



Port-Cartier Plage Rochelois Protection des berges



Rapport technique FINAL
15 octobre 2026



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	iii
1 Introduction	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Objectifs de la présente étude	2
2 Données de base	4
2.1 Généralités	4
2.2 Niveaux d'eau	4
2.3 Influence des changements climatiques	6
2.4 Recommandations de niveaux d'eau – Conception d'infrastructures côtières	8
2.5 Vagues au large de la zone à protéger	8
2.6 Topo-bathymétrie des rives	13
2.7 Calcul de l'élévation des crêtes des ouvrages	14
2.8 Granulométrie des matériaux de recharge	14
3 Conception d'une protection de berge en recharge de plage	16
3.1 Série temporelle de vagues et de niveaux d'eau	16
3.2 Remontée des vagues sur une plage	16
4 Conception de l'épi à l'est de la recharge de plage	20
4.1 Série temporelle de vagues et de niveaux d'eau	20
4.2 Dimension des pierres de l'épi	20
4.3 Remontée des vagues sur l'épi	20
5 Options de protection des berges envisagées	21
5.1 Recharge de plage	21
5.2 Options de recharge V1 versus V2	22
5.3 Option V3	23
5.4 Option V4	24
5.5 Option de recharge avec un D_{50} de 10 mm	28
5.6 Option de recharge avec un D_{50} de 5 mm	28
6 Conclusion et recommandations	30
6.1 Conclusion	30
6.2 Recommandations	30

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Port-Cartier – Plage Rochelois – Localisation de la plage (Carte topographique au 1/20 000 ^e)	3
Figure 2.1	Port-Cartier – Fréquence de dépassement des niveaux d'eau horaires extrêmes hauts	5
Figure 2.2	Port-Cartier – Période de retour des niveaux d'eau annuels extrêmes hauts.....	6
Figure 2.3	Hausse du niveau moyen des mers – GIEC/IPCC-2021 (« 2 » = SSP2-4.5, « 5 » = SSP5-8.5)	7
Figure 2.4	Localisation des points d'extraction des vagues – Lasalle NHC, 2026 (en préparation)	10
Figure 2.5	Hauteurs significative des vagues par 2,5 m de profondeur (P1) – Fréquence de dépassement	11
Figure 2.6	Relation entre le Hs et la direction des grandes vagues au point P1	12
Figure 2.7	Relation entre le Hs et la période de pointe des grandes vagues au point P1	12
Figure 2.8	Relevés topographiques disponibles dans la zone d'étude (Cadoret-2023).....	13
Figure 2.9	Photo de la plage McCormick prise le 27 juillet 2026 (Ville de Port-Cartier).....	15
Figure 2.10	Photo de la recharge de plage de Pointe-aux-Outardes prise en juin 2026 (MSI)	15
Figure 3.1	Remontée des vagues – R _{2%} Poate-2016 – Conditions actuelles – Fond à -1,3 m ...	17
Figure 3.2	Résultats des calculs de remontée des vagues sur une plage – Rochelois point P1 – Fond à -1,3 m (climat actuel)	18
Figure 3.3	Résultats des calculs de remontée des vagues sur une plage – Rochelois point P3 – Fond à -1,0 m (climat actuel)	18
Figure 5.1	Coupe-type d'une recharge de plage – Zone centrale de la plage Rochelois	22
Figure 5.2	Comparaison des options de recharge de plage – V1 (2021) versus V2 (2025)	22
Figure 5.3	Vue en plan de l'option V3 de recharge de la plage Rochelois	23
Figure 5.4	Coupe-type de la recharge de plage option V3 avec excavation préalable de la plage actuelle.....	24
Figure 5.5	Vue en plan de l'option V4 de la recharge de plage (vue d'ensemble).....	26
Figure 5.6	Vue en plan de l'option V4 de la recharge de plage (zoom sur l'extrémité est)	27
Figure 5.7	Comparaison en coupe des options de recharge utilisant des D ₅₀ et 15 mm et de 10 mm	28
Figure 5.8	Comparaison en coupe des options de recharge utilisant des D ₅₀ et 15 mm et de 5 mm	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Fréquence de dépassement des niveaux d'eau à Port-Cartier	8
Tableau 2.2	Localisation des points d'extraction des vagues à Port-Cartier	9
Tableau 3.1	Recommandations d'élévation de crête de la recharge selon la zone	19

CLAUSE 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 de la Ville de Port-Cartier (**VPC**) et du ministère de la Sécurité Intérieure (**MSI**) et de leurs représentants autorisés dans le cadre spécifique de l'étude de **la protection des berges de la plage Rochelois à Port-Cartier**. 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 la VPC et le MSI.

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

La plage Rochelois située dans la municipalité de Port-Cartier (voir figure 1.1) subit de l'érosion lors de tempêtes majeures. La récurrence des ondes de tempête affectant le site d'étude s'est accélérée au cours de la période récente. Les tempêtes du 26 octobre 1980 et du 7 décembre 1983 ont été suivies de plusieurs tempêtes majeures qui ont affecté Port-Cartier entre mars 2005 et décembre 2022, dont la tempête du 6 décembre 2010 et celle du 30 décembre 2016.

Une analyse de risques préliminaire et de solutions a été réalisée en 2011-2012 (DESSAU) en vue d'une recharge de la plage Rochelois.

Les études de protection de la plage Rochelois ont été reprises en 2017, sous l'égide du ministère de la Sécurité Publique (MSP, devenu récemment ministère de la Sécurité Intérieure - MSI), suite aux dommages observés lors de la tempête de décembre 2016. Une première étude visait la protection de la plage Rochelois sous la forme d'une recharge de plage à l'aide de matériaux granulaires et d'un épi à son extrémité est¹.

Une analyse hydro-sédimentaire a été effectuée par Lasalle|NHC² en 2019. Une analyse granulométrique des sédiments présents sur la plage avait été réalisée à cette occasion.

Des séances publiques d'information se sont tenues du 25 et 26 novembre 2020, séances au cours desquelles la mission du MSI et un projet de recharge de plage ont été présentées.

Depuis 2008, de multiples acquisitions de données et travaux de recherche ont eu lieu à Port-Cartier et au Québec afin de mieux comprendre la situation relative aux aléas côtiers. Ces informations découlent de demandes du MSI, mais aussi de projets de recherche universitaires.

Un contrat a été octroyé le 3 octobre 2023 par la Ville de Port-Cartier à Consultants Ropars Inc. (CRI) pour la « *Mise à jour de la conception préliminaire du projet de stabilisation du secteur de la plage Rochelois* ».

¹ Consultants Ropars Inc., «Port-Cartier – Rochelois – Recharge de plage », Rapport technique daté de mars 2018 présenté au Ministère de la Sécurité Intérieure.

² Lasalle|NHC, « Plage Rochelois à Port-Cartier – Résumé des résultats de modélisation », Présentation faite par Nicolas Galant et Tristan Aubel le 28 juin 2019.

En parallèle, la Ville de Port-Cartier a également mandaté Lasalle|NHC afin de modéliser les conditions hydro-sédimentaires spécifiques au site de Rochelois. L'étude présentée dans ce rapport s'appuie en partie sur ces modélisations hydro-sédimentaires.

Une mise à jour de l'analyse de risques produite en 2026 est en préparation par les experts en géomorphologie côtière du MSI³. Cette analyse brosse un portrait de l'intensité des aléas côtiers et de la vulnérabilité des infrastructures des secteurs visés à Port-Cartier.

Le MSI 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;
- Adapter les solutions aux spécificités du territoire;
- Limiter les impacts environnementaux;
- Favoriser l'acceptabilité sociale.

La solution de recharge de la plage Rochelois à Port-Cartier s'inscrit dans les objectifs du MSI.

1.2 Objectifs de la présente étude

Les objectifs du mandat confié par la Ville de Port-Cartier à Consultants Ropars Inc. sont de :

- Analyser les informations topo-bathymétriques récentes concernant la plage Rochelois à Port-Cartier,
- Analyser les données révisées de vagues et de niveaux d'eau (données fournies par Lasalle|NHC);
- Calculer la remontée des vagues sur la recharge de plage envisagée;
- Définir les caractéristiques techniques de la recharge de plage en s'appuyant sur les données de modélisations des conditions hydrosédimentaires produites par Lasalle|NHC;
- Estimer les quantités de matériaux impliqués dans la recharge de plage;
- Rédiger un rapport technique détaillant les calculs et les recommandations.

³ MSI, 2026. Appréciation de risques pour le projet d'atténuation des risques liés à l'érosion et à la submersion côtières. Secteur de Rochelois, à Port-Cartier. Rapport produit pour la ville de Port-Cartier (en préparation)



Figure 1.1 Port-Cartier – Plage Rochelois – Localisation de la plage (Carte topographique au 1/20 000^e)

2 Données de base

2.1 Généralités

De nombreuses données ont été consultées et analysées afin d'en arriver à dimensionner la recharge de plage présentée dans la suite de ce rapport. Les 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.) ont été retenues en priorité.

Le dimensionnement de la recharge est également appuyé sur des modélisations numériques des conditions hydrosédimentaires à court et à long terme du secteur.

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 de la plage Rochelois à Port-Cartier.

2.2 Niveaux d'eau

Quelques données de niveaux d'eau sont disponibles pour Port-Cartier (#2790) en 1961 et 1966 sur le site du ministère des Pêches et Océans Canada (MPO – Service hydrographique du Canada⁴). Port-Cartier se situe à environ 40 km au sud-ouest de la station du SHC à Sept-Îles (N° 2780).

La série de données de niveaux d'eau de Port-Cartier 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 entre 1980 et 2023 a servi à l'analyse des niveaux d'eau à Port-Cartier. 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 et dans le Golfe du Saint-Laurent.

Le SHC⁵ donne en 2026 une différence de 1,47 m entre le Zéro des cartes marines (ZC) et le zéro géodésique CGVD28 (ZG) à Port-Cartier, le ZG se situant au-dessus du ZC à Port-Cartier.

La figure 2.1 présente la courbe de fréquence de dépassement des niveaux d'eau extrêmes hauts à Port-Cartier (données horaires modélisées de 1980 à 2023). Selon la régression polynomiale utilisée dans ce graphique, le niveau d'eau dépassé une heure tous les 50 ans est de +2,71 m CGVD28.

⁴ <https://www.isdm-gdsi.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/inventory-inventaire/sd-ds-fra.asp?no=2790&user=isdm-gdsi®ion=PAC>

⁵ <https://marees.gc.ca/fr/stations/02790>

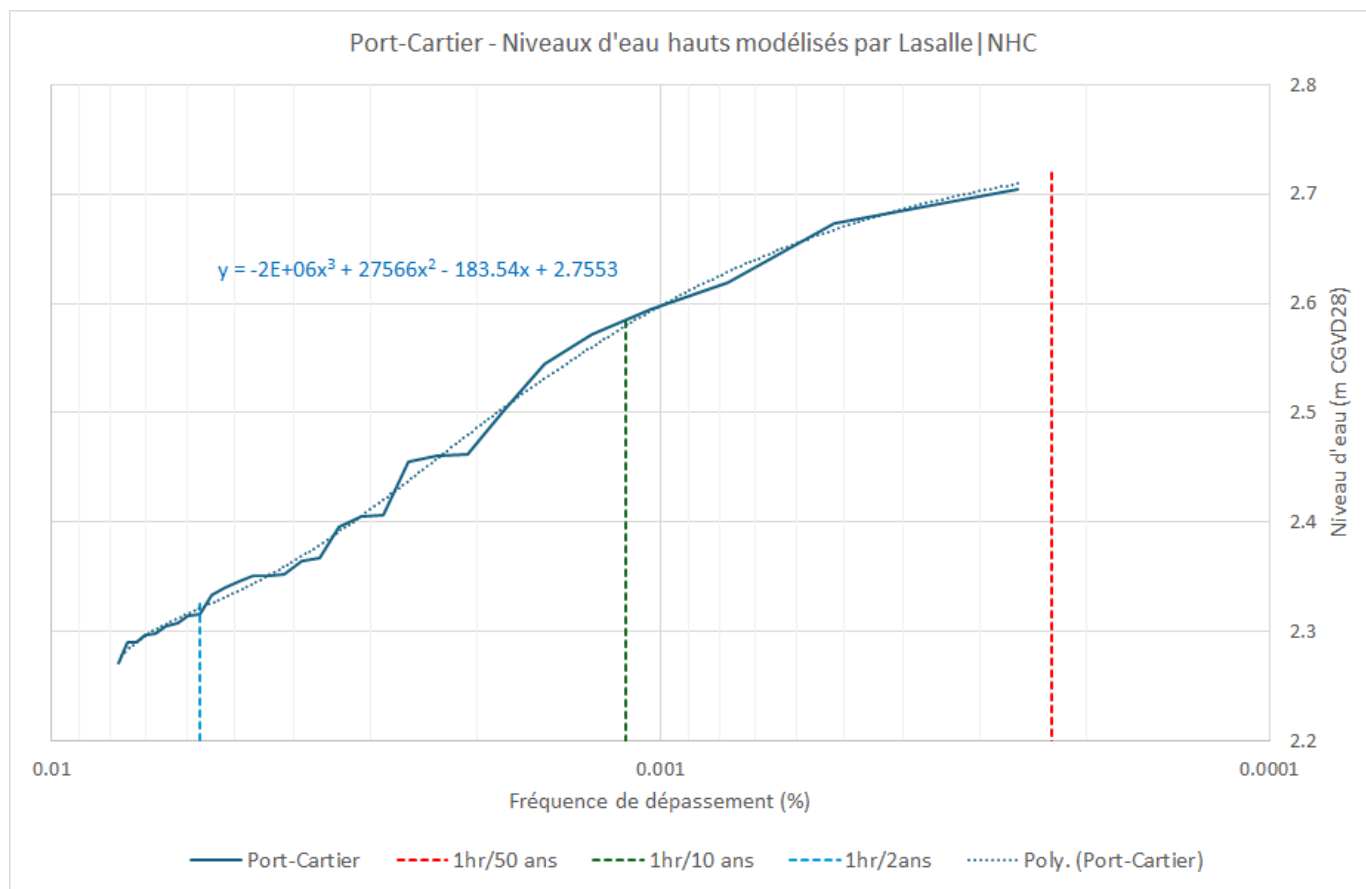


Figure 2.1 Port-Cartier – Fréquence de dépassement des niveaux d'eau horaires extrêmes hauts

La figure 2.2 présente l'analyse statistique des maximums annuels sur la même période. Les résultats sont similaires avec les deux méthodes statistiques pour la période de retour de 50 ans (+2,70 m versus +2,71 m CGVD28).

L'analyse faite par Lasalle|NHC en utilisant une méthode statistique différente propose une valeur similaire, soit +2,75 m.

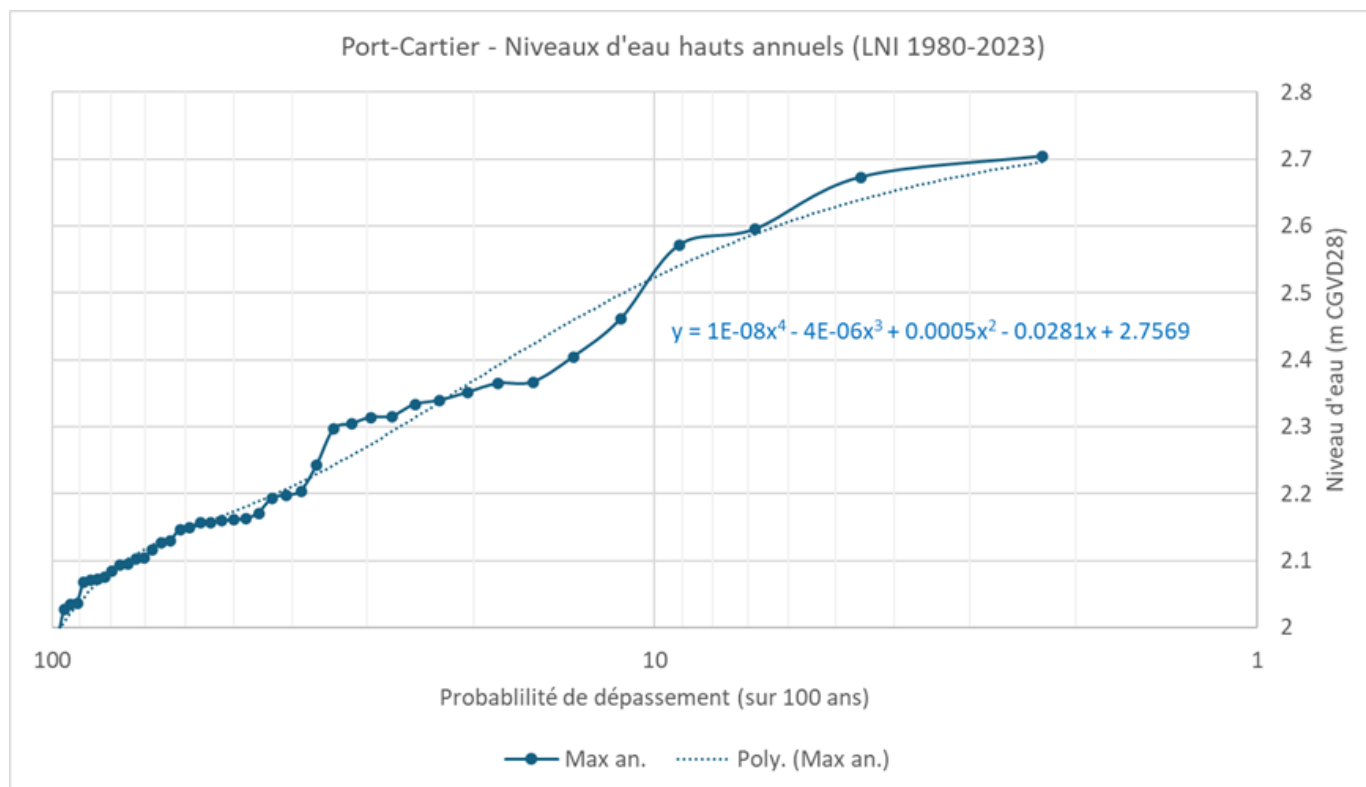


Figure 2.2 Port-Cartier – Période de retour des niveaux d’eau annuels extrêmes hauts

2.3 Influence des changements climatiques

La hausse du niveau moyen des mers⁶ selon le GIEC (IPCC)⁷ et le calcul de l’ajustement isostatique selon NRCan⁸ ont été utilisés en vue d’obtenir une évaluation des niveaux d’eau extrêmes dans le futur.

Ressources naturelles Canada indique pour Port-Cartier une remontée de la croute terrestre de 3,6 mm/an.

Les données du rapport du GIEC en 2023 (scénario SSP5-8.5⁹ – 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

⁶ 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).”.

⁷ Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat / Intergovernmental Panel on Climate Change

⁸ Ressources naturelles Canada <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/trx.php>

⁹ 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

0,39 m par rapport à 2005). La hausse relative du niveau d'eau selon ce scénario serait de 0,08 m en 2045 et de 0,22 m en 2075 par rapport aux niveaux d'eau de 2025.

Par rapport à 2025, la combinaison de la hausse du niveau moyen des mers et du relèvement isostatique à **Port-Cartier** donne une **hausse effective du niveau d'eau** de :

- **0,08 m dans 20 ans,**
- **0,12 m dans 30 ans,**
- **0,22 m dans 50 ans.**

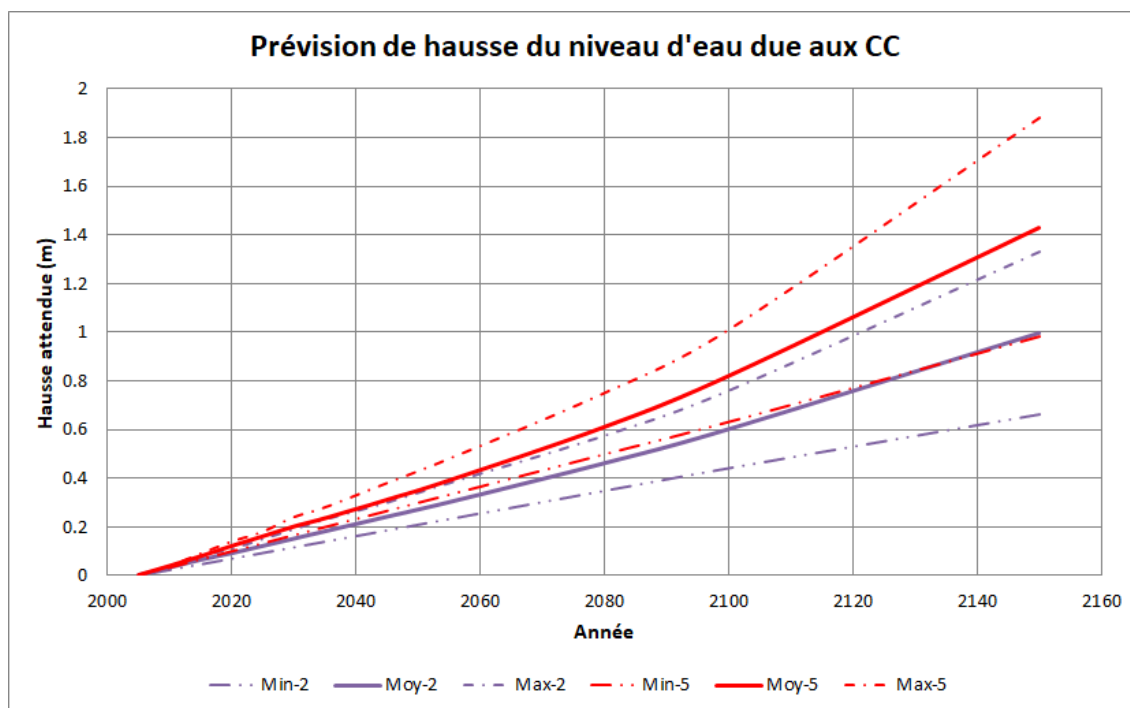


Figure 2.3 Hausse du niveau moyen des mers – GIEC/IPCC-2021 (« 2 » = SSP2-4.5, « 5 » = SSP5-8.5)

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 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.”

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 Port-Cartier. À l'échéance de 50 ans, on s'attend à ce que les niveaux d'eau moyens soient 22 cm plus haut qu'aujourd'hui.

Tableau 2.1 Fréquence de dépassement des niveaux d'eau à Port-Cartier

Niveau d'eau	Fréquence de dépassement	Élévation (m GVD28)	Remarque
Haut	1 heure / 2 ans	+2,32	
Très haut	1 heure / 10 ans	+2,58	
Extrême actuel	1 heure / 50 ans	+2,72	Sans influence des changements climatiques ni ajustement isostatique
Extrême futur	1 heure / 50 ans	+2,94	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). Les données fournies par Pêches et Océans Canada¹⁰ pour la station de Port-Cartier sont les suivantes :

- Pleine Mer Supérieure de Grande Marée (**PMSGM**) : +3,36 m ZC / **+1,89 m** CGVD28
- Pleine Mer Supérieure de Marée Moyenne (PMSMM) : +2,67 m ZC / +1,20 m CGVD28
- Niveau moyen de l'eau : +1,43 m ZC / -0,04 m CGVD28
- Basse Mer Inférieure de Marée Moyenne (BMIMM) : +0,39 m ZC / -1,08 m CGVD28
- Basse Mer Inférieure de Grande Marée (BMIGM) : -0,22 m ZC / -1,69 m CGVD28

2.5 Vagues au large de la zone à protéger

Les modélisations de vagues faites par Lasalle|NHC entre 1980 et 2023 (en se servant des données climatiques disponibles dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent) ont été utilisées pour dimensionner les

¹⁰ <https://marees.gc.ca/fr/stations/02790>

protections de berge de Port-Cartier. Ces modélisations de vagues ont été validées, entre autres, à partir des données enregistrées par des AWAC de l'ISMER à Sept-Îles et Rivière Pentecôte.

Les données climatiques utilisées par Lasalle|NHC sont les données de forçage CFSR (grille de 36 km – entre 1980 et 2023) et HRDPS (grille de 2,5 km – entre 2018 et 2023). Les validations faites sur les données enregistrées par l'UQAR dans la région de Port-Cartier 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.

Il faut noter que l'utilisation du forçage CFSR (1980-2023) pourrait avoir induit une légère sous-estimation des hauteurs de vagues extrêmes dans le secteur de Port-Cartier, malgré l'effort de correction fait par Lasalle|NHC pour débiaiser ces données.

Les vagues au large ont été réfractées en plusieurs points et des séries chronologiques ont été produites pour différents points d'extraction.

La figure 2.4 illustre la position des points d'extraction des vagues fournis par Lasalle|NHC. Les informations concernant les points P1, P2 et P3 ont été utilisées dans le dimensionnement des ouvrages de protection.

Les coordonnées (MTM6) des points P1 à P3 sont :

Tableau 2.2 Localisation des points d'extraction des vagues à Port-Cartier

Point	X (m MTM6)	Y (m MTM6)	Z (m CGVD28)
P1	350700	5542725	-1,36
P2	351050	5542725	-1,00
P3	351300	5542725	-1,12

On distingue deux orientations principales des grandes vagues au large de Port-Cartier, soit le sud et le sud-est. À l'approche de la rive, les vagues proviennent exclusivement du sud.

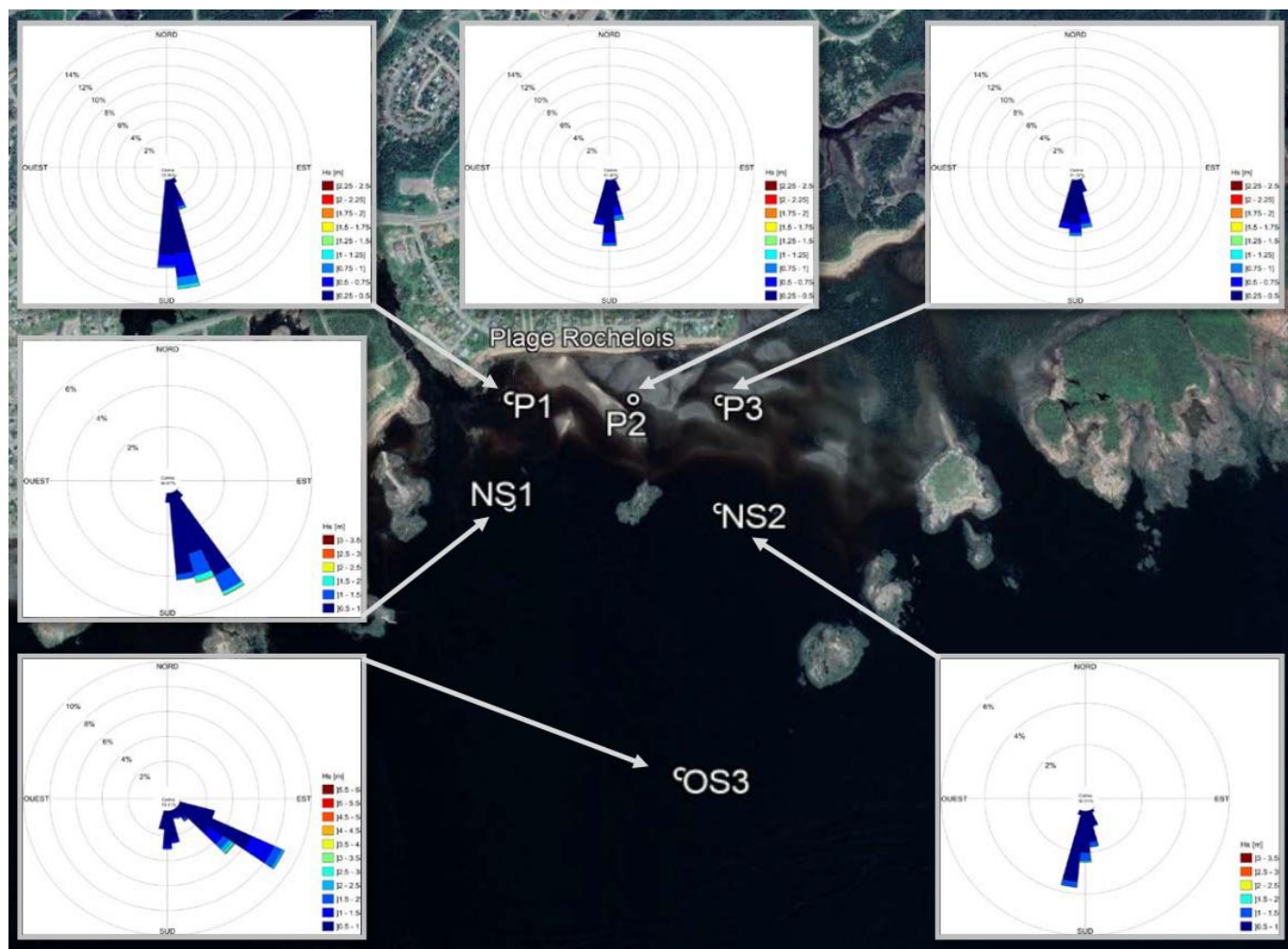


Figure 2-10 : Distribution des hauteurs significatives des vagues (Hs [m]) dans le domaine local

Figure 2.4 Localisation des points d'extraction des vagues – Lasalle|NHC, 2026 (en préparation)

Les hauteurs significatives des fortes vagues au point P1 (le point le plus exposé aux vagues) sont illustrées sur la figure 2.5 qui montre la fréquence de dépassement des plus grandes vagues de la série. Pour une fréquence d'une heure en 50 ans, la hauteur de vague significative est de l'ordre de 2,0 m et elle provient du Sud-Sud-Est.

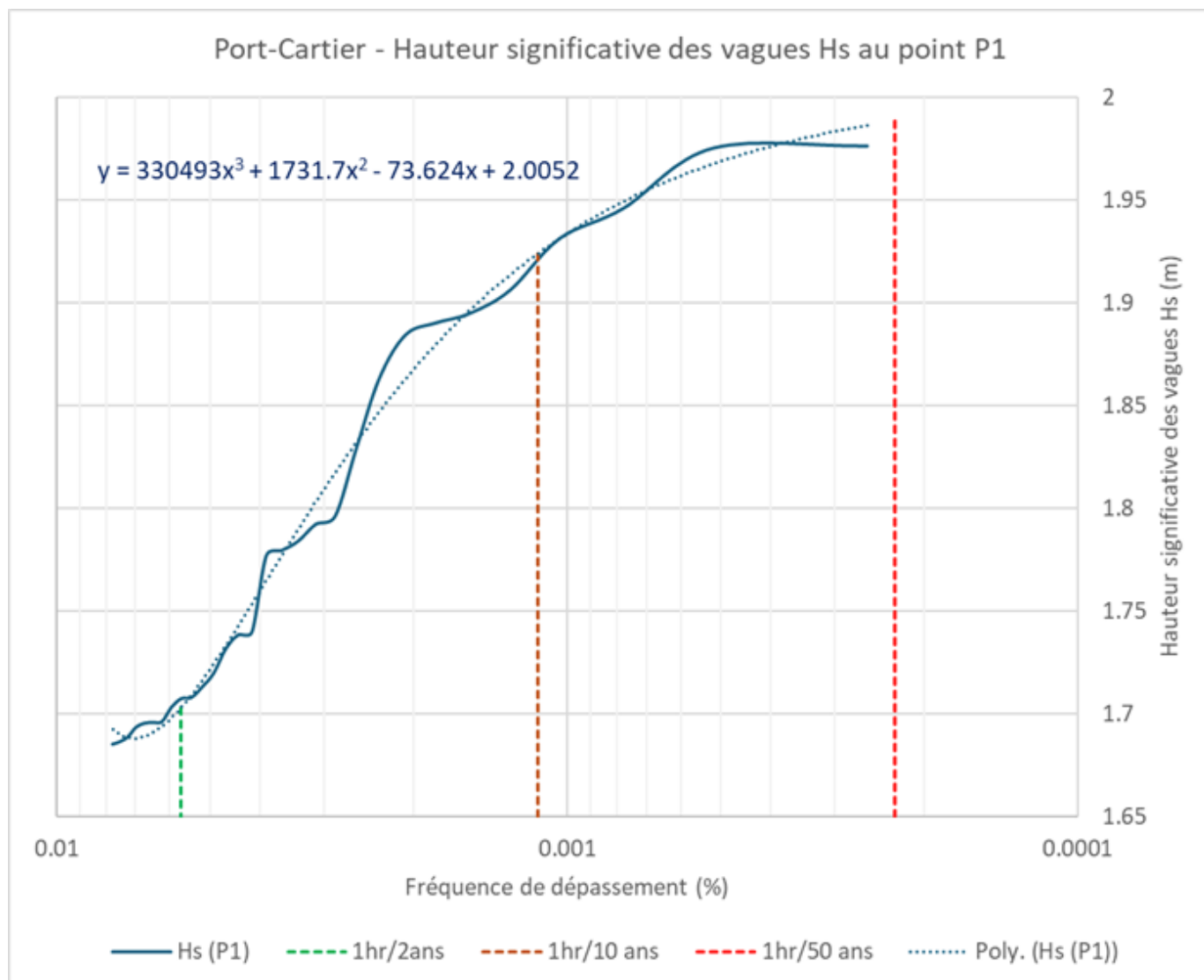


Figure 2.5 Hauteurs significative des vagues par 2,5 m de profondeur (P1) – Fréquence de dépassement

Des séries temporelles synchrones de vagues / niveaux d'eau ont été produites pour les points P1 à P3 par Lasalle|NHC. Ces séries temporelles comprennent 385 704 données horaires chacune. Les figures 2.6 et 2.7 illustrent la relation entre la hauteur significative des plus fortes vagues de la série temporelle et les niveaux d'eau (figure 2.6) ou la période de pointe (figure 2.7) pour le point P1. On constate sur ces figures que des vagues de 1,95 m de Hs se sont produites avec des niveaux d'eau de 2,7 m CGVD28 (tempête du 30 décembre 2016).

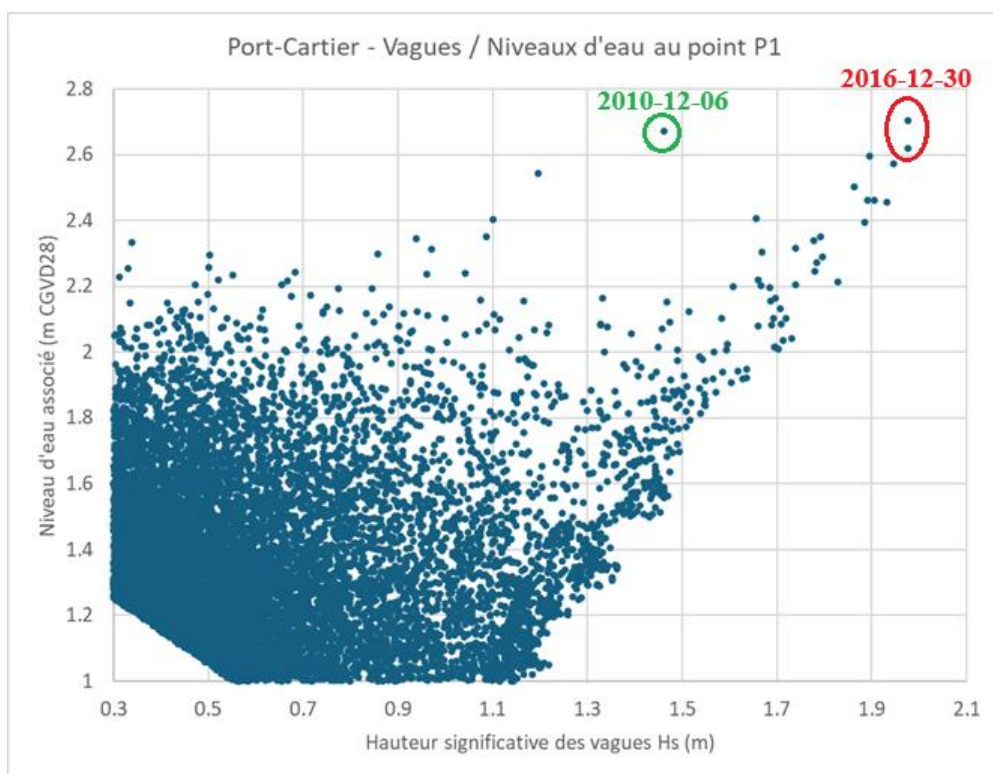


Figure 2.6 Relation entre le Hs et la direction des grandes vagues au point P1

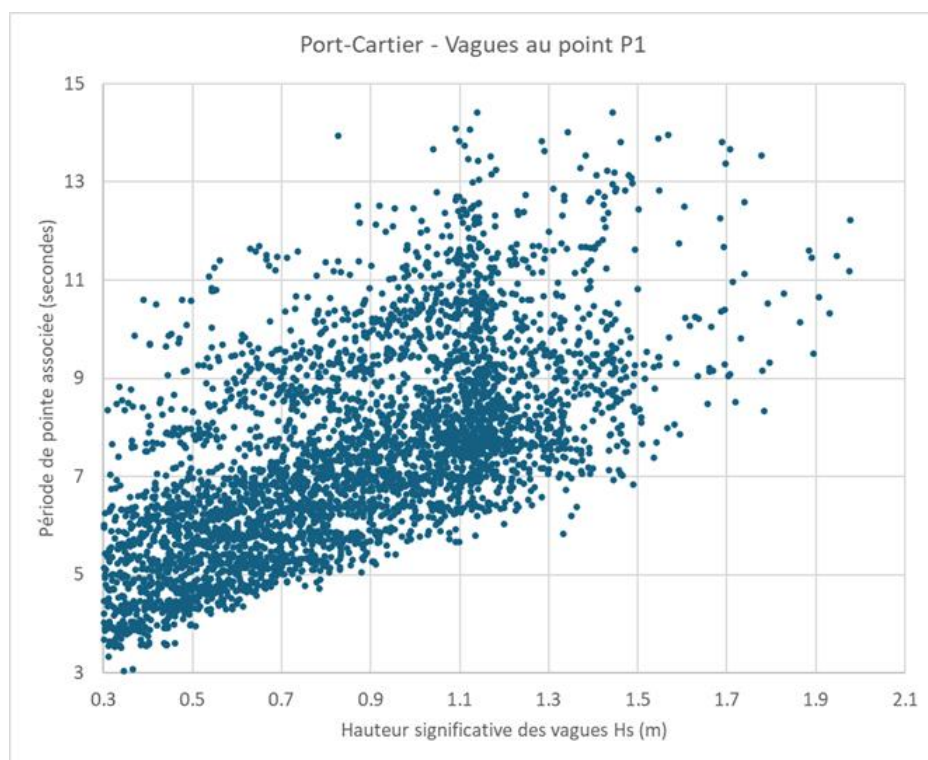


Figure 2.7 Relation entre le Hs et la période de pointe des grandes vagues au point P1

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 Port-Cartier sont les données les plus récentes disponibles, soit celles recueillies à marée basse par Cadoret le 3 août 2023 (figure 2.8). À cause de l'amplitude de la marée, aucune donnée de relevé bathymétrique n'était requise pour les besoins de mise en plan de la recharge de plage.

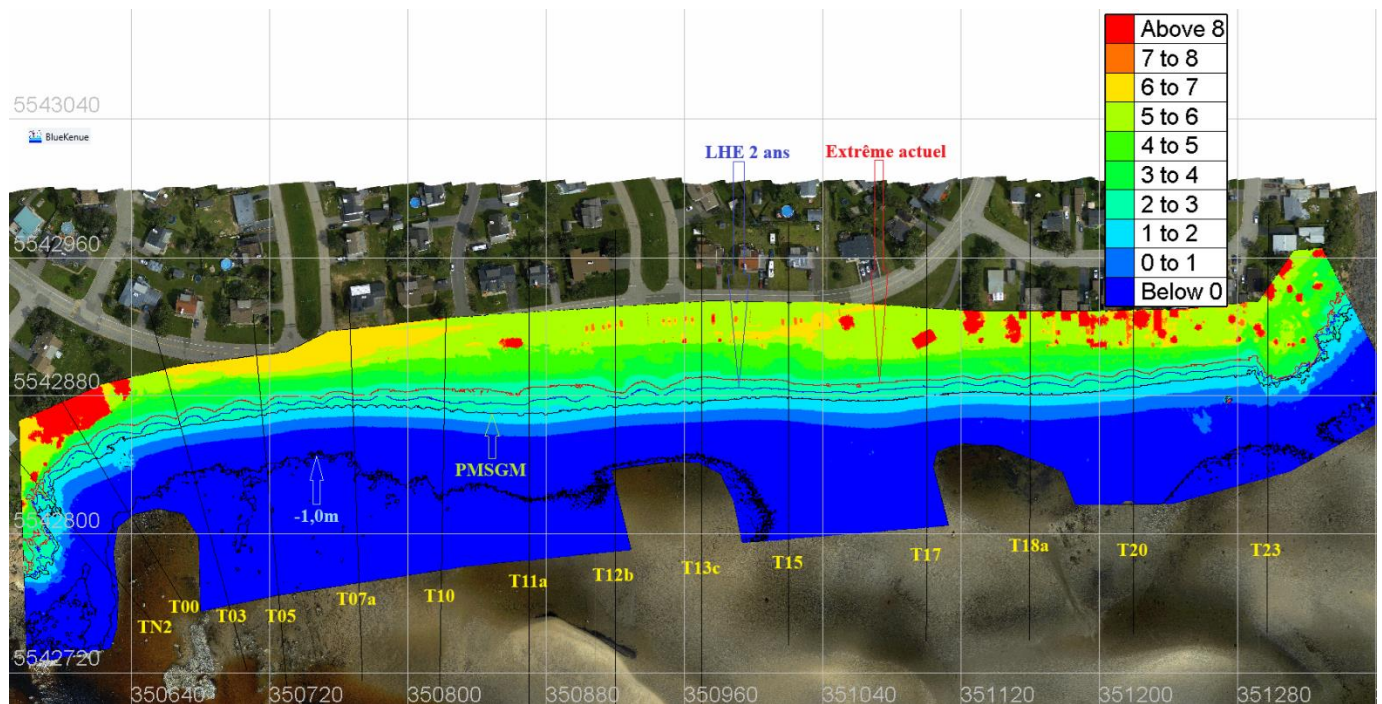


Figure 2.8 Relevés topographiques disponibles dans la zone d'étude (Cadoret-2023)

Il est recommandé de prévoir un relevé topographique de la berge avant le début des travaux pour valider les quantités de matériaux requises.

La figure 2.8 présente la position des différents transects illustrés plus loin en coupe. Les chiffres sur la figure en plan réfèrent au numéro du transect apparaissant dans le titre des vues en coupe.

2.7 Calcul de l'élévation des crêtes des ouvrages

En se basant sur les informations fournies dans le Coastal Engineering Manual (C.E.M.)¹¹, sur les travaux de Didier et al., 2016¹² ainsi que sur d'autres publications scientifiques, plusieurs équations de la remontée des vagues sur le rivage de Port-Cartier 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|NHC, 2026¹³(en préparation).

2.8 Granulométrie des matériaux de recharge

Compte tenu de l'exposition aux vagues de la plage Rochelois et des contraintes budgétaires liées à la protection de ce secteur, il est recommandé de s'orienter vers un diamètre médian D_{50} des matériaux de recharge de 15 mm. Ce choix limite les quantités de matériaux à mettre en œuvre lors de la construction ainsi que la mobilité des matériaux sous l'impact des vagues, ce qui prolonge la durée de vie utile de la recharge de plage. Les options de diamètre médian D_{50} des matériaux de 10 mm et 5 mm ont également été évaluées et sont présentées aux chapitres 5.5 et 5.6.

L'expérience des recharges de plage mises en place au Québec depuis plus de dix ans sous la direction du ministère de la Sécurité Intérieure montre que ce sont les matériaux granulaires plus fins qui dominent la surface de la recharge de plage en été. Cette constatation peut être faite sur la plage McCormick sur laquelle avaient été placés des matériaux significativement plus grossiers que ceux prévus sur la plage Rochelois (voir figure 2.9).

La figure 2.10 illustre la recharge de plage de Pointe-aux-Outardes en juin 2026. On remarque que le sable domine la partie intermédiaire de la plage bien que le matériel granulaire mis en place en 2022 ait un diamètre médian de 10 mm.

¹¹ U.S. Army Corps of Engineers – Coastal Engineering Manual <https://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/u43544q/636F617374616C20656E67696E656572696E67206D616E75616C/>

¹² Didier, D. et al., “Wave runup estimations on platform-beaches for coastal flood hazard assessment”, Nat Hazards, Springer Science+Business Media Dordrecht, 2016

¹³ Lasalle|NHC, « Plage Rochelois – Port-Cartier - Mise à jour de la conception de la recharge de gravier », Rapport R-0829, En préparation.



Figure 2.9 Photo de la plage McCormick prise le 27 juillet 2026 (Ville de Port-Cartier)



Figure 2.10 Photo de la recharge de plage de Pointe-aux-Outardes prise en juin 2026 (MSI)

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

3.1 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 – 1980-2023) a été utilisée pour calculer la remontée des vagues sur une recharge de plage (voir chapitres 2.2 et 2.5).

Les prévisions de hausse de niveaux d'eau due aux changements climatiques à Port-Cartier sont de 0,12 m en 30 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 0,10 m a été prise en compte de façon à obtenir une évaluation raisonnable de l'élévation de la crête de la recharge de plage au cours de sa vie utile.

3.2 Remontée des vagues sur une plage

La remontée des vagues sur les rives de Port-Cartier 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 :

- 3 points d'extraction des données de vagues (points P1 à P3 – voir figure 2.4),
- 6 pentes de plage (de 8% à 25%),
- 2 configurations de rivage (élévation du fond au déferlement de -1.0 m et -1,3 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 1980-2023) et en conditions futures (2053). Pour ce faire, la série temporelle synchrone de 1980 à 2023 a été modifiée en ajoutant 10 cm à tous les niveaux d'eau de la série pour simuler un régime de vagues et de niveaux d'eau en conditions futures (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 (une heure dans 50 ans) de remontée des vagues sur le rivage. Pour la partie ouest de la plage, la figure 3.1 illustre les résultats obtenus pour l'équation de Poate-2016 (runup à 2%) en conditions actuelles. La récurrence d'une heure en 50 ans correspond à la ligne pointillée verticale à droite sur la figure. 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 sont privilégiés par rapport aux autres résultats puisque les matériaux envisagés pour la recharge seraient relativement grossiers ($D_{50} = 15$ mm).

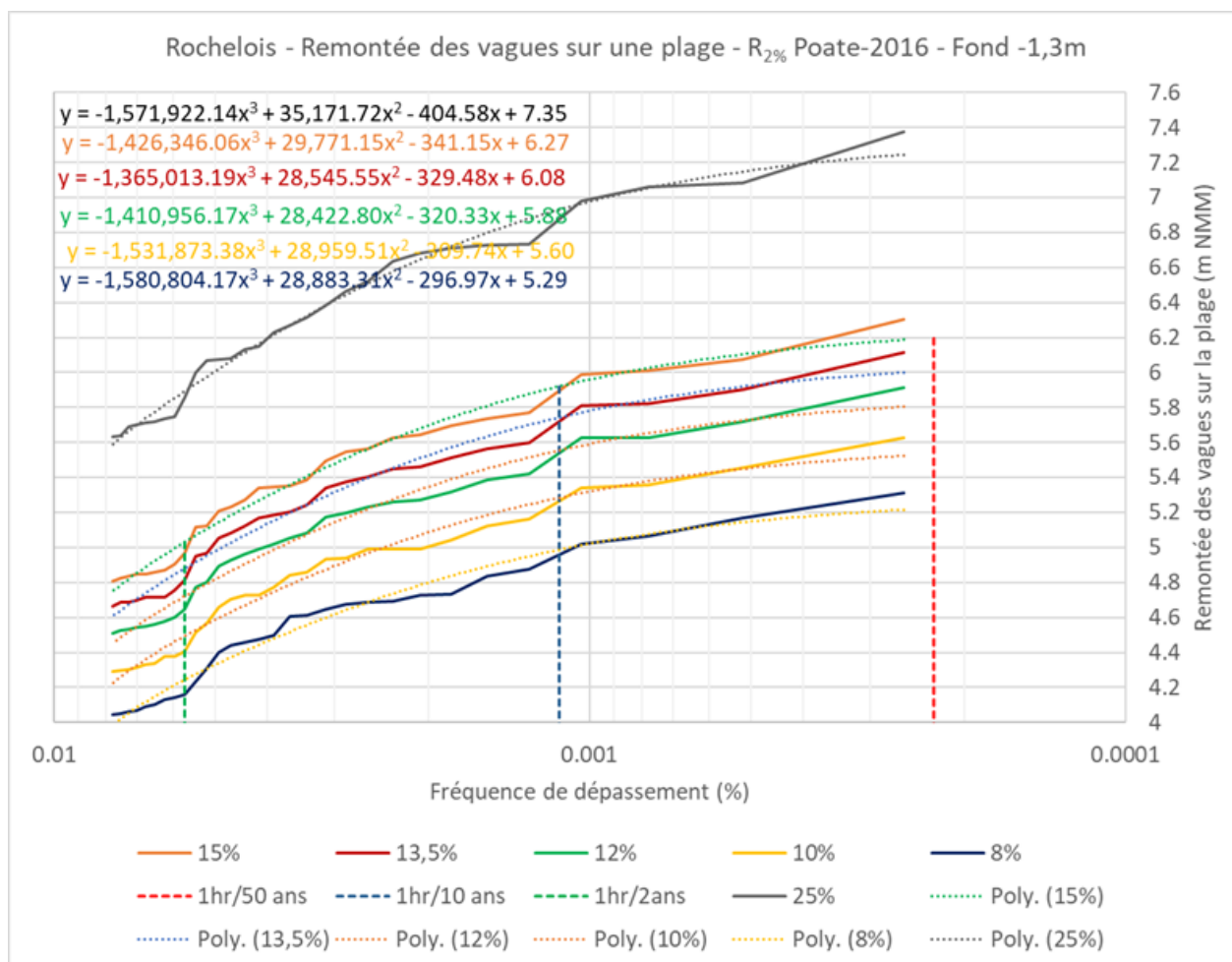


Figure 3.1 Remontée des vagues – $R_{2\%}$ Poate-2016 – Conditions actuelles – Fond à -1,3 m

La figure 3.2 (fond à -1,3 m - Actuel) présente les résultats de calcul de remontée des vagues correspondant aux vagues au point P1 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.

La figure 3.3 (fond à -1,0 m - Actuel) présente les mêmes résultats de calcul de remontée des vagues, mais pour le point P3. Les quatre pentes de plage représentées sont 25%, 15%, 13,5% et 12%.

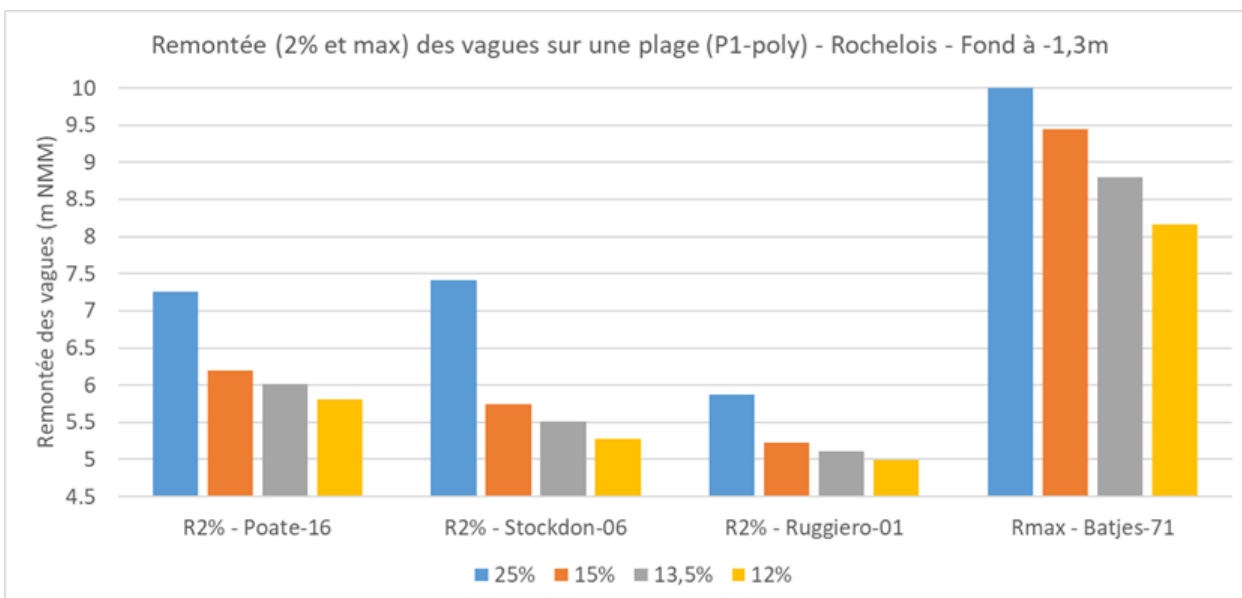


Figure 3.2 Résultats des calculs de remontée des vagues sur une plage – Rochelois point P1 – Fond à -1,3 m (climat actuel)

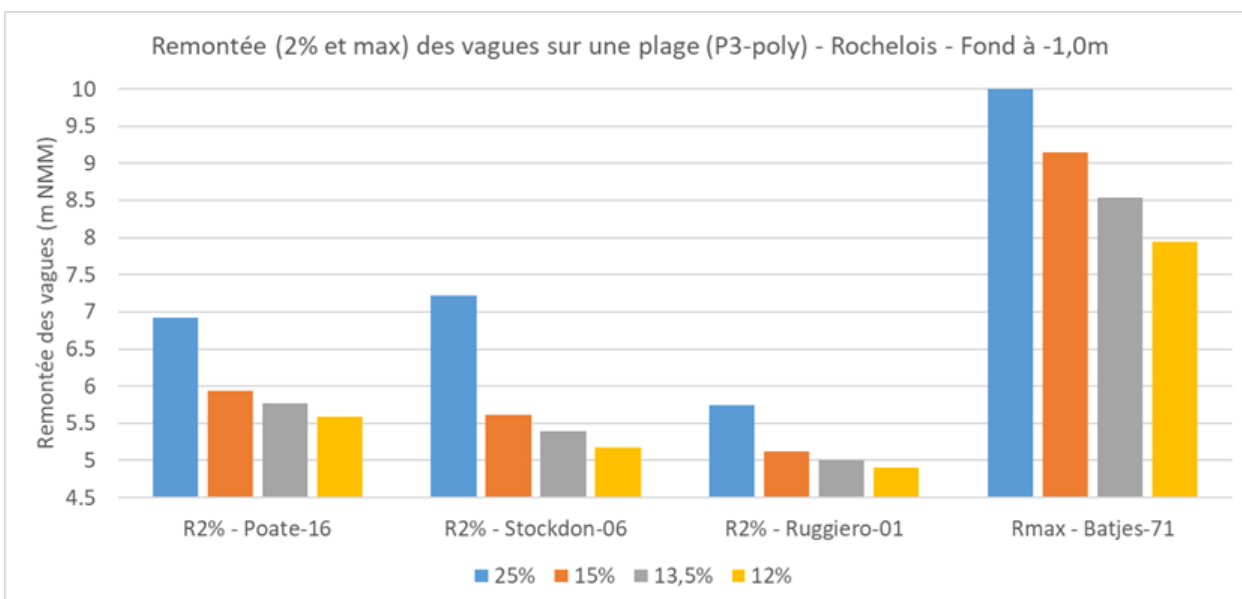


Figure 3.3 Résultats des calculs de remontée des vagues sur une plage – Rochelois point P3 – Fond à -1,0 m (climat actuel)

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 prend 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. **Les figures 3.2 et 3.3 indiquent 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).

Selon les résultats qui incluent la hausse des niveaux d'eau avec les changements climatiques et en tenant compte des risques plus importants de franchissement de la partie ouest de la recharge, le tableau 5.1 présente les recommandations d'élévation de la crête de la recharge selon la zone considérée.

Tableau 3.1 Recommandations d'élévation de crête de la recharge selon la zone

Chainage (m)	Partie ouest (P1)	Partie centrale et partie est (P2 et P3)
Élévation de crête recommandée	+6,2 m	+5,9 m

4 Conception de l'épi à l'est de la recharge de plage

4.1 Série temporelle de vagues et de niveaux d'eau

La série temporelle synchrone de vagues et de niveaux d'eau obtenue pour le point P3 (Lasalle|NHC – 1980-2023) a été utilisée pour calculer la remontée des vagues sur l'épi situé à l'extrémité orientale de la recharge de même que pour dimensionner les pierres constituant cet épi.

4.2 Dimension des pierres de l'épi

La hauteur significative de vague de dimensionnement des enrochements de l'épi de la plage Rochelois obtenue avec les données de vagues au point P3 est de 1,88 m (1hr/50ans).

Pour le musoir de l'épi, avec une pente de 1,5H/1V, la taille moyenne des pierres requises est de 1,6 t (fourchette de 1,2 à 2 tonnes – diamètre équivalent de 0,9 à 1,05 m). L'épaisseur de cette couche de pierres doit être de 1,7 m et la largeur minimale de la crête doit être de 2,5 m.

La pierre-filtre recommandée sous cette pierre de carapace est une pierre de 100 à 200 kg à placer sur une épaisseur de 0,9 m.

Le tout-venant sous la pierre-filtre devrait être un matériel de carrière de 0 à 200 kg dont au plus 5% en poids devrait peser moins de 1 kg.

Pour la partie en riprap de l'épi, la dimension recommandée pour les pierres est de 0,6 tonne (fourchette de 0,5 à 0,8 tonnes – diamètre équivalent de 0,65 à 0,75 m). L'épaisseur de cette couche de pierres doit être de 1,25 m et la largeur minimale de la crête recommandée est de 2,4 m. Le noyau recommandé pour le cœur ce riprap est de la pierre de 50 à 100 kg (diamètre équivalent de 0,3 à 0,4 m).

4.3 Remontée des vagues sur l'épi

La remontée des vagues sur les rives de Port-Cartier 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 une pente d'enrochement de 1,5H/1V.

Comme la structure se présente avec un fort angle d'incidence par rapport aux directions principales des vagues et qu'aucune infrastructure sensible n'est présente à proximité immédiate, une élévation de crête d'enrochement de +6,3 m a été retenue (runup à 5%, 1 hr/10ans + hausse des niveaux d'eau).

5 Options de protection des berges envisagées

5.1 Recharge de plage

En présence de plages sur le site, l'option de protection de berge par recharge de plage est une solution très intéressante. Cette option limite les impacts des travaux de protection de berge sur les rives et propriétés avoisinantes. Comme le sable est très mobile dans l'environnement de Port-Cartier, c'est un matériau granulaire de type gravier et sable qui a été étudié dans le cadre de cette protection de berge. 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 (voir chapitres 5.5 et 5.6).

La taille (diamètre médian ou D_{50}) des sédiments de plage échantillonnés par Englobe en 2018 sur la plage Rochelois (40 échantillons analysés) variait de 0,2 à 1 mm¹⁴. Par contre, lors de réunions publiques, un résident de Port-Cartier a mentionné que l'existence de la plage Rochelois résultait de travaux de déplacement de matériaux granulaires effectués par de la machinerie dans les années 70 (prélèvement de sable au large pour le ramener sur la rive). La plage Rochelois ne serait donc pas entièrement naturelle.

L'élévation de **crête de la recharge retenue** varie de **+5,9 m à +6,2 m CGVD28**, ce qui est généralement proche de l'altitude actuelle de la rive.

La figure 5.1 illustre le concept de recharge de plage utilisant un mélange de gravier et de sable ($D_{50} = 15$ mm) sur la plage Rochelois de Port-Cartier. Ce concept a l'avantage de ne pas créer d'obstruction visuelle pour les usagers et de conserver une plage comme rivage à Port-Cartier, 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 Municipalité. Si du matériel plus fin 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.

¹⁴ Englobe, "Caractérisation géotechnique – Plage Rochelois - Port-Cartier (QC) », Référence # 127-P-0017584-0-01-100-GE-R-0001-00, rédigé pour le compte de la Ville de Port-Cartier, 21 septembre 2018

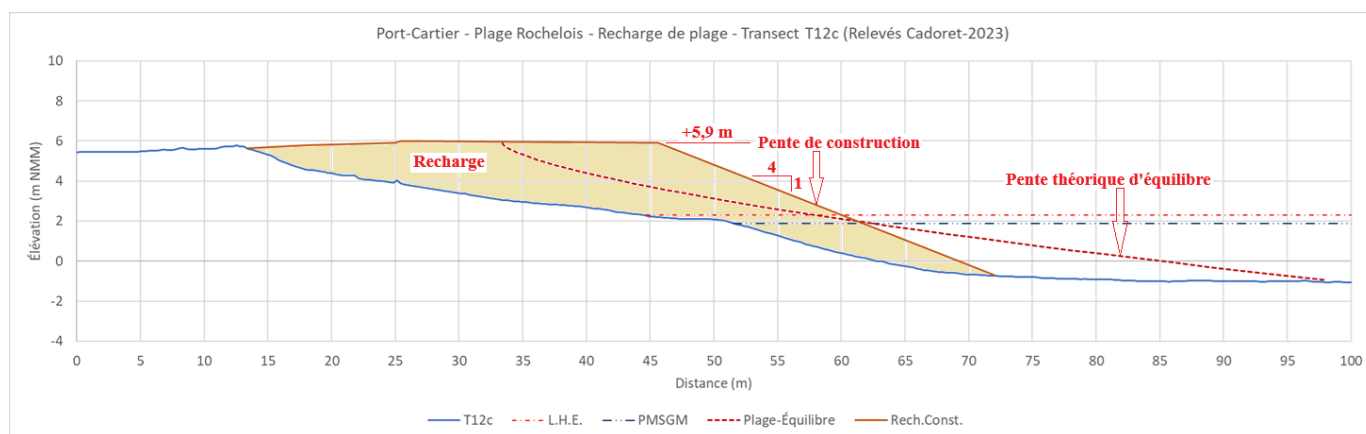


Figure 5.1 Coupe-type d'une recharge de plage – Zone centrale de la plage Rochelois

5.2 Options de recharge V1 versus V2

L'option de recharge V1 consistait en une reprise de la dernière géométrie évaluée en 2021.

La figure 5.2 illustre les différences en plan entre l'option V2 qui intègre les derniers éléments d'analyse hydro-sédimentaires de Lasalle|NHC, les nouvelles élévations de crête et les relevés topographiques de 2023.

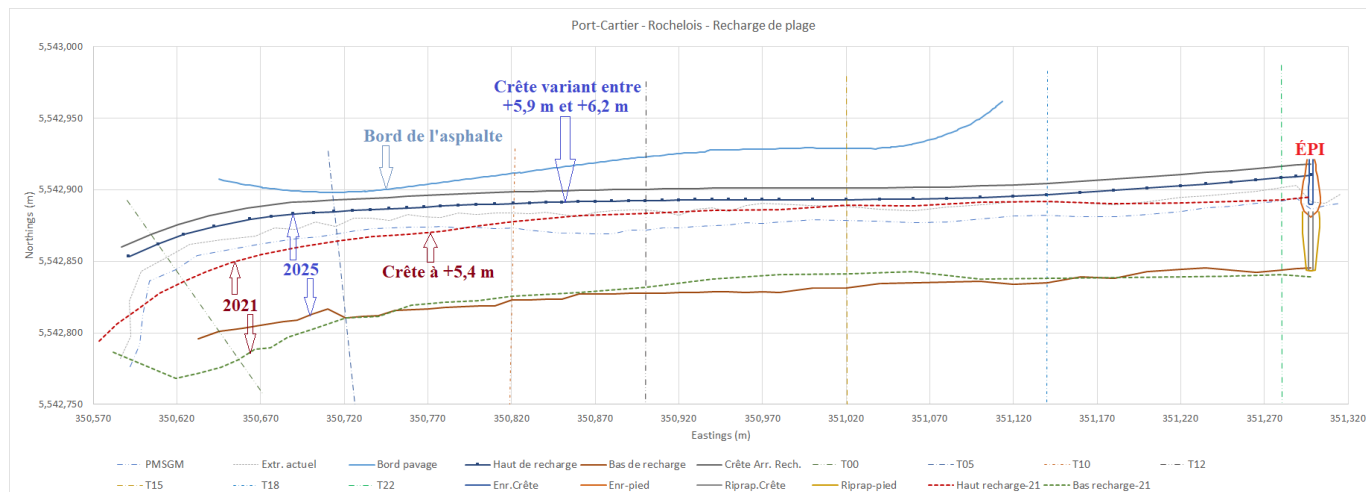


Figure 5.2 Comparaison des options de recharge de plage – V1 (2021) versus V2 (2025)

La version de la recharge de 2025 (V2) est moins courbée que la version de 2021 (V1), suite aux analyses hydrosédimentaires récentes de Lasalle|NHC.

Les caractéristiques principales de cette option de recharge V2 sont :

- Longueur : 730 m
- Volume anticipé de matériaux granulaires : 100 000 m³
- Un épi rocheux orienté N-S à l'extrémité est de la recharge.

5.3 Option V3

L'option V2 avait mis en lumière deux éléments potentiellement problématiques, soit :

- La position de l'épi situé directement sur un cran de roc (difficulté à stabiliser les pierres),
- La quantité de matériel granulaire requis (dépassement anticipé des coûts jugés acceptables).

Une option V3 de la recharge de plage a été développée afin de répondre à ces deux questions (figure 5.3).

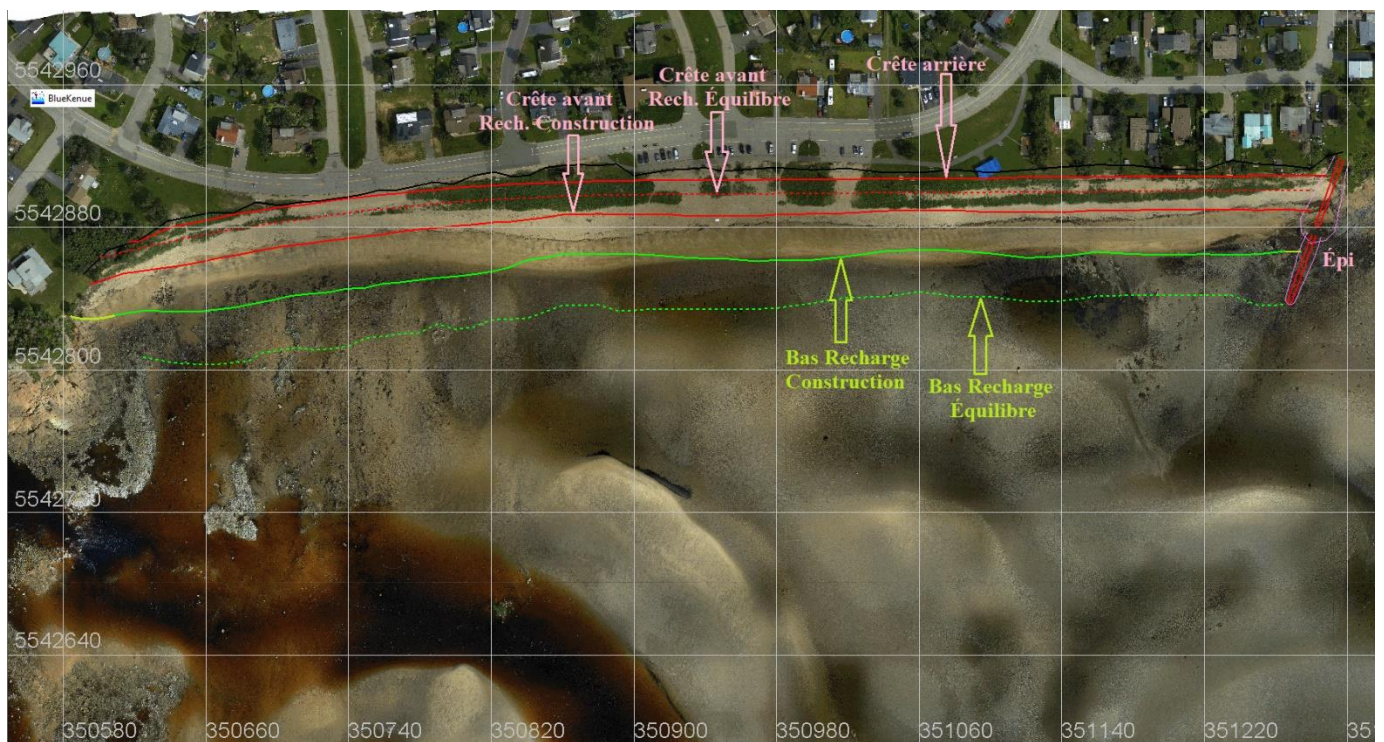


Figure 5.3 Vue en plan de l'option V3 de recharge de la plage Rochelois

Pour l'épi, une rotation de 20 degrés dans le sens horaire a été proposée (sans changement de l'origine sur terre de l'épi). Cette nouvelle position fait en sorte que l'épi se retrouve dans des zones légèrement plus sablonneuses, ce qui diminuera l'impact des vagues et des glaces sur la stabilité des pierres mais n'éliminera pas le besoin d'ancrage des pierres de l'épi (muret de béton armé ancré dans le roc).

Pour les quantités de matériaux granulaires, la recharge a été déplacée de six mètres vers le nord par rapport à l'option V2. Il s'agit du plus grand déplacement possible avant que l'arrière de la recharge n'embarque sur la rue des Rochelois. Ce déplacement implique que, pour conserver la fonctionnalité de la recharge en matériaux granulaires en tant que protection de berge, il sera requis d'excaver une partie de la plage actuelle de façon à garantir une épaisseur minimale de matériaux granulaires ayant un D_{50} de 15 mm. Les matériaux granulaires en place étant nettement plus fins que les matériaux proposés pour la recharge de plage, leur exposition lors des changements de géométrie de la plage sous l'impact des vagues aurait pu mettre en péril la capacité de la recharge de plage à conserver un profil adéquat sous l'impact de ces vagues. La figure 5.4 illustre l'excavation requise par endroits sur la plage.

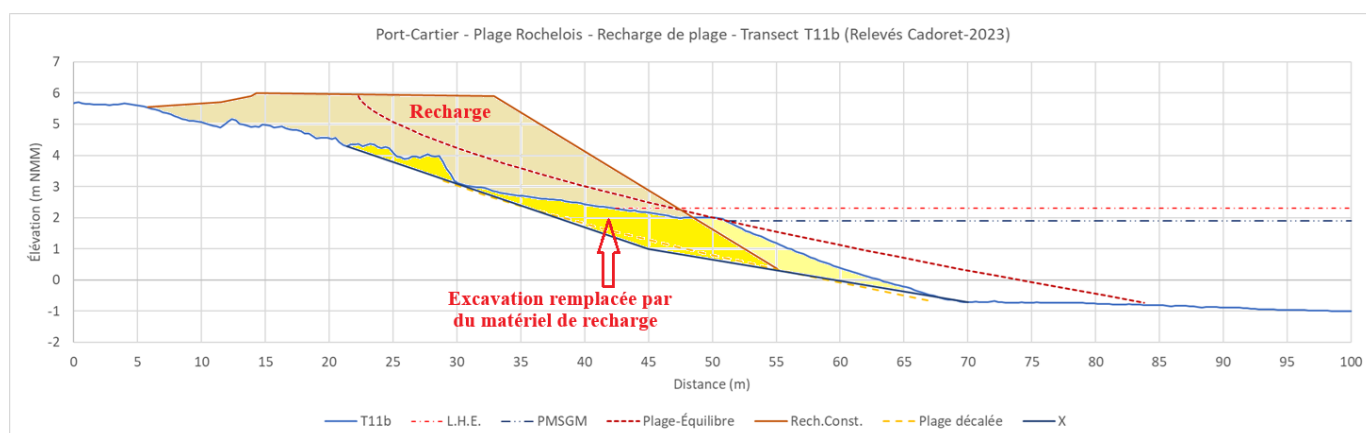


Figure 5.4 Coupe-type de la recharge de plage option V3 avec excavation préalable de la plage actuelle

Les matériaux granulaires fins prélevés de la plage seront réutilisés sur le dessus de la recharge de plage.

Les caractéristiques principales de cette option de recharge V3 sont :

- Longueur : 720 m
- Volume anticipé de matériaux granulaires : 74 000 m³
- Un épi rocheux orienté NNE-SSO à l'extrémité est de la recharge.

5.4 Option V4

Par rapport à l'option V3, l'option V4 introduit quelques correctifs mineurs relatifs à la continuité des pentes de la recharge (décalage horizontal introduit pour répondre au décalage vertical de la crête) et par rapport à la longueur de l'épi (légère augmentation de la longueur pour tenir compte de la rotation de 20 degrés).

Les figures 5.5 (vue d'ensemble) et 5.6 (zoom sur l'extrémité est) présentent la vue en plan de l'option V4 de la recharge de la plage Rochelois.

Les caractéristiques principales de cette option de recharge V4 sont :

- Longueur : 720 m
- Volume anticipé de matériaux granulaires : 76 000 m³
- Un épi rocheux orienté NNE-SSO à l'extrémité est de la recharge.

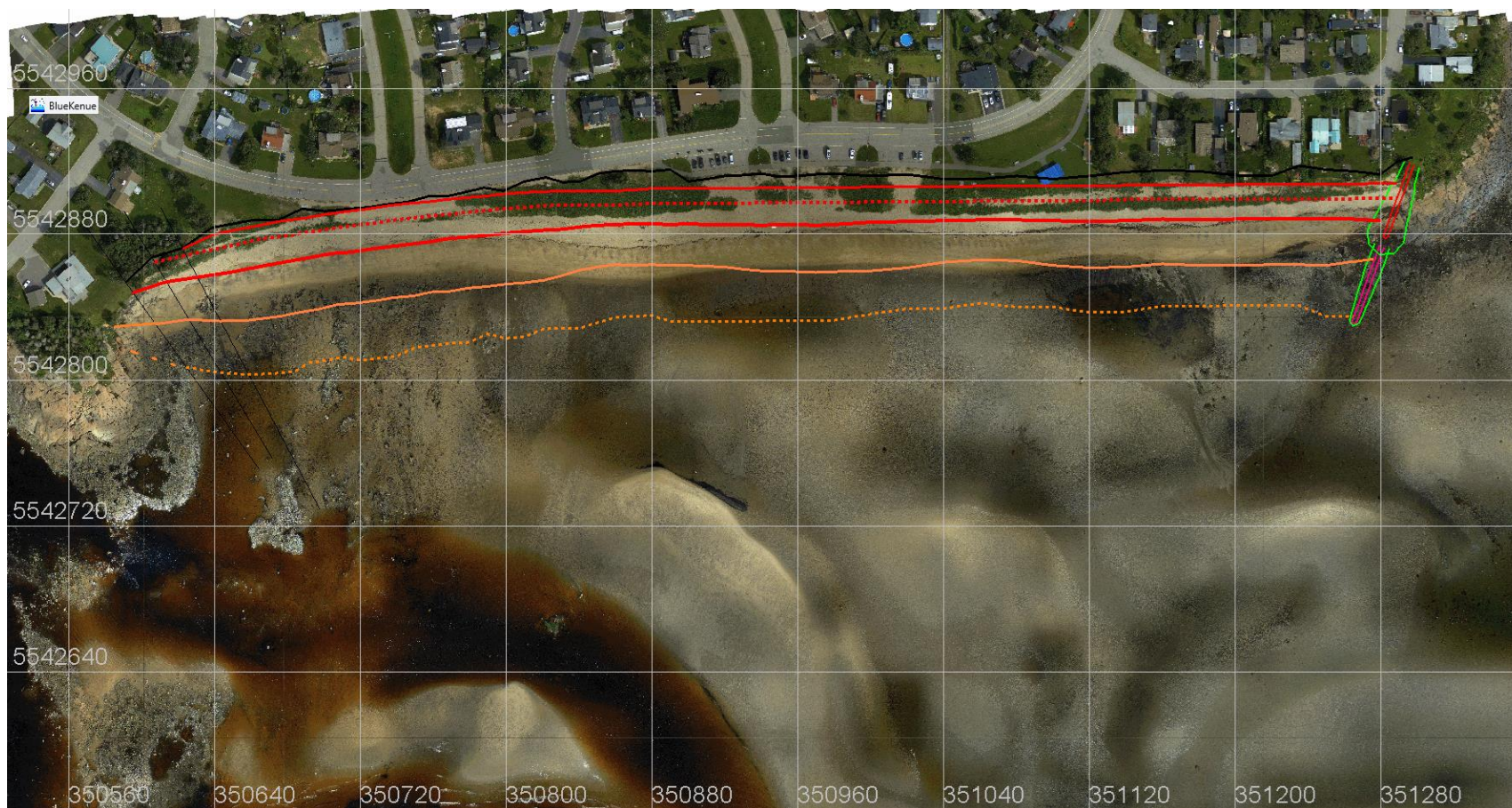


Figure 5.5 Vue en plan de l'option V4 de la recharge de plage (vue d'ensemble)

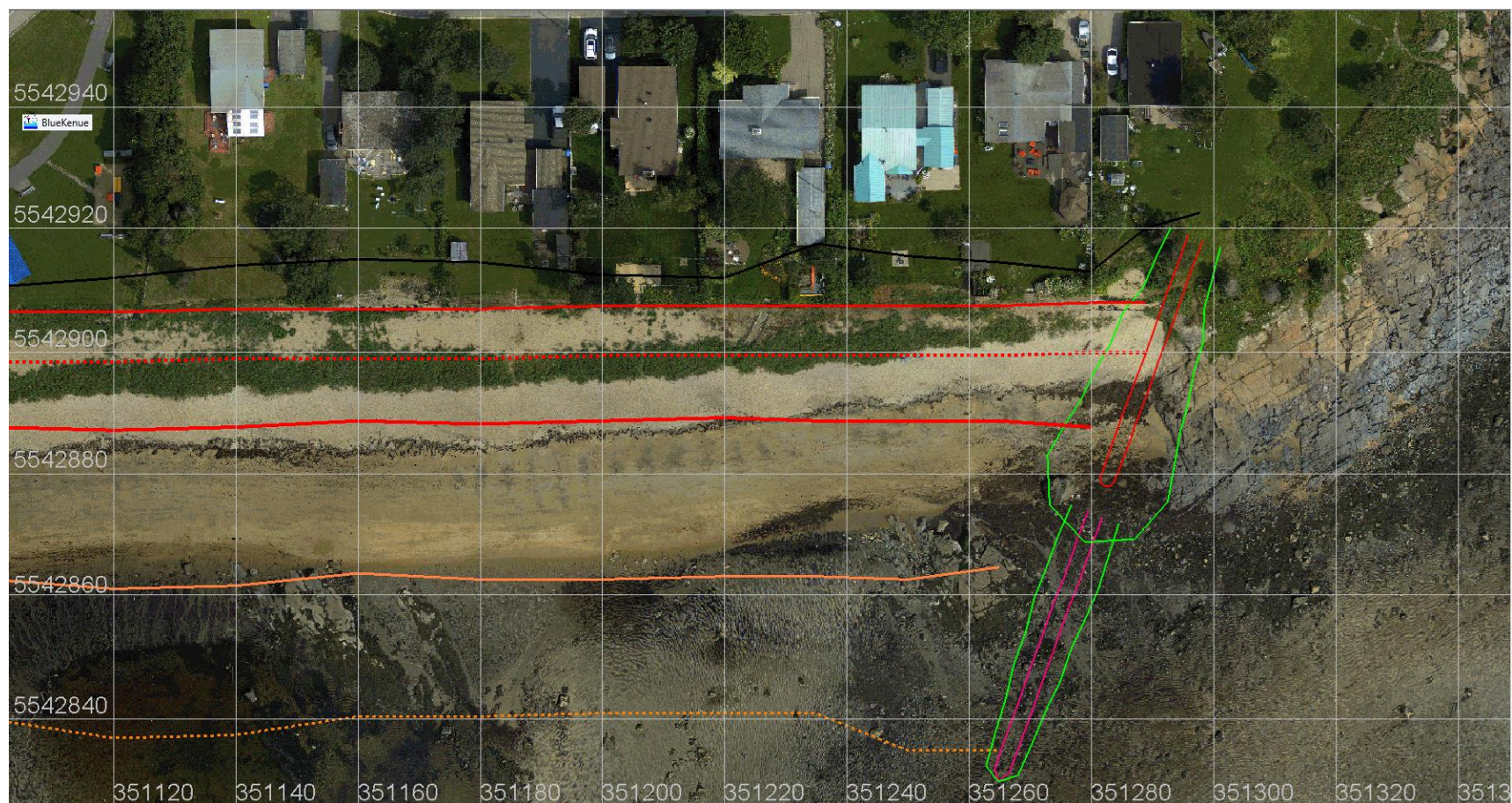


Figure 5.6 Vue en plan de l'option V4 de la recharge de plage (zoom sur l'extrémité est)

5.5 Option de recharge avec un D_{50} de 10 mm

Une option de la recharge de plage utilisant un matériel granulaire ayant un diamètre médian D_{50} de 10 mm a été évaluée.

La figure 5.7 présente en coupe les différences entre une recharge de plage utilisant un D_{50} de 15 mm et celle utilisant un D_{50} de 10 mm. Pour compenser la plus faible pente d'équilibre théorique d'un matériau granulaire plus fin, il est nécessaire de placer plus de matériaux lors de la construction de la recharge.

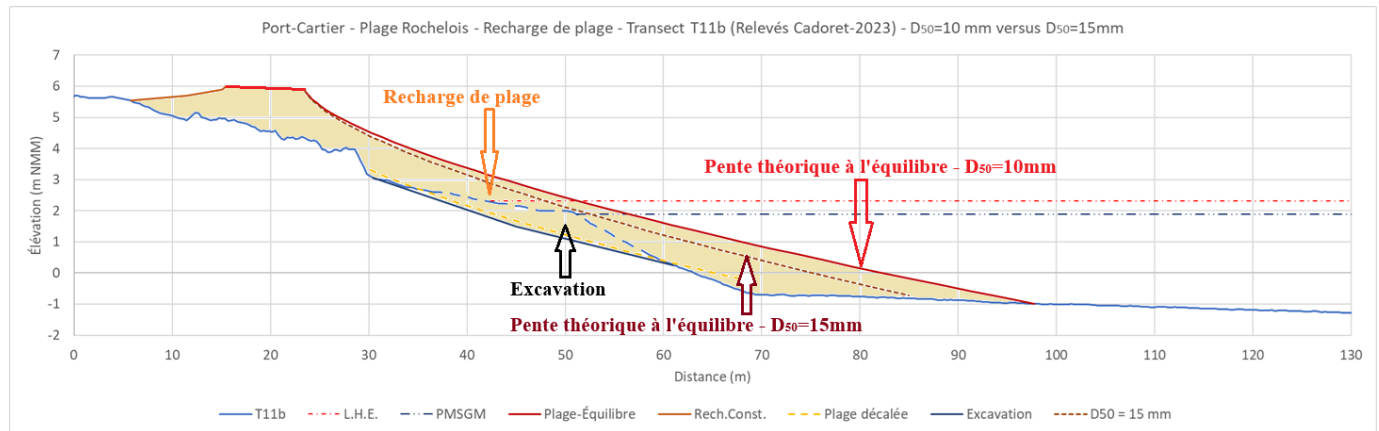


Figure 5.7 Comparaison en coupe des options de recharge utilisant des D_{50} de 15 mm et de 10 mm

Avec exactement la même géométrie de crête de recharge à l'équilibre, les calculs de quantités estimatives de matériaux requis pour une recharge de plage utilisant un D_{50} de 10 mm donnent un volume de 94 000 m³ de matériaux granulaires (par rapport à 76 000 m³ pour un matériel granulaire ayant un D_{50} de 15 mm).

La quantité de matériaux à excaver de la plage actuelle et à replacer sur le dessus de la recharge passe de 5 200 m³ pour un D_{50} de 15 mm à 1 100 m³ pour un D_{50} de 10 mm.

La longueur de l'épi à l'extrémité est de la recharge de plage devrait être augmentée d'environ 13% en passant d'un D_{50} de 15 mm à un D_{50} de 10 mm.

L'émissaire situé dans la partie ouest de la recharge devrait être allongé de l'ordre de 14 m en passant d'un D_{50} de 15 mm à un D_{50} de 10 mm.

5.6 Option de recharge avec un D_{50} de 5 mm

Une option de la recharge de plage utilisant un matériel granulaire ayant un diamètre médian D_{50} de 5 mm a également été évaluée.

La figure 5.8 présente en coupe les différences entre une recharge de plage utilisant un D_{50} de 15 mm et celle utilisant un D_{50} de 5 mm. Pour compenser la plus faible pente d'équilibre théorique d'un matériau granulaire plus fin, il est nécessaire de placer encore plus de matériaux lors de la construction de la recharge.

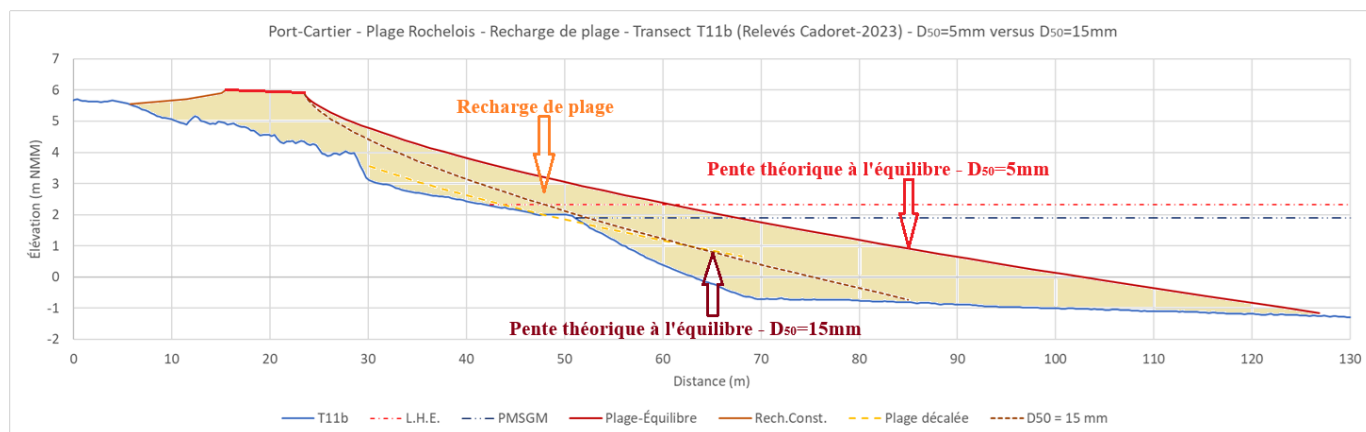


Figure 5.8 Comparaison en coupe des options de recharge utilisant des D₅₀ et 15 mm et de 5 mm

Avec exactement la même géométrie de crête de recharge à l'équilibre, les calculs de quantités estimatives de matériaux requis pour une recharge de plage utilisant un D₅₀ de 5 mm donnent un volume de 147 000 m³ de matériaux granulaires (par rapport à 76 000 m³ pour un matériel granulaire ayant un D₅₀ de 15 mm).

Il n'y aurait plus de matériaux à excaver dans la plage actuelle et à replacer sur le dessus de la recharge pour un D₅₀ de 5 mm.

La longueur de l'épi à l'extrémité est de la recharge de plage devrait être augmentée d'environ 41% en passant d'un D₅₀ de 15 mm à un D₅₀ de 5 mm.

L'émissaire situé dans la partie ouest de la recharge devrait être allongé de l'ordre de 45 m en passant d'un D₅₀ de 15 mm à un D₅₀ de 5 mm.

6 Conclusion et recommandations

6.1 Conclusion

La protection de berge prévue sur la plage Rochelois à Port-Cartier a fait l'objet d'une révision complète de son dimensionnement par rapport aux analyses faites en 2018-2020. De nouvelles données de niveaux d'eau et de vagues ont été modélisées par Lasalle|NHC. Un relevé topographique a été fait à marée basse en août 2023. Ces nouvelles informations ont été intégrées dans la conception de la recharge de plage en vue d'obtenir un ouvrage de protection de berge plus durable.

Le MSI recommande que la Municipalité 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 un équilibre entre les investissements et la valeur des enjeux et usages protégés 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 la plage Rochelois à Port-Cartier a été faite.

- Quatre options de protection de la berge à l'aide d'une recharge de plage ont été analysées avec des matériaux granulaires ayant un diamètre médian D_{50} de 15 mm.
- Deux options supplémentaires de recharge de plage ont été sommairement évaluées avec des matériaux granulaires ayant un diamètre médian D_{50} de 10 mm et de 5 mm.
- La position en plan de la recharge de plage a été adaptée pour optimiser les quantités de matériaux granulaires requis dans la construction de cette recharge de plage.
- La position en plan de l'épi retenant l'extrémité est de la recharge a également fait l'objet d'une rotation afin d'améliorer la résistance des pierres de l'épi aux impacts des glaces et des vagues.

6.2 Recommandations

L'option V4 de la recharge de la plage Rochelois est l'option recommandée qui répond le mieux aux objectifs du *Cadre pour la prévention des sinistres* du MSI car elle :

- 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 nettement 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.

En raison des coûts importants, tant lors de la construction que dans le cadre de recharges d'entretien, il est recommandé de s'orienter vers une recharge faite avec des matériaux granulaires de type gravier et sable (D_{50} de 15 mm) plutôt que sable et gravier fin (D_{50} de 5 mm) ou sable (D_{50} de 0,5 à 1 mm). Il est intéressant de noter que les problèmes liés à la granulométrie relativement grossière des matériaux granulaires de la recharge de plage recommandée pourraient être atténués par des mesures de mitigation, comme le fait de prévoir une couche de sable ou de gravier fin sur la crête de la recharge.

Il serait important d'informer les résidents que la zone de matériaux granulaires de la recharge de plage qui serait construite devant les résidences n'est pas une zone de développement. Toute construction, durable ou temporaire, devrait être strictement interdite sur cette zone, même si une partie de cette zone « gagnée sur la mer » est à l'intérieur des propriétés tel que définies par le cadastre. En cas de non-respect de cette recommandation, à cause du caractère de zone-tampon de ce haut de plage, les installations construites seront probablement détruites lors de tempêtes accompagnées de hauts niveaux d'eau.

En ce qui concerne la durabilité de la recharge de plage, il faut noter que les calculs effectués par Lasalle|NHC comportent une importante hypothèse, soit l'absence d'interférence de l'émissaire sur le comportement de la recharge de plage. Si, par exemple, l'émissaire est dimensionné de façon à se comporter comme un épi ou si les débits d'écoulement de l'émissaire 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.

La circulation de véhicules motorisés (motos, quads, pickups, etc.) sur la plage devrait être interdite car cette activité affecte directement la durée de vie utile de la recharge de plage.

Compte tenu de l'évolution de la berge constatée entre les relevés de 2017 et de 2023, il est recommandé de prévoir un relevé topographique de la berge avant le début des travaux pour valider les quantités de matériaux requises et de prévoir un suivi topographique de la plage sur 5 à 10 ans pour intervenir en prévention en cas d'impact significatif sur la recharge de tempêtes exceptionnelles.

Préparé par :



2026-10-15

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