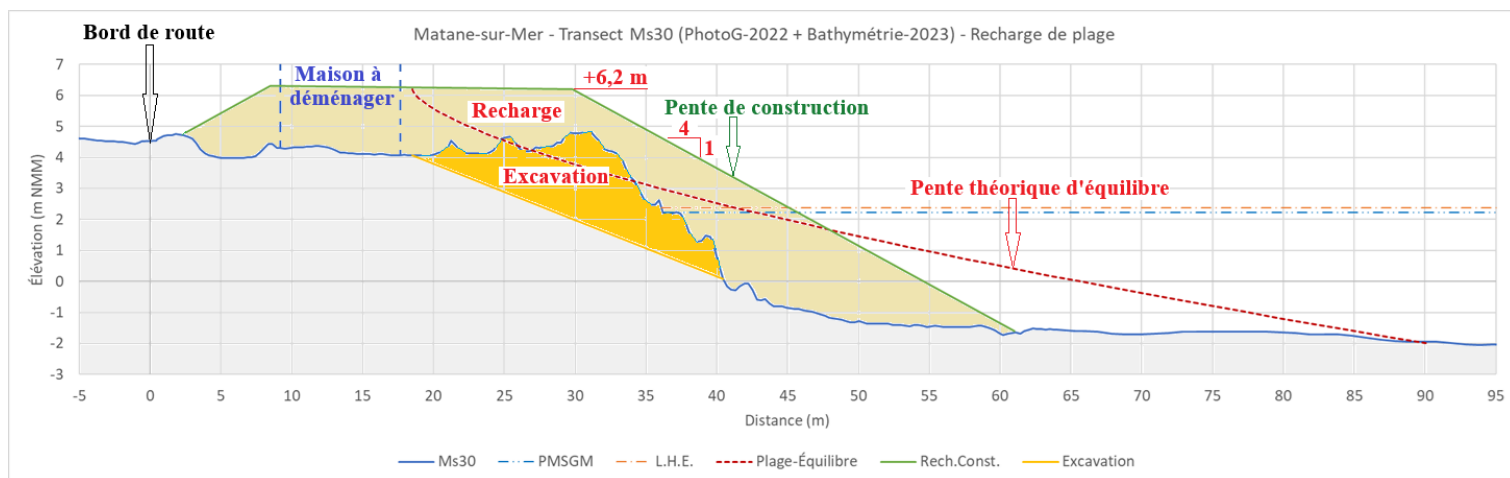


Figure 5.5 Vue en coupe de la recharge de plage de Matane-sur-Mer (Transect Ms30 – Déménagement des bâtiments)

5.4 Recharge avec déménagement des bâtiments

La figure 5.6 présente en plan l'étendue de l'option de recharge de plage avec déplacement des bâtiments dans la moitié nord-est de la zone à l'étude. L'arrière de la recharge arrive par endroits à un mètre du bord de la rue.

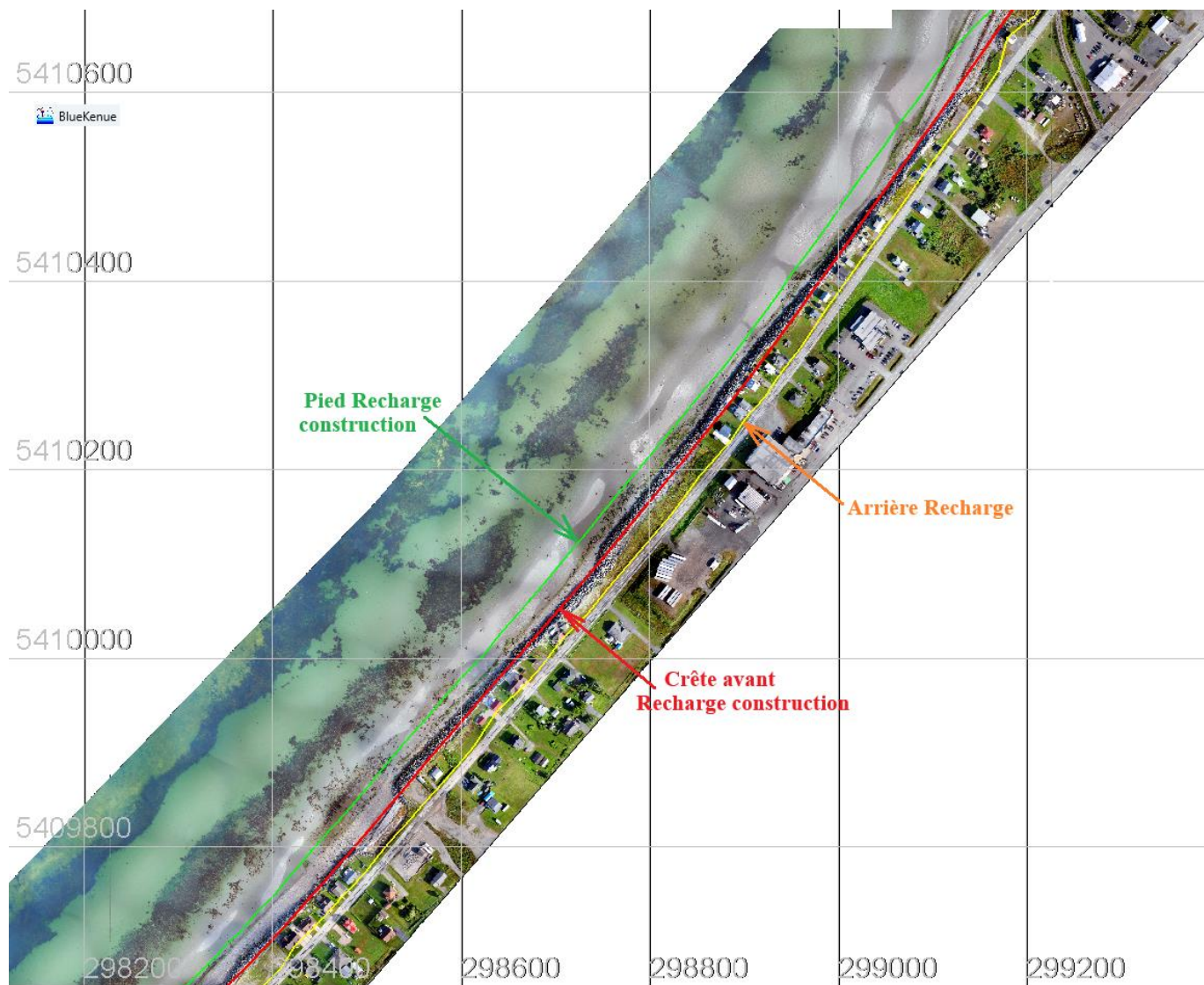


Figure 5.6 Vue en plan d'une recharge de plage dans la partie nord-est de Matane-sur-Mer

À cause de la direction préférentielle du transit des sédiments sur la plage du nord-est vers le sud-ouest, la mise en place de la recharge de plage va induire un apport de sédiments dans le secteur à l'ouest de la zone protégée par la recharge. Avec la granulométrie relativement grossière retenue pour la recharge de plage, il faut s'attendre à ce que cet apport soit marginal.

5.5 Évolution temporelle de la recharge de plage

Aucune modélisation à long terme de l'évolution de la recharge de plage sur un horizon de 30 ou 50 ans n'a été réalisée. Si le concept de recharge de plage est retenu pour la protection des berges de Matane-sur-Mer, cette modélisation à long terme sera requise pour s'assurer que le transit préférentiel des matériaux granulaires du nord-est vers le sud-ouest n'affectera pas indument la durabilité de la protection de berge.

Étant donné le transit littoral majoritairement orienté vers le sud-ouest, il faut s'attendre à un déplacement des sédiments de la recharge de plage vers le secteur à l'ouest de Matane-sur-Mer. Les modélisations hydro-sédimentaires auraient pour but de quantifier la perte de sédiments de la recharge avec les années, de traduire cette perte en avancée de la crête en vue de compenser cette perte, puis de vérifier que la géométrie de recharge proposée à la construction respecte le critère de durabilité minimale de trente ans.

6 Options de protection des berges envisagées

6.1 Enrochement classique

La mise en place d'un enrochement le long des berges du secteur de Matane-sur-Mer a été envisagée dans la continuité des ouvrages de protection de berge déjà en place.

Pour une pente des enrochements de 1,5H/1V, une **élévation de crête variant de +6,9 m** (extrémité nord-est) à **+7,4 m** (extrémité sud-ouest) CGVD28 est recommandée en première analyse (remontée des vagues R_{5%}, base de données horaires de vagues et niveaux d'eau de Lasalle|NHC de 1980 à 2022 – voir chapitre 2.4), ce qui correspond souvent à une crête située à près de **trois mètres au-dessus de la rive actuelle** de Matane-sur-Mer (voir figures 3.4 et 3.5).

Il est important de noter que ce choix d'élévation de crête, même s'il peut paraître haut par rapport aux enrochements existants à Matane-sur-Mer, est loin d'être trop sécuritaire. D'une part, des franchissements de cette crête vont se produire lors d'événements exceptionnels au cours desquels de hauts niveaux d'eau seront accompagnés de fortes vagues, ce qui pourrait affecter certaines résidences placées beaucoup trop près de la rive. D'autre part, les changements climatiques vont influencer les niveaux d'eau à la hausse (+30 cm en 50 ans – voir chapitre 2.3) et ils pourraient modifier le régime des vagues (par exemple avec une augmentation de la fréquence des fortes tempêtes frappant les rives du Québec).

Les calculs faits avec les données disponibles indiquent une hauteur significative de vague de conception de 2,75 m, ce qui implique de recommander la mise en place de pierres de 3,6 à 6,2 tonnes (1,3 à 1,55 m de diamètre équivalent) comme pierres de carapace (épaisseur de 2,5 m, crête d'une largeur minimale de 3,7 m). Les figures 3.4 et 3.5 illustrent le concept d'une protection en enrochement classique à Matane-sur-Mer. La **butée en pied d'enrochement** est requise à cause de la disparition anticipée de la plage au pied de l'enrochement (à cause de la présence-même de cet enrochement). Dans les cas où du roc se trouverait à l'emplacement de l'enrochement prévu, la butée de pied serait requise pour assurer la stabilité à long terme des enrochements.

De plus, il serait recommandé d'évaluer la présence d'argile à faible profondeur sous les sédiments granulaires par un spécialiste en géotechnique et, si requis, de faire effectuer des forages géotechniques pour valider l'éventuelle présence d'un tel horizon argileux en vue de prendre les précautions requises pour assurer la stabilité à long terme de l'enrochement.

Un enrochement en mesure de protéger adéquatement les résidences et les infrastructures de Matane-sur-Mer contre l'érosion, la submersion et la projection de débris lors du déferlement des vagues se révèle donc un **obstacle majeur en termes de vue sur le fleuve et d'accès au rivage**, étant donné que le sommet de l'enrochement se trouverait à plus de trois mètres au-dessus de la rive.

À moins de retenir l'option avec déménagement complet des bâtiments, l'empiètement important de l'enrochement sur la plage impliquera la disparition de celle-ci sur une dizaine de mètres de largeur.

La présence de l'enrochement provoquera à moyen et long termes l'abaissement de la plage située au large de l'enrochement, réduisant encore sa largeur et son accessibilité.

L'impact de la mise en place d'un enrochement comme celui présenté sur la figure 5.1 sur la dynamique sédimentaire de ce secteur de Matane-sur-Mer serait important. La circulation des sédiments en provenance de l'est se ferait au large de l'enrochement, dans des conditions très énergiques. Des changements importants de la configuration de la rive pourraient être observés à l'ouest de la zone enrochée. Du point de vue de l'hydro-sédimentologie côtière de cette zone du fleuve Saint-Laurent, la mise en place d'un enrochement le long de la rive de Matane-sur-Mer implique un potentiel « effet de bout » à l'extrémité sud-ouest de l'enrochement. Cet effet de bout aura pour conséquence d'accentuer les problèmes d'érosion au sud-ouest de la zone protégée par l'enrochement.

La protection des berges de Matane-sur-Mer à l'aide d'un enrochement serait donc un ouvrage de plus de trois (3) km de long qui :

- Ferait disparaître la plage de Matane-sur-Mer,
- Bloquerait la vue des résidents sur l'eau,
- Nuirait significativement à l'accès à l'eau et
- Aurait des impacts potentiellement importants sur la dynamique sédimentaire à l'ouest de la zone enrochée.

Quatre options d'enrochements classiques ont été analysées, soit :

- Option d'enrochement avec déménagement des bâtiments,
- Option d'enrochement sans déplacement des bâtiments,
- Option d'enrochement minimal des trois zones actuellement sans protection,
- Option d'enrochement avec crête élargie.

Deux options d'enrochement supplémentaires ont été envisagées, soit la construction d'un brise-lames au large de la rive et la construction d'un champ d'épis conjugué à une recharge de plage pour limiter l'érosion entre les épis. Ces deux dernières options n'ont pas fait l'objet d'analyses plus poussées compte tenu des désavantages qu'elles présentaient par rapport aux autres options.

Une évaluation approximative des quantités d'enrochement requis en vue de la construction de ces différentes options de protection en enrochement donne les chiffres suivants :

Tableau 6.1 Quantités estimatives de pierres – Enrochement classique à Matane-sur-Mer

Option	Avec démantèlement de bâtiments (V1)	Sans démantèlement de bâtiments (V2)	Enrochement minimal des zones sans protection (V3)	Enrochement avec crête surbaissée (V4)
Carapace	123 000 m ³ / 230 000 t	134 000 m ³ / 250 000 t	5 500 m ³ / 11 000 t	196 000 m ³ / 360 000 t
Pierre-filtre	42 500 m ³ / 85 000 t	48 000 m ³ / 96 000 t	1 700 m ³ / 3 500 t	64 000 m ³ / 128 000 t
Tout-venant	20 000 m ³ / 42 000 t	20 000 m ³ / 42 000 t	1 600 m ³ / 3 300 t	0 m ³ / 0 t

Considérant les éléments d'information présentés plus haut et au regard des objectifs poursuivis par le CPS, les solutions d'enrochement complet de la plage de Matane-sur-Mer ne sont pas recommandées à Matane-sur-Mer.

La solution d'enrochement minimal des zones actuellement sans protection ne peut être considérée que comme une solution temporaire visant à limiter la submersion en trois endroits spécifiques à des fins de protection partielle des infrastructures publiques (rue et réseaux d'égout et d'aqueduc sous-jacent). Cette solution n'est pas recommandable parce qu'elle ne répond pas aux objectifs du CPS.

6.2 Riprap

Afin de limiter l'élévation de la crête de la protection de berge, la mise en place d'un riprap (pierre de carrière présentant une granulométrie plus étalée que les enrochements traditionnels) a été envisagée avec une pente externe plus douce que celle de l'enrochement (4H/1V). L'élévation de la crête de ce riprap serait légèrement inférieure à celle de l'enrochement classique (de +5,7 m à +6,2 m CGVD28), essentiellement à cause de la pente plus douce du riprap.

Une note dans le C.E.M. précise qu'un riprap ne se révèle économiquement intéressant par rapport à un enrochement classique que si la hauteur de vague de dimensionnement est inférieure à 1,5 m²¹, ce qui n'est pas le cas à Matane-sur-Mer (hauteur de vague de conception = 2,75 m).

²¹ Coastal Engineering Manual, Chapitre VI-5-3-7, page VI-5-84 : “A limitation on the use of graded riprap is that the design wave height should be less than about 1.5 m. At higher design wave heights uniform-size armor units are usually more economical”

Les calculs recommandés par la SEBJ utilisant les mêmes données de vagues que celles ayant permis de dimensionner l'enrochement classique indiquent qu'il faudrait retenir des pierres de 1,6 à 6 tonnes comme pierres de carapace de ce riprap.

Les figures 4.2 et 4.3 présentent la coupe théorique d'un riprap de protection de berge à Matane-sur-Mer.

L'empiètement créé par cette option de protection de berge en riprap dans le domaine hydrique et de l'habitat du poisson serait encore plus important que celui de l'enrochement classique, ce qui impliquerait la destruction de la plage sur près de 30 mètres de largeur et réduirait d'autant l'usage et l'accessibilité de la plage. L'obstacle visuel serait légèrement moindre que celui de l'enrochement classique mais encore très évident puisque le sommet du riprap se trouverait souvent à plus de 1,5 mètres au-dessus de la rive. La présence du riprap va également provoquer (dans une moindre mesure que l'enrochement classique) une baisse de l'élévation et un rétrécissement de la plage située au large du riprap.

L'impact de la mise en place d'un riprap sur la dynamique sédimentaire de ce secteur de Matane-sur-Mer serait similaire à celui d'un enrochement.

Les quantités approximatives de matériaux requis dans un riprap seraient les suivantes :

- 213 000 m³ de pierres de carapace (1,6 à 6,0 tonnes),
- 81 000 m³ de pierre-filtre (150 à 600 kg).

Ces quantités sont plus importantes que celles requises dans un enrochement classique et le gain en diminution de la grosseur des pierres est minime.

Considérant les éléments d'information présentés plus haut et au regard des objectifs poursuivis par le CPS, cette solution de riprap n'est pas recommandée à Matane-sur-Mer.

6.3 Brise-lames détachés

Le concept de brise-lames détachés (sections de brise-lames positionnés au large de la plage dans le but de la protéger) a été envisagé pour la plage de Matane-sur-Mer. Il s'agit d'un concept qui évite de détruire directement la plage par empiètement avec des enrochements mais qui implique la mise en place d'environ trois à quatre fois les quantités de pierres d'un enrochement placé sur la rive.

L'empiètement de ce brise-lames sur le milieu hydrique serait important.

Ce brise-lames constituerait un **imposant obstacle visuel** pour les gens qui se trouvent sur la rive.

Ce concept de brise-lames détaché est complexe à dimensionner sans provoquer trop d'impacts négatifs sur son environnement. Il serait requis de réaliser des modélisations hydrodynamiques et hydro-sédimentaires

pour que ces brise-lames n'engendrent pas plus d'inconvénients que de bénéfices pour la plage, ses usagers et les infrastructures situées à proximité de la rive.

Considérant les éléments d'information présentés plus haut et au regard des objectifs poursuivis par le CPS, cette solution de brise-lames détachés n'est pas recommandée à Matane-sur-Mer.

6.4 Recharge de plage

En présence de plages sur le site, l'option de recharge de plage peut se révéler intéressante. De plus, cette option limite les impacts des travaux de protection de berge sur les rives avoisinantes. Comme le sable est très mobile dans l'environnement de Matane-sur-Mer, c'est un matériau granulaire de type gravier et sable qui a été étudié dans le cadre de cette option. Ce choix de matériaux granulaires permet de limiter les quantités de matériaux requises lors de la première recharge ainsi que la fréquence et l'importance des recharges ultérieures.

L'élévation de **crête de la recharge retenue** varie de **+5,9 m à +6,5 m** CGVD28 à Matane-sur-Mer, ce qui correspond généralement à environ deux mètres au-dessus de la rive actuelle.

Comme pour l'enrochement ou le riprap, il ne s'agit pas d'un choix d'élévation de crête trop sécuritaire. Au contraire, les mesures faites par l'UQAR à la suite de l'événement du 6 décembre 2010 dans la région de Rimouski indiquent que les remontées maximales de vagues peuvent être largement supérieures à l'élévation moyenne déterminée par les calculs théoriques. Afin de limiter l'impact de ces remontées exceptionnelles de vagues, il est envisagé de mettre en place une recharge de plage qui diminuera la pente de la rive et élargira significativement la zone de la rive sur laquelle déferlent les vagues, ce qui éloignera les infrastructures de la zone d'impact des vagues et minimisera les risques de submersion. Par contre, il ne faudrait surtout pas que les riverains profitent de cet « élargissement » du rivage devant leurs résidences pour recommencer à empiéter dans une zone sujette aux remontées des vagues.

Les figures 5.4 et 5.5 illustrent le concept de recharge de plage utilisant un mélange de gravier et de sable à Matane-sur-Mer. Ce concept engendre une obstruction visuelle du même ordre de grandeur que certains enrochements étudiés. Ce type d'ouvrage permet de conserver une plage comme rivage à Matane-sur-Mer, mais avec une granulométrie relativement grossière. Ce choix de matériel granulaire de type gravier et sable permet une meilleure résistance de la plage à l'érosion et une plus grande durée de vie utile de l'ouvrage de protection, ce qui devrait être un objectif à poursuivre par la Ville. Si du sable était utilisé comme matériel de recharge, il faudrait une quantité beaucoup plus importante de matériaux granulaires pour assurer la même protection, de même que des entretiens plus réguliers. Ceci augmenterait significativement le coût des travaux à court et long termes et irait à l'encontre de l'objectif d'avoir une solution qui respecte les coûts et les avantages.

L'option d'une **recharge de plage sans déplacement des bâtiments** impliquerait la mise en place d'environ **900 000 m³ de matériaux granulaires** (D₅₀ de 15 mm) sur 3,2 km de long.

L'option d'une **recharge de plage avec déplacement des bâtiments** impliquerait l'enlèvement de toutes les protections en enrochement existantes et la mise en place d'environ **450 000 m³ de matériaux granulaires** (D₅₀ de 15 mm) sur 3,2 km de long.

Ces quantités majeures de matériaux, qui représentent plus de 2 à 4 fois les volumes impliquées dans la recharge de plage de Sainte-Flavie, engendrent des enjeux de faisabilité lié à l'approvisionnement en matériaux ainsi que des coûts au-delà de la valeur des actifs du secteur estimées par le MSP²².

Considérant les éléments d'information présentés plus haut et au regard des objectifs poursuivis par le CPS, au strict minimum le coût de ces solutions de recharge de plage va devoir être établi avant d'être en mesure de recommander une recharge de plage à Matane-sur-Mer.

6.5 Plage suspendue

Un concept de plage suspendue (plage dont le pied est retenu par la mise en place d'une butée et/ou de récifs artificiels) a été envisagé pour le secteur de Matane-sur-Mer. Ce concept nécessite la mise en place non seulement d'une butée de pied mais également d'une recharge de plage (ou d'un autre type de protection de berge) pour contrer l'érosion et la submersion que la butée de pied ou les récifs artificiels ne feront qu'atténuer. Ce concept permettrait théoriquement de concevoir une recharge de plage utilisant des matériaux granulaires plus fins (sable et gravier fin) sans faire exploser les quantités. La figure 6.1 présente en coupe un concept de plage suspendue qui avait été étudié pour Sainte-Luce. Les conditions topobathymétriques et hydrodynamiques ne sont pas favorables à un concept de plage suspendue à Matane-sur-Mer. La crête d'une plage suspendue serait probablement à une élévation équivalente à celle d'une recharge de plage standard.

Le concept de plage suspendue est complexe à mettre en œuvre, entre autres à cause des effets hydrodynamiques et sédimentaires qui se produiraient. Avant de s'avancer trop loin dans ce concept, des modélisations hydrodynamiques et hydro-sédimentaires seraient nécessaires pour valider le concept. Les matériaux granulaires de la recharge et les enrochements ou blocs artificiels de la butée de pied seront fortement sollicités par les vagues et les glaces. Il serait également requis de concevoir les extrémités latérales de l'ouvrage pour limiter les risques de fuite de matériaux granulaires, surtout par l'extrémité sud-ouest et vers le large par-dessus la butée de pied.

²² MSP, 2025. Appréciation de risques du secteur de Matane-sur-Mer. Rapport produit pour la ville de Matane (en préparation)

Ce concept aurait l'avantage de créer une obstruction visuelle pour les usagers similaire à celle de la solution de recharge de plage et de conserver une plage comme rivage de Matane-sur-Mer. Certains usagers pourraient cependant trouver dérangeante et éventuellement dangereuse la présence de la butée de pied en enrochement ou blocs de béton (seul concept de butée économiquement viable en présence de glace). En effet, cette butée d'une hauteur de l'ordre de deux à trois mètres et d'une largeur de 10 à 20 mètres serait un obstacle pour ceux qui voudraient accéder au fleuve à partir de la plage, sans parler des dangers pour la navigation de plaisance.

Par rapport au concept de recharge de plage avec des matériaux granulaires plus grossiers, il faudrait prévoir des recharges de plage récurrentes plus fréquentes et plus onéreuses. Il faudrait également prévoir des projets de compensation suite à l'empiètement dans le domaine hydrique et dans l'habitat du poisson de la butée de pied. Les coûts d'une plage suspendue seraient plus élevés que ceux d'une recharge de plage et les impacts environnementaux seraient plus grands (empiètement sur le milieu hydrique et sur l'habitat du poisson dû à la butée de pied).

Considérant les éléments d'information présentés plus haut et au regard des objectifs poursuivis par le CPS, cette solution de plage suspendue n'a pas fait l'objet d'un dimensionnement et n'est pas recommandée à Matane-sur-Mer.

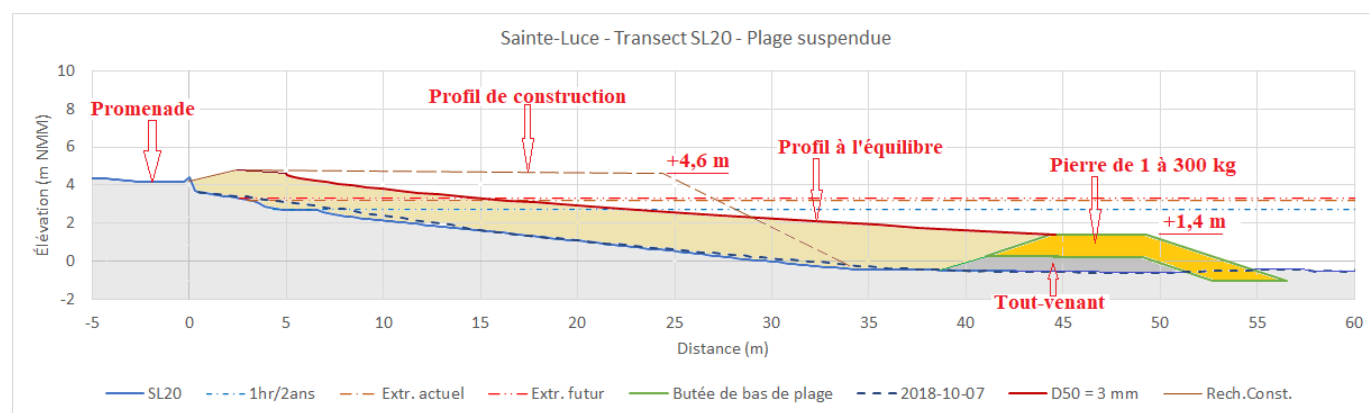


Figure 6.1 Coupe-type d'une plage suspendue

6.6 Champ d'épis

La solution d'un champ d'épis installés perpendiculairement à la rive sur la plage de Matane-sur-Mer a été évaluée. Dans un environnement sédimentaire dominé par un transport presque unidirectionnel des sédiments, la mise en place d'un épi provoque automatiquement une accumulation de sédiments du côté

amont de l'épi (par rapport au flux des sédiments – en général du côté nord-est à Matane-sur-Mer) et une érosion du côté aval de l'épi (en général du côté sud-ouest à Matane-sur-Mer).

Pour être en mesure de protéger de façon durable la rive de Matane-sur-Mer, un champ d'épi doit donc obligatoirement être combiné à une recharge de plage, sous peine de voir les zones entre les épis se faire très rapidement attaquer par l'érosion. Dans tous les cas, l'impact de l'épi terminal (celui situé à l'extrémité sud-ouest du champ d'épis) serait important et devrait être analysé.

L'exercice de modélisation hydro-sédimentaire et de comparaison d'un projet de recharge de plage et d'un projet de champ d'épi combiné à de la recharge de plage a été fait par Lasalle|NHC dans le cas de Pointe-aux-Outardes. Cet exercice a démontré que, du point de vue économique, le champ d'épis ne présentait aucun intérêt par rapport à une recharge de plage sans épis. Les coûts d'un champ d'épis seraient plus élevés que ceux d'une recharge de plage et les impacts environnementaux seraient plus grands (empiètement sur le milieu hydrique et sur l'habitat du poisson dû aux épis).

Considérant les éléments d'information présentés plus haut et au regard des objectifs poursuivis par le CPS, cette solution de champ d'épi n'a pas fait l'objet d'un dimensionnement et n'est pas recommandée à Matane-sur-Mer.

6.7 Mur vertical

Étant donné l'impact dramatique qu'aurait un mur vertical sur l'abaissement et la diminution de largeur de la plage de Matane-sur-Mer, le scénario d'un mur vertical comme protection de berge à Matane-sur-Mer n'a pas été évalué. Pour être en mesure de protéger de façon durable la rive, la crête d'un tel mur devrait être significativement plus haute de celle d'un enrochement classique. Comme les élévations de crête des enrochements représentent déjà un obstacle visuel majeur (en moyenne 2,5 mètres au-dessus de la rive pour l'enrochement standard), le fait que le dessus d'un mur vertical devra être au-delà de ces 2,5 mètres au-dessus de la rive implique que ce dernier créerait un obstacle physique et visuel majeur, en plus de faire disparaître la plage. Dans ce contexte, cette option n'a pas été approfondie.

Considérant les éléments d'information présentés plus haut et au regard des objectifs poursuivis par le CPS, cette solution de mur vertical n'a pas fait l'objet d'un dimensionnement et n'a pas été retenue.

7 Conclusion et recommandations

7.1 Conclusion

Le MSP recommande que la Ville mette en œuvre une solution qui assure en priorité la sécurité des personnes et de biens, qui soit durable (au moins 30 ans), qui prend en compte l'effet des changements climatiques, qui soit adaptée au milieu et qui assure que les investissements soient inférieurs ou égaux à la valeur des enjeux et usages protégés, dans le respect des capacités financières des parties prenantes prévues dans l'entente, tout en limitant les impacts environnementaux.

Les données disponibles pour la zone à l'étude ont été recueillies et analysées (relevés topographiques et bathymétriques, données de niveaux d'eau et régime des vagues) et une revue des options de protection des berges de Matane-sur-Mer a été faite.

Différentes options de protection de berge utilisant des **enrochements** ont été évaluées :

- Protection linéaire de la rive en enrochement classique (pente de 1,5H/1V – avec et sans déménagement des bâtiments),
- Protection linéaire de la rive en enrochement avec crête surbaissée et élargie (pente de 1,5H/1V),
- Protection partielle d'encoches avec un enrochement sous-dimensionné,
- Protection de la rive à l'aide de brise-lames détachés, segmentés ou non, à une certaine distance de la rive,
- Champ d'épis,
- Protection linéaire de la rive en riprap (enrochement à granulométrie étalée sur une pente relativement douce de 4H/1V).

De plus, deux options de protection de la berge à l'aide d'une **recharge de plage** ont été analysées, en plus d'une option de plage suspendue nécessitant une butée de pied de plage (en enrochement ou récif artificiel) et de l'option d'un mur vertical.

La **protection en enrochement classique** présente l'inconvénient de créer un obstacle visuel majeur pour les usagers (élévation de crête en moyenne à 2,5 m au-dessus de la rive). C'est également le cas, dans une moindre mesure, pour l'option d'un enrochement surbaissé avec crête élargie (élévation de crête en moyenne à 1,7 m au-dessus de la rive). Ces options d'enrochement feraient disparaître la plus grande partie de la plage par empiètement significatif sur le milieu hydrique et l'habitat du poisson. De plus, ces options d'enrochement provoqueraient l'érosion de la berge une fois en place et diminueraient encore la surface de plage utilisable. Enfin, des compensations pour empiètement seraient exigées par le MPO et le MELCCFP.

La **protection partielle d'encoches** avec un enrochement sous-dimensionné limiterait l'érosion constatée au droit de ces encoches et ne ferait qu'atténuer localement le risque de submersion de la route et des

infrastructures municipales derrière les quatre encoches. Le niveau de risque global de submersion du secteur resterait le même. Cette solution devrait être combinée à d'autres solutions (relocalisation, par exemple), car elle n'assurerait pas la sécurité durable des personnes et des biens contre l'érosion et la submersion côtière dans la zone à l'étude.

La **protection en riprap** ne présente pratiquement aucun avantage par rapport à l'option des enrochements classiques compte tenu de la topographie de la plage et des conditions d'exposition du site aux vagues. En effet, les gains en diminution de l'élévation de la crête et en grosseur des pierres sont minimes alors que les quantités de pierres nécessaires et les impacts environnementaux sont plus importants que pour la variante d'enrochement surbaissé étudiée. De plus, une note dans le C.E.M précise que ce type d'ouvrage doit être mis en place quand la hauteur de vague est inférieure à 1,5m, ce qui n'est pas le cas à Matane-sur-Mer avec des hauteurs de vague de l'ordre de 2,7 m.

La **protection à l'aide de brise-lames détachés** présente des inconvénients similaires à ceux des enrochements classiques, mais avec nettement plus d'empiètement sur le milieu hydrique. Par conséquent, des compensations seront demandées par le MPO et le MELCCFP. Une recharge de la plage devrait selon toute vraisemblance faire partie d'un projet de brise-lames détachés pour éviter l'apparition de zones d'érosion de la berge, érosion induite par la présence-même des brise-lames. Des modélisations hydrodynamiques et hydro-sédimentaires devraient être faites pour s'assurer de correctement dimensionner l'ouvrage et d'éviter les dommages collatéraux de ce genre d'aménagement.

Dans les conditions rencontrées à Matane-sur-Mer, les **protections de berge faites à l'aide de champ d'épis** impliquent de l'empiètement dans le milieu hydrique et des impacts importants sur la dynamique côtière, notamment en bloquant le transit sédimentaire, ce qui causerait une aggravation de l'érosion entre les épis et à l'extrémité ouest du champ d'épis. Pour évaluer et contrer ce problème d'érosion, il faudrait envisager une modélisation hydro-sédimentaire détaillée et une importante recharge de plage en complément à la mise en place des épis, ce qui augmenterait significativement les coûts.

L'option d'un **mur vertical** a été écartée à cause des impacts importants sur la plage et sur l'hydro-sédimentologie du secteur de Matane-sur-Mer, en plus de son élévation de crête qui bloquerait la vue sur le fleuve.

Différentes options de **recharge de plage** ont été évaluées :

- Recharge de plage utilisant du matériel granulaire de type gravier et sable (avec et sans déplacement des bâtiments),
- Recharge de plage sous forme de plage suspendue utilisant du matériel granulaire de type sable et gravier fin,

Les recharges de plage utilisant des matériaux granulaires fins doivent être protégées par une butée de pied en enrochement sous peine d'augmenter significativement les quantités requises de matériaux granulaires.

Même avec la butée de pied, elles ont l'inconvénient de requérir plus de matériaux granulaires, tant lors de la construction que dans le cadre des recharges d'entretien. Le concept de butée de pied (ou récif artificiel) est délicat à dimensionner, tant dans l'optique de retenir les matériaux de la recharge de plage que dans sa résistance aux vagues et aux glaces. Une butée de pied en enrochement ou blocs de béton représente également un obstacle pour les usagers de la plage et un danger pour les embarcations de plaisance.

Les recharges de plage utilisant des matériaux granulaires de type gravier ont l'avantage de ne pas requérir de butée de pied, demandent moins de matériaux, tant lors de la construction que dans le cadre des recharges d'entretien.

7.2 Recommandations

Certaines solutions présentées dans ce rapport sont techniquement réalisables, mais l'analyse technique doit impérativement être complétée par une analyse comparative des coûts, des impacts environnementaux, de l'acceptabilité sociale des ouvrages de protection envisagés et de leur impact sur le paysage et le milieu de vie.

Compte tenu des inconvénients provoqués par la mise en place de protections de berge utilisant des enrochements, notamment l'obstruction visuelle qu'engendrerait la crête de l'ouvrage variant de 1,7 mètres (enrochement surbaissé) à plus de 2,5 mètres (enrochement standard) au-dessus de la rive, l'abaissement de la plage et l'empiètement dans le domaine hydrique, il n'est pas recommandé de mettre en œuvre de telles options dans l'environnement de Matane-sur-Mer.

L'option de la recharge de plage utilisant un mélange de gravier et de sable engendrerait une obstruction visuelle majeure (en moyenne de 2 mètres par rapport au niveau de la rive) et impliquerait potentiellement des enjeux d'approvisionnement en matériaux et de faisabilité économique qui la rendent difficilement recommandable au regard des objectifs du *Cadre pour la prévention des sinistres* du MSP. Malgré cela, il s'agit de l'ouvrage de protection étudié qui s'approche le plus des objectifs du CPS car l'option de recharge de plage :

- Limite la submersion de la rive et la projection de débris,
- Limite la dégradation du milieu naturel (plage),
- Limite la perte de connectivité entre la rive et le domaine maritime (sommet de l'ouvrage plus bas que celui d'un enrochement ou d'un mur vertical),
- Reconstitue une plage pour les résidents locaux et les touristes,
- Reconstitue un milieu naturel pour la macrofaune benthique.

Deux options d'étendue linéaire de la recharge de plage sont présentées dans ce rapport.

- La première option laisse en place les bâtiments de Matane-sur-Mer,
- La deuxième option exige le déménagement des bâtiments situés entre la route et le rivage de Matane-sur-Mer.

En ce qui concerne la durabilité de la recharge de plage, il est important de noter que le dimensionnement préliminaire comporte une importante hypothèse, soit l'absence d'interférence des émissaires sur le comportement de la recharge de plage. Si, par exemple, les émissaires sont dimensionnés de façon à se comporter comme des épis ou si les débits d'écoulement des émissaires dans la recharge sont trop concentrés, cette hypothèse ne tient plus et le comportement de la recharge de plage à long terme pourrait en être affecté.

Si le concept de recharge de plage était retenu pour la protection des berges de Matane-sur-Mer, une modélisation hydro-sédimentaire à long terme serait requise pour s'assurer que le transit préférentiel des matériaux granulaires du nord-est vers le sud-ouest n'affectera pas indument la durabilité de la protection de berge et pour corriger cet impact le cas échéant.

Le projet de Sainte-Flavie a démontré que la recherche de matériaux risquait d'être difficile pour un projet de recharge de plage à Matane-sur-Mer. Les matériaux granulaires disponibles dans la région sont, règle générale, d'une qualité insuffisante pour résister adéquatement aux efforts mécaniques intenses engendrés par le déferlement des vagues et l'impact des glaces.

En raison des volumes importants de matériaux nécessaires pour construire une protection en enrochement ou une recharge sur une plate-forme littorale qui est profonde, les coûts de ces solutions risquent de dépasser largement la valeur des enjeux exposés. Dans ce contexte, une recherche de sources de matériaux et une estimation des coûts des travaux doivent être réalisées afin de confirmer cette hypothèse.

Compte tenu de l'évolution continue de la berge et de la date des relevés disponibles (2022), il est recommandé de prévoir au minimum un relevé topographique de la berge avant le début des travaux pour valider la faisabilité d'un projet de protection des berges de Matane-sur-Mer et les quantités de matériaux requises.



2025-12-10

Préparé par :

Yann Ropars, ing. (#34863), M. Sc.
Consultants Ropars, Inc.
yann_ropars@videotron.ca