



Ville de Port-Cartier

PROJET DE STABILISATION DE LA PLAGE ROCHELOIS – ÉTUDE D'IMPACT

**Document de réponses aux questions et
commentaires du MELCC**

16-P0017164.001-1001-EN-R-0200-00

DÉCEMBRE 2021

VERSION FINALE



Préparé par :

Catherine Lalumière, biol., MBA
Chargée de projet en environnement et
directrice-adjointe de service
Études environnementales et changements
climatiques

Approuvé par :

Michel Belles-Isles, Ph. D., ichtyologiste
Chargé de projet
Études environnementales et changements
climatiques

Registre des révisions et émissions		
N° de révision	Date	Description
0A	12 novembre 2021	Version préliminaire
00	16 décembre 2021	Version finale

Propriété et confidentialité

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

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

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

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

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

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
2	QUESTIONS ET COMMENTAIRES	1
2.1	Volet administratif et description du projet	1
2.1.1	Recharge de plage.....	1
2.1.2	Conditions hydrosédimentaires.....	3
2.1.3	Réalisation des travaux.....	4
2.1.4	Enrochement.....	5
2.1.5	Coûts du projet.....	9
2.2	Volet sol et matières	10
2.2.1	Banc d'emprunt.....	10
2.3	Volet milieux humides, hydriques et naturels	12
2.3.1	Milieux humides et hydriques.....	12
2.3.2	Protection du poisson et de son habitat.....	17
2.3.3	Remise en état des lieux.....	18
2.3.4	Aires protégées	19
2.4	Volet milieu humain/social et autochtone	20
2.4.1	Consultation sur les enjeux.....	20
2.4.2	Contraintes réglementaires relatives aux schémas d'aménagement et de développement.....	21
2.5	Autres	23

Tableaux

Tableau 1	Coûts estimatifs du projet de stabilisation de la plage Rochelois	10
Tableau 2	Bilan des empiétements du projet de stabilisation de la plage Rochelois	16
Tableau 3	Activités d'information et de consultation tenues depuis le dépôt de l'étude d'impact	20
Tableau 4	Principales préoccupations soulevées lors des activités d'information et de consultation	21

Figures

Figure 1	Concept d'épi à l'extrémité est de la recharge de plage – Coupe longitudinale	2
Figure 2	Transport littoral en conditions actuelles – LNI-2020.....	6
Figure 3	Transport littoral en présence de la recharge (solution V3) – LNI-2020	6
Figure 4	Plage Rochelois et plage adjacente (baie Brunelle) en 2004	7
Figure 5	Plage Rochelois et plage adjacente en 2021.....	7
Figure 6	Vue en direction ouest de l'épi à partir de la rue des Rochelois en conditions ensoleillées.....	8
Figure 7	Vue à partir de la cour d'une résidence de la 5 ^e Rue	9
Figure 8	Niveaux d'eau maximums annuels à Port-Cartier pour la période 1979-2011	13
Figure 9	Modèle numérique de terrain de la zone de la recharge (Fond d'image 2017)	14

Figure 10	Limites de calcul des empiétements résultant de la recharge en rive et dans le littoral	15
Figure 11	Délimitation de l'aire de travail du projet de recharge de la plage Rochelois ...	19
Figure 12	Aires d'affectation de la MRC des Sept-Rivières (tirée du schéma d'aménagement de la MRC de Sept-Rivières)	22

Annexes

Annexe 1	Modélisation numérique des conditions hydrosédimentaires – 2020
Annexe 2	Étude de scénarios alternatifs de protection de plage
Annexe 3	Plans de localisation des bancs d'emprunt
Annexe 4	Documents consultatifs
Annexe 5	Quantification des émissions de gaz à effet de serre

1 INTRODUCTION

La Ville de Port-Cartier a déposé une étude d'impact sur l'environnement en juin 2020 dans le cadre du projet de stabilisation de la plage Rochelois, sur le territoire de la ville de Port-Cartier.

Le 21 août 2020, une première série de questions et de commentaires sur l'étude d'impact sur l'environnement a été produite et transmise par la Direction de l'évaluation environnementale des projets terrestres du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) (réf. dossier 3211-02-313). Le présent document vise à répondre à cette première série de questions et de commentaires soulevés, lesquels sont repris intégralement dans les prochaines sections.

2 QUESTIONS ET COMMENTAIRES

2.1 VOLET ADMINISTRATIF ET DESCRIPTION DU PROJET

2.1.1 Recharge de plage

QC-1 À la page 52 de l'étude d'impact à la section 6.1.2, l'initiateur mentionne que le type d'interventions prévu a été conçu afin de résister sur une période de 30 ans, donc qu'il ne nécessitera pas de recharge d'entretien. Cette affirmation est cependant contredite à la page 21 de l'annexe B (Ropars, section 4.3.1) où il est dit qu'il faudra prévoir que la plage et l'épi submersible fassent l'objet d'entretiens réguliers (recharges de matériaux).

- L'initiateur doit préciser le détail des travaux d'entretien de l'épi et de la recharge de plage, incluant la fréquence des travaux d'entretien qui sont à prévoir tout au long de la durée de vie utile des interventions. Les données ou informations qui permettent d'appuyer ces précisions doivent aussi être présentées.

RÉPONSE

Rappelons d'abord que le concept intégrant un épi submersible (figure 1-1) est la meilleure solution dans le contexte du projet, car il nécessite moins d'empiétement sur le milieu hydrique et est peu perceptible au niveau visuel. L'extrémité sud de cette structure sera cependant impactée par des vagues et des glaces à différents niveaux d'eau. La grosseur des pierres (0,5 à 1,0 t pour cette partie submersible de l'épi) a été choisie pour résister aux glaces et aux vagues, mais les glaces et les vagues risquent tout de même de déstabiliser quelques pierres lors de tempêtes ou d'épisodes de poussée de glace. Si l'entretien de l'épi (remise en place des pierres) n'est pas réalisé, le déplacement de plusieurs pierres pourrait entraîner le déplacement des sédiments de la plage Rochelois plus vers l'est.

De façon réaliste, il faut s'attendre à avoir une vingtaine de pierres de 0,5 à 1 t à remplacer dans l'enrochement tous les dix ans ou à la suite d'une tempête particulièrement violente (ayant une période de retour supérieure à 10 ans). Il est probable qu'une partie de ces pierres seront éventuellement emportées par les glaces. Les travaux consisteraient donc à transporter environ une dizaine de pierres tous les dix ans, puis à remplacer les pierres déplacées et les nouvelles pierres dans l'épi. L'ampleur de ces travaux d'entretien se limite à environ une demi-heure de pelle hydraulique tous les dix ans.

Si ces travaux de remise en place des pierres ne devaient pas se faire régulièrement (p. ex. en attendant une vingtaine d'années pour intervenir), le départ de plus de pierres pourrait potentiellement créer une brèche et permettre à des matériaux granulaires de la recharge de traverser l'épi vers l'est. Dans ce cas, les travaux de remise en place des pierres s'accompagneront de l'importation de quelques dizaines de m³ de matériaux granulaires. À cet égard, rappelons que la recharge de la plage Rochelois nécessite environ 104 000 m³ de matériaux granulaires.

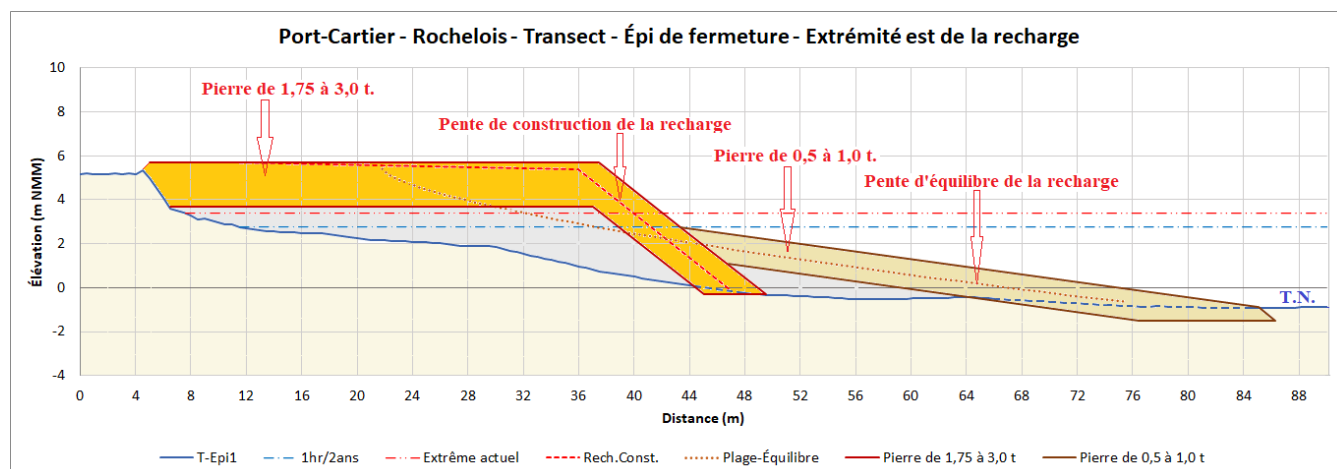


Figure 1 Concept d'épi à l'extrémité est de la recharge de plage – Coupe longitudinale

QC-2 L'initiateur mentionne à différents endroits dans l'étude d'impact (ex. : section 2.2, p. 3) que plusieurs événements, dont les tempêtes de 2010 et de 2016, ont causé de l'érosion importante. L'initiateur ne précise toutefois pas la cause principale de l'érosion pour ce secteur du projet.

- ▶ L'initiateur doit préciser la ou les causes de l'érosion et justifier la granulométrie choisie pour la recharge de plage afin d'assurer la protection du secteur contre l'érosion.

RÉPONSE

Comme mentionné à l'annexe F de l'étude d'impact (*Modélisation numérique des conditions hydro-sédimentaires* – section 6.5), les causes de la problématique d'érosion observée au cours des dernières années à la plage Rochelois sont les suivantes :

- ▶ Le transport transversal, issu de l'attaque frontale des vagues, est dominant par rapport au transport littoral;
- ▶ Les fortes tempêtes, qui surviennent très souvent à niveau d'eau élevé en raison de la dépendance entre les vagues et les niveaux d'eau, peuvent générer des reculs importants de la ligne de végétation. À titre d'exemple, la tempête 2016 a généré des reculs de plus de 10 m à certains endroits;
- ▶ La section ouest de la plage Rochelois est plus fortement exposée aux vagues par rapport à la section est, puisque cette dernière subit une certaine protection naturelle par un îlot rocheux qui agit d'une manière analogue à un brise-lames détaché.
- ▶ La vitesse des courants littoraux générée par les vagues est relativement faible puisque l'effet de réfraction fait en sorte que la direction des vagues qui déferlent sur la plage Rochelois est pratiquement perpendiculaire à celle-ci;
- ▶ La problématique d'érosion observée au courant des dernières années n'est pas le produit d'une érosion chronique engendrée par un mécanisme de transport littoral longitudinal conduisant à un bilan sédimentaire déficitaire à long terme.

Afin d'assurer la protection du secteur contre l'érosion, une attention particulière a été portée à la granulométrie du matériau sélectionné pour la recharge de la plage, qui est plus grossier dans le contexte du projet (Lasalle|NHC, 2020; voir l'annexe 1). Ce choix s'explique par le fait que, de manière générale, l'utilisation des matériaux plus fins tend à augmenter les taux de transport sédimentaire. En conséquence, les phénomènes d'érosion et d'accrétion sont généralement accélérés lorsque le sable est utilisé au lieu du gravier dans la construction d'une recharge granulaire.

L'utilisation du sable au lieu du gravier dans une recharge granulaire engendre aussi une répercussion sur le mode de transport sédimentaire qui sera dominant sur la plage en question. Dans le cas des matériaux de type sable, les sédiments composant la plage sont facilement mis en suspension par les vagues et sont ensuite déplacés dans l'eau sous l'effet des courants littoraux (transport par suspension). Dans le cas des matériaux plus grossiers de type gravier, les sédiments ont plutôt tendance à rouler sur le fond marin (transport par charriage) sous l'action des vagues et des courants littoraux puisque ces sédiments sont plus lourds.

Référence :

Lasalle|NHC. 2020. *Modélisation numérique des conditions hydro-sédimentaires*. Projet de recharge de plage de Rochelois à Port-Cardier. Rapport préparé pour le ministère de la Sécurité publique du Québec.

2.1.2 Conditions hydrosédimentaires

QC-3 L'étude d'impact s'appuie, entre autres, sur l'étude de l'annexe F portant sur la modélisation numérique des conditions hydrosédimentaires. L'initiateur a fourni la version préliminaire datée de 2019 de la modélisation numérique. Toutefois, dans l'étude d'impact, l'initiateur fait référence à la version 2020.

À la lecture de l'annexe F, une incertitude demeure quant à savoir si l'impact des changements climatiques sur le rehaussement du niveau des mers a été considéré dans les niveaux d'eau utilisés pour les simulations en conditions futures. De plus, aucune précision quant aux dimensions de l'épi intégré dans les modélisations des conditions hydrosédimentaires n'est fournie.

L'initiateur doit donc :

- ▶ fournir la version la plus récente de la modélisation hydrosédimentaire;
- ▶ présenter comment l'impact des changements climatiques sur le rehaussement du niveau des mers a été considéré ou, dans la négative, justifier pourquoi ce facteur n'a pas été considéré;
- ▶ préciser les dimensions de l'épi intégré utilisées dans les modélisations des conditions hydrosédimentaires.

RÉPONSE

La version la plus récente de la modélisation des conditions hydrosédimentaires est rendue disponible à l'annexe 2 (Lasalle|NHC, 2021).

Comme spécifié à la section 2.3.3 de ce rapport (Lasalle|NHC, 2021), les changements climatiques exercent une influence certaine sur la protection et la stabilité des berges. Parmi les facteurs qui ont le plus d'influence sur la vulnérabilité des côtes à l'érosion, il y a la présence des glaces en rive, l'augmentation du niveau de la mer et le régime des vents. Dans le contexte de la modélisation des conditions hydrosédimentaires réalisée pour le projet de stabilisation de la plage Rochelois (Lasalle|NHC, 2021), le rehaussement du niveau de la mer anticipé n'a pas été pris en compte puisque le phénomène de relèvement isostatique marqué, qui est documenté sur la Côte-Nord, le compense largement selon les projections climatiques actuelles.

Enfin, les dimensions de l'épi qui ont été utilisées dans les modélisations des conditions hydrosédimentaires sont d'une hauteur maximale de 7 m, d'une largeur maximale de 17 m et d'une longueur de 80 m. Une représentation graphique est disponible à la figure 4.8 de la page 23 du rapport de modélisation des conditions hydrosédimentaires (Lasalle|NHC, 2021).

Référence :

Lasalle|NHC. 2021. *Étude de scénarios alternatifs de protection de plage*.

2.1.3 Réalisation des travaux

QC-4 L'initiateur mentionne que la durée des travaux (EI, section 6.2.2.1, p. 56) est conditionnelle au camionnage, selon la disponibilité des camions (entre 12 à 20 camions-bennes) d'une capacité de 8 m³.

- Afin d'optimiser la durée des travaux et réduire les nuisances, l'initiateur doit décrire les options qu'il a considérées pour le transport du matériel, par exemple en indiquant s'il a considéré des camions pouvant transporter des volumes plus élevés et justifier son choix de capacité pour l'utilisation de camions-bennes.

RÉPONSE

Dans le contexte du projet, la Ville de Port-Cartier réitère son intention de recourir à des camions d'une capacité de 8 m³, et ce, bien que des camions de plus grande capacité pourraient réduire la durée des travaux.

Ce choix est d'abord justifié par le fait qu'elle souhaite éviter de restreindre les soumissionnaires à une sélection spécifique de types de camions, lesquels pourraient s'avérer indisponibles sur la Côte-Nord, afin de favoriser l'économie régionale et d'optimiser les coûts du projet. Par la suite, plusieurs mesures d'atténuation ont été proposées pour limiter les impacts relatifs au climat sonore et à la qualité de vie dans l'étude d'impact (voir les sections 8.4.1.5 et 8.4.1.6). Ces mesures feront partie intégrante des documents d'appel d'offres pour la réalisation des travaux.

QC-5 Il est mentionné aux sections 6.2.21 et 8.4.2.1 (p. 55 et 77) qu'il n'y aura qu'un seul chemin d'accès. Toutefois, il y a peu de précisions sur le chemin qu'empruntera la machinerie pour accéder au site des travaux dans la rive et sur le littoral.

Veuillez noter que l'aménagement du chemin d'accès temporaire à la plage devra être décrit dans la demande d'autorisation ministérielle (Loi, q-2, art. 22). S'il est prévu d'aménager ce chemin d'accès en rive et en littoral, les informations suivantes devront être fournies :

- Sa localisation sur un plan;
- Sa composition (type d'ouvrage, matériaux, etc.);
- Ses dimensions (dont la superficie en m² en rive et en littoral);
- La méthode de travail pour l'installation et le retrait des ouvrages;
- Les mesures d'atténuation qui seront mises en place afin de limiter les impacts temporaires et permanents sur le milieu hydrique;
- Les travaux qui seront réalisés à la fin des interventions afin de remettre la rive et le littoral dans son état d'origine.

RÉPONSE

Conformément à la réglementation en vigueur, la demande d'autorisation ministérielle requise en vertu de l'article 22 de la *Loi sur la qualité de l'environnement* (LQE) inclura le chemin d'accès temporaire qui devra être aménagé pour réaliser les travaux de recharge de plage. Bien que l'ingénierie ne soit pas encore finalisée, il peut d'ores et déjà être mentionné qu'il sera aménagé à partir de la rue des Rochelois de manière à éviter tout empiètement dans la rive ou sur le littoral (carte 1). D'une longueur approximative de 43 mètres linéaires (m.l.) et d'une largeur maximale de 8 m, il permettra aux camions et à la machinerie d'accéder au site des travaux dans la rive et sur le littoral.

Le chemin d'accès temporaire sera composé de remblai de matériaux de recharge, soit du gravier-sable avec une granulométrie médiane de 15 mm. Pour assurer un aménagement limitant les empiétements, les matériaux seront mis en pile à l'aide de camions et étalés avec un boueur. La circulation du boueur sur les matériaux mis en place permettra la compaction requise pour assurer une circulation sécuritaire des véhicules. À la fin des travaux, le chemin d'accès sera remis en état et les matériaux retirés à l'aide d'une pelle mécanique. Les matériaux retirés seront transportés puis mis en pile au garage municipal de la ville de Port-Cartier. Le terrain utilisé pour l'aménagement du chemin d'accès temporaire sera revégétalisé avec des espèces indigènes.

Comme le chemin d'accès temporaire n'empiétera pas sur la rive ou le littoral, aucune mesure d'atténuation additionnelle à celles proposées dans l'étude d'impact n'est prévue pour limiter davantage les impacts sur le milieu hydrique.

2.1.4 Enrochement

QC-6 Tel que mentionné dans l'étude d'impact (section 2.4 et 6 1.3, p. 10 et p. 52), la mise en place d'un épi rocheux à l'est de la plage Rochelois a pour objectif de réduire la perte de sédiments par la dérive littorale et par le fait même les interventions d'entretien de recharge de la plage. L'impact de cette structure sur la plage qui se trouve à l'est de la plage Rochelois n'est toutefois pas clairement expliqué, même dans l'annexe F où les conditions hydrosédimentaires sont modélisées.

Par ailleurs, à la section 5.2.4 et sur la carte 2 (EI, p. 16-17), l'initiateur mentionne que la dérive littorale dans le secteur de Port-Cartier s'effectue d'est en ouest. Cependant, le secteur de la plage Rochelois y fait exception et la dérive s'effectue d'ouest en est.

Il est également mentionné à l'annexe F, dans le rapport de modélisation numérique des conditions hydrosédimentaires (Lasalle, 2019 : page 97) : « le transport transversal, issu de l'attaque frontale des vagues, est dominant par rapport au transport littoral » et que la problématique d'érosion est engendrée par les événements de fortes tempêtes à niveau d'eau élevé avec une prédominance de vagues frontales.

L'initiateur doit donc :

- ▶ Caractériser de façon quantitative, et à long terme, les impacts d'une réduction des apports sédimentaires sur la plage voisine;
- ▶ Justifier la mise en place d'un épi si la problématique d'érosion, expliquée à l'annexe F, est engendrée par les événements de fortes tempêtes à niveau d'eau élevé avec une prédominance de vagues frontales;
- ▶ Décrire, de façon probable, les travaux en eaux pour la mise en place de l'épi submergé et proposer des mesures d'atténuation pour les différentes composantes valorisées identifiées.

RÉPONSE

Une mise à jour de l'étude de modélisation des conditions hydrosédimentaires a été effectuée (Lasalle|NHC, 2021; voir l'annexe 2), laquelle permet d'apprécier le phénomène de transit des sédiments pouvant se produire à l'extrémité est de la plage Rochelois (variante V3 optimisée). En se basant sur cette étude, il est possible de quantifier les impacts d'une réduction des apports sédimentaires sur la plage voisine résultant du projet de recharge de la plage Rochelois.

Selon les résultats de la modélisation hydrosédimentaire de Lasalle|NHC en conditions actuelles (figure 2), il n'y a aucun transfert des sédiments de la plage Rochelois vers l'est. De façon plus conservatrice, c'est la quantité brute de sédiments en mouvement vers l'est à une vingtaine de mètres à l'ouest de la pointe rocheuse fermant la plage Rochelois qui sera utilisée. La quantité obtenue est alors de l'ordre de 130 m³/a. Le même exercice a été fait sur les résultats des modélisations hydrosédimentaires de Lasalle|NHC en conditions futures (après la mise en place

de la recherche de plage, version V3 optimisée; figure 3). Dans ce cas, on obtient une quantité brute de l'ordre de $10 \text{ m}^3/\text{a}$. Par conséquent, le déficit sédimentaire touchant la plage située à l'est de la plage Rochelois serait donc, dans les pires conditions, de l'ordre de $120 \text{ m}^3/\text{a}$, à la suite des travaux de recharge de la plage Rochelois.

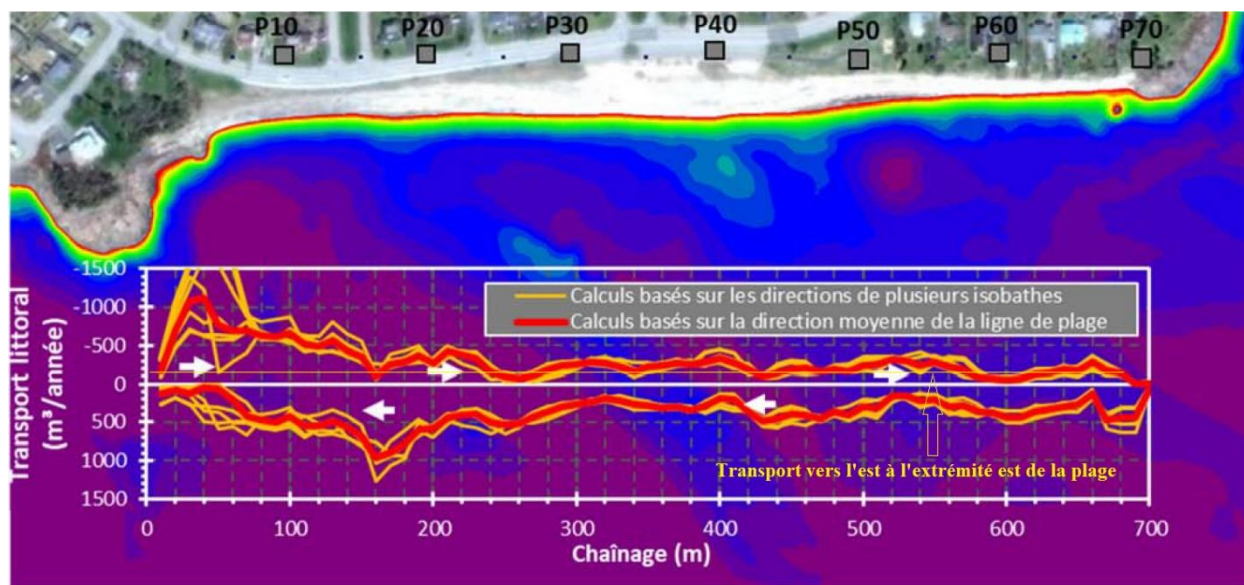


Figure 2 Transport littoral en conditions actuelles – LNI-2020

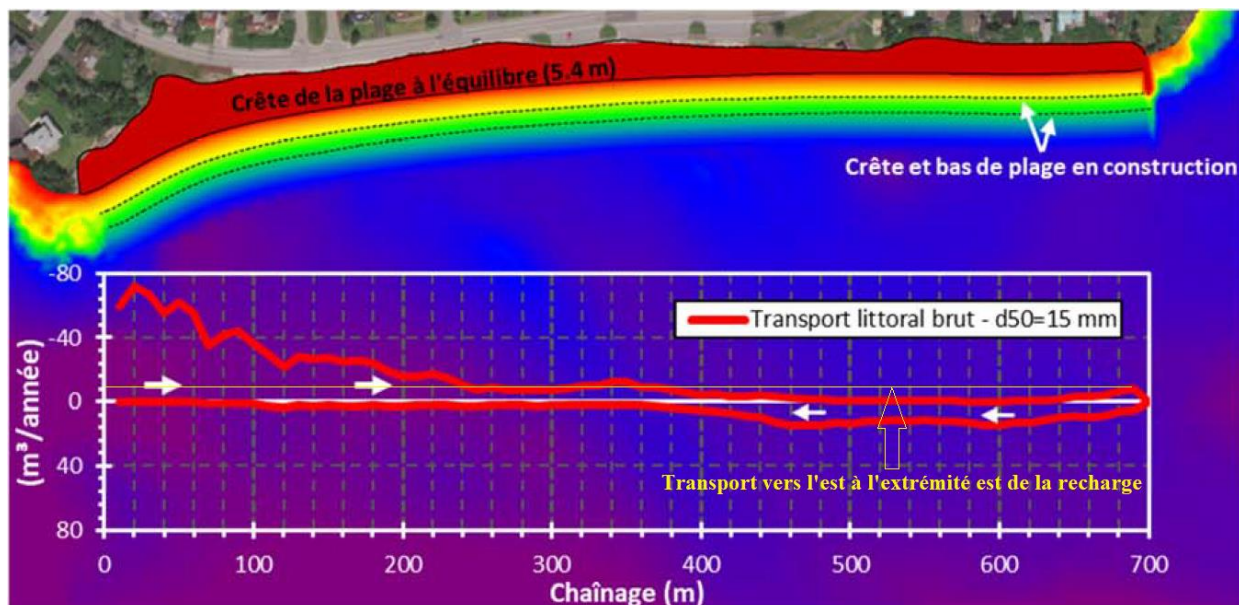


Figure 3 Transport littoral en présence de la recharge (solution V3) – LNI-2020

Les figures 4 (2004) et 5 (2021) illustrent la portion de plage de la baie Brunelle, qui a été considérée comme étant réceptrice des sédiments transitant à l'extrémité est de la plage Rochelois. Longue de 700 m, la largeur typique de cette plage a été calculée à partir de coupes de la plage Rochelois et elle s'établit en moyenne à 53 m. Répartis sur une telle plage, les $120 \text{ m}^3/\text{a}$ de sédiments potentiellement perdus pour cette plage à la suite de la mise en place de la recharge de plage Rochelois correspondraient à une épaisseur de 3 mm ou à un recul de la plage de

30 mm/a. En comparant avec le changement de configuration de la plage à l'est de la plage Rochelois entre 2004 et 2021 en conditions actuelles (aucune recharge de plage ni épi en place), il s'avère que la partie ouest de cette plage a reculé de près de 35 m en 17 ans, soit plus de 2 m/a. En considérant un profil de plage typique de cette zone (pente de 11 %), le recul constaté entre 2004 et 2021 dans les 120 m les plus à l'ouest de cette plage correspondrait à une perte d'environ 19 000 m³, soit 1 100 m³/a (environ 10 fois plus que les matériaux théoriquement en provenance de la plage Rochelois). La perte potentielle de sédiments en provenance de la plage Rochelois, à la suite de la mise en place de la recharge de plage, est donc minime par rapport à l'érosion qu'on peut constater sur cette plage actuellement. Cette perte potentielle de sédiments ne fera que contribuer (modestement) à l'érosion de cette plage.

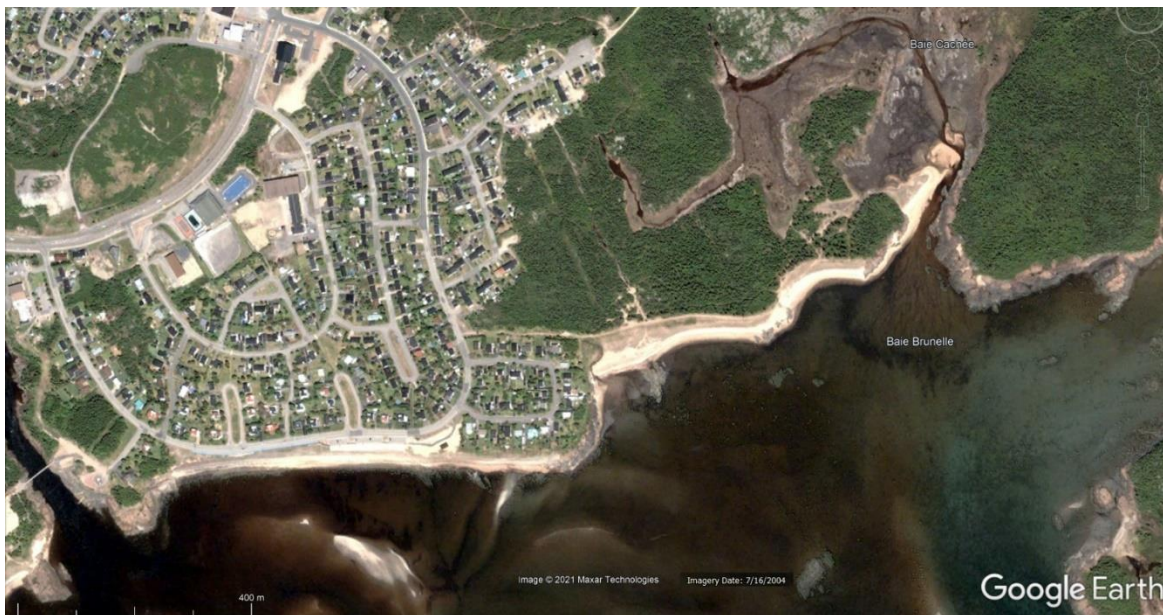


Figure 4 Plage Rochelois et plage adjacente (baie Brunelle) en 2004 (Source : Google Earth™)



Figure 5 Plage Rochelois et plage adjacente en 2021 (Google Earth™)

Comme recommandé dans le rapport de modélisation hydrosédimentaire (Consultants Ropars inc., 2021), la configuration et les dimensions de la recharge granulaire ont été optimisées. À la lumière des résultats de la modélisation numérique, la variante préférable est celle impliquant la recharge de plage. Cette variante nécessite un volume total d'environ 113 000 m³ de gravier (d₅₀ = 15 mm), la mise en place d'un épi submersible à l'est de la plage Rochelois et le déplacement de l'émissaire existant dans la section ouest de la plage. L'élévation recommandée de la crête de la pente de construction est de 5,4 m (NMM). La mise en place de l'épi submergé est requise pour maintenir les matériaux granulaires en place à plus long terme et ainsi augmenter la durée utile de l'ouvrage de protection.

À titre de mesure d'atténuation, les travaux pour la mise en place de l'épi submergé seront coordonnés avec les marées pour éviter que la machinerie ne circule dans l'eau. Le matériau filtrant sera mis en pile à l'aide de camions puis étalé à l'aide d'un bouteur. Les pierres de carapace seront mises en place à l'aide d'une pelle mécanique munie d'une pince ou d'un godet. Ces mesures sont jugées suffisantes pour limiter les impacts sur les différentes composantes environnementales.

Référence :

LASALLE|NHC. 2020. *Projet de recharge de la plage de Rochelois à Port-Cartier – Modélisation numérique des conditions hydrosédimentaires* ». Rapport R.0212, préparé pour le ministère de la Sécurité publique, avril 2020.

QC-7 Dans la description générale du projet (EI, section 6.2.1, p. 54), il est mentionné que le concept d'épi choisi ne devrait pas constituer un obstacle visuel majeur pour les résidents.

► L'initiateur doit fournir des simulations visuelles pour mieux caractériser cet impact.

RÉPONSE

Afin de mieux caractériser l'impact anticipé de la présence de l'épi sur le paysage et les observateurs mobiles ou fixes, des simulations visuelles ont été réalisées par la firme Double Mirage (2020) à partir de différents points de vue (figures 6 et 7). À partir de ces simulations, il est donc possible de confirmer que le concept d'épi choisi ne constituera pas un obstacle visuel majeur pour les résidents.



Figure 6 Vue en direction ouest de l'épi à partir de la rue des Rochelois en conditions ensoleillées



Figure 7 Vue à partir de la cour d'une résidence de la 5^e Rue

2.1.5 Coûts du projet

QC-8 L'initiateur ne présente aucune estimation du coût du projet dans son document. Pourtant dans le rapport de conception (annexe B), il y a une estimation des quantités et des coûts pour le projet de recharge de plage, de la modification de l'émissaire, de l'épi ainsi que pour les travaux d'entretien nécessaires. L'initiateur doit également prévoir dans son estimation les montants relatifs à la compensation de la mise en place de l'épi.

L'initiateur doit inclure, dans l'étude d'impact :

- ▶ Une évaluation et une description des coûts estimatifs totaux du projet comprenant la recharge de plage, l'épi, la modification de l'émissaire et les travaux d'entretien nécessaires.
- ▶ La présentation de l'évaluation des coûts sous forme de tableau.

RÉPONSE

Le coût global de la réalisation du projet de stabilisation de la plage Rochelois est estimé à 7,4 M\$, dont la grande majorité (6,6 M\$) est associée à la recharge de plage en recourant à 104 000 m³ de matériaux granulaires (tableau 1).

Tableau 1 Coûts estimatifs du projet de stabilisation de la plage Rochelois

Activité	Coût estimatif (en dollars de 2021)
Recharge de plage avec 104 000 m ³ de matériaux granulaires ¹	6,0 M\$
Étalement du sable	> 0,4 M\$
Mise en place de l'épi ¹	0,3 M\$
Modification de l'émissaire ¹	0,3 M\$
Travaux d'entretien de l'épi et de la plage ²	
Scénario aux 10 ans ou après une tempête particulièrement violente	Entre 2 500 et 3 000 \$
Scénario aux 20 ans	Entre 10 000 et 15 000 \$
Compensation de la mise en place de l'épi ³	25 000 \$
Total	7,4 M\$

1 Estimations provenant de Consultants Ropars inc. (2020)

2 Estimations fournies par Consultants Ropars inc. (2021)

3 Estimations fournies par Englobe (2021)

Références :

CONSULTANTS ROPARS INC. 2020. *Rochelois – Recharge de plage, Port-Cartier, Québec*. Rapport technique final transmis au ministère de la Sécurité publique.

2.2 VOLET SOL ET MATIÈRES

2.2.1 Banc d'emprunt

QC-9 L'initiateur mentionne que la granulométrie de la recharge de plage a été déterminée selon la disponibilité du banc d'emprunt (EI, section 6.1.2, p. 51-52) et qu'elle détermine également la pente de construction. À cet effet, l'initiateur mentionne qu'il y a quatre sites potentiels gérés par la municipalité régionale de comté (MRC) de Sept-Rivières (EI, section 6.2.1, p. 54) sans toutefois les décrire.

Il est à noter que l'exploitation d'une carrière et/ou d'une sablière est assujettie au 10^e paragraphe de l'article 22 de la Loi sur la qualité de l'environnement. L'exploitation devra respecter le Règlement sur les carrières et sablières (chapitre Q-2, r. 7.1), particulièrement sur les normes de localisation. Ainsi, l'initiateur doit prévoir si une demande d'autorisation devra être transmise à la direction régionale de l'analyse et de l'expertise de la Côte-Nord. Ce délai de traitement devrait être inclus à l'échéancier de réalisation.

De plus, l'initiateur envisage (ex. EI, section 6.2.1, p. 54) d'ajouter une couche de sable de 40 cm d'épaisseur sur le dessus de la recharge afin de conserver les usages de la plage. Cet ajout de sable fait également partie des mesures d'atténuation pour l'habitat du poisson et pour conserver les usages existants.

Bien que l'initiateur puisse préciser le détail lors de la demande d'autorisation ministérielle (c. Q-2, art. 22), il doit confirmer à cette étape-ci du projet, si une couche de sable sera ajoutée sur le dessus de la recharge et préciser la provenance de ce sable (banc d'emprunt ou extrait directement sur la plage avant les travaux). Selon l'option retenue, il sera nécessaire que l'initiateur précise davantage la deuxième option, soit celle de récupérer le sable directement sur la plage.

L'ensemble des interventions à réaliser dans le cadre du projet doit être décrit, détaillé et justifié. Ces informations sont nécessaires afin de porter un jugement sur les impacts réels et potentiels des travaux sur le milieu récepteur.

Ainsi, l'initiateur doit, pour chacun des bancs d'emprunt et sources potentielles qu'il envisage d'exploiter, présenter les informations suivantes :

- ▶ La localisation précise du site potentiel envisagé pour l'approvisionnement en matériaux pour le projet;
- ▶ La caractérisation du terrain selon le *guide de caractérisation des terrains* (ministère de l'Environnement, 2003);
- ▶ La localisation de l'entreposage;
- ▶ Le type et le volume prélevé de matériel d'emprunt;
- ▶ La présence de milieux humides ou hydriques à proximité des sites;
- ▶ La description des chemins prévus pour accéder au lieu d'extraction;
- ▶ L'évaluation de l'impact du transport.

De plus, dans le cas où l'initiateur prévoit extraire le sable directement sur la plage avant les travaux, l'initiateur doit préciser les éléments suivants :

- ▶ La quantité en m³ de sable à extraire;
- ▶ La localisation de l'entreposage;
- ▶ Le mode d'entreposage;
- ▶ La méthode de travail pour l'excavation du sable;
- ▶ Les mesures d'atténuation qui seront mises en place afin de limiter les impacts temporaires et permanents dans le milieu hydrique.

RÉPONSE

Les sites potentiels pour l'approvisionnement en matériaux actuellement envisagés par la Ville de Port-Cartier sont situés à environ 25 km au sud de la plage Rochelois (voir le plan de localisation à l'annexe 3). Pour accéder à ces sites, il y a des chemins d'accès existants d'une largeur d'environ 9 m, accessibles via la route 138. Ils sont constitués de matériaux granulaires naturels, carrossables, dont les caractéristiques granulométriques sont semblables à celles d'un MG-112. Les impacts liés au transport entre les sites potentiels d'approvisionnement et le site des travaux sont décrits aux sections 8.4.1.6 et 8.4.3.2 de l'étude d'impact.

Selon la plus récente estimation (Consultants Ropars inc., 2020), ce sont 104 000 m³ de matériaux granulaires qui sont nécessaires pour le projet de recharge de la plage Rochelois. Aucun site d'entreposage temporaire des matériaux granulaires provenant du site d'approvisionnement n'est prévu sur le site des travaux.

Lorsque le site d'approvisionnement sera déterminé, la Ville de Port-Cartier s'engage à transmettre au MELCC la caractérisation environnementale de site phase I ainsi que la caractérisation du milieu naturel lors de la demande d'autorisation ministérielle exigée en vertu de l'article 22 de la *Loi sur la qualité de l'environnement*. Pour le moment, des discussions ont toujours lieu pour finaliser la sélection du site d'approvisionnement pour ce projet.

Enfin, il est prévu que du sable soit extrait directement à partir de la plage (volume approximatif de 6 500 m³) à l'aide d'une pelle mécanique. Ce sable sera entreposé en piles sur la recharge de plage déjà mise en place à l'une de ses extrémités (est ou ouest). Les mesures d'atténuation pour limiter les impacts de ces travaux, en particulier dans le milieu hydrique, sont les mêmes que celles indiquées dans l'étude d'impact, aux sections 8.4.2.1 (page 78) et 8.4.2.2 (pages 79 et 80).

2.3 VOLET MILIEUX HUMIDES, HYDRIQUES ET NATURELS

2.3.1 Milieux humides et hydriques

QC-10 À plusieurs endroits dans l'étude, il est mentionné que des relevés bathymétriques à jour devraient être faits pour confirmer la quantité de recharge de plage, le dimensionnement de l'épi, ainsi que les superficies d'empiètement.

Lors de l'analyse d'un projet qui affecte un milieu humide et hydrique, le Ministère applique la séquence d'atténuation « éviter-minimiser-compenser ». L'initiateur a présenté une démonstration qu'il ne pouvait éviter le secteur à l'étude et un justificatif expliquant pourquoi les travaux ne peuvent être réduits davantage, en proposant notamment une solution pour 30 ans. La caractérisation des milieux humides et hydriques touchés demeure toutefois à être complétée, notamment afin de distinguer les empiètements en rive et en littoral.

En vertu du 4^e paragraphe de l'article 5 du RÉEIE, l'article 46.0.3. de la Loi s'applique au présent projet. Afin d'apporter des précisions supplémentaires concernant le contenu relatif aux milieux humides et hydriques dans l'étude d'impact, l'initiateur doit décrire les milieux humides et hydriques sur la base des éléments mentionnés à l'article 46.0.3 de la Loi ainsi qu'à l'annexe 1 du présent document.

Par ailleurs, l'initiateur doit prévoir la compensation pour les pertes résiduelles du milieu hydrique de manière à répondre à l'objectif d'aucune perte nette fixé par la Loi (article 46.0.5). Un projet de compensation ou la prévision d'une compensation financière doit être inclus à l'étude d'impact. La compensation doit minimalement équivaloir à la superficie impactée par l'épi. Afin d'élaborer le projet de compensation, la caractérisation du milieu (section de l'épi) doit être approfondie.

De plus, la ligne naturelle des hautes eaux déterminée à la suite de la caractérisation écologique (Annexe C) doit être indiquée sur la carte de synthèse des composantes du milieu biophysique. La méthodologie pour déterminer la ligne naturelle des hautes eaux doit être davantage détaillée. La rive et le littoral devraient être identifiés sur la cartographie ainsi que les impacts du projet sur ces milieux.

L'initiateur doit :

- ▶ Préciser pourquoi des relevés bathymétriques récents n'ont pas été réalisés à ce stade-ci du projet et s'engager à réaliser ces relevés et à en présenter les résultats au plus tard à l'étape de l'analyse de l'acceptabilité environnementale du projet;
- ▶ S'engager à revoir les informations relatives à la quantité de recharge de plage et au dimensionnement de l'épi à l'aide des données provenant des relevés bathymétriques et à présenter ces informations revues au plus tard à l'étape de l'analyse de l'acceptabilité environnementale du projet;
- ▶ Décrire la méthodologie utilisée pour calculer la ligne des hautes eaux afin de confirmer les superficies d'empiètement;
- ▶ Identifier sur une carte comprenant la synthèse des composantes du milieu biophysique, la rive, le littoral et la ligne naturelle des hautes eaux déterminée à la suite de la caractérisation écologique;
- ▶ Présenter et ventiler dans un tableau les empiètements en rive, littoral et plaines inondables et prévoir mettre à jour l'information à l'étape de l'analyse de l'acceptabilité environnementale du projet;
- ▶ Présenter un projet visant la compensation des pertes résiduelles du milieu hydrique de manière à répondre à l'objectif d'aucune perte nette fixé par la Loi (article 46.0.5).

RÉPONSE

Dans le contexte du projet de stabilisation de la plage Rochelois, aucun relevé bathymétrique n'a été réalisé puisqu'il a été jugé que les données existantes et disponibles étaient suffisantes pour définir le concept de stabilisation et pour évaluer avec suffisamment de précision les quantités préliminaires de matériaux requis.

La Ville de Port-Cartier s'engage toutefois à faire effectuer des relevés du secteur de la plage Rochelois à marée basse de façon à augmenter la précision des données disponibles et à réviser les quantités de matériaux nécessaires à la recharge avant l'étape d'analyse de l'acceptabilité environnementale du projet. Ces relevés viendront compléter les relevés topographiques réalisés par Groupe Cadoret en 2018. De plus, la Ville s'engage à valider le dimensionnement de l'épi à l'aide de ces données bathymétriques, et ce, avant l'étape d'analyse de l'acceptabilité environnementale du projet.

Pour documenter d'étude d'impact, les bases de données de niveaux d'eau disponibles ont été utilisées pour déterminer l'élévation de la limite des hautes eaux (LHE) selon la définition de la *Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables – Loi sur la qualité de l'environnement* (chapitre Q-2.1-d). Le calcul a consisté à déterminer « la limite des inondations de récurrence de 2 ans, laquelle est considérée équivalente à la ligne établie selon les critères botaniques définis précédemment au point a ».

La première base de données utilisée est normalement celle des marégraphes du Service hydrographique du Canada (SHC). Cependant, les archives du SHC ne proposent que quelques mois de données en 1961 et en 1966 pour Port-Cartier. Il a donc fallu appuyer l'analyse sur d'autres données de façon à avoir au moins une quinzaine de données et être en mesure d'obtenir une analyse statistique plus robuste.

La seconde base de données consultée est celle de l'ISMER (date), qui est une modélisation des niveaux d'eau dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, incluant la marée et les ondes de tempête et couvrant la période de 1979-2011.

L'analyse des maximums annuels réalisée à partir de ces bases de données s'échelonnant sur 33 ans a permis de démontrer que le niveau d'eau ayant une période de retour de 2 ans est de +2,53 m NMM (CGVD-28) (figure 8). Il s'agit d'un type d'analyse couramment utilisé pour l'évaluation de la période de retour des crues de rivières. Par conséquent, la recommandation pour la conception de l'aménagement de stabilisation est de retenir une élévation de +2,55 m NMM comme LHE, ce qui permet d'être légèrement au-dessus de la période de retour de 2 ans.

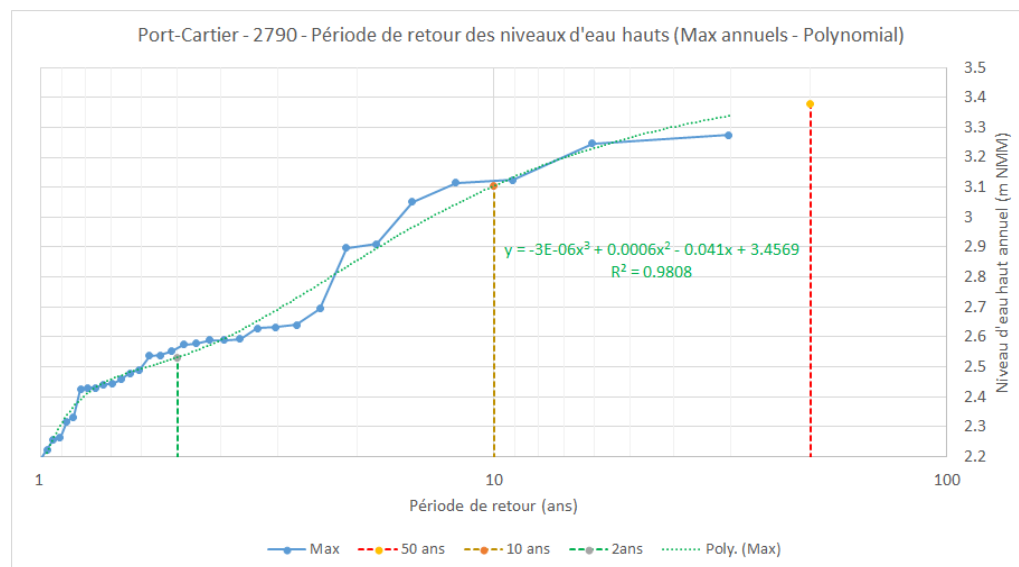


Figure 8 Niveaux d'eau maximums annuels à Port-Cartier pour la période 1979-2011

Une consultation du service de l'urbanisme de la ville de Port-Cartier a permis d'établir que la documentation fournie par la municipalité régionale de comté (MRC) de Sept-Rivières n'indique la présence d'aucune zone inondable sur le territoire de la ville de Port-Cartier. Une carte interactive disponible sur le site Web du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) corrobore d'ailleurs cette information (CEHQ, 2021).

Compte tenu de cette information, les empiétements en rive et en littoral ont été calculés en fonction de la LHE comme aucune intervention n'est prévue dans la plaine inondable. Selon les définitions présentées dans la *Politique de la protection des rives, du littoral et des plaines inondables* (PPRLPI – chapitres 2.2 et 2.3) :

- « La **rive** est une bande de terre qui borde les lacs et cours d'eau et qui s'étend vers l'intérieur des terres à partir de la ligne des hautes eaux ». Dans le cas de la plage Rochelois, la pente de la rive est inférieure à 30 % ». La rive aurait donc une largeur de 10 m;
- « Le **littoral** est cette partie des lacs et cours d'eau qui s'étend à partir de la ligne des hautes eaux vers le centre du plan d'eau ».

Un modèle numérique de terrain (figure 9) a été produit à partir des informations topographiques les plus récentes disponibles (arpentage réalisé en août 2020 (Groupe Cadoret, 2020)). De ce modèle numérique de terrain a été extraite la LHE. Les superficies d'empiétement en rive et en littoral ont été calculées à partir de la LHE vers la limite des ouvrages, soit vers l'intérieur des terres pour la rive et vers l'eau pour le littoral (figure 10). Pour la rive, on constate que la limite des 10 m de largeur précisée dans la PPRLPI prédomine dans le calcul de l'empiétement en rive.

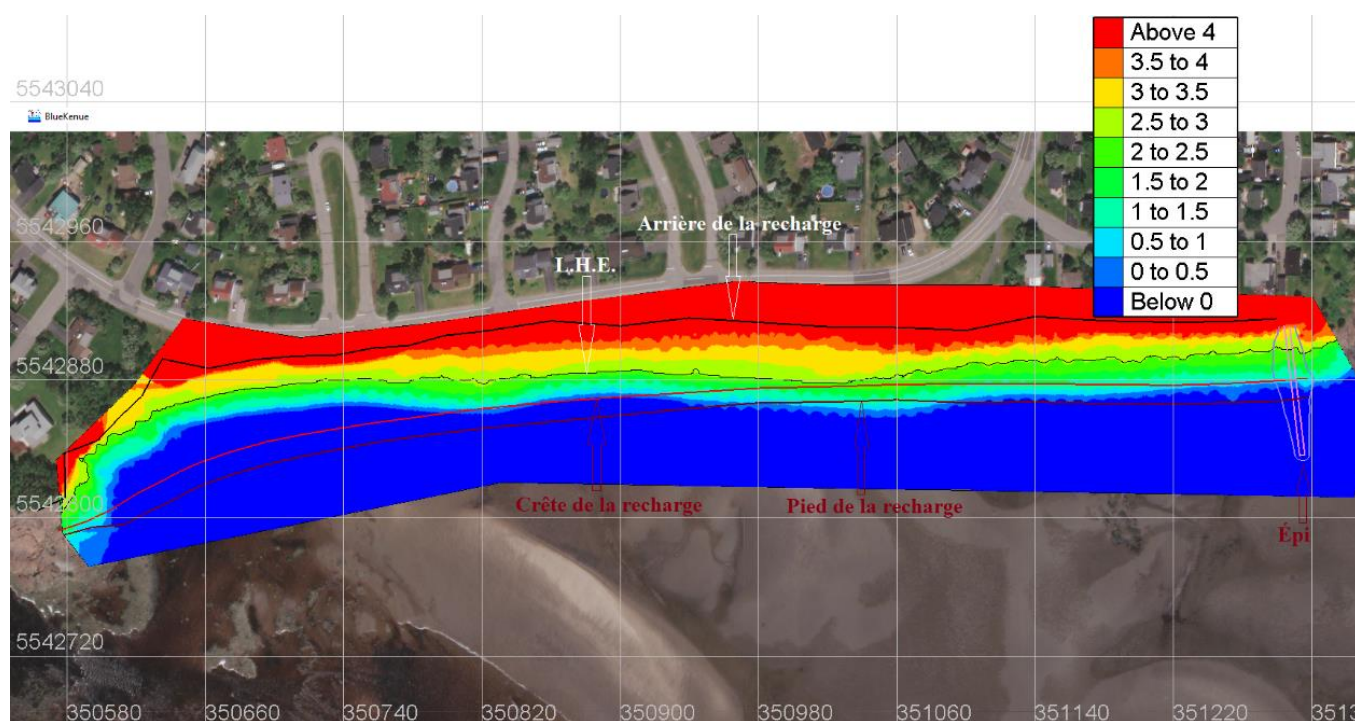


Figure 9 Modèle numérique de terrain de la zone de la recharge (Fond d'image 2017)

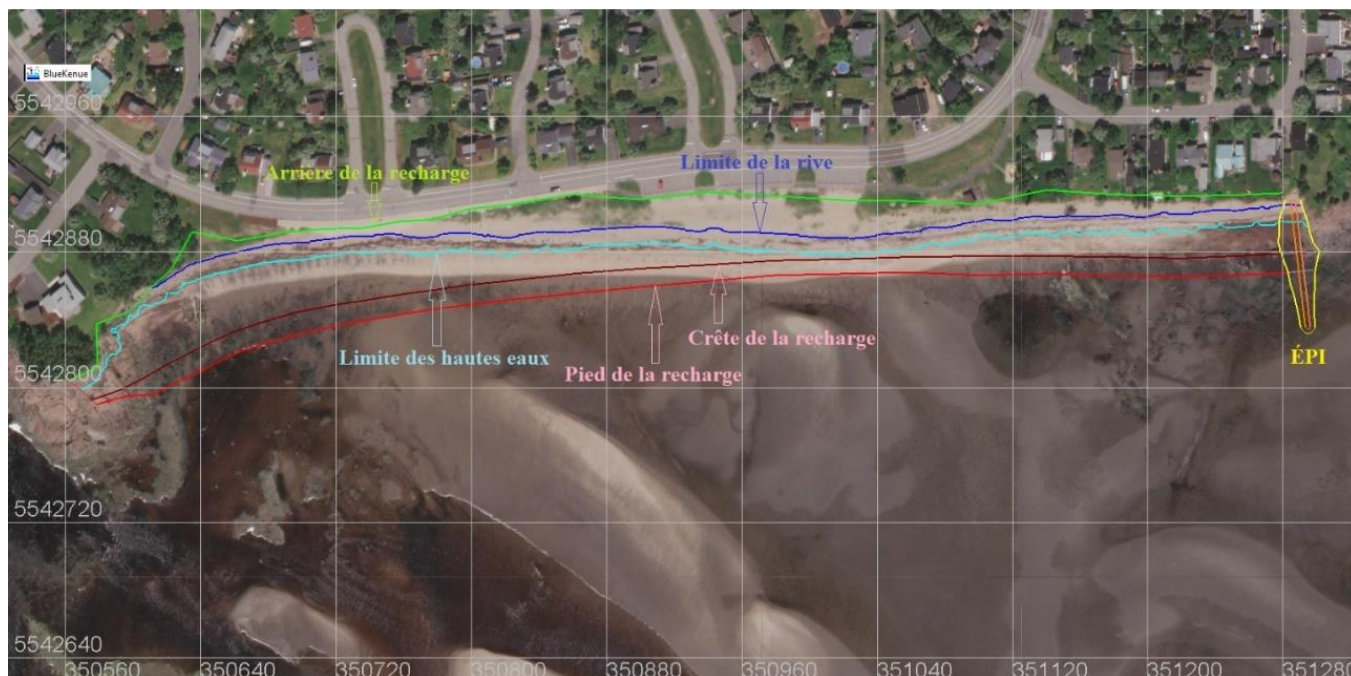


Figure 10 Limites de calcul des empiètements résultant de la recharge en rive et dans le littoral

Afin de présenter un bilan complet des empiètements du projet de stabilisation, le projet de recharge et l'aménagement projeté de l'épi ont été considérés comme des interventions engendrant des superficies d'empiètement prévisibles. Selon les données disponibles, il n'est pas possible de positionner et d'évaluer précisément la superficie et la nature de l'empiètement résultant des autres activités prévues, à savoir l'aménagement du chemin d'accès temporaire et l'exploitation du banc d'emprunt.

Pour ce qui est du chemin d'accès, il sera aménagé temporairement entre le site des travaux de recharge de la plage et la rue des Rochelois. Il aura une largeur approximative de 8 m. L'endroit le plus probable pour aménager l'accès au site des travaux se trouve dans la partie ouest du site. Cette portion de terrain vacant est actuellement colonisée par quelques espèces végétales communes et représentatives du haut de talus dans ce secteur, notamment du chiendent commun (*Elymus repens*), du pissenlit officinal (*Taraxacum officinale*), de l'épervière des prés (*Pilosella caespitosa*), du trèfle blanc (*Trifolium repens*) et du liondent indéterminé (*Leontodon sp.*; Englobe, 2018). Les quelques premiers mètres en bordure de la rue des Rochelois sont entretenus, la végétation y étant coupée régulièrement. Selon les résultats d'inventaire, aucun milieu humide n'a été répertorié sur le terrain visé pour l'aménagement du chemin temporaire. Par conséquent, ce dernier sera aménagé à l'extérieur de tout milieu humide ou hydrique.

En ce qui concerne l'exploitation d'un banc d'emprunt requise pour fournir les matériaux granulaires nécessaires à la recharge de la plage, plusieurs sites ont été envisagés. Aucune donnée concernant la présence de milieux humides ou hydriques sur ces sites n'est actuellement disponible. Pour cette raison, la Ville de Port-Cartier s'engage à réaliser une caractérisation du milieu naturel préalablement à l'analyse de l'acceptabilité environnementale du projet. Cette caractérisation respectera les méthodes prescrites par Bazoge et coll. (2015) et viser à identifier, à délimiter et à décrire tous les milieux humides ou hydriques potentiellement présents sur le site visé pour l'exploitation du banc d'emprunt.

En résumé, le bilan des empiétements du projet fait état d'une perturbation permanente totale de 27 430 m² et d'une perte équivalente à 1 120 m² (tableau 10-1). La perturbation permanente associée à la recharge de la plage se divise en 20 200 m² dans la portion littorale de la zone des travaux et en 7 230 m² dans la rive. Quant à l'aménagement de l'épi, il sera responsable de la perte de 980 m² dans le littoral et de 140 m² dans la rive.

Tableau 2 Bilan des empiétements du projet de stabilisation de la plage Rochelois

Source de l'empiétement	Milieu ¹				Durée
	Littoral	Rive	Milieu humide	Autre	
Recharge de la plage	20 200 m ²	7 230 m ²	0	N. D.	Permanente
Aménagement de l'épi	980 m ²	140 m ²	0	N. D.	Permanente
Chemin d'accès temporaire	0	0	0	N. D.	Temporaire
Banc d'emprunt	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
Total	21 180 m ²	7 370 m ²	N. D.	N. D.	–

1 Comme mentionné précédemment, aucune plaine inondable n'est répertoriée dans la zone d'étude. Pour cette raison, aucune superficie d'empiétement n'est prévue dans un tel milieu.

En raison de l'empiétement projeté de la stabilisation de la plage dans le milieu hydrique, c'est-à-dire dans la portion littorale se trouvant sous la LHE, une compensation sera nécessaire. Comme mentionné à l'article 46.0.5 de la LQE, cette compensation peut prendre plusieurs formes, notamment par une compensation financière. Cette approche proposée par les autorités s'inscrit dans l'objectif d'aucune perte nette fixé par la Loi (article 46.0.5). Il s'agit également de l'approche qui sera préconisée par la Ville de Port-Cartier pour le projet de stabilisation de la plage Rochelois. Par conséquent, aucun projet de compensation spécifique n'est envisagé (p. ex. restauration ou création de milieux humides ou hydriques équivalents).

Cette compensation financière visera uniquement l'empiétement causé par l'épi de protection en enrochement sous la LHE. En effet, les travaux de recharge de plage qui visent à contrer les effets de l'érosion sont des activités soustraites à l'obligation de compenser selon l'article 5 du Règlement sur la compensation pour l'atteinte aux milieux humides et hydriques. De plus, seule la superficie d'empiétement sous la LHE, donc dans le littoral, sera considérée pour la compensation sachant que les travaux ou activités dans la rive ne sont pas assujettis à la compensation. À cet effet, l'article 14.1 du Règlement indique que :

« l'article 46.0.5 de la Loi ne s'applique pas aux travaux, aux constructions et aux autres interventions réalisées dans la rive ou la plaine inondable d'un lac ou d'un cours d'eau jusqu'à ce que le paragraphe 3 de l'article 5, les paragraphes 2 et 3 de l'article 9, ainsi que les sous-sections 2 et 3 des sections I et II de l'annexe III entrent en vigueur. »

Par conséquent, il est prévu qu'une compensation financière soit nécessaire pour l'empiétement de l'épi dans le littoral sur une superficie totale de 980 m².

Bien que la caractérisation écologique réalisée en 2018 par Englobe ait permis de décrire les différentes composantes du milieu, notamment du secteur d'implantation de l'épi, la Ville de Port-Cartier s'engage à valider les résultats de cette dernière lors de la nouvelle caractérisation prévue avant l'analyse de l'acceptabilité environnementale du projet. En ce qui a trait de la compensation, cette nouvelle caractérisation ne devrait pas changer les conclusions qui peuvent dès maintenant être tirées, notamment en ce concerne le calcul du montant de compensation. En effet, la section I de l'annexe III du Règlement sur la compensation pour l'atteinte aux milieux

humides et hydriques établi que le facteur représentant l'état initial de la partie du littoral affectée par l'activité (I_{fINI}) est, dans tous les cas, fixé à 1,5. Néanmoins, la caractérisation du milieu dans la section de l'épi sera approfondie et permettra une meilleure compréhension des impacts potentiels.

Références

CENTRE D'EXPERTISE HYDRIQUE DU QUÉBEC (CEHQ). 2021. *Zones inondables – Rapports techniques et cartographie en eau libre*. Site internet consulté en octobre 2021. [En ligne]
[<https://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/rapports-carto.htm>]

GRUPE CADORET. 2020. *Relevé topographique – Plage Rochelois – Minute 5912 effectué le 6 octobre 2020 par un arpenteur-géomètre (D. Savard)*.

ENGLLOBE. 2018. *Caractérisation écologique*. Projet de stabilisation de la plage Rochelois. Ville de Port-Cartier. 046-P-0017164-0-01-001-EN-R-0100-00. Version finale. Novembre 2018. 28 pages + annexes.

2.3.2 Protection du poisson et de son habitat

QC-11 Les effets des recharges de plages sur les organismes aquatiques, et plus particulièrement sur la faune benthique, ne sont abordés que très superficiellement (EI, section 8.4.2.2 et 8.5.2.2, p. 79 et 94). Les effets des modifications de l'habitat causées par la recharge de plage sur la faune benthique sont méconnus et variables à court, moyen et long terme. Les organismes sessiles ou peu mobiles vont être ensevelis par les matériaux utilisés, ce qui causera de la mortalité, et la granulométrie de la plage sera différente puisque ce sont des sédiments plus grossiers que ceux d'origine qui seront déposés, ce qui modifiera les caractéristiques d'habitat.

Des suivis de la pérennité et de l'efficacité de la recharge de plage pour contrer l'érosion des berges, de l'établissement de la végétation riveraine et de l'utilisation de la plage par le capelan, seront effectués. L'initiateur doit toutefois compléter ses programmes de suivis proposés à la section 10.2 (EI, p. 117) et proposer un suivi pour la faune benthique.

L'initiateur doit :

- ▶ Présenter une évaluation plus approfondie des effets de la recharge de plage, incluant les travaux d'entretien, sur le poisson et son habitat, notamment la faune benthique. Cette évaluation doit s'appuyer sur les données scientifiques disponibles dans la littérature à ce sujet.
- ▶ Présenter une version préliminaire du programme de suivi ayant pour objectif de déterminer si la recharge a des effets négatifs, positifs ou neutres sur ces organismes à court, moyen et long terme.
- ▶ S'engager à présenter la version finale, pour approbation, au moment de la demande d'autorisation ministérielle (c. Q-2, art. 22);
- ▶ S'engager à mettre en place le programme de suivi de la faune benthique dès le début des travaux.

RÉPONSE

La recharge de la plage Rochelois s'effectue dans la partie supérieure du littoral, dont une partie est susceptible d'accueillir des organismes benthiques. Selon les inventaires réalisés, il y a une faible densité des organismes benthiques, laquelle augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le bas de l'estran.

Certains individus de la communauté benthique risquent d'être partiellement touchés par l'ensevelissement de leur habitat par l'ajout de matériaux grossiers. Le changement granulométrique pourra aussi perturber la composition de la communauté benthique. En effet, il est possible que certains organismes benthiques préférant le gravier au sable colonisent le milieu à la suite de la recharge. Pour s'assurer que le milieu est recolonisé, la Ville de Port-Cartier s'engage à réaliser un suivi qualitatif de la communauté benthique. L'approche méthodologique proposée

consistera à suivre des stations situées dans le secteur de la recharge, mais également certaines situées à l'extérieur de l'aire des travaux de manière à pouvoir faciliter l'identification des facteurs causals si des différences étaient observées. Un protocole plus détaillé sera transmis au moment de la demande d'autorisation ministérielle.

2.3.3 Remise en état des lieux

QC-12 Dans le rapport de caractérisation écologique (annexe C), il est mentionné que l'inventaire floristique a été réalisé en septembre 2018. À la page 10 (Annexe C), l'initiateur mentionne que les espèces (plantes) exotiques envahissantes (EEE) font partie des inventaires, mais que ces derniers n'ont pas été exhaustifs.

L'initiateur doit compléter la liste des mesures d'atténuation et le détail des travaux de remise en état qui seront effectués. Il doit également préciser les mesures qui seront mises en place afin d'éviter l'établissement des EEE advenant leur présence dans le secteur des travaux.

Veuillez noter que le programme de revégétalisation devrait suivre les recommandations de la Fiche technique du MELCC sur la végétalisation de la bande riveraine, disponible ici :

www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rives/vegetalisation-bande-riveraine.pdf.

L'initiateur doit :

- ▶ Fournir le détail des travaux de remise en état, notamment sans s'y limiter, et en suivant les recommandations de la fiche technique du MELCC sur la végétalisation de la bande riveraine. À cette fin, il doit préciser :
 - La délimitation claire des aires de travail et des voies d'accès afin de limiter le piétinement inutile de la végétation;
 - La restauration du couvert végétal de l'ensemble des surfaces où il aura été détruit sur le haut de talus ou au niveau du chemin d'accès en effectuant des plantations d'arbres et d'arbustes indigènes ou effectuant un ensemencement hydraulique d'herbacées indigènes adaptées à la région et aux conditions du site (pente, berge, talus, bord de route, etc.) et en définissant le type de plantes choisies, le taux de plantation et du taux de succès;
 - Le programme de suivi.

RÉPONSE

La délimitation de l'aire de travail, incluant le chemin d'accès temporaire, sera transmise dans les documents d'appel d'offres, selon les indications fournies à la figure 11. Bien qu'aucune espèce exotique envahissante (EEE) n'ait été répertoriée lors de la visite de terrain, il sera de la responsabilité de l'entrepreneur de porter une attention particulière à ne pas introduire ou proposer des EEE jugées plus dommageables (p. ex. roseau commun), particulièrement lors du transport de matériaux granulaire ou de l'excavation du sable.

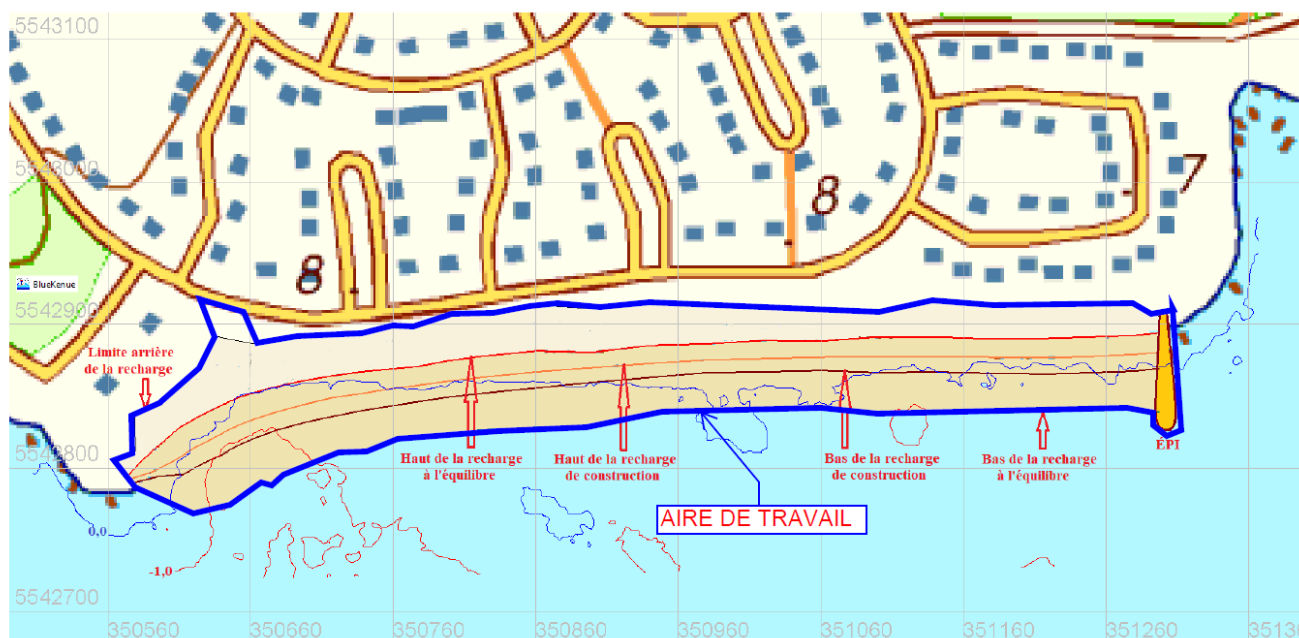


Figure 11 Délimitation de l'aire de travail du projet de recharge de la plage Rochelois

La restauration du couvert végétal sur l'ensemble des surfaces s'inspirera des recommandations de la Fiche technique du MELCC sur la végétalisation de la bande riveraine. Pour s'assurer du succès du programme de restauration, un suivi sera mis en place pour évaluer la croissance des espèces végétales ensemencées (p. ex. conditions des plants, évaluation de la reprise végétative et érosion des sols). Les inspections seront effectuées par un professionnel qualifié, qui aura la responsabilité de relever la végétation pour déterminer la couverture spatiale, la composition, la densité et la fréquence des espèces. Advenant une reprise lente, des engrais de rappel pourraient être épandus et des reprises d'ensemencement effectuées. Un rapport de visite incluant les données recueillies et les photographies pertinentes sera produit à la suite de chacune des inspections visuelles.

2.3.4 Aires protégées

QC-13 L'initiateur mentionne (EI, section 5.4.8, p. 40 et annexe C, section 4.2.6, p. 22) que le projet se situe dans des aires de concentration des oiseaux aquatiques – ACOA au complet (ACOA n° 5531) ou en partie (ACOA n° 5552), mais on ne décrit pas comment il va considérer les travaux dans les ACOA.

- L'initiateur doit décrire les mesures d'atténuation prévues afin de procéder à des travaux dans les ACOA.

RÉPONSE

Des mesures d'atténuation proposées dans l'étude d'impact par la Ville de Port-Cartier permettent de procéder à des travaux dans les aires de concentrations d'oiseaux aquatiques (ACOA). Tout d'abord, aucune activité n'aura lieu pendant la période de migration printanière selon le calendrier des travaux, ce qui permet d'éviter la perturbation pour les oiseaux aquatiques qui s'y concentreraient pour s'alimenter. Par la suite, la Ville de Port-Cartier a prévu réaliser la construction de l'épi en période marée basse pour limiter les répercussions dans le milieu. En raison de la vaste batture qui est disponible à marée basse en face de la plage Rochelois, les oiseaux aquatiques se trouveront plus au large ou ailleurs le long de la côte, ce qui limitera le dérangement de leur activité biologique. Par conséquent, aucune mesure d'atténuation additionnelle à celles proposées dans l'étude d'impact n'est prévue pour procéder à des travaux dans les ACOA.

2.4 VOLET MILIEU HUMAIN/SOCIAL ET AUTOCHTONE

2.4.1 Consultation sur les enjeux

QC-14 Dans la section 1.3 (EI, p. 2), l'initiateur dresse une liste d'enjeux qu'il souhaite présenter à la population, par exemple sous forme de capsules vidéo. À plusieurs reprises dans l'étude d'impact (sections 1.3, 4.1 et 4.3, p. 2 et 13), l'initiateur mentionne également que ces enjeux seront confirmés par les préoccupations et attentes exprimées à la population lors de la démarche d'information et de consultation.

L'initiateur mentionne également (EI, section 4.3, p. 13) qu'une lettre sera transmise à la communauté Innu Takuaikan Uashat mak Mani-Utenam (Uashat-Maliotenam).

L'initiateur doit :

- ▶ Préciser et détailler :
 - La démarche d'information et de consultation qu'il a prévu réaliser (ex. : capsules vidéo);
 - Les périodes où seront consultées les communautés (non-autochtones et autochtones);
 - Comment seront intégrées les préoccupations exprimées par les communautés (non-autochtones et autochtones);
- ▶ Mentionner comment il a répondu aux préoccupations exprimées et fournir les réponses qu'il a données à la population.

RÉPONSE

Depuis le dépôt de l'étude d'impact, plusieurs activités d'information et de consultation ont été réalisées par la Ville de Port-Cartier (tableau 2) pour présenter le projet et recueillir les préoccupations à l'égard du projet (tableau 3). La tenue de ces différentes activités traduit l'importance qu'accorde la ville de Port-Cartier à l'avis et aux préoccupations du public dans la réalisation de ce projet. À cet égard, soulignons que les préoccupations sont intégrées dans le processus de gestion de projet et discutées au sein de la direction de la ville de Port-Cartier pour décider si des analyses supplémentaires ou des modifications au projet sont justifiées. Parmi les modifications apportées au projet à la suite de préoccupations soulevées, il y a l'ajout d'une couche de sable sur la crête. L'ensemble de la documentation, de la correspondance ainsi que des invitations et avis diffusés par la ville de Port-Cartier sont disponibles à l'annexe 4.

Tableau 3 Activités d'information et de consultation tenues depuis le dépôt de l'étude d'impact

Activité	Date
Mise en ligne de capsules vidéo et d'un sondage Survey Monkey	Juin 2020
Réalisation d'un sondage pour recueillir les préoccupations	Juillet à août 2020
Diffusion d'un document de questions-réponses	Août 2020
Séance d'information organisée par la ville de Port-Cartier et le ministère de la Sécurité publique	9 novembre 2020
Envoi d'une lettre aux communautés autochtones	Octobre 2021

Tableau 4 Principales préoccupations soulevées lors des activités d'information et de consultation

Principale préoccupation soulevée
Le maintien à l'accès à la plage et aux activités récréatives (p. ex. kayak) pour les résidents et les touristes.
L'étude d'autres solutions au projet proposé.
Le processus mis en place pour consulter en priorité les 29 résidences ciblées par le projet.
L'accès à un processus transparent en distribuant plus largement la documentation en format papier pour favoriser l'accessibilité sociale du projet.
La préoccupation à l'égard que le projet ressemble à ce qui s'est passé à la place Mc Cormik (esthétisme, etc.).
L'efficacité de la solution proposée en termes de durabilité.
Le questionnement relatif à la nécessité de détruire l'élyme des sables, qui a repoussé naturellement et agi comme protection naturelle.
Les coûts relatifs au projet à assumer par les résidents de Port-Cartier.

2.4.2 Contraintes réglementaires relatives aux schémas d'aménagement et de développement

QC-15 En réponse aux inondations printanières de 2019, le gouvernement du Québec a pris un décret le 12 juillet 2019 concernant l'instauration d'une zone d'intervention spéciale (ZIS) visant, entre autres, à assurer une application uniforme de la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (PPRLPI). La ZIS s'applique aux zones inondables de récurrence 0-20 ans déterminées, au 10 juin 2019, dans les outils de planification des municipalités régionales de comté, dont la MRC de Sept-Rivières.

Les informations concernant la ZIS et ses modalités d'application sont disponibles à l'adresse suivante : www.mamh.gouv.qc.ca/ministere/inondations-printanieres-2019-zone-d-intervention-special/. Dans l'étude d'impact (section 3, p. 11), l'initiateur décrit le cadre réglementaire applicable au projet. Toutefois, il n'est fait aucune mention de la ZIS ni des impacts potentiels sur le projet.

L'initiateur doit :

- ▶ Si le projet est situé dans la ZIS, décrire et identifier sur une carte la ZIS.
- ▶ Évaluer si des impacts sur le projet qui y sont associés.

RÉPONSE

Selon le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) et le ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH), le projet est compris dans la zone d'intervention spéciale (ZIS) de la ville de Port-Cartier, qui est incluse dans la MRC de Sept-Rivières. Conformément à ce décret, il y a un moratoire sur la construction de bâtiments et sur la reconstruction de bâtiments détruits par une inondation. Cette désignation n'a pas d'incidence sur le projet de stabilisation de la plage Rochelois, puisqu'aucune infrastructure permanente ou modification à des infrastructures permanentes n'est prévue.

QC-16 La Directive pour le projet de stabilisation du secteur de la Plage Rochelois à Port-Cartier demande notamment que l'initiateur du projet identifie « l'utilisation actuelle et prévue du territoire et de ses ressources conformément aux lois, règlements, politiques, orientations, schémas et plans provinciaux, régionaux et municipaux de développement et d'aménagement [...] » (PR2.1, p. 10). Dans l'étude d'impact (section 5.4.1.2, p. 33), l'initiateur indique que « l'affectation du sol de la zone d'étude correspond à une aire résidentielle urbaine » selon le premier projet de schéma d'aménagement et de développement révisé (PSADR) adopté par la MRC de Sept-Rivières en 2002. Toutefois, ce document n'a pas reçu d'avis de conformité aux orientations gouvernementales en matière d'aménagement du territoire délivré par la ministre des Affaires municipales et de l'Habitation. En conséquence, le PSADR ne constitue pas un outil de planification du territoire en vigueur.

L'initiateur doit :

- Identifier la ou les aires d'affectation du territoire de la zone d'étude selon le schéma d'aménagement et de développement (SAD) de la MRC de Sept-Rivières actuellement en vigueur;
- Préciser quels sont les usages autorisés dans cette ou ces aires d'affectation;
- Réviser la Figure 2 : Affectations du territoire Port-Cartier (EI, section 5.4.2, p. 37) afin que celle-ci illustre les affectations du SAD en vigueur.

RÉPONSE

Selon le schéma d'aménagement et de développement (SAD) de la municipalité régionale de comté (MRC) de Sept-Rivières actuellement en vigueur (MRC de Sept-Rivières, 2016), la zone d'étude définie pour le projet de stabilisation de la plage Rochelois est comprise dans le périmètre d'urbanisation de la ville de Port-Cartier (figure 12¹). Dans cette aire d'affectation, les usages autorisés sont les suivants : résidentiel permanent, égout et aqueduc et récréation intensive. Sous certaines conditions, les usages suivants sont également permis : industrie autre, récréation extensive et parc de maisons mobiles. Par conséquent, aucune restriction d'usage ne cible les activités prévues dans le contexte du projet de stabilisation de la plage Rochelois.

Référence :

MUNICIPALITÉ RÉGIONALE DE COMTÉ (MRC) DE SEPT-RIVIÈRES. 2016. *Schéma d'aménagement. Version amendée et corrigée*. [En ligne] [https://www.septrivieres.qc.ca/data/66-septrivieres/ressources/documents/sys_docs/Schema88__vb__dernier.pdf?v=1563297886]

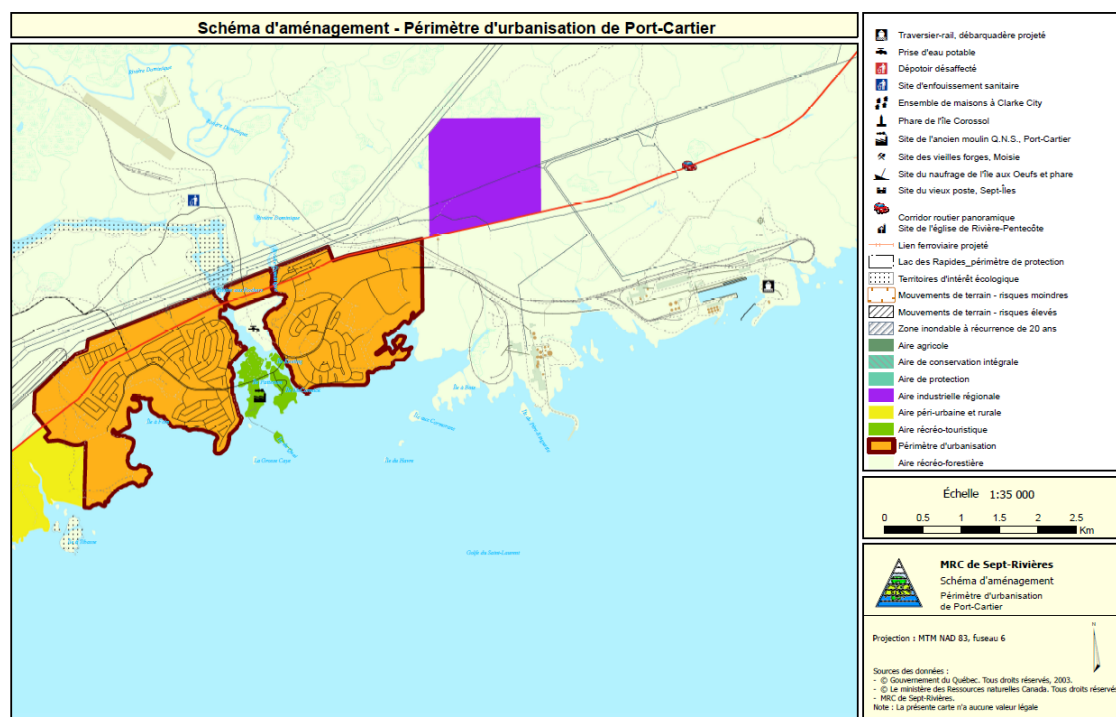


Figure 12 Aires d'affectation de la MRC des Sept-Rivières (tirée du schéma d'aménagement de la MRC de Sept-Rivières)

¹¹¹ Il s'agit de la figure 2 de l'étude d'impact, qui a été révisée pour répondre à une partie de la QC-16.

2.5 AUTRES

QC-17 L'initiateur doit estimer les émissions de gaz à effet de serre (GES) associé à son projet tel que prévu dans les documents *Complément d'information pour la prise en compte des changements climatiques* et l'annexe 2 du présent document.

Le *Complément d'information pour la prise en compte des changements climatiques* est disponible par ce lien : www.environnement.gouv.qc.ca/evaluations/directive-etude-impact/Changements-climatiques.pdf

L'annexe 2 présente la méthodologie générale pour la quantification des émissions de GES et les formules de calcul des émissions de GES.

- Pour estimer les émissions de GES, l'initiateur doit considérer les principales sources d'émissions notamment celles liées à l'utilisation de la machinerie et des véhicules lourds pour la réalisation des travaux et du transport du matériel d'emprunt;
- Lorsque le choix est fait d'exclure une source d'émissions, une justification doit être fournie;
- L'initiateur doit présenter les mesures d'atténuation qui seront mises en place afin de minimiser les émissions.

RÉPONSE

La quantification des émissions de gaz à effet de serre (GES) a été réalisée pour le projet de stabilisation de la plage Rochelois en se basant sur le *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre* (MELCC, 2019a). À cet égard, un rapport technique a été produit pour inclure les informations demandées (Englobe 2021; annexe 5), notamment la justification du choix des sources d'émissions retenues et exclues ainsi que la quantification des GES pour les phases de construction et d'exploitation. Compte tenu de la nature du projet, les sources d'émissions retenues se limitent à la combustion des sources mobiles (p. ex. transport des matériaux, fonctionnement de la machinerie et de l'équipement).

Au total, le projet sera responsable de l'émission de 918 t CO₂ eq., qui surviendront au cours des 14 semaines que durera la phase de construction (tableau 1). Les émissions de phase d'exploitation et d'entretien représentent moins de 1 % des émissions de GES du projet et constituent donc une contribution négligeable. Ces émissions ont donc été exclues de la quantification. À titre comparatif, les émissions du projet représentent 0,001 % des émissions de GES du Québec, lesquelles s'établissaient à 78,6 Mt CO₂ eq. en 2017 (MELCC, 2019b). Il s'agit donc d'une contribution négligeable, qui témoigne de la volonté de la ville de Port-Cartier d'intégrer des mesures ou des bonnes pratiques dans le contexte de ses projets pour limiter les émissions de GES. Parmi ces mesures, celles qui seront mises en œuvre dans le contexte du projet sont les suivantes :

- Éviter de laisser les véhicules de chantier fonctionner inutilement au ralenti.
- S'assurer que les véhicules de chantier et la machinerie sont en bon état de marche afin de limiter les émissions atmosphériques.
- Utiliser des équipements et mettre en œuvre des normes de construction et d'aménagement, de procédures et de mode d'exploitation favorisant l'efficacité énergétique.

Références :

ENGLOBE. 2021. *Quantification des émissions de gaz à effet de serre associées au projet de stabilisation de la plage Rochelois*. Note technique déposée à la Ville de Port-Cartier.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MELCC). 2019A. *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre*. 107 p. [En ligne]
[\[https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/guide-quantification/guide-quantification-ges.pdf\]](https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/guide-quantification/guide-quantification-ges.pdf)

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MELCC). 2019B. *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2017 et leur évolution depuis 1990*. Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale de la réglementation carbone et des données d'émission, 44 p. [En ligne]
[<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2017/Inventaire1990-2017.pdf>]

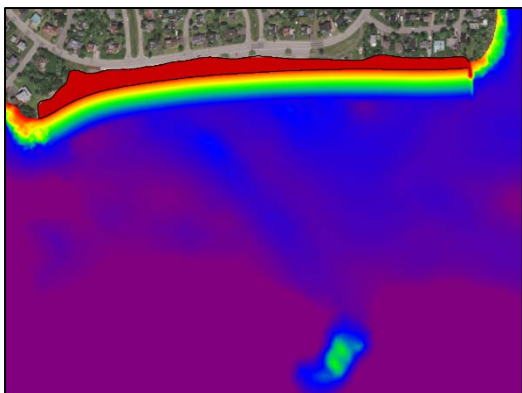
Annexe 1 Modélisation numérique des conditions hydrosédimentaires – 2020



PROJET DE RECHARGE DE LA PLAGE DE ROCHELOIS À PORT-CARTIER

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES CONDITIONS HYDRO-SÉDIMENTAIRES

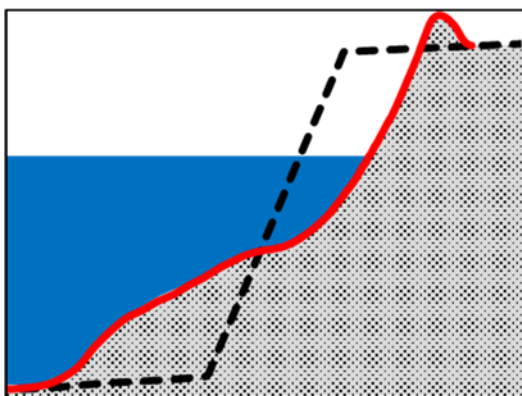
RAPPORT R.0212



Préparé pour:

**Ministère de
la Sécurité publique**

Québec 



Avril 2020

No reference lasalle | NHC 08003855

**PROJET DE RECHARGE DE LA PLAGE DE ROCHELOIS À PORT-CARTIER
MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES CONDITIONS HYDRO-SÉDIMENTAIRES**

RAPPORT R.0212

VERSION FINALE

Préparé pour:

Ministère de la Sécurité Publique
Québec, Québec


Préparé par:

Lasalle | NHC
Montréal, Québec

Avril 2020

No de référence Lasalle | NHC 08003855

Préparé par:



Nicolas Gallant, ing., M. Ing.
Ingénieur de projets
No OIQ : 5047189



Tristan Aubel, ing., M.Ing.
Ingénieur, associé
No OIQ : 129611

CLAUDE DE LIMITATION DE RESPONSABILITÉ

Ce document a été préparé par Lasalle|NHC de façon conforme aux bonnes pratiques d'ingénierie et est destiné à l'usage exclusif de **Ministère de la Sécurité Publique** et de leurs représentants autorisés dans le cadre spécifique du projet **Projet de recharge de la plage de Rochelois à Port-Cartier – Modélisation numérique des conditions hydro-sédimentaires**. Le contenu de ce document ne peut être appliqué ou utilisé, en tout ou en partie, par ou à l'avantage d'autres parties sans l'autorisation écrite de Lasalle|NHC. Aucune autre garantie, expresse ou tacite, n'est accordée.

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

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	2
LISTE DES TABLEAUX	4
1. INTRODUCTION	1
2. MISE EN CONTEXTE	2
2.1 Secteur à l'étude.....	2
2.2 Problématique observée	3
2.3 Érosion côtière – Principes de base.....	3
3. MÉTHODOLOGIE	9
3.1 Données utilisées.....	9
3.2 Outils de modélisation.....	9
3.3 Résumé de la méthodologie employée	11
4. MNT.....	13
4.1 Provenance des données.....	13
4.2 Montage du MNT	14
4.3 Conditions limites du MNT	15
4.4 MNT en conditions actuelles	19
4.5 MNT en conditions futures (avec la recharge granulaire).....	19
5. CONDITIONS MARITIMES	24
5.1 Concepts généraux	24
5.2 Niveaux d'eau	25
5.3 Régime des vagues	28
5.4 Probabilités combinées des niveaux d'eau et des vagues.....	40
5.5 Récapitulatif des conditions maritimes	49
6. DYNAMIQUE HYDROSÉDIMENTAIRE.....	50
6.1 Analyse historique de la dynamique sédimentaire du site	50
6.2 Modélisation 2D des événements fréquents en conditions actuelles	58
6.3 Modélisation (1D & 2D) des fortes tempêtes.....	67
6.4 Modélisation 1D du transport littoral (long-terme).....	84
6.5 Récapitulatif de la dynamique sédimentaire & recommandations.....	97
7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	99
8. RÉFÉRENCES	101
ANNEXE A – DÉPENDANCE ENTRE LES VARIABLES	102

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Localisation de Port-Cartier	2
Figure 2.2 : Localisation de la plage Rochelois.....	2
Figure 2.3 : Érosion de la plage de Rochelois à Port-Cartier	3
Figure 2.4 : Illustration du phénomène de réfraction des vagues.....	5
Figure 2.5 : Illustration du processus d'attaque frontale des vagues (transport transversal).....	5
Figure 3.1 : Résumé de la méthodologie employée	12
Figure 4.1 : Données utilisés dans le montage du MNT de Port-Cartier	13
Figure 4.2 : Étendue des modèles local et global de Port-Cartier	16
Figure 4.3 : Maillage utilisé dans le modèle global.....	17
Figure 4.4 : Maillage utilisé dans le modèle local	18
Figure 4.5 : MNT en conditions actuelles.....	20
Figure 4.6 : Présentation des différentes recharges granulaires étudiées (Variantes V1 et V2).....	21
Figure 4.7 : Présentation de la recharge granulaire optimisée (Variante V3)	22
Figure 4.8 : Dimensions de l'épi submersible (Variante V3)	23
Figure 5.1 : Amplitude de la marée à Port-Cartier.....	26
Figure 5.2 : Occurrence des niveaux d'eau à Port-Cartier	27
Figure 5.3 : Réfraction des vagues au large de Port-Cartier	30
Figure 5.4 : Nombre de tempête à Port-Cartier en fonction du mois de l'année.....	32
Figure 5.5 : Couvert de glace sur le golfe de Saint-Laurent le 9 février 2015 (tiré de NASA Worldview) ..	33
Figure 5.6 : Variation de la hauteur de vagues des 250 tempêtes les plus énergétiques	34
Figure 5.7 : Corrélation entre la hauteur de vagues et la durée de la tempête	34
Figure 5.8 : Rose des vagues et occurrence des vagues à Port-Cartier	37
Figure 5.9 : Discrétisation de la rose des vagues de Port-Cartier	39
Figure 6.1 : Comparaison de l'étendue de la plage Rochelois entre 1976 et 2013	52
Figure 6.2 : Comparaison de l'étendue de la plage Rochelois entre 1987 et 2017	53
Figure 6.3 : Granulométrie de la plage Rochelois	54
Figure 6.4 : Comparaison de la plage Rochelois entre 2010 et 2017	55
Figure 6.5 : Comparaison de la plage Rochelois entre 2010 et 2017 (suite)	56
Figure 6.6 : Comparaison de la plage Rochelois entre 2010 et 2017 (suite)	57
Figure 6.7 : Résultats de modélisation 2D de l'événement #3 en conditions actuelles	60
Figure 6.8 : Résultats de modélisation 2D de l'événement #12 en conditions actuelles	61
Figure 6.9 : Résultats de modélisation 2D de l'événement #27 en conditions actuelles	62
Figure 6.10 : Résultats de modélisation 2D de l'événement #36 en conditions actuelles	63
Figure 6.11 : Résultats de modélisation 2D de l'événement #63 en conditions actuelles	64
Figure 6.12 : Résultats de modélisation 2D de l'événement #72 en conditions actuelles	65
Figure 6.13 : Résultats de modélisation 2D de l'impact du débit moyen de la rivière aux rochers	66
Figure 6.14 : Évolution du profil de plage suite à deux événements de tempête	69
Figure 6.15 : Résultats de modélisation 2D de la tempête A en conditions actuelles.....	71
Figure 6.16 : Résultats de modélisation 2D de la tempête B en conditions actuelles.....	72
Figure 6.17 : Résultats de modélisation 2D de la tempête C en conditions actuelles.....	73
Figure 6.18 : Résultats de modélisation 2D de la tempête D en conditions actuelles	74

Figure 6.19: Résultats de modélisation 2D de la tempête E en conditions actuelles.....	75
Figure 6.20 : Résultats de modélisation 2D des tempêtes B et C en conditions actuelles et futures	76
Figure 6.21 : Évolution du profil de construction sous différentes tempêtes	79
Figure 6.22 : Évolution du profil d'équilibre sous différentes tempêtes	80
Figure 6.23 : évolution du profil d'équilibre sous différentes tempêtes – essais de sensibilité.....	81
Figure 6.24 : évolution du profil d'équilibre sous différentes tempêtes – essais de sensibilité des marées	82
Figure 6.25 : évolution du profil d'équilibre lors de la succession des différentes tempêtes – essais de sensibilité des marées.....	83
Figure 6.26 : Profils de calcul pour le transport littoral	86
Figure 6.27 : Résultats de modélisation du transport littoral en conditions actuelles.....	89
Figure 6.28 : Hauteur (Hs) et direction des vagues au déferlement en conditions actuelles.....	90
Figure 6.29 : Transport littoral pour quelques événements typiques de vagues	90
Figure 6.30 : Résultats de modélisation du transport littoral de la recharge granulaire V1 (variante intermédiaire)	94
Figure 6.31 : Résultats de modélisation du transport littoral de la recharge granulaire V2 (variante intermédiaire)	95
Figure 6.32: Résultats de modélisation du transport littoral en conditions futures - Recharge granulaire V3	96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1 : Période de retour des niveaux d'eau maximums annuels à Port-Cartier (Loi Gumbel)	27
Tableau 5.2 : Résumés des principaux paramètres utilisés dans le modèle Mike 21 SW	29
Tableau 5.3 : Période de retour de la hauteur de vague maximale à Port-Cartier.....	36
Tableau 5.4: Dépendance entre les variables de surcote et de hauteur de vagues (H_s) de l'ESE	42
Tableau 5.5 : Dépendance entre les variables de niveau d'eau et de hauteur de vagues (H_s) de l'ESE.....	42
Tableau 5.6: Dépendance entre les variables de surcote et de hauteur de vagues (H_s) du sud.....	43
Tableau 5.7: Dépendance entre les variables de niveau d'eau et de hauteur de vagues (H_s) du sud	43
Tableau 5.8 : Périodes de retour d'événements de tempête	44
Tableau 5.9 : Période de retour des combinaisons de niveaux d'eau et de hauteur de vagues de l'ESE ..	45
Tableau 5.10 : Période de retour des combinaisons de niveaux d'eau et de hauteur de vagues du sud ..	46
Tableau 5.11 : Énumération des événements combinant niveaux d'eau, hauteur de vagues et direction	48

1. INTRODUCTION

Les berges de la municipalité de Port-Cartier subissent une érosion notable, en particulier à cause de l'impact des tempêtes automnales et hivernales qui surviennent dans le golfe du Saint-Laurent. Parmi les événements récents, on retient notamment la tempête du 30 décembre 2016, qui a significativement endommagé la plage du secteur Rochelois (voir figure 1).

Dans ce contexte, le Gouvernement du Québec (Ministère de la Sécurité Publique) envisage présentement une intervention de protection sous la forme d'une recharge de plage à l'aide de matériaux granulaires, de façon à stabiliser le littoral et à éviter que les dommages ne s'étendent à la route adjacente à la plage (rue des Rochelois) ainsi qu'aux infrastructures municipales et privées qui se trouvent à proximité.

Lasalle | NHC a été mandaté par le Ministère de la Sécurité Publique afin d'étudier les conditions hydro-sédimentaires de la plage Rochelois pour appuyer la conception de la recharge de plage (avec ou sans épis) et d'évaluer leur efficacité à long terme. Pour ce faire, un modèle numérique a notamment été utilisé dans le cadre de la présente étude.

Le rapport d'étude est divisé en 7 chapitres. Le chapitre 2 présente une mise en contexte de la problématique observée à Port-Cartier. Le chapitre 3 résume la méthodologie employée pour réaliser cette étude. Le chapitre 4 traite du modèle numérique de terrain utilisé par le modèle numérique. Le chapitre 5 décrit le climat maritime de la région de Port-Cartier alors que le chapitre 6 enchaîne avec l'aspect hydro-sédimentaire de ce secteur. Finalement, la conclusion et les recommandations de cette étude sont exposées au chapitre 8.

2. MISE EN CONTEXTE

2.1 Secteur à l'étude

La ville de Port-Cartier est située sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent à environ 40 km au sud-ouest de Sept-îles (figure 2.1). La présente étude porte sur la dynamique sédimentaire de la plage Rochelois (figure 2.2)



Figure 2.1 : Localisation de Port-Cartier



Figure 2.2 : Localisation de la plage Rochelois

2.2 Problématique observée

La plage Rochelois, localisée vis-à-vis de la rue des Rochelois, est affectée par des problèmes d'érosion depuis plusieurs années. Parmi les événements récents, la tempête du 30 décembre 2016 a sévèrement impacté cette plage, la passerelle longeant celle-ci ainsi que les terrains de certaines propriétés résidentielles.

Dans le but de protéger la plage Rochelois ainsi que les infrastructures adjacentes à celle-ci, le Ministère de la Sécurité Publique prévoit une intervention de protection sous la forme d'une recharge granulaire (avec ou sans épi rocheux) pour cette plage. La présente étude a pour but, en premier lieu, d'analyser la dynamique sédimentaire de la plage Rochelois pour appuyer la conception de la recharge de plage et de l'épi rocheux puis, en second lieu, d'évaluer leur efficacité à long terme.



Figure 2.3 : Érosion de la plage de Rochelois à Port-Cartier

2.3 Érosion côtière – Principes de base

2.3.1 Causes du phénomène

La mise en suspension d'un grain de sédiment (argile, silt, sable ou gravier) se produit lorsque la force d'entraînement exercée sur la particule excède le point critique. En milieu fluvial, une vitesse minimale de l'écoulement (souvent appelée vitesse critique) est nécessaire pour atteindre ce point critique. Il faut toutefois noter qu'une mise en suspension des grains de sédiments n'engendre pas nécessairement une problématique d'érosion puisque le départ de ces grains peut être compensé par le dépôt d'autres grains provenant de l'amont.

En milieu côtier, un forçage supplémentaire s'ajoute au portait : il s'agit de l'énergie des vagues. Celles-ci ont tendance à mettre les sédiments en suspension dans l'eau. Encore une fois, une mise en suspension

des grains de sédiment n'engendre pas nécessairement une problématique d'érosion puisque le départ de ces grains peut être compensé par le dépôt d'autres grains.

Selon la force, la direction et la durée des vents soufflant sur un plan d'eau, des vagues d'intensité variable sont générées par ces vents. En zone très profonde, ces vagues ne sont pas influencées par le fond marin et pour cette raison, elles peuvent voyager sur de très longue distance. Le terme houle est utilisé pour identifier les vagues formées par un vent éloigné de la zone d'observation.

À l'approche du rivage, les vagues commencent à ressentir l'influence de la réduction de la profondeur et de la forme des fonds et ont tendance à tourner pour s'aligner avec les isobathes (effet de la réfraction illustrée à la figure 2.4). C'est pour cette raison que la direction des vagues peut varier dans l'espace malgré une direction constante du vent dans l'espace. Lorsque la profondeur d'eau devient trop faible, la déformation de la vague est telle que sa cambrure outrepassé l'équilibre et la vague déferle (effet de déferlement illustré à la figure 2.5). Ce phénomène survient généralement à proximité des plages dans une zone désignée par zone de déferlement.

Le déferlement des vagues libère une énergie qui remet les sédiments en suspension en plus de générer des courants sur les fonds. Comme les vagues conservent généralement un certain angle d'incidence par rapport au rivage, les courants ont deux composantes : parallèle et perpendiculaire au rivage. À cet effet, la composante parallèle génère des courants littoraux alors que la composante perpendiculaire engendre des courants vers le large ainsi que des courants de « run up » (montée de la vague sur la plage). La combinaison de ces courants et de la mise en suspension des sédiments provoque le transport sédimentaire en milieu côtier.

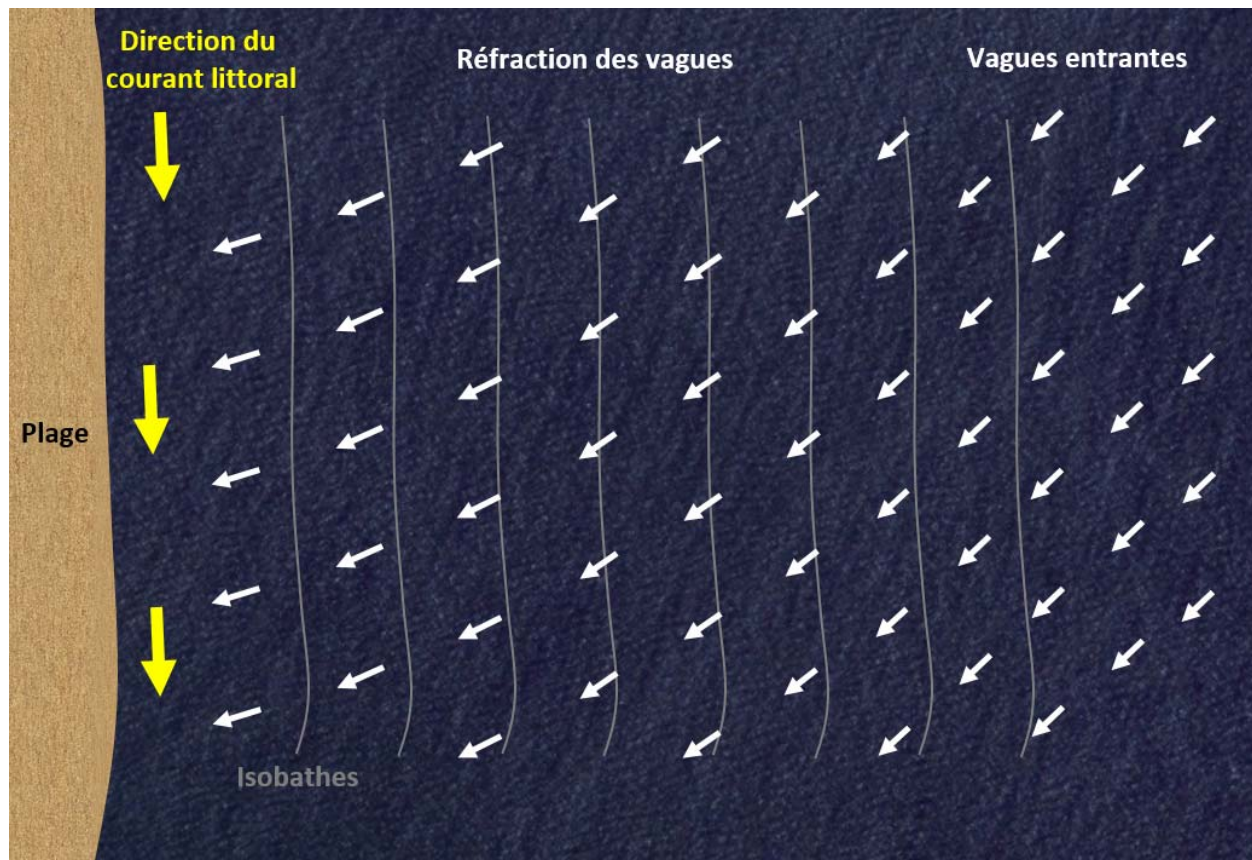


Figure 2.4 : Illustration du phénomène de réfraction des vagues

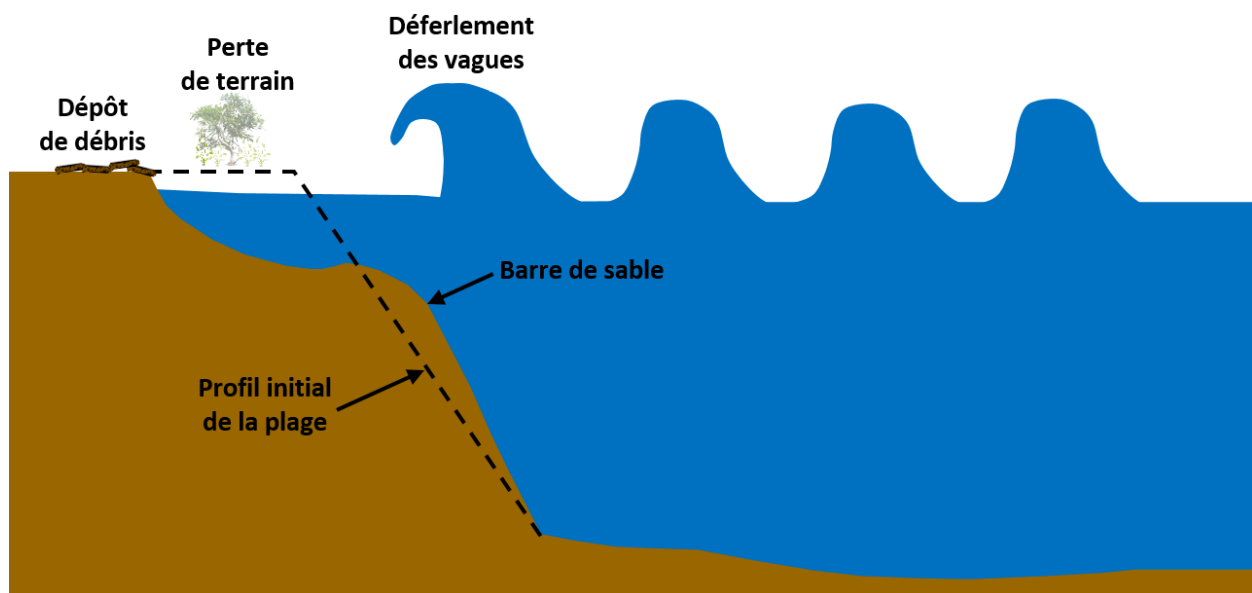


Figure 2.5 : Illustration du processus d'attaque frontale des vagues (transport transversal)

2.3.2 Transport sédimentaire

En milieu côtier, le transport sédimentaire se décompose en deux composantes : transversale (perpendiculaire à la plage) et littorale (parallèle à la plage). Bien qu'il existe un lien physique entre ces deux types de transport, l'analyse effectuée sur chacun de ces deux types de transport ne porte pas sur la même échelle de temps. En effet, l'analyse du transport transversal se limite généralement à la durée d'une tempête (quelques heures à quelques jours) alors que l'analyse du transport littoral est plutôt effectuée sur une très longue période de temps (quelques années à plusieurs décennies). La connaissance des phénomènes physiques ainsi que la disponibilité des outils informatiques d'aujourd'hui permettent de modéliser ces deux types de transport sédimentaire.

Sous l'effet des vagues en temps de tempête, les sédiments du haut de la plage ont tendance à se faire éroder, puis à être transportés vers le large pour finalement se déposer au pied de la plage. Ce dépôt de sédiments porte le nom de barre de sable. En temps de tempête exceptionnelle, l'érosion produite par les vagues est en mesure d'engendrer des affaissements de talus de plage ce qui peut endommager les infrastructures et la végétation du haut de plage. Ces dégâts deviennent particulièrement sévères lorsque le niveau d'eau est beaucoup plus élevé qu'à la normale en raison des surcotes générées par les vents et la dépression atmosphérique. En se superposant à la marée (forçage généré par la lune et le soleil), ces surcotes provoquent les niveaux d'eau anormalement élevés, souvent surnommés très grande marée par les médias et les riverains.

En temps plus calme, les sédiments accumulés dans la barre de sable au pied de la plage s'érodent pour se déposer en haut de plage. Ce phénomène se poursuit jusqu'à l'atteinte d'un profil d'équilibre : il s'agit ici d'un processus naturel de reconstruction de la plage. Toutefois, il demeure impossible pour l'extrémité supérieure de la plage de subir ce processus de reconstruction naturelle puisqu'un niveau d'eau anormalement élevé serait requis pour permettre cela. Or ces niveaux d'eau anormalement élevés surviennent uniquement durant les événements de tempête, ceux-ci étant destructifs plutôt que reconstructifs.

Le processus de reconstruction naturelle de la plage est possible seulement si la barre de sable en bas de la plage demeure disponible. En effet, celle-ci peut aussi partir à la dérive littorale : c'est le phénomène du transport littoral.

Le transport littoral est un élément à analyser sur une très longue échelle de temps (plusieurs années à plusieurs décennies). Ce type de transport dicte la tendance moyenne de la plage. À très long-terme, certaines plages peuvent perdre du terrain (plage en érosion) ou, dans d'autres cas, s'engraisser (plage en accrétion). Dans certains cas, le transport littoral est tellement faible par rapport au transport transversal que la tendance moyenne de la plage peut être camouflée par les impacts ponctuels des fortes tempêtes. C'est notamment le cas pour les plages qui sont essentiellement impactées par des vagues pratiquement perpendiculaires à la ligne de plage.

Le transport littoral peut être calculé le long de la ligne de plage dans le but d'évaluer un gradient de transport. Lorsque le gradient du transport littoral est positif, il se produit un déficit en sédiments : la quantité de sédiments en provenance de l'amont (par rapport au sens de la dérive littorale) est insuffisante pour combler le départ de sédiments vers l'aval. Une telle situation engendre une zone d'érosion (recul de la plage). Lorsque, au contraire, le gradient du transport littoral est négatif, il se forme un excédent de sédiments : la quantité de sédiments en provenance de l'amont excède la quantité de sédiments nécessaire pour combler le départ de sédiments vers l'aval. Une telle situation engendre ainsi une zone d'accrétion (avancée de la plage).

La tendance d'une plage (érosion versus accrétion) peut s'inverser à l'intérieur d'une même année où même d'une année à l'autre dépendamment de la variabilité du climat de vagues. Toutefois à très long-terme, la tendance devient plus évidente à constater. C'est pour cette raison que l'analyse du transport littoral doit être réalisée sur une grande échelle de temps (plusieurs années, plusieurs décennies).

La mise en place d'un épi a pour effet de diminuer le transport littoral vis-à-vis de celui-ci. En amont de la structure (par rapport à la direction du transport littoral), il se forme un excédent de sédiments ce qui engendre une zone d'accrétion. Cependant en aval de la structure, il se produit un déficit en sédiments ce qui crée une zone d'érosion. Ainsi, la problématique d'érosion n'est pas supprimée, mais déplacée plus loin en aval.

Un phénomène similaire survient également suite à la mise en place d'un brise-lames détaché : une zone d'accrétion est observée vis-à-vis du brise-lames alors que la section en aval de celui-ci montre une tendance vers l'érosion.

Les murs en enrochement, étant non-érodables, diminuent le transport littoral ce qui a pour conséquence de réduire l'apport sédimentaire en aval de celui-ci et donc de créer une zone d'érosion. Le problème est donc, encore une fois, déplacé, ce qui n'est pas toujours souhaitable. Les murs en enrochement provoquent aussi des effets de réflexion sur les vagues : la combinaison des vagues incidentes et des vagues réfléchies sur le mur tend à augmenter les effets érosifs. Bien que le mur en enrochement ne soit pas érodable en tant que tel, sa fondation peut se faire éroder pour éventuellement mener à un affaissement de la structure.

L'érosion côtière est donc une problématique complexe générée par les grandes forces de la nature. Puisqu'il est souvent difficile de travailler à l'encontre de ces forces, il est préférable d'apprivoiser celles-ci afin de les utiliser à notre avantage. Ce type d'approche, souvent surnommée « méthode douce » dans le génie côtier moderne, nécessite une bonne connaissance de la dynamique sédimentaire du site à l'étude. C'est pour cette raison qu'il est recommandé d'analyser le régime maritime et météorologique ainsi que l'historique morphologique du site à l'étude avant de procéder à la mise en place d'infrastructures de protection côtière.

2.3.3 Influence des changements climatiques

Dans les régions froides, la formation de glace de rive au pourtour d'une étendue d'eau contribue à protéger les berges de l'action directe des vagues. De plus, les morceaux de glace flottant sur un plan

d'eau permettent de dissiper l'énergie des vagues et donc, de réduire la hauteur de celles-ci. Ainsi, la formation de la glace en hiver fournit une certaine protection naturelle qui permet d'atténuer les problématiques d'érosion.

Or, avec le rehaussement de la température moyenne de l'air engendré par les changements climatiques, la durée de l'hiver glaciologique aura tendance à diminuer au fil des années. L'apparition de la glace se produira donc plus tard en hiver et la disparition s'amorcera plus tôt au printemps, ce qui laissera les berges vulnérables aux effets érosifs durant une plus grande portion de l'année.

L'augmentation du niveau de la mer est également un autre élément à considérer dans un contexte de changements climatiques. Toutefois, l'augmentation relative du niveau d'eau sera différente d'une région à l'autre en raison, notamment, du soulèvement isostatique qui tend à compenser partiellement le rehaussement du niveau de la mer. Certaines régions seront donc touchées plus sévèrement que d'autres par le rehaussement du niveau de la mer.

Les changements climatiques peuvent également impacter le régime des vents. Toutefois avec les modèles climatiques actuellement disponibles, il demeure difficile de conclure concrètement sur la tendance des vents à long terme pour ce qui a trait à la vitesse, la direction et la fréquence d'occurrence des tempêtes.

2.3.4 Influence de la granulométrie de la plage

La granulométrie des plages a une influence significative sur les mécanismes de transport de sédiments. On distingue principalement les plages de sables ainsi que les plages de graviers et galets. Dans le premier cas, l'inertie des matériaux et les phénomènes d'infiltration sont pratiquement négligeables, conduisant à un mouvement symétrique des vagues sur la plage (remontée et ressac de la vague sur la plage) qui engendre généralement un transport des sédiments du haut de la plage vers le pied de la plage en période de tempête. De plus, l'action combinée des vagues et des courants engendre une remise en suspension et des taux de transport littoral importants.

Dans le cas des plages de graviers et galets, le mouvement des vagues sur la plage est asymétrique : la remontée peut entraîner les matériaux vers le haut de plage mais l'infiltration permet de dissiper l'énergie qui n'est plus suffisante pour déplacer les matériaux vers le bas de la plage lors du ressac. Il se forme alors une barre en haut de plage (« swash bar »). Au pied de la plage, le déferlement peut également produire un déplacement des matériaux vers le bas de la plage. En fonction de la combinaison des niveaux d'eau et des hauteurs de vagues, différents mécanismes se produisent : formation d'une barre en haut de plage, érosion de la plage, rehaussement de la crête dans le cas d'une barrière de galets, franchissement de la crête et création d'une brèche. Les mécanismes dominants se produisent essentiellement dans la zone d'interaction directe des vagues et de la plage. Les courants littoraux, qui se développent un peu plus au large, ont moins d'influence sur le transport, notamment en raison du calibre des matériaux.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 Données utilisées

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

- Photos aériennes historiques (1965-2013) disponibles sur Géoboutique.com;
- Photos obliques héliportées prises par le MSP en 2010 et en 2017;
- Photos satellites publiées par la NASA;
- Données bathymétriques du SHC;
- Données lidar & bathymétriques relevées en 2017 et en 2018 par le MSP;
- Niveaux d'eau mesurés par les marégraphes de Pêches et Océans Canada;
- Niveaux d'eau prédits par Pêches et Océans Canada;
- Niveaux d'eau simulés par le modèle de l'ISMER [1];
- Vagues simulées par le modèle de l'UQAR;
- Données granulométriques relevées par Englobe en automne 2018;
- Plans des recharges granulaires proposées par M. Ropars [2];

3.2 Outils de modélisation

Les outils de modélisation ainsi que leurs paramètres utilisés seront présentés en détails dans les chapitres appropriés. Cette section a pour but de présenter brièvement les différents outils de modélisation qui ont été utilisés dans le cadre de la présente étude. Il est à noter que l'utilisation de ces outils de modélisation a également été complétée par des calculs analytiques sur la base de diverses références scientifiques qui seront présentées dans les chapitres appropriés.

3.2.1 Mike par DHI

L'ensemble des travaux de modélisation, de même que le montage du modèle numérique de terrain, ont été principalement réalisés à l'aide des divers modules de la suite logicielle MIKE, conçue et commercialisée par la firme danoise *DHI Water & Environment*.

Les divers modules de MIKE permettent une description complète de l'ensemble des processus régissant l'hydrodynamique et le transport sédimentaire en milieu côtier : niveaux d'eau, agitation due aux vagues, courants littoraux, transport sédimentaire en charriage et en suspension, évolution à court et long terme de la morphologie littorale, etc.

Les travaux de modélisation ont été effectués avec les modules MIKE suivants:

1. MIKE Zero : construction du modèle de terrain, pré-traitement des données ainsi que post-traitement et présentation des résultats de simulations;
2. MIKE 21 SW (*Spectral Waves*) : modèle bidimensionnel de transformation des vagues à l'approche du littoral et génération des contraintes de radiation produisant les courants littoraux;

3. Mike 21 HD (*Hydrodynamics*) : modèle bidimensionnel de résolution de l'hydrodynamique (vitesse d'écoulement & niveaux d'eau) du domaine par la méthode des volumes finis;
4. Mike 21 ST (*Sand Transport*) : modèle bidimensionnel de transport sédimentaire (et d'évolution morphologique) associé aux courants et aux vagues.

Il est à noter que les modules SW, HD, ST de Mike 21 sont exécutés en parallèle afin d'obtenir un feedback continu entre chacun de ces trois modules.

3.2.2 XBeach-G par Deltates

L'étude de la déformation du profil de plage sous l'action des vagues lors d'une tempête doit être effectuée à l'aide d'outils permettant d'inclure les spécificités des plages de graviers et galets. Les modèles commerciaux conventionnels étant essentiellement développés pour des plages de sable, le choix s'est orienté vers un modèle récent résultant des travaux de recherche du programme NUPSIG (*New Understanding and Prediction of Storm Impact on Gravel Beaches*) avec la collaboration notamment de l'université de Plymouth en Grande-Bretagne et Deltares aux Pays-Bas [3].

Le modèle unidimensionnel XBeach-G, développé en 2014, intègre à la plateforme XBeach de Deltares l'ensemble des paramètres régissant l'interaction des vagues et d'une plage de gravier ou galets, comme l'infiltration, les écoulements souterrains, et l'inertie des matériaux. Bien que récemment rendu disponible, le modèle a été validé et réglé sur la base de nombreux cas de mesures en laboratoire (Bardex ([4] et [5]) et in-situ [3], dont certains présentant des caractéristiques similaires à la plage Rochelois en termes de granulométrie, pente de plage et vagues.

3.2.3 HYFRAN

HYFRAN est un logiciel développé à l'INRS-ÉTÉ en 2008 qui permet de calculer les périodes de retour des événements sur la base de données d'observation et de diverses lois de distribution (Gumbel, Normale, Pearson, etc.). Ce logiciel a été utilisé pour calculer les périodes de retour des tempêtes.

3.3 Résumé de la méthodologie employée

Le schéma illustrant les nombreuses étapes nécessaires pour quantifier le transport sédimentaire de la plage de Rochelois est illustré sur la figure 3.1.

Il est à noter qu'avant de procéder aux diverses modélisations numériques affichées dans ce schéma, une analyse conceptuelle a d'abord été effectuée. À cet effet, les photos historiques (aériennes, héliportées et satellites) ont notamment été analysées dans le but d'étudier la dynamique sédimentaire de la plage Rochelois. Ces analyses, basées principalement sur des observations, ont également été complétées par des résultats de modélisation bidimensionnelle.

Les diverses étapes illustrées sur la figure 3.1 peuvent se résumer comme suit :

Probabilités d'occurrence des événements

- Utilisation des données du modèle de l'UQAR (vagues) et de l'ISMER (niveaux d'eau);
- À partir d'un MNT, modélisation 2D de la réfraction des vagues pendant plus de 30 ans;
- Extraction de la rose des vagues à 2 km de la plage Rochelois;
- Détermination de la dépendance entre les variables de niveau d'eau et de hauteur de vagues;
- Calculs des probabilités d'occurrence des événements de tempête

Transport transversal (tempêtes ponctuelles)

- Modélisation 2D du transport sédimentaire pour des événements de fortes tempêtes en conditions actuelles (plage de sable);
- Modélisation 1D du transport sédimentaire pour des événements de fortes tempêtes en conditions futures (avec recharge de gravier) et évaluation du run-up des vagues ;
- Évaluation de l'efficacité de l'ouvrage de protection côtière

Transport littoral (long-terme)

- Discrétisation de la rose des vagues en 72 événements (4 directions x 3 hauteurs de vagues x 6 niveaux d'eau);
- Modélisation 2D des 72 événements considérés en conditions actuelles;
- Calcul du transport littoral net annuel le long de la plage Rochelois en conditions actuelles;
- Modélisation 2D des 72 événements considérés en conditions futures (avec recharge granulaire);
- Calcul du transport littoral net annuel le long de la plage Rochelois en conditions futures (avec recharge granulaire);
- Évaluation de l'efficacité de l'ouvrage de protection côtière et optimisation de l'orientation de la recharge granulaire.

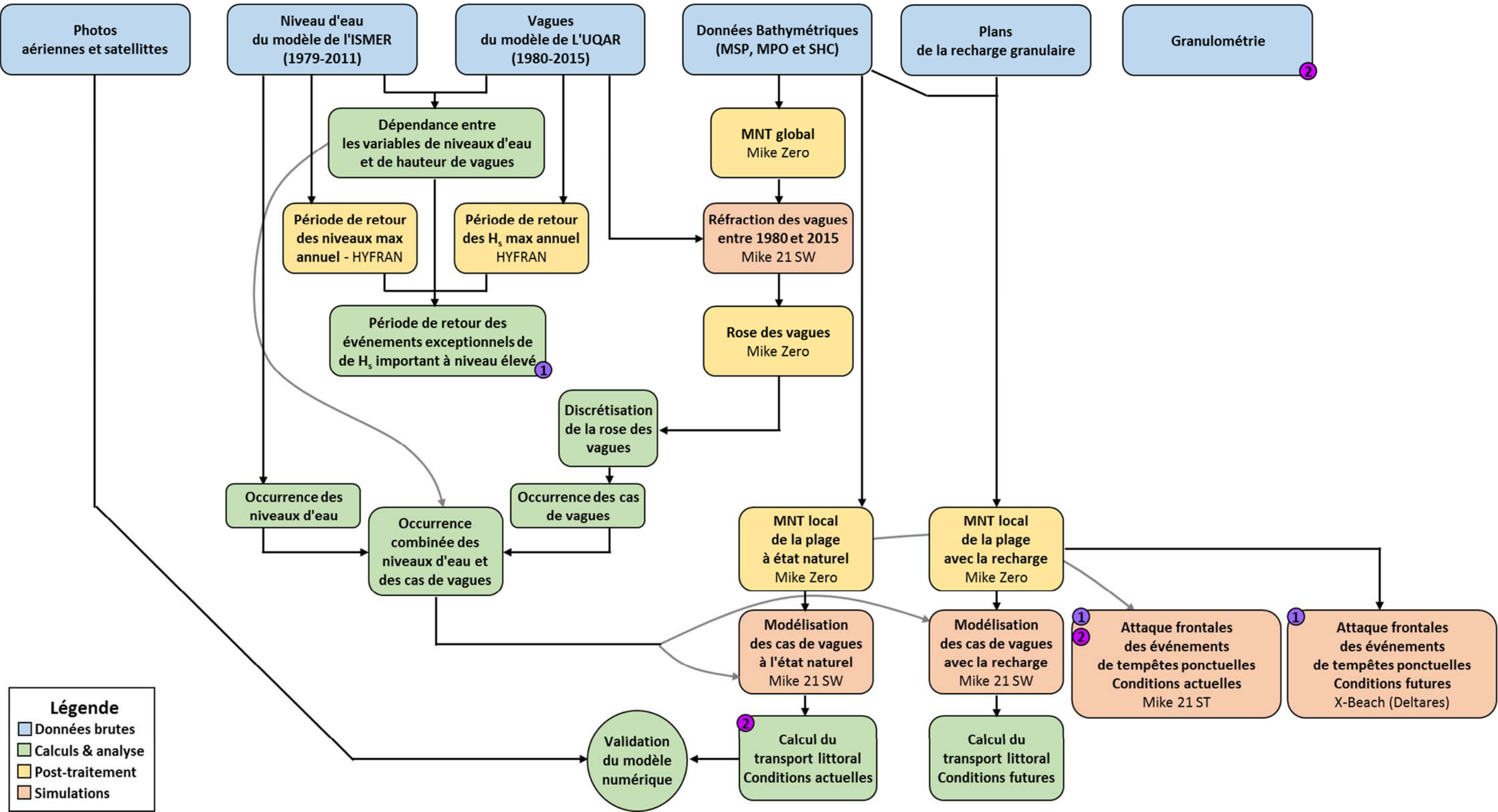


Figure 3.1 : Résumé de la méthodologie employée

4. MNT

4.1 Provenance des données

Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé dans le cadre de la présente étude a été monté en utilisant une compilation de données bathymétriques et topographiques issues de campagnes de mesures récentes ainsi que de données bathymétriques anciennes offertes par le Service hydrographique du Canada (SHC). La figure 4.1 affiche l'étendue des diverses sources de données utilisées. Il est à noter que les données de 2017 et 2018, situées dans la zone d'intérêt du projet, sont à très-haute résolution. Les données du SHC possèdent, quant à elles, une résolution variant de 15 m à 500 m.

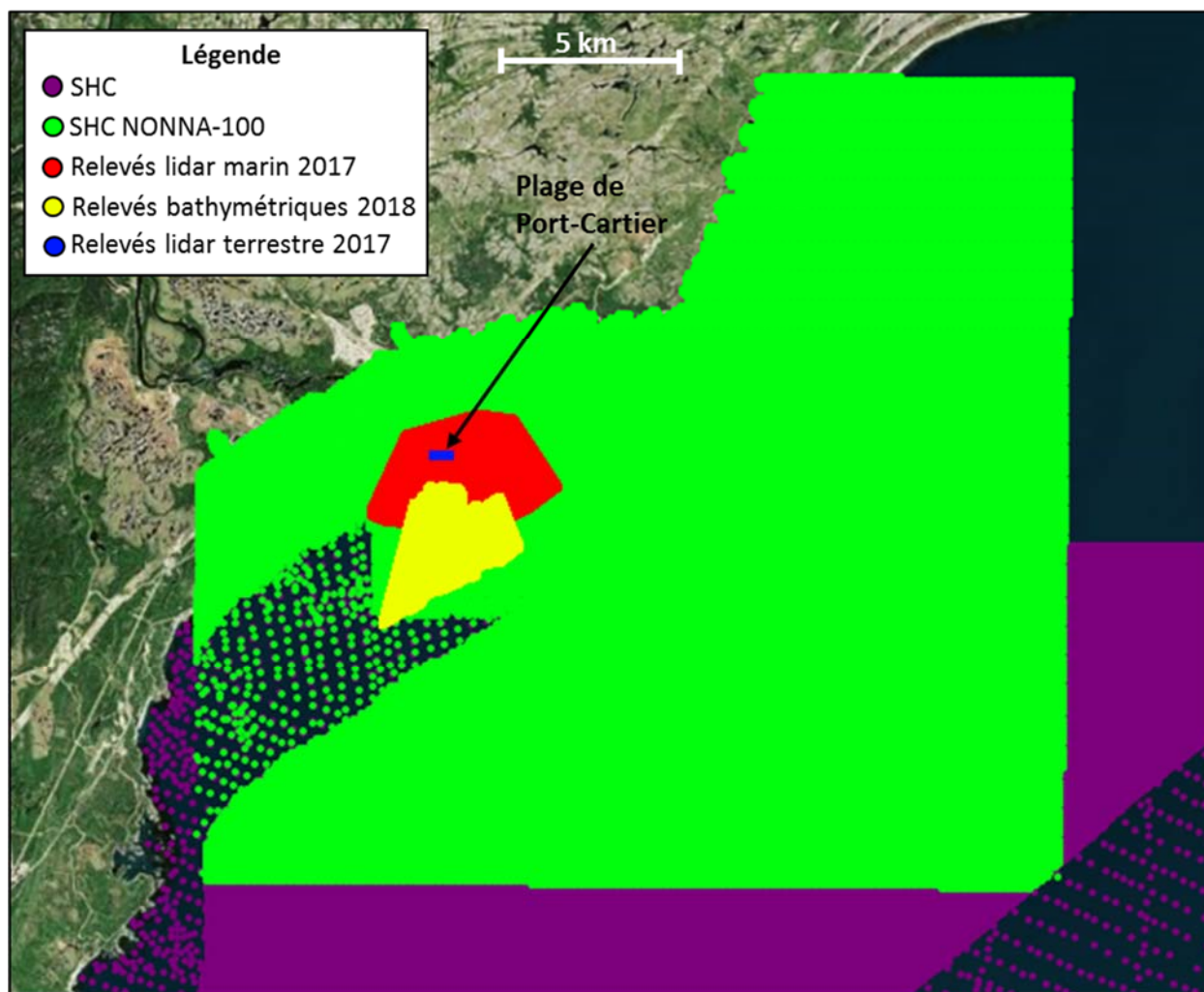


Figure 4.1 : Données utilisés dans le montage du MNT de Port-Cartier

4.2 Montage du MNT

4.2.1 Référencement altimétrique et géodésique

L'ensemble des données bathymétriques a été importé dans le logiciel de pré-traitement Mike Zero commercialisé par la firme DHI. Le tout a été converti vers une projection NAD1983 MTM6 et le datum utilisé est celui du niveau moyen des mers (NMM).

4.2.2 Étendue du MNT

La figure 4.2 illustre l'étendue des modèles de terrain globaux et locaux utilisés dans le cadre de la présente étude. L'élaboration de deux modèles (global et local) plutôt qu'un seul modèle permet, d'une part, de raffiner le maillage dans les zones d'intérêts et, d'autre part, d'optimiser les temps de calcul. L'utilité de chacun de ces deux modèles sera abordée plus en détails aux sections 5.3 et 6.

Le modèle global couvre un quadrilatère d'environ 8 km en longueur (axe est-ouest) par 5 km de largeur (axe nord-sud). La limite sud du modèle global correspond à l'emplacement des points d'extraction des données de vagues (voir chapitre 5.3).

Le modèle local couvre un quadrilatère d'environ 4,5 km en longueur (axe est-ouest) par 2 km de largeur (axe nord-sud).

4.2.3 Maillage du MNT

Tel qu'illustré sur la figure 4.3, la taille des mailles du modèle global varie selon la profondeur d'eau. En effet, les mailles situées dans les zones à profondeur élevée (plus de 45 m) sont caractérisées par des largeurs d'environ 500 m. En zone moins profonde, soit à proximité de la limite du modèle local, la largeur des mailles du modèle global est plutôt aux alentours de 125 m.

Le maillage du modèle local est affiché sur la figure 4.4. Le maillage de ce modèle varie non seulement en fonction de la profondeur d'eau, mais également en fonction des exigences techniques au niveau des calculs de transport sédimentaire. À cet effet, la largeur des mailles varie de 80 m au large de Port-Cartier jusqu'à 1 m à proximité de Port-Cartier afin de bien schématiser le déferlement des vagues sur la plage.

4.3 Conditions limites du MNT

Pour le modèle global, les propriétés physiques des vagues (H_s , T_p et dir) sont imposées à la limite sud. Les limites Est et Ouest sont, quant à elles, du type latéral (propriétés des vagues calculées par le modèle). Puisque les profondeurs de la bathymétrie sont très élevées (plus de 10 m) dans le domaine du modèle global, le niveau d'eau n'impacte pas significativement la transformation des vagues au large. Pour cette raison, il est admissible de fixer un niveau d'eau constant de 0 m dans le modèle global. La question de la variation du niveau d'eau sera toutefois abordée dans le modèle local, celui-ci possédant un maillage plus fin.

Pour le modèle local, les propriétés physiques des vagues calculées par le modèle global sont imposées à la limite sud alors que les limites Est et Ouest sont du type latéral. Le niveau d'eau des trois conditions aux limites est quant à lui imposé à une valeur comprise entre -1 m et 3.4 m dépendamment du scénario considéré.

Dans les deux types de modèles (global et local), les caractéristiques physiques des vagues ne varient pas le long de la condition frontière sud. À cet effet, le modèle local a été orienté de manière à ce que la limite sud soit parallèle aux iso-contours des hauteurs de vagues. En d'autres mots, les données brutes de vagues ne varient pas de façon significative entre les extrémités sud-ouest et sud-est du modèle local.



Figure 4.2 : Étendue des modèles local et global de Port-Cartier

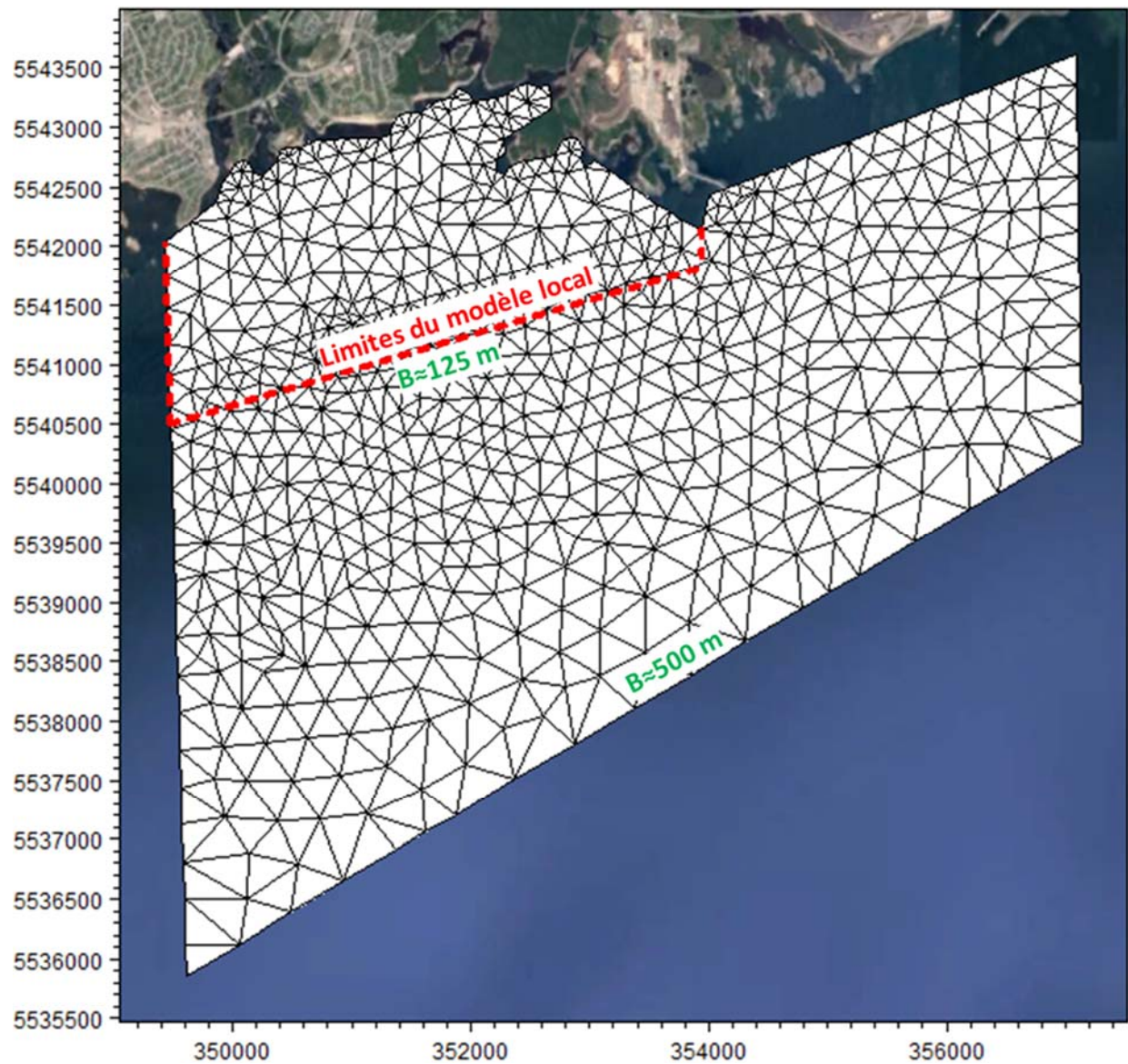


Figure 4.3 : Maillage utilisé dans le modèle global

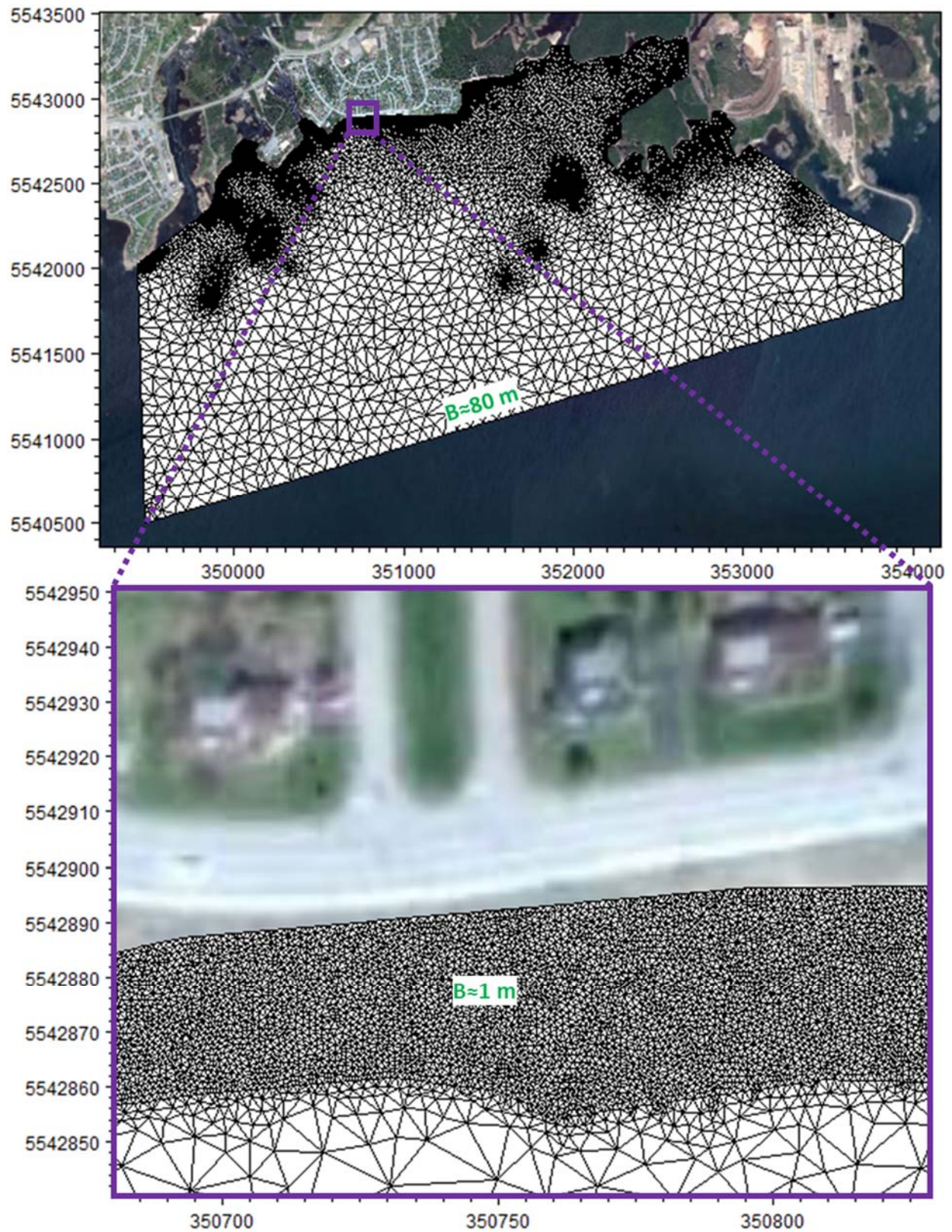


Figure 4.4 : Maillage utilisé dans le modèle local

4.4 MNT en conditions actuelles

La figure 4.5 affiche la bathymétrie issue du modèle de terrain de Port-Cartier.

La figure 4.5a montre plusieurs ilots et hauts-fonds pouvant dissiper l'énergie des vagues. Cet aspect sera abordé au chapitre 5.3.

La figure 4.5b révèle une bathymétrie peu profonde à proximité de la plage de Port-Cartier. En effet, la bathymétrie varie principalement entre -1 m et 0 m sur environ 400 m au large de la plage et des bancs de sable peuvent y être observés. Un rocher agissant de manière analogue à un brise-lame détaché est également présent à 500 m de la plage Rochelois. Ces éléments seront analysés dans le chapitre 6 portant sur la dynamique sédimentaire.

4.5 MNT en conditions futures (avec la recharge granulaire)

Une intervention de recharge granulaire est prévue sur la plage actuelle de Rochelois afin d'offrir la protection nécessaire aux événements de tempête. Des dimensions préliminaires de la recharge avaient d'abord été établies dans l'étude de M. Yann Ropars (CRI) en mars 2018 [2]. À la suite des résultats de simulations hydrodynamiques exploratoires de Lasalle|NHC en février 2019, les dimensions ont été révisées et la nouvelle recharge granulaire a été nommée « Variante V1 ».

Les travaux de modélisation du comportement hydro-sédimentaire ont ensuite permis d'optimiser la recharge granulaire afin d'obtenir la « Variante V2 » en premier lieu, puis la « Variante V3 » en second lieu. À cet effet, les détails concernant ces travaux de modélisation sont présentés à la section 6.4.

La figure 4.7c affiche une vue en coupe de la recharge granulaire prévue à la plage de Rochelois. La hauteur prévue de la crête de la recharge granulaire est de 5,4 m et une pente de 1:2 est anticipée pour la construction. Cette même figure illustre aussi la pente d'équilibre théorique qui est anticipée pour cette recharge granulaire. À cet effet, les figures figure 4.7a et figure 4.7b comparent la forme de cette recharge à la construction ainsi qu'à l'état d'équilibre théorique.

Les échantillons des bancs d'emprunt de la recharge granulaire indiquent un d_{50} variant entre 7 mm et 20 mm pour une moyenne d'environ 15 mm. Un volume total d'environ 113 000 m³ de gravier sera nécessaire pour obtenir la recharge illustrée sur la figure 4.7. Ce volume est évalué à partir du MNT formé à l'aide des données LiDAR terrestre et bathymétriques 2017 tel que décrit à la section 4.1.

Un épi submersible est prévu à l'extrémité Est de la recharge granulaire afin de contenir les matériaux granulaires à l'intérieur de la zone délimitée par cette recharge. La figure 4.8 affiche les dimensions de l'épi submersible, celles-ci ayant été proposées par M. Yann Ropars en octobre 2019.

Afin de permettre la mise en place de la recharge granulaire, l'émissaire localisé dans la section Ouest de la plage Rochelois devra être déplacé.

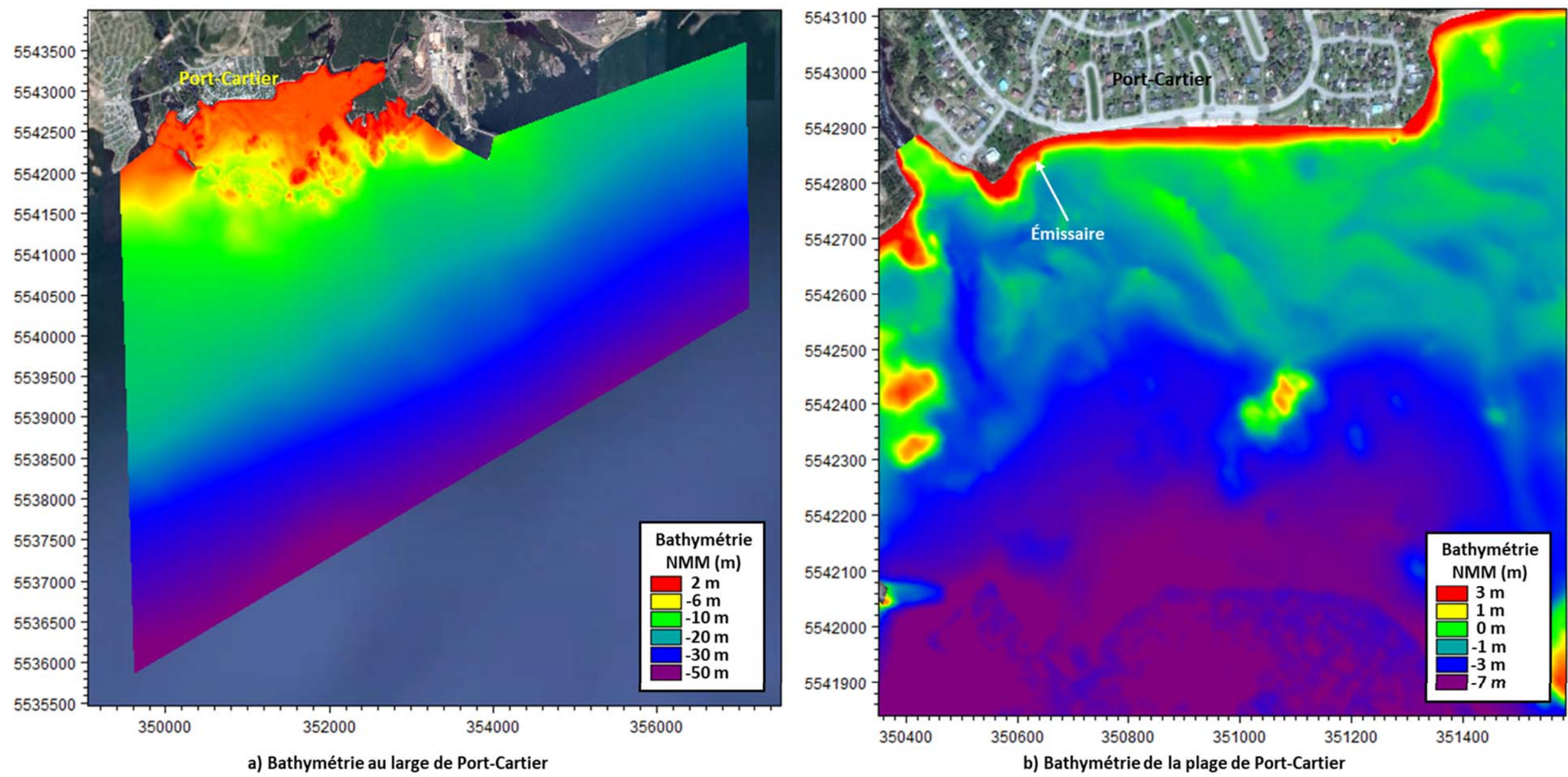


Figure 4.5 : MNT en conditions actuelles

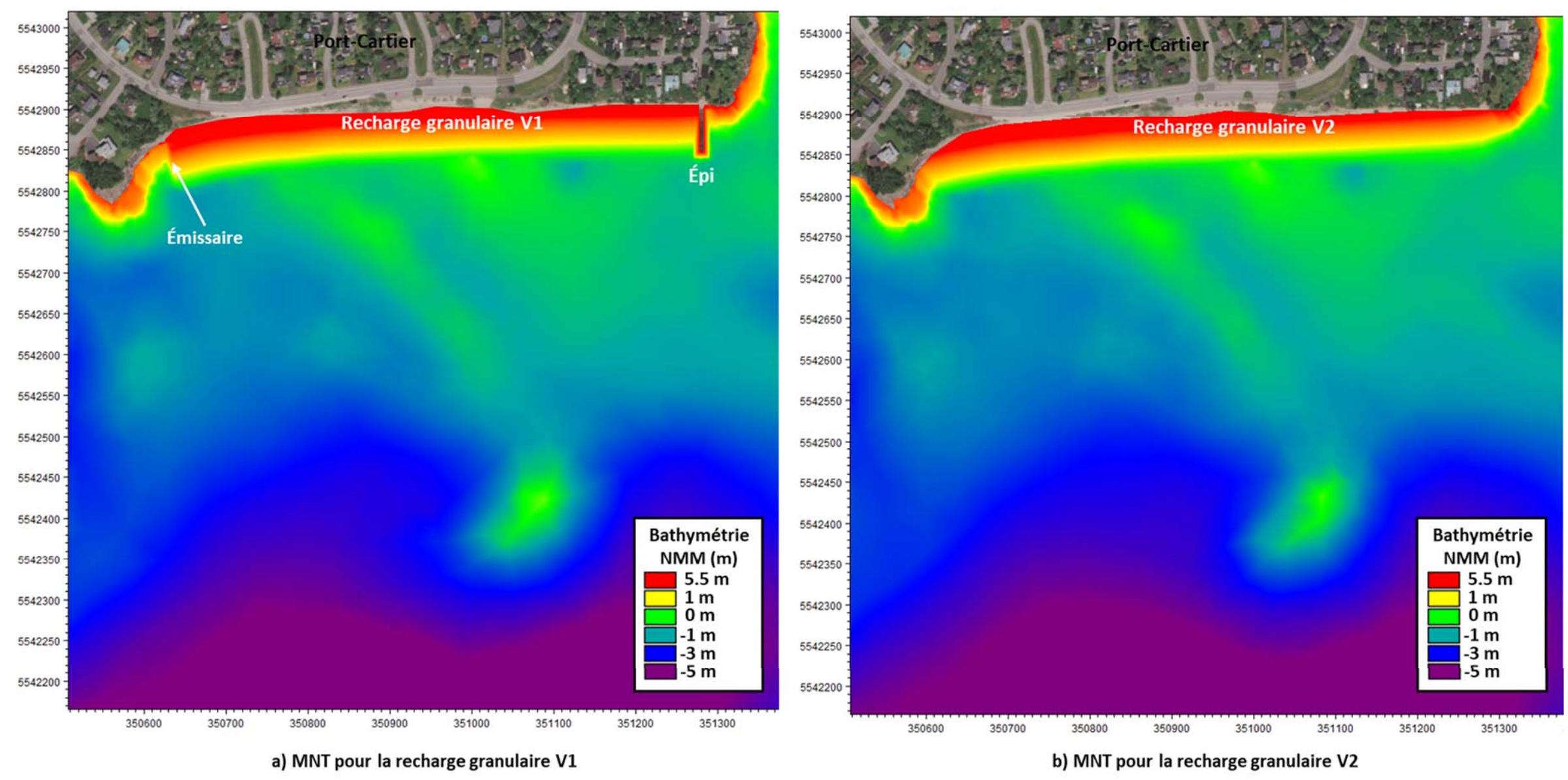
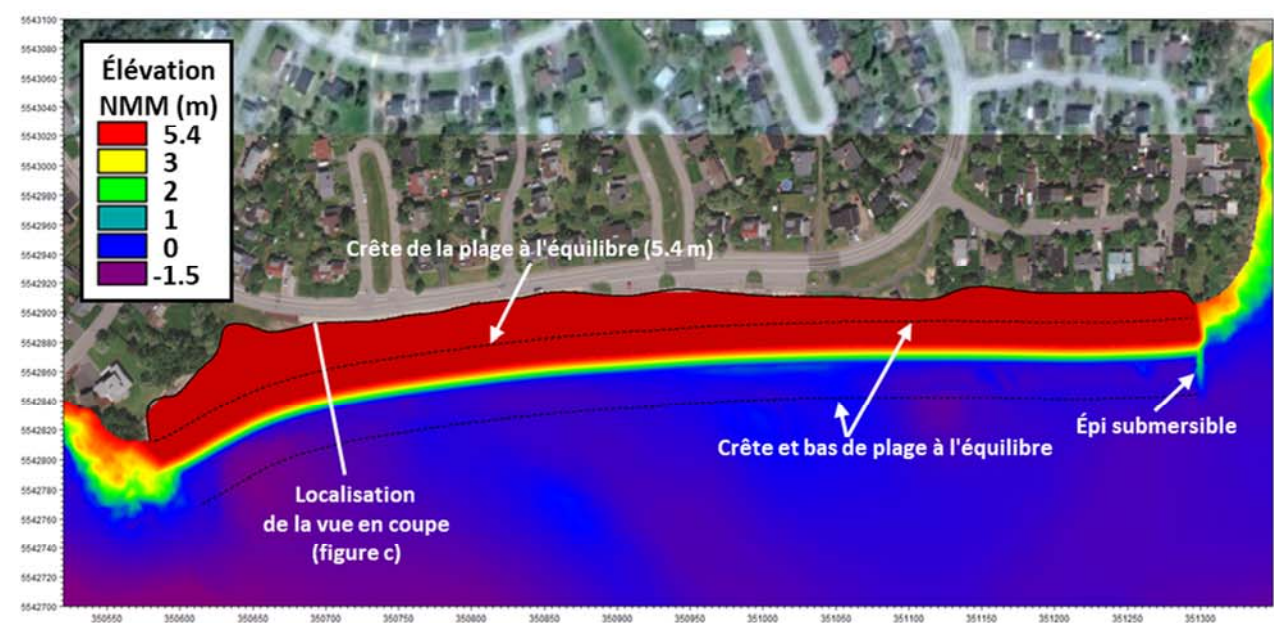
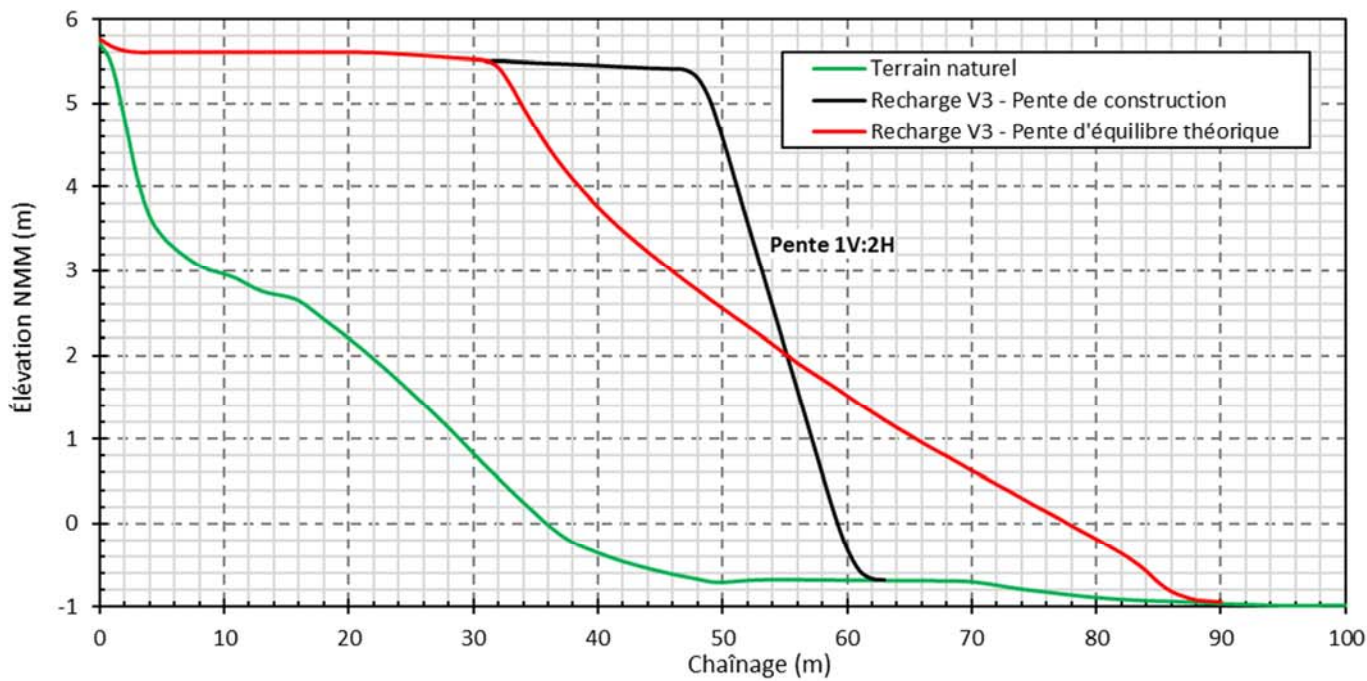


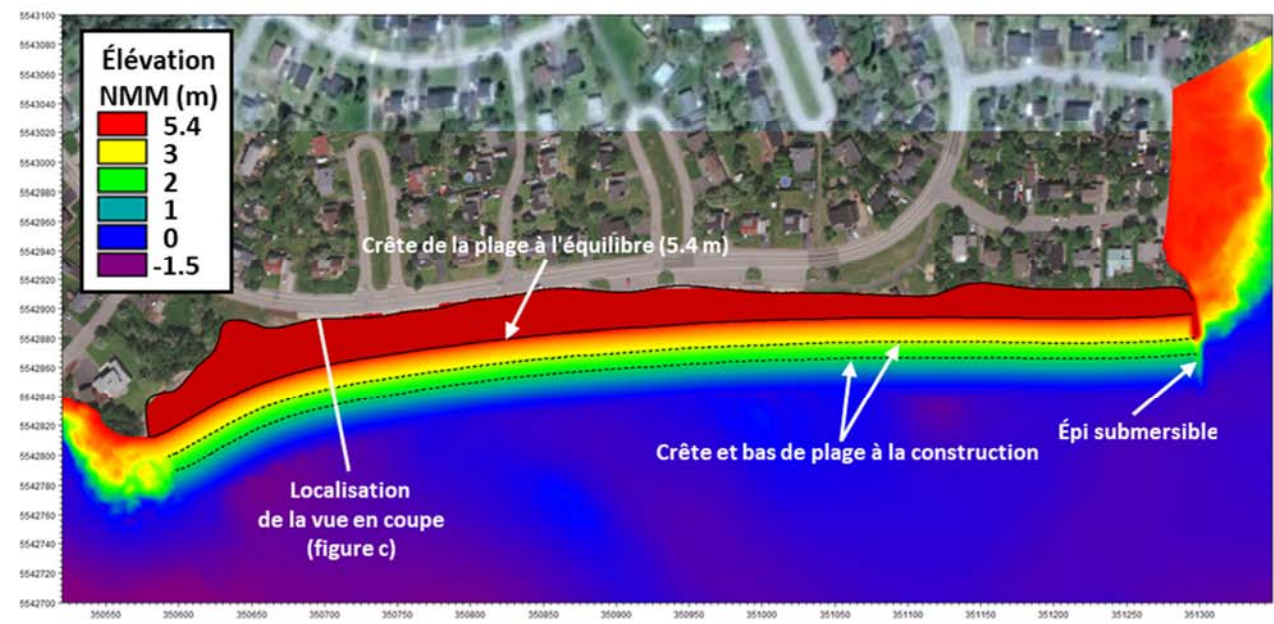
Figure 4.6: Présentation des différentes recharges granulaires étudiées (Variantes V1 et V2)



a) Recharge granulaire V3 - À la construction



c) Vue en coupe de la recharge granulaire V3



b) Recharge granulaire V3 - À l'équilibre



d) Quantité de matériaux nécessaires pour la recharge granulaire V3

Figure 4.7 : Présentation de la recharge granulaire optimisée (Variante V3)

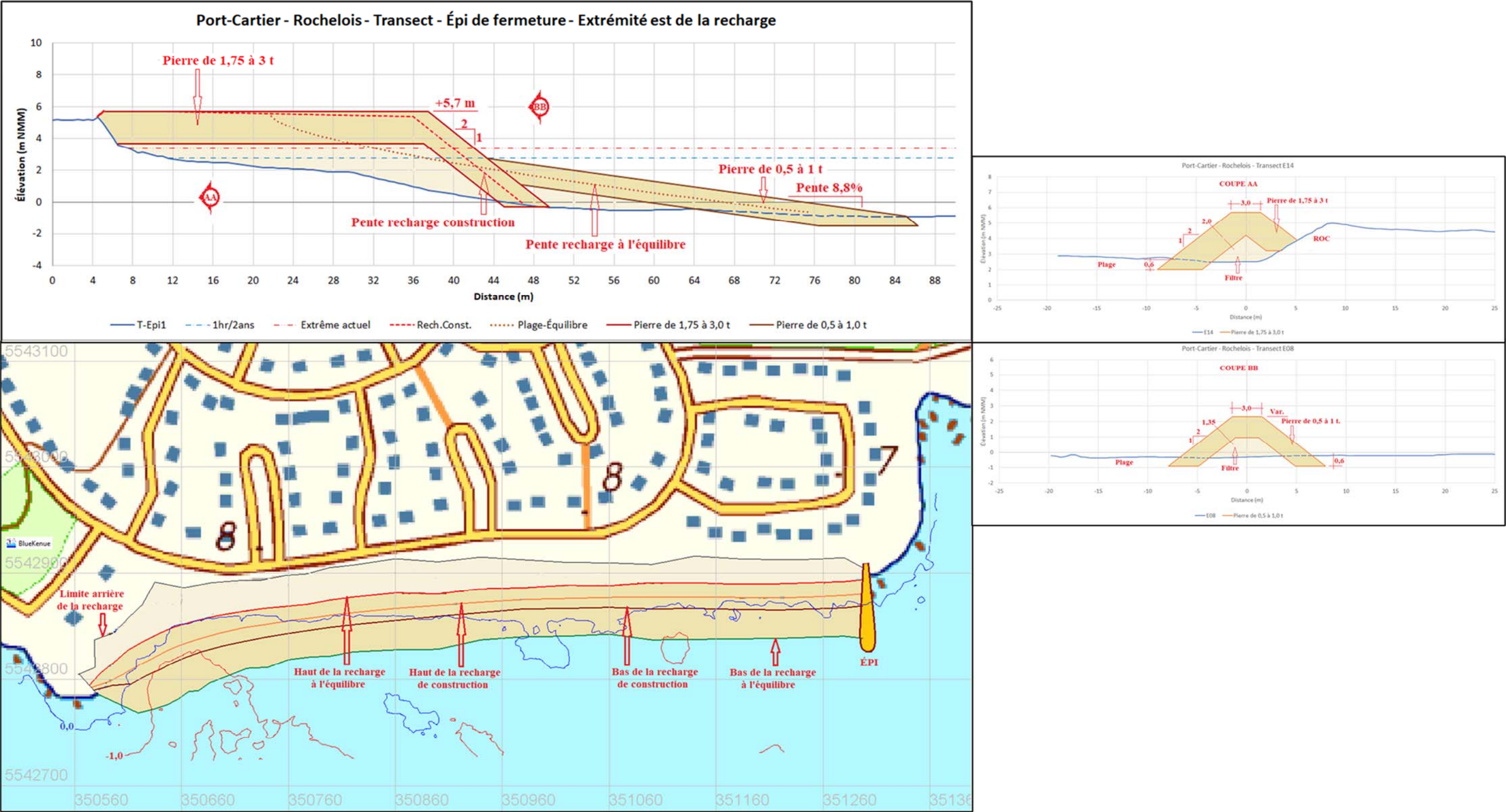


Figure 4.8 : Dimensions de l'épi submersible (Variante V3)

5. CONDITIONS MARITIMES

5.1 Concepts généraux

En milieu côtier, les vagues sont le mécanisme de base pour le transport sédimentaire (érosion et dépôt de sédiments). Les propriétés (hauteur, direction, période) et l'occurrence (nombre d'heures moyen par année) des vagues dictent non seulement la magnitude du transport sédimentaire, mais également la direction de celui-ci. C'est pour cette raison que l'élément de base de l'analyse statistique de vagues se présente sous la forme d'une rose de vagues (section 5.3).

Les dommages engendrés par une tempête ne dépendent pas uniquement de l'ampleur des vagues, mais également du niveau d'eau. En effet d'une manière générale, les tempêtes survenant à niveau élevé ont tendance à être plus dévastatrices pour la plage, d'où l'importance de considérer la question du niveau d'eau dans l'étude (section 5.2). Il existe aussi une certaine dépendance (corrélation) entre le niveau d'eau et la hauteur de vagues durant un événement de tempête. Cette dépendance est importante à considérer afin de ne pas sous-estimer la récurrence des tempêtes (section 5.4).

Somme toute, il est important de considérer le portrait général de la zone d'étude pour bien comprendre la dynamique côtière de la plage Rochelois. À cet effet, la section 5.5 résume les points clés de l'analyse des conditions maritimes de la région de Port-Cartier.

5.2 Niveaux d'eau

5.2.1 Provenance des données

Dans le cadre de la présente étude, les niveaux d'eau provenant de trois sources distinctes ont été utilisés :

1. Les niveaux d'eau prédits à Port-Cartier par Pêches et Océans Canada;
2. Les niveaux d'eau mesurés à Sept-Îles (1987-2016) publiés sur le site de Pêches et Océans Canada;
3. Les niveaux d'eau modélisés à Port-Cartier (1979-2011) par le modèle de l'ISMER [1].

Les prédictions de Pêches et Océans Canada permettent de déterminer l'amplitude du marnage dans le fleuve Saint-Laurent à la hauteur de Port-Cartier, un élément qui est abordé au chapitre 5.2.2. L'utilisation de ce type de données demeure toutefois limitée puisque les surcotes n'y sont pas incluses.

À l'opposé, les données mesurées à Sept-Îles et publiées par Pêches et Océans Canada offrent un niveau d'eau total incluant la marée et les surcotes (ou décotes). La station de mesure en question est toutefois positionnée à 40 km en aval de Port-Cartier. De plus, des absences de données peuvent parfois survenir dans la série temporelle en raison, notamment, de problèmes techniques en lien avec le matériel.

Les données modélisées par le modèle de l'ISMER permettent d'obtenir une série temporelle horaire complète de niveaux d'eau à Port-Cartier entre 1979 et 2011 (33 ans). Ce modèle tient compte de la marée et des surcotes (ou décotes). Ces données sont ainsi les plus complètes et les plus représentatives de la réalité et pour cette raison, elles ont été utilisées dans les calculs d'occurrence et de période de retour (voir chapitre 5.2.3).

Les données modélisées par l'ISMER s'arrêtant en 2011, il n'est présentement pas possible d'obtenir le niveau d'eau durant la tempête de décembre 2016 à l'aide de cet outil. Ainsi, les niveaux mesurés à Sept-Îles et publiés par Pêches et Océans Canada demeure actuellement la meilleure méthode pour déterminer le niveau d'eau maximum survenu durant la tempête de décembre 2016.

5.2.2 Marnage

Les prédictions de Pêches et Océans Canada sur les niveaux d'eau à la hauteur de Port-Cartier ont été utilisées afin de calculer les composantes harmoniques du signal de marée. À partir de ces composantes, il est possible de générer un signal de marée pour une période de temps donnée tel qu'illustré sur la figure 5.1.

À partir du signal de marée affichée sur la figure 5.1, il est possible de constater que le niveau d'eau varie essentiellement (80% du temps) entre -1 m et 1 m (NMM) avec un niveau minimum de -1,64 m et un maximum de 1,93 m. À cet effet, seulement 2% des cycles de marée atteignent un niveau maximum dépassant 1,8 m.

Les niveaux d'eau mesurés à Sept-Îles et publiés par Pêches et Océans Canada révèlent des niveaux dépassant fréquemment (plusieurs heures par année) une élévation de 2 m et ce, malgré le niveau prédit maximum de 1,93 m pour la marée. Cela souligne l'importance de l'inclusion des surcotes dans l'analyse

des niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent à la hauteur de Port-Cartier. Ce concept est abordé en détails à la section 5.2.3.

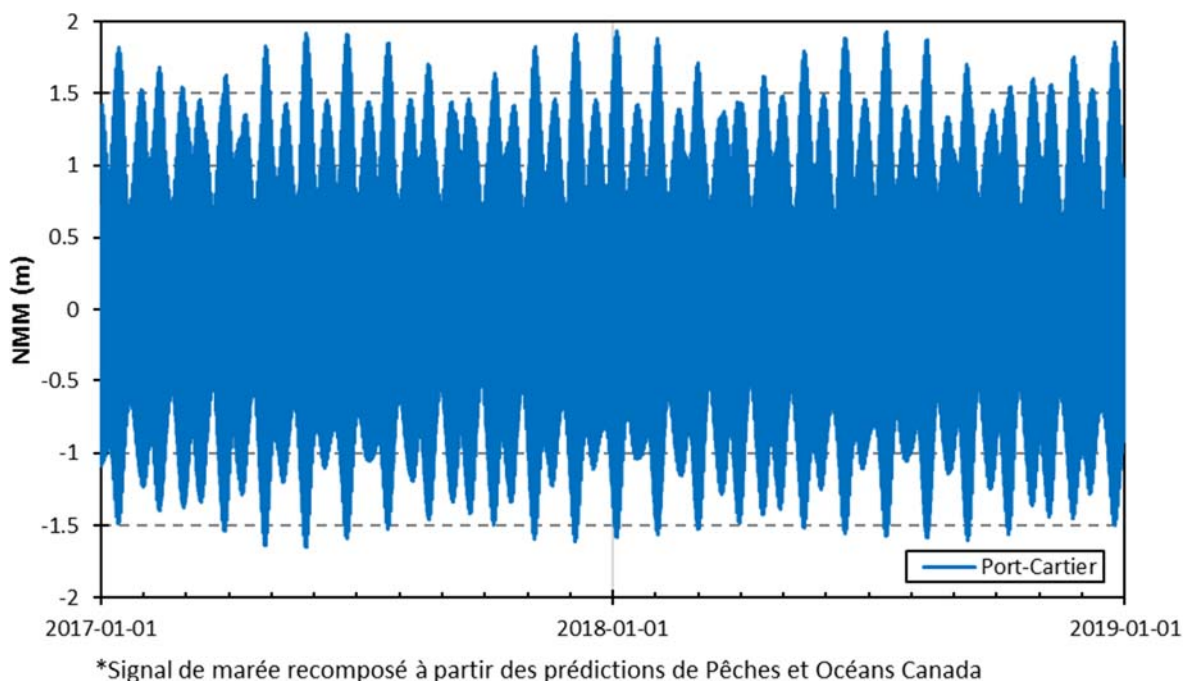


Figure 5.1 : Amplitude de la marée à Port-Cartier

5.2.3 Niveau total

Les niveaux d'eau simulés par le modèle de l'ISMER, qui inclut les cycles de marée et les surcotes (ou décotes), ont été utilisés pour calculer les probabilités d'occurrence des niveaux d'eau totaux. Il est à noter que ces niveaux ont été modélisés en appliquant les conditions atmosphériques de réanalyse du modèle MERRA (développé par la NASA) entre 1979 et 2011. À cet effet, la résolution spatiale de ce modèle planétaire est de $0,5^\circ$ (36 km).

La figure 5.2 affiche l'occurrence des niveaux d'eau totaux modélisés pour Port-Cartier. Cette figure montre qu'en considérant la surcote, le niveau total excède fréquemment (22 h par année en moyenne) une élévation de 2 m et même parfois (0,3 h/année) l'élévation de 3 m. C'était d'ailleurs le cas durant la tempête du 6 décembre 2010 lorsque le niveau modélisé a atteint un maximum de 3,24 m.

En identifiant le niveau d'eau maximum annuel pour chacune des 33 années simulées par le modèle de l'ISMER, il a été possible de calculer les périodes de retour pour les niveaux d'eau à Port-Cartier. À cet effet, les niveaux d'eau maximums annuels ont été traités avec le modèle HYFRAN afin de calculer des périodes de retour en considérant une distribution de type Gumbel. La période de retour calculée pour un niveau de 2 m est ainsi de 1 an alors que pour un niveau de 3,0 m, elle est de 13 ans (voir tableau 5.1).

En comparant les résultats de la figure 5.2 avec ceux du tableau 5.1, il est possible de constater qu'un niveau de 2,6 m correspond à une occurrence de 1 heure par année et à une période de retour de

2,6 ans (et non 1 an). Ces résultats traduisent le fait qu'à chaque année, la probabilité que le niveau maximum dépasse 2,6 m est de 38% (1/2,6 année) et que, dans le cas où un tel événement surviendrait, le dépassement de 2,6 m s'étalerait fort-probablement sur plusieurs heures d'une manière à arriver à une moyenne de 1 heure par année sur une très longue échelle de temps.

Il est à noter que les niveaux d'eau évoqués dans le présent chapitre ne tiennent pas compte du rehaussement du niveau de la mer provoqué par les changements climatiques. Toutefois, ce rehaussement de niveau est en grande partie compensé par le phénomène du relèvement isostatique dans la région de la Côte Nord du Québec [6].

Tableau 5.1 : Période de retour des niveaux d'eau maximums annuels à Port-Cartier (Loi Gumbel)

NMM (m)	T (années)
2.0	1
2.2	1.1
2.4	1.4
2.6	2.6
2.8	5.6
3.0	13
3.2	31
3.4	75

*Niveau d'eau simulée par le modèle de l'ISMER entre 1979 et 2011

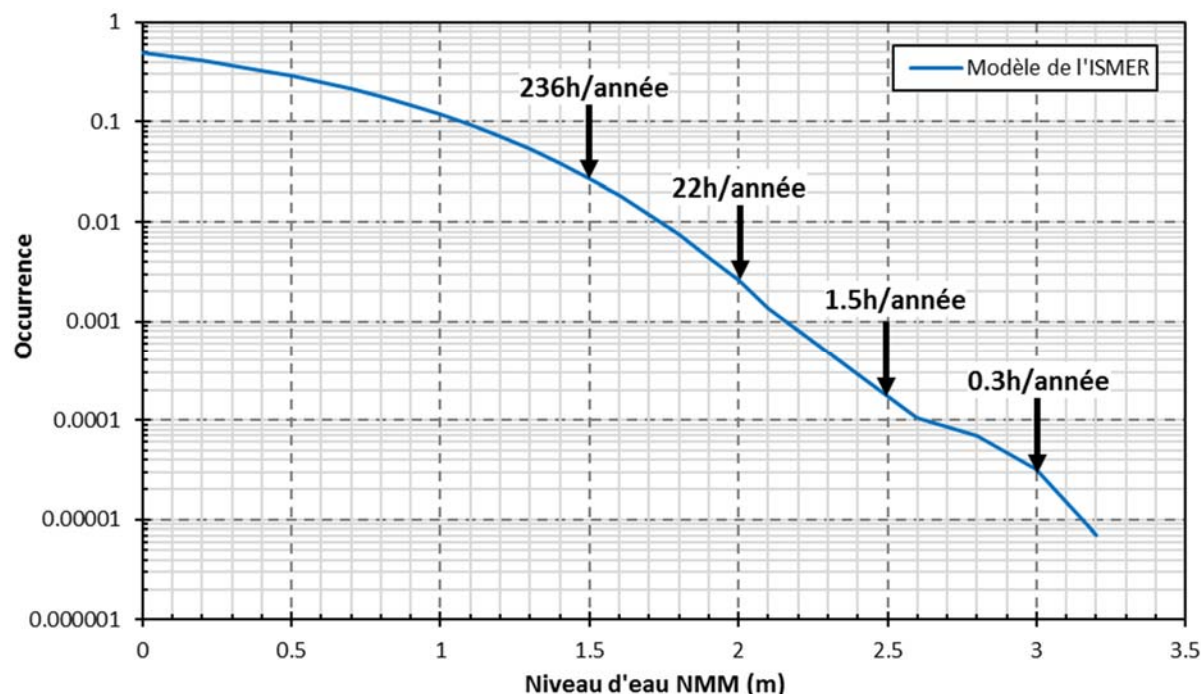


Figure 5.2: Occurrence des niveaux d'eau à Port-Cartier

5.3 Régime des vagues

5.3.1 Provenance des données

Les données de vagues utilisées dans le cadre de la présente étude proviennent du modèle de l'UQAR qui couvrent l'ensemble du fleuve Saint-Laurent ainsi que le golfe du Saint-Laurent. Il est à noter que ce modèle utilise l'algorithme du modèle planétaire Wave Watch III (WWIII) développé et opéré par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Le modèle de l'UQAR offre ainsi des données horaires de vagues et de vents entre les années 1980 et 2015 (35 ans) à une résolution de 1 km². Il est à noter que les vagues ont été modélisées en appliquant les conditions atmosphériques de réanalyse du modèle NARR entre 1980 et 2010 et NARR et GEM après 2010. La résolution spatiale de ce modèle, qui couvre l'ensemble de l'Amérique du nord, est de 0,3° (21,5 km).

En plus de tenir compte du forçage des vents, le modèle de l'UQAR inclut également la dissipation de l'énergie des vagues engendrée par la présence de glace à la dérive sur le Saint-Laurent.

Les données modélisées par l'UQAR s'arrêtant en décembre 2015, il n'est présentement pas possible d'obtenir les caractéristiques des vagues durant la tempête de décembre 2016 à l'aide de cet outil.

5.3.2 Réfraction des vagues du large

Les données de vagues de l'UQAR ont été extraites à une profondeur d'eau suffisamment élevée (à environ 5 km de Port-Cartier) afin d'obtenir une série temporelle de vagues dépourvue d'effets de réfractions et de diffraction engendrés par la bathymétrie et les divers îlots. Ces phénomènes physiques, qui nécessitent un maillage plus fin pour être bien résolus, seront couverts à l'aide d'un modèle global en premier lieu, puis par un modèle local en second lieu.

L'élaboration de deux modèles (global et local) plutôt qu'un seul modèle permet, d'une part, de raffiner le maillage dans les zones d'intérêts et, d'autre part, d'optimiser les temps de calcul. La figure 5.3 illustre l'étendue de chacun de ces deux modèles.

La série temporelle (1980-2015) de vagues de l'UQAR a ainsi été imposée comme condition à la limite au large du modèle global (voir figure 4.3 p.17 pour le maillage utilisé). La réfraction et la diffraction de ces vagues est ensuite modélisées avec le module Mike 21 SW pour la période de temps considérée. Le tableau 5.2 offre un résumé des principaux paramètres utilisés dans ce modèle. Il est à noter que ces paramètres sont standards dans le domaine du génie côtier.

Puisque les profondeurs de la bathymétrie sont relativement élevées (supérieures à 10 m) dans le domaine du modèle global, le niveau d'eau n'impacte pas significativement les phénomènes de réfraction et de diffraction des vagues. Pour cette raison, il est admissible de fixer un niveau d'eau constant de 0 m dans l'ensemble du modèle global. L'influence de la variation du niveau d'eau est toutefois prise en compte dans le modèle local, celui-ci possédant un maillage plus fin. Ce type d'analyse est présenté au chapitre 6 de ce rapport.

Tableau 5.2 : Résumés des principaux paramètres utilisés dans le modèle Mike 21 SW

Paramètre	Valeur
Type de formulation	Quasi-stationnaire
Discrétisation de la direction	15°
Gamma (déferlement des vague)	0.8
Coefficient Nukuradse	0.04
Condition limite au sud	H_s , T_p , Dir_{moy} et DSD
Conditions limites ouest et est	Latérale
Écart-type directionnel des vagues (DSD)	10°
Niveau d'eau	Constant (0 m NMM) pour le modèle global Variable pour le modèle local

La figure 5.3 illustre, à titre d'exemple, le phénomène de réfraction des vagues à Port-Cartier pour une heure donnée. Cette figure montre qu'au sud-est du modèle, les vagues sont en provenance de l'est (90°) alors qu'à proximité de Port-Cartier, la direction des vagues (environ 180°) est pratiquement perpendiculaire à la plage. Cette même figure montre aussi que la hauteur de vagues subit une importante diminution (3.8 m à 0.5 m) à proximité de Port-Cartier ce qui révèle une dissipation importante de l'énergie des vagues par les divers îlots-rochers.

La série temporelle (35 ans) de vagues issues du modèle global a ensuite été extraite à environ 2 km au large de Port-Cartier, soit à la limite du modèle local. Ces données extraites seront ainsi utilisées en tant qu'intrants pour le modèle local pour la modélisation de la dynamique sédimentaire (voir chapitre 6).

Il est à noter que pour le reste du rapport, les caractéristiques des vagues utilisées sont celles extraites à la limite au large du modèle local, soit à environ 2 km au large de Port-Cartier. Ces données de vagues, plus proche de Port-Cartier que celles du modèle de l'UQAR, sont plus représentatives du climat de vagues à Port-Cartier.

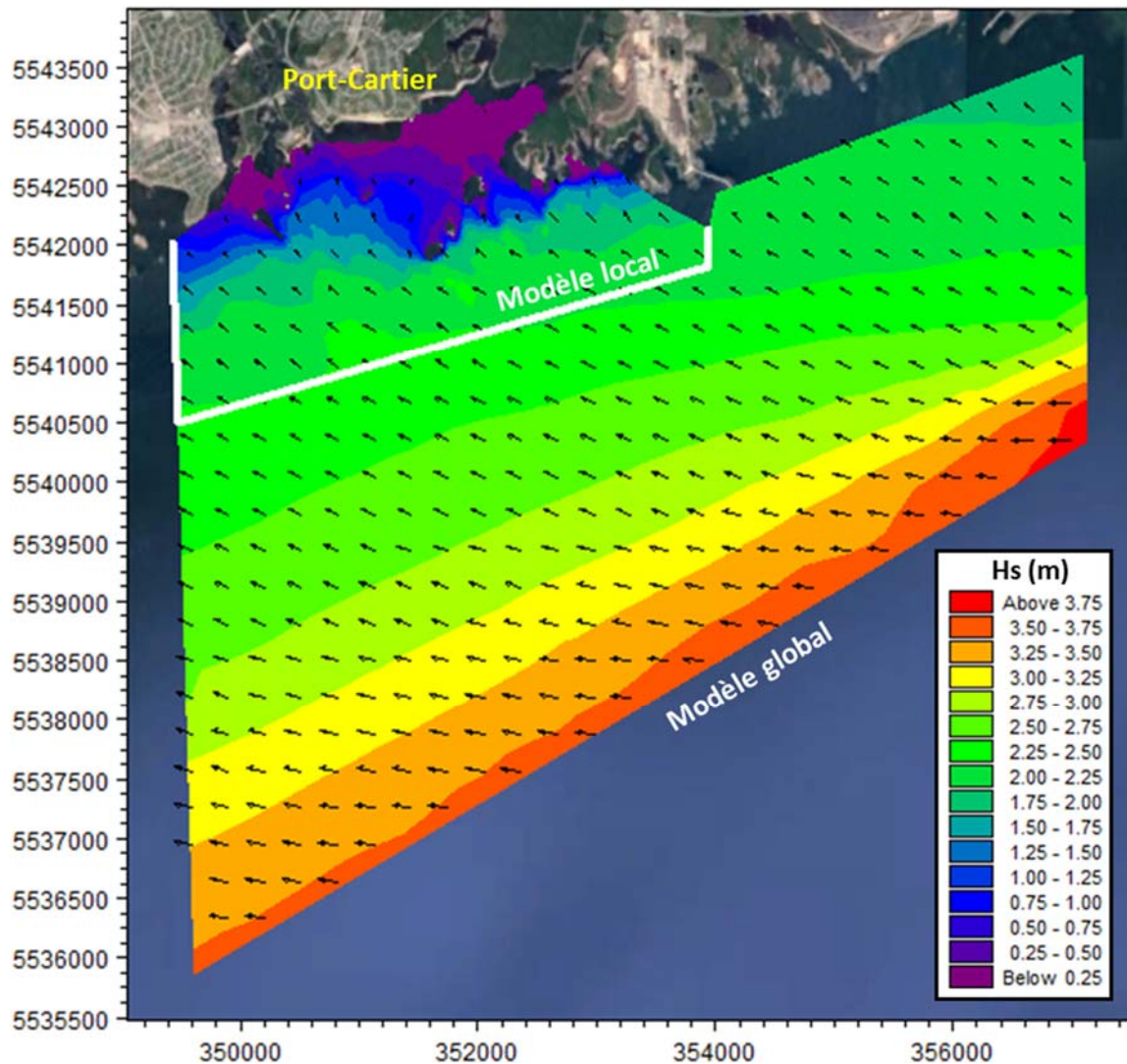


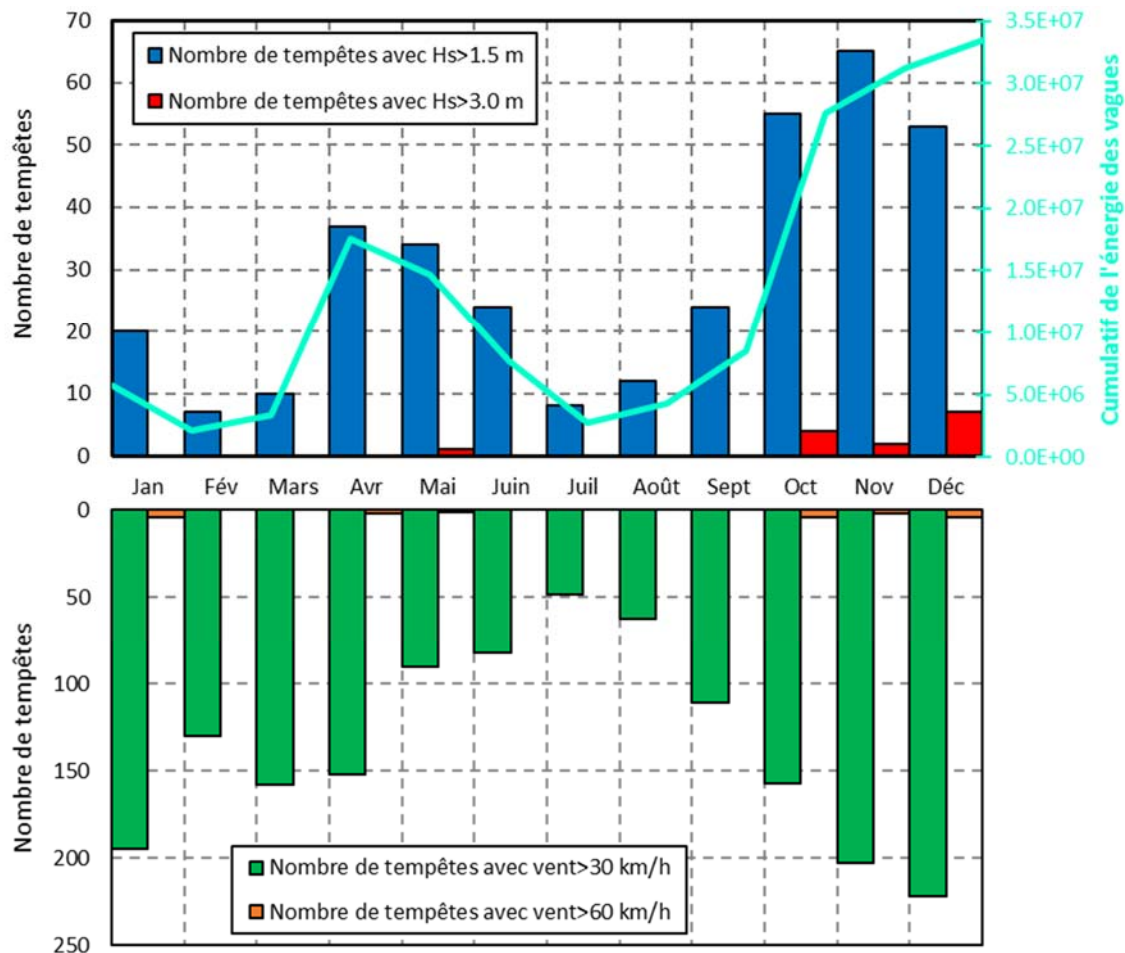
Figure 5.3 : Réfraction des vagues au large de Port-Cartier

5.3.3 Saison des tempêtes

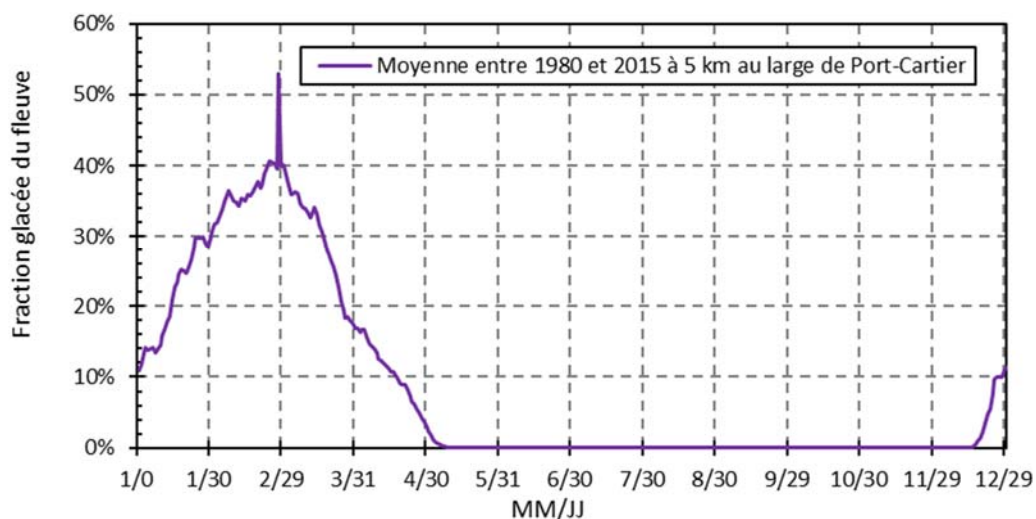
La figure 5.4a illustre la variation du nombre de tempête en fonction du mois de l'année. Deux saisons de tempêtes (hauteur de vagues importantes) peuvent ainsi être identifiées : la première au printemps (avril-juin) et la seconde en automne (octobre-décembre). Il est à noter que la saison d'automne contient les tempêtes les plus énergétiques, certaines d'entre elles étant caractérisées par des vagues de plus de 3 m à 2 km au large de Port-Cartier.

Il est intéressant de noter que la saison d'accalmie des vagues observée en juillet et en août coïncide également avec l'accalmie des vents durant cette même période. À l'opposé, l'accalmie des vagues en février et mars ne coïncide pas avec une accalmie des vents pour cette même période. Cette observation révèle une dissipation importante de l'énergie des vagues par la présence de glace à la dérive sur le Saint-Laurent. En effet, la figure 5.4b affiche une fraction glacée non-négligeable du Saint-Laurent entre la mi-janvier et la fin mars. À ce sujet, le rapport d'étude de l'ISMER sur la modélisation du régime des vagues du golfe de Saint-Laurent [7] mentionne que la glace est considérée présente dans le Saint-Laurent lorsque la concentration dépasse le seuil du 10%. Ce même rapport considère aussi une atténuation complète des vagues lorsque la concentration dépasse le seuil du 50%. En guise d'illustration, la figure 5.5 affiche l'ampleur de la glace à la dérive sur le golfe du Saint-Laurent par le biais d'une image satellite qui a été prise le 9 février 2015.

La génération de la glace dans le golfe du Saint-Laurent entre la mi-janvier et la fin mars constitue donc un mécanisme naturel d'atténuation d'énergie des vagues pour la période considérée. Toutefois, les projections climatiques prévoient, à partir de 2025, une diminution linéaire de la durée d'englacement pour finalement devenir nulle en 2100 [7]. Ainsi selon les résultats de ces projections climatiques, la saison des tempêtes d'automne (octobre-décembre) sera prolongée vers le mois de janvier alors que la saison des tempêtes de printemps (avril-juin) sera étendue vers le mois de mars. À plus long-terme, soit en 2100, il est prévu que la saison des tempêtes d'automne rejoigne celle des tempêtes de printemps en raison de l'absence de glace dans le golfe du Saint-Laurent. Ainsi, la saison des tempêtes s'étendra entre les mois d'octobre et juin, laissant place à une accalmie de seulement 3 mois (juillet-septembre).



a) Nombre de tempêtes entre 1980 et 2015 en fonction du mois de l'année



b) Fraction glacée du fleuve Saint-Laurent en fonction du temps

Figure 5.4 : Nombre de tempête à Port-Cartier en fonction du mois de l'année et fraction glacée du fleuve Saint-Laurent en fonction du temps de l'année

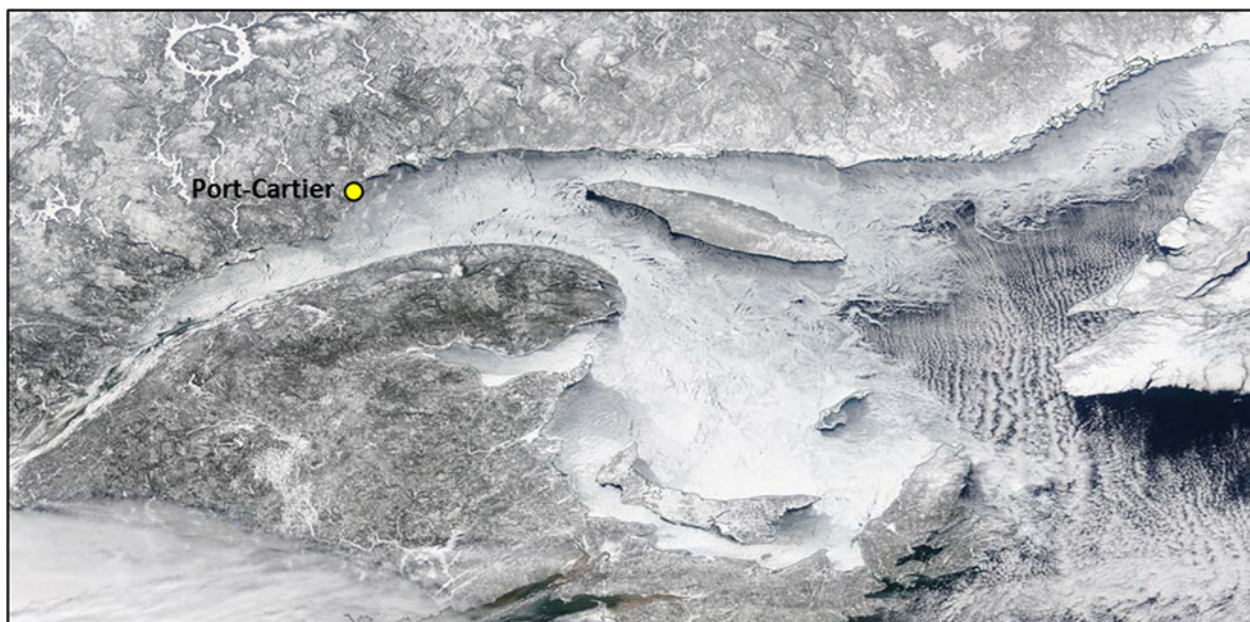


Figure 5.5 : Couvert de glace sur le golfe de Saint-Laurent le 9 février 2015 (tiré de NASA Worldview)

5.3.4 Durée des tempêtes

La figure 5.6 illustre la variation de la hauteur de vagues des 250 tempêtes les plus énergétiques entre 1980 et 2015. Cette figure montre qu'à l'exception des tempêtes du 15 décembre 2010 et du 5 décembre 2010, la variation de la hauteur de vagues se produit selon la forme d'une cloche.

Pour chacune des 250 tempêtes considérées, il est possible de calculer le cumulatif d'énergie de la tempête considérée (points bleus sur la figure 5.7) et de diviser ce cumulatif par la hauteur de vague maximale de la tempête de manière à obtenir une durée équivalente de la tempête pour une hauteur de vague constante (points rouges sur la figure 5.7). La durée des tempêtes peut ainsi varier d'une extrême à l'autre entre 6 h et 49 h avec la majorité (90%) comprise entre 10 h et 30 h. La durée moyenne d'une tempête est, quant à elle, égale à environ 18 h et ce, autant pour les petites tempêtes (H_s de 1.5 m) que pour les grandes tempêtes (H_s de 3 m). Cette durée moyenne sera considérée dans les simulations de tempêtes ponctuelles à la section 6.3.

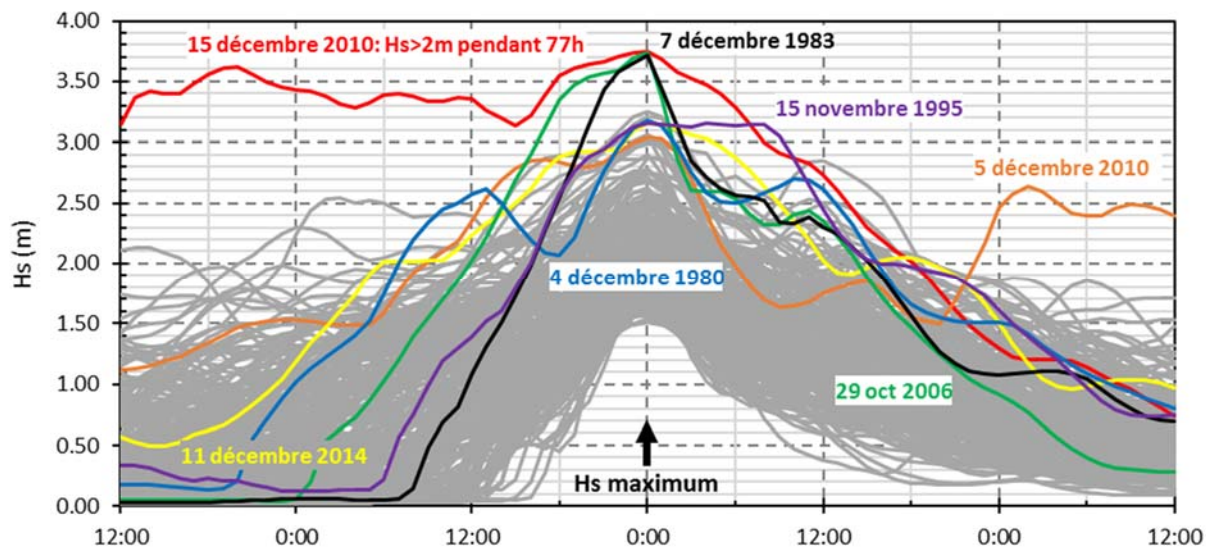


Figure 5.6 : Variation de la hauteur de vagues des 250 tempêtes les plus énergétiques entre 1980 et 2015

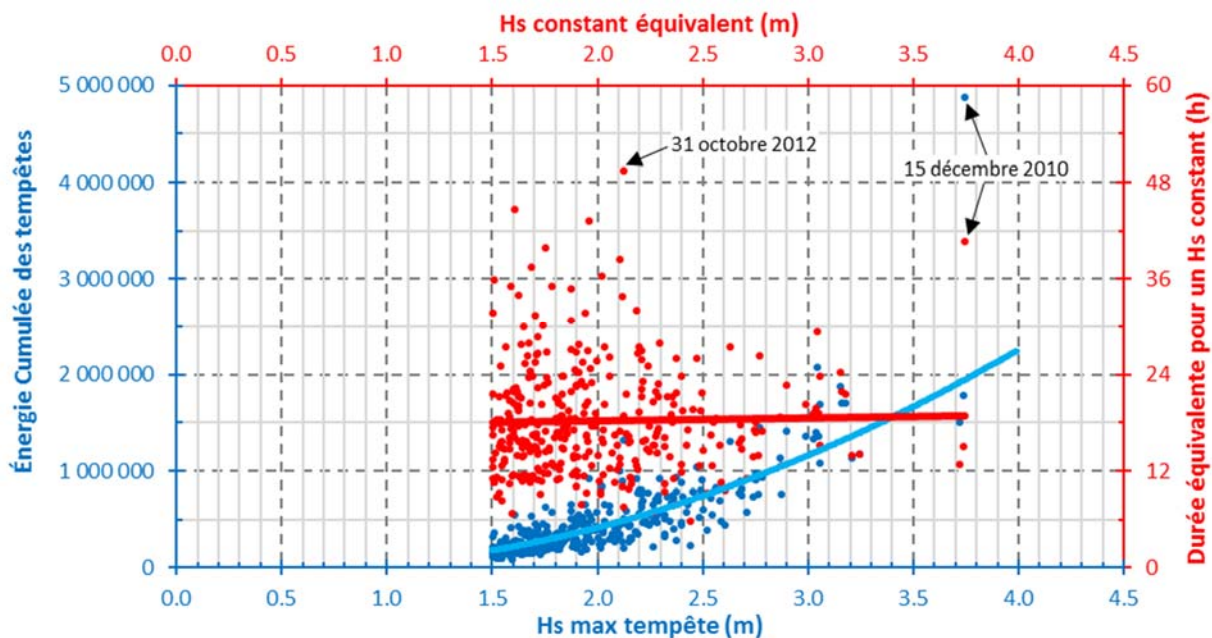


Figure 5.7 : Corrélation entre la hauteur de vagues et la durée de la tempête pour les 250 tempêtes les plus énergétiques entre 1980 et 2015

5.3.5 Rose des vagues

La figure 5.8a illustre la rose des vagues calculées par le modèle numérique à 2 km au large de Port-Cartier à l'aide de la série temporelle de 1980 à 2015. Deux directions dominantes sont observées : soit l'est-sud-est (ESE) et le sud (S).

Les vagues en provenance de l'ESE peuvent être générées autant par les tempêtes ayant lieu dans le fleuve Saint-Laurent (à environ 200 km à l'ESE de Port-Cartier) que par celles ayant lieu dans le golfe du Saint-Laurent (jusqu'à 600 km de Port-Cartier). Puisque la profondeur d'eau est très élevée dans cette section du fleuve et du golfe, les vagues sont libres de se propager sur de longues distances sans être dissipées par le fond marin. Ainsi, la combinaison des profondeurs d'eau importantes et des longueurs de fetch élevées font en sorte que les vagues de l'ESE peuvent fréquemment atteindre des hauteurs importantes.

Les vagues en provenance du sud sont quant à elles générées par les tempêtes ayant lieu dans le fleuve Saint-Laurent au sud de Port-Cartier. Le fetch disponible pour la génération de ces vagues est moins important (à peine 100 km) ce qui fait en sorte que les vagues du sud sont beaucoup moins énergétiques que les vagues de l'ESE.

En effet, la figure 5.8b montre que les vagues du sud n'ont jamais atteint une hauteur de plus de 3.0 m entre les années 1980 et 2015 alors que pour la direction ESE, une telle hauteur est dépassée 3 h/année en moyenne. Un constat semblable peut également être fait pour les vagues de plus de 2 m : elles sont très rarement en provenance du sud (0,4 h/année) et relativement fréquentes en provenance de l'ESE (41 h/année).

Le tableau 5.3 affiche la période de retour des hauteurs de vagues pour chacune des deux directions considérées. Ces périodes de retour ont été calculées en considérant les hauteurs de vagues maximales annuelles entre 1980 et 2015 et en appliquant la loi de Gumbel. La période de retour pour une tempête ayant des vagues maximales de 3,0 m est de 4 ans alors que pour une hauteur maximale de 4,0 m, elle est de 33 ans. Il est à noter qu'entre les années 1980 et 2015, la vague maximale annuelle a toujours été en provenance de l'ESE et non du sud.

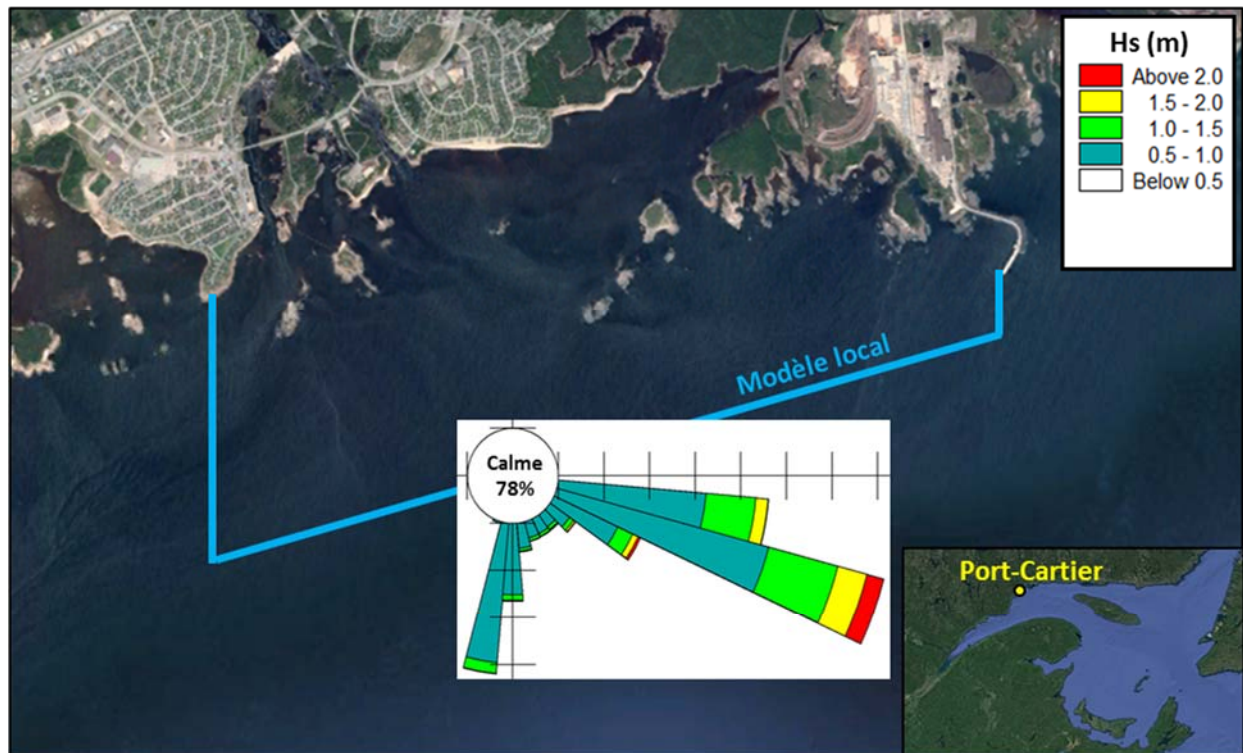
En comparant les résultats de la figure 5.8b avec ceux du tableau 5.3, il est possible de constater qu'une hauteur de vagues de 3,4 m correspond à une occurrence de 1 heure par année et à une période de retour d'environ 10 ans (et non 1 an). Ces résultats traduisent le fait qu'à chaque année, la probabilité que la hauteur de vague maximum dépasse 3,4 m est de 10% (1/10 ans) et que, dans le cas où un tel événement surviendrait, le dépassement de 3,4 m s'étalerait fort-probablement sur plusieurs heures d'une manière à arriver à une moyenne de 1 heure par année sur une très longue échelle de temps.

Tableau 5.3 : Période de retour de la hauteur de vague maximale à Port-Cartier

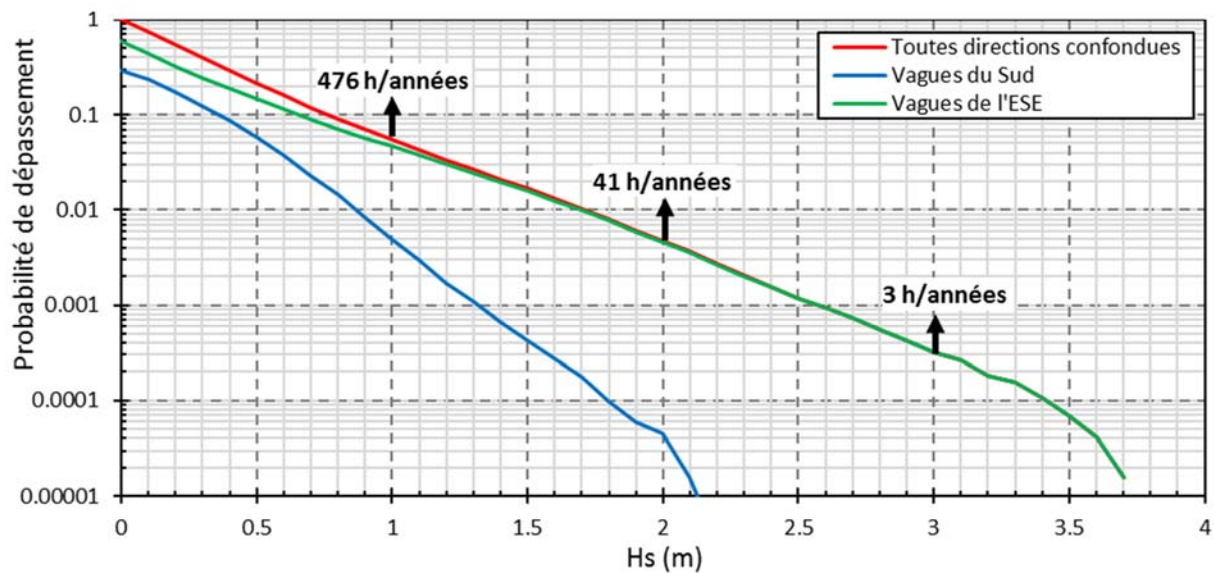
Hs (m)	T (années) – Loi Gumbel		
	Vagues toutes directions confondues	Vagues de l'ESE	Vagues du sud
1.0	-	-	1.01
1.5	1.000	1.000	2
2.0	1.04	1.04	12
2.5	1.5	1.5	100
3.0	4	4	-
3.5	11	11	-
4.0	33	33	-

Calculé à partir des années 1980 à 2015

Il est à noter que pour calculer l'ensemble des probabilités de hauteur de vagues, l'hypothèse d'un climat stationnaire est considérée. En d'autres mots, la probabilité d'occurrence d'une tempête exceptionnelle serait la même en 1980 qu'en 2015. Or, il est prévu que la durée d'englacement du golfe du Saint-Laurent diminuera au fil des années à partir de 2025 en raison des changements climatiques ce qui, en conséquence, diminuera la durée de la période d'accalmie où l'énergie des vagues peut être dissipée par la glace à la dérive (voir section 5.3.3). Ainsi dans le futur, les vagues d'une hauteur importante seront libres de se former durant les mois de janvier et mars alors qu'actuellement, les hauteurs maximales annuelles des vagues surviennent principalement (75% des cas) entre les mois d'octobre et décembre ainsi qu'entre les mois d'avril et mai (17% des cas). La diminution projetée de la durée d'englacement du golfe du Saint-Laurent aura donc pour effet, à plus long terme, de diminuer la période de retour des événements affichés dans le tableau 5.3.



a) Rose des vagues



b) Occurrence des vagues

Figure 5.8 : Rose des vagues et occurrence des vagues à Port-Cartier

5.3.6 Discrétisation de la rose des vagues

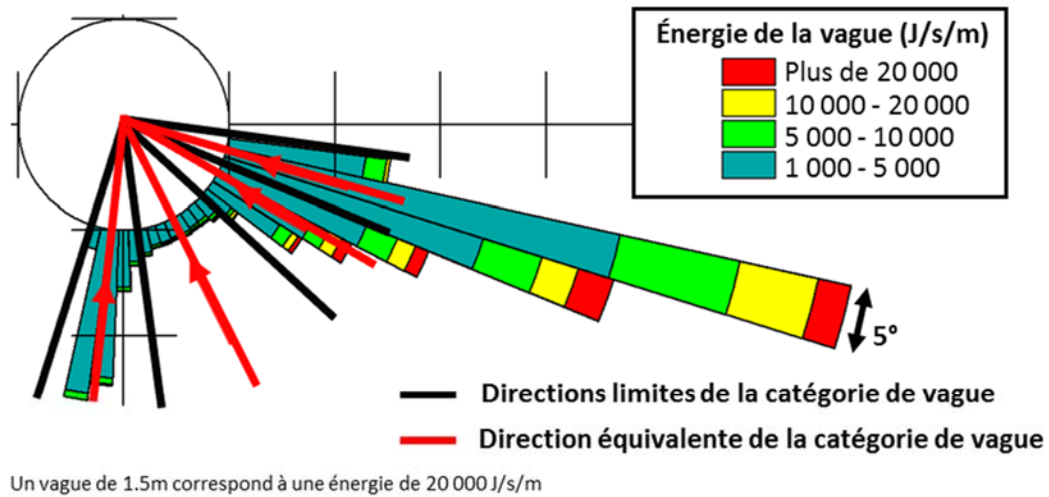
Pour fin de modélisation du transport littoral à long-terme (plusieurs années, décennies), la rose des vagues présentée à la figure 5.8a a été discrétisée en plusieurs cas typiques de vagues. Une telle approche permet d'effectuer des travaux de modélisation en utilisant un maillage raffiné dans les zones d'intérêt tout en maintenant des temps de calcul réalistes. À cet effet, la section 6.4 aborde en détails la méthodologie utilisée pour modéliser le transport littoral à long-terme.

La discrétisation de la rose des vagues a principalement été effectuée sur la base de la méthode de flux d'énergie (EFM) présentée dans une étude de Deltares publiée en 2016 [8]. Cette méthode consiste à diviser la rose des vagues en différentes combinaisons hauteur-direction possédant le même niveau d'énergie cumulée. De légères modifications ont toutefois été apportées à la méthode afin de l'appliquer dans les particularités de Port-Cartier.

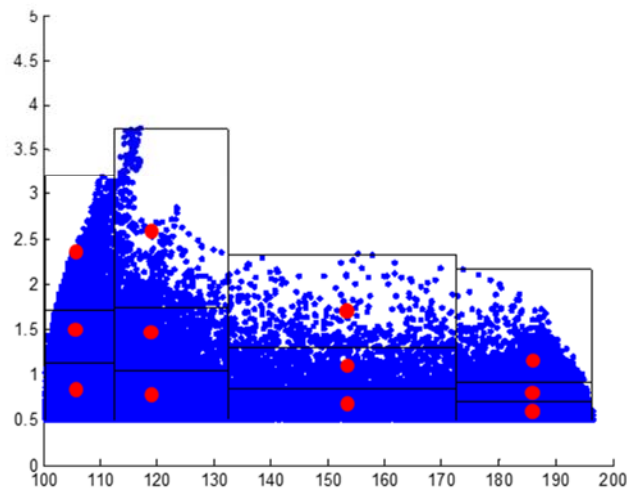
Puisque la majorité de l'énergie des vagues est concentrée à l'intérieur d'une même direction, soit l'ESE, la discrétisation des directions a été effectuée en considérant l'allure de la rose des vagues plutôt que sur un niveau d'énergie équivalent. Ainsi, la rose des vagues a été discrétisée en 4 directions tel qu'illustré sur la figure 5.9a. Ces 4 groupes de direction comprennent 60%, 25%, 6% et 9% du niveau d'énergie total (groupes de l'est vers l'ouest).

Pour chaque groupe de direction, 3 sous-groupes de hauteurs de vagues ont été définis en considérant un niveau d'énergie cumulée équivalent dans chacun des 3 sous-groupes. Les vagues de moins de 50 cm n'ont toutefois pas été considérées dans le calcul puisqu'elles n'engendrent pas de transport littoral notable. La rose des vagues est ainsi schématisée par 12 cas de vagues tel qu'illustré sur la figure 5.9b. L'occurrence de chacun de ces 12 cas sera présentée dans la section 5.4.3.

Des travaux de recherche & développement réalisés par Lasalle|NHC en novembre 2019 ont permis de conclure sur le fait qu'une discrétisation en 12 cas de vagues était suffisante pour bien schématiser le climat de vagues à Port-Cartier [9]. À cet effet, les travaux effectués par Lasalle|NHC consistaient à comparer un cas de discrétisation comportant 90 cas de vagues (15 groupes de directions et 6 groupes de H_s) avec une vingtaine de scénarios de discrétisation possédant diverses combinaisons de groupes de directions et de H_s .



a) Rose d'énergie des vagues à proximité de Port-Cartier



b) Discrétisation de la rose des vagues à proximité de Port-Cartier

Figure 5.9 : Discrétisation de la rose des vagues de Port-Cartier

5.4 Probabilités combinées des niveaux d'eau et des vagues

5.4.1 Dépendance entre les variables

Pour des raisons physiques, les variables de niveau d'eau et de hauteur de vagues ne sont pas strictement indépendants. En effet, les vagues importantes, étant générées par des forts vents, surviennent durant des dépressions atmosphériques (cyclones) couvrant de grandes superficies. La combinaison de l'effet de baromètre inversé et des vents constants sur le Saint-Laurent peut engendrer des surcotes importantes qui se superposent à l'amplitude de la marée. C'est pour cette raison que les tempêtes exceptionnelles surviennent souvent (mais pas toujours) à niveau haut.

Les notions de probabilités se compliquent donc dans une telle situation : les probabilités d'occurrence de chacun des deux événements ne peuvent pas tout simplement être multipliées ensemble pour obtenir une probabilité d'occurrence simultanée des deux événements. En effet, une telle opération aurait pour effet de surestimer la période de retour d'un événement et, en conséquence, de sous-dimensionner un ouvrage de protection. Pour cette raison, il est primordial d'évaluer la dépendance entre les variables de niveaux d'eau et de hauteur de vagues.

L'analyse de la dépendance entre les variables de niveaux d'eau et de hauteur de vagues a été effectuée sur la base d'une méthodologie présentée dans un rapport d'étude de l'état de Queensland en octobre 2012 [10]. Cette méthodologie consiste à évaluer le nombre de fois où un événement dépasse simultanément un certain niveau d'eau et une hauteur de vagues donnée. Un facteur de dépendance, compris entre 0% (indépendance totale) et 100% (dépendance totale), est ensuite calculé entre ces deux variables. Cette méthodologie a été appliquée non seulement aux niveaux d'eau, mais également aux surcotes.

Le tableau 5.4 affiche les résultats de dépendance entre les variables de surcote et de hauteur de vagues lorsque celles-ci sont en provenance de l'ESE. Un exemple d'interprétation des résultats de ce tableau serait le suivant : si une hauteur de vague atteint 3,5 m, la probabilité qu'une surcote atteigne simultanément 1,6 m est de 69%. Dans une telle situation, la période de retour d'un événement de vagues de 3,5 m de hauteur ($P_{H5}=1/11$) doit être multipliée par le facteur de dépendance (0,69) afin d'obtenir la période de retour combinant une hauteur de vagues de 3,5 m et une surcote de 1,6 m ($P_{comb}=1/16$).

Les résultats du tableau 5.4 montrent une variabilité importante de la dépendance entre les variables de surcote et d'hauteur de vagues en fonction de la combinaison considérée. En effet, il est possible de remarquer une certaine tendance à l'augmentation de la dépendance pour les combinaisons de variables à magnitudes semblables (diagonale identifiée en rouge dans le tableau). Cette observation traduit le fait que les surcotes et les hauteurs de vagues découlent du même système de dépression atmosphérique : une augmentation de la sévérité de la dépression atmosphérique engendre à la fois une augmentation de la surcote et de la hauteur de vagues. En effet, il serait absurde d'observer des surcotes exceptionnelles en période d'eau calme et vice-versa.

Le tableau 5.5 affiche les résultats de dépendance entre les variables de niveau d'eau (combinant surcote et marée) et de hauteur de vagues lorsque celles-ci sont en provenance de l'ESE. Tel qu'évoqué précédemment, une dépendance flagrante existe entre les variables de surcote et de hauteur de vagues.

Toutefois, la marée découle d'un système physique complètement différent (forçage astronomique) et pour cette raison, elle est totalement indépendante de la hauteur de vagues (forçage atmosphérique). Néanmoins, une dépendance claire peut tout de même être observée entre les variables de niveau d'eau (combinant surcote et marée) et de hauteur de vagues sur le tableau 5.5. Encore une fois, la dépendance est plus élevée pour les combinaisons de variables à magnitudes semblables et ce, particulièrement pour les événements de fortes tempêtes (niveaux d'eau et vagues supérieurs à 2 m). Cette constatation s'explique par le fait que pour atteindre un niveau d'eau de 2 m, une surcote doit absolument être superposée à la marée puisqu'une marée à elle seule ne dépasse jamais 1,93 m et varie essentiellement (80% du temps) entre -1 m et 1 m (voir section 5.2.2). Ainsi, un niveau d'eau supérieur à 2 m implique fort-probablement l'existence d'une surcote importante ce qui, en conséquence, implique une hauteur de vagues importante ce qui se traduit en une forte dépendance entre les variables de niveau d'eau et de hauteur de vagues.

Puisque la dépendance entre les variables de hauteur de vagues en provenance de l'ESE et de niveau d'eau élevé est aussi forte que la dépendance entre les vagues et les surcotes, les calculs de probabilités combinées peuvent être faits directement avec le niveau d'eau (au lieu de la surcote) afin de simplifier les calculs (utilisation du tableau 5.5). Une telle approche ne pourra toutefois pas être utilisé dans le cas des vagues du sud.

En effet, le tableau 5.7 révèle une dépendance quasi-inexistante entre les variables de hauteur de vagues en provenance du sud et de niveau d'eau. Cela s'explique par le fait que, pour obtenir des vagues du sud, le vent doit être en provenance du sud, une direction beaucoup moins propice à la génération de surcote. En effet, les surcotes générées par les vents du sud s'alimentent par la superficie mouillée du fleuve Saint-Laurent au sud-ouest de Port-Cartier tandis que les surcotes générées par les vents de l'ESE s'alimentent par la superficie mouillée de l'ensemble du golfe du Saint-Laurent et même d'une certaine fraction de l'océan Atlantique. De plus, lorsque les vents sont du sud-ouest ou du sud, le centre de la dépression est en général en grande partie sur la terre au nord de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, l'effet de baromètre inversé ne s'applique donc plus autant que lorsque le centre de la dépression est sur la masse d'eau.

Une faible dépendance (20% à 25%) peut tout de même être observée entre les variables de hauteur de vagues en provenance du sud et de surcote. Ainsi, les calculs de probabilités combinées seront effectués en considérant la surcote (et non le niveau d'eau) pour les événements de vagues du sud. Il sera donc nécessaire d'inclure un élément de probabilité relié à la marée afin de compléter ce calcul (voir sections 5.4.2). Rappelons aussi que la hauteur des vagues du sud est beaucoup moins importante que celle des vagues en provenance de l'ESE (tableau 5.5 p.42).

En complément aux résultats de dépendance présentés dans cette section, des résultats supplémentaires de dépendance entre différentes combinaisons de variables sont présentés à l'annexe A.

Tableau 5.4: Dépendance entre les variables de surcote et de hauteur de vagues (H_s) de l'ESE

		Surcote à Port-Cartier (m)									
		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
Hs à proximité de Port-Cartier (m)	0.25	20%	26%	26%	23%	21%	18%	17%	13%	12%	4%
	0.5	24%	36%	41%	39%	35%	31%	27%	22%	21%	11%
	0.75	25%	41%	49%	50%	47%	41%	37%	32%	30%	20%
	1	24%	41%	52%	55%	54%	48%	46%	41%	38%	28%
	1.25	23%	41%	54%	59%	57%	53%	50%	45%	43%	34%
	1.5	22%	41%	55%	62%	60%	57%	53%	49%	46%	32%
	1.75	20%	40%	56%	63%	63%	61%	58%	52%	49%	37%
	2	19%	38%	55%	64%	67%	65%	61%	56%	52%	24%
	2.25	18%	36%	54%	63%	67%	66%	64%	58%	55%	
	2.5	17%	34%	53%	62%	66%	68%	67%	60%	56%	
	2.75	16%	32%	50%	58%	60%	62%	65%	64%	62%	
	3	15%	30%	48%	53%	56%	60%	65%	67%	65%	
	3.25	14%	29%	45%	45%	48%	56%	64%	64%	65%	
	3.5	12%	26%	41%	42%	51%	60%	67%	66%	69%	

Tableau 5.5 : Dépendance entre les variables de niveau d'eau et de hauteur de vagues (H_s) de l'ESE

		Niveau d'eau à Port-Cartier (m)																
		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.2
Hs à proximité de Port-Cartier (m)	0.25	5%	6%	6%	7%	7%	8%	10%	11%	12%	13%	15%	16%	13%	9%	9%	11%	13%
	0.5	8%	8%	10%	11%	12%	13%	15%	18%	20%	23%	24%	23%	19%	17%	18%	22%	23%
	0.75	10%	10%	12%	14%	16%	18%	21%	24%	27%	31%	33%	32%	29%	27%	28%	31%	31%
	1	11%	12%	14%	16%	18%	21%	24%	28%	31%	35%	38%	38%	36%	36%	36%	38%	38%
	1.25	12%	13%	15%	17%	20%	23%	26%	31%	34%	38%	41%	40%	41%	41%	43%	45%	44%
	1.5	13%	14%	16%	19%	22%	26%	28%	34%	37%	42%	45%	44%	45%	46%	50%	51%	50%
	1.75	14%	15%	17%	19%	23%	26%	29%	35%	37%	42%	46%	46%	46%	51%	53%	55%	55%
	2	14%	15%	17%	20%	23%	27%	31%	35%	38%	45%	49%	51%	52%	56%	58%	59%	61%
	2.25	14%	15%	17%	19%	22%	26%	30%	33%	36%	43%	46%	51%	51%	55%	58%	59%	58%
	2.5	15%	16%	19%	22%	24%	27%	30%	34%	37%	44%	45%	51%	54%	58%	61%	59%	63%
	2.75	15%	15%	18%	20%	24%	26%	31%	35%	38%	45%	45%	54%	60%	63%	67%	64%	68%
	3	14%	14%	17%	17%	22%	24%	27%	31%	32%	42%	47%	57%	64%	65%	68%	69%	72%
3.25	14%	13%	15%	16%	20%	22%	17%	20%	21%	33%	41%	53%	62%	65%	68%	66%		
3.5	13%	15%	18%	22%	26%	30%	29%	30%	29%	40%	45%	56%	64%	64%	67%			

Tableau 5.6: Dépendance entre les variables de surcote et de hauteur de vagues (Hs) du sud

		Surcote à Port-Cartier (m)										
		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	
Hs à proximité de Port-Cartier (m)	0.25	3%	2%	0%	3%	9%	8%	13%				
	0.5	6%	7%	6%	13%	14%	-2%					
	0.75	6%	11%	15%	24%	26%	7%					
	1	0%	11%	20%	19%	22%						
	1.25	-1%	13%	21%	23%	24%						
	1.5	-4%	4%	-27%								
	1.75	-18%	-14%									
	2	-22%										
	2.25											
	2.5											
	2.75											
	3											
	3.25											
	3.5											

Tableau 5.7: Dépendance entre les variables de niveau d'eau et de hauteur de vagues (Hs) du sud

		Niveau d'eau à Port-Cartier (m)																
		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.2
Hs à proximité de Port-Cartier (m)	0.25	0%	-1%	-1%	-1%	-1%	0%	-2%	0%	-1%	-3%	1%	-3%					
	0.5	0%	-1%	-1%	-1%	0%	1%	1%	3%	3%	4%	4%	-6%					
	0.75	2%	1%	1%	1%	2%	4%	3%	4%	5%	7%	12%	15%					
	1	1%	0%	0%	-1%	2%	3%	4%	5%	3%	-4%	-5%						
	1.25	1%	2%	2%	-1%	2%	3%	2%	7%	0%								
	1.5	1%	3%	4%	4%	7%	4%	7%	18%	19%								
	1.75	-4%	-2%	-3%	-9%	-15%												
	2	-23%	-19%															
	2.25																	
	2.5																	
	2.75																	
	3																	
	3.25																	
	3.5																	

5.4.2 Récurrence des événements de fortes tempêtes

À partir des résultats de périodes de retour des niveaux d'eau (section 5.2.3), de hauteurs de vagues (section 5.3.5) et des niveaux de dépendance entre ces deux variables (section 5.4.1), il est possible de calculer les périodes de retour pour les événements combinant des niveaux d'eau élevés avec des hauteurs de vagues importantes.

Les tableaux 5.9 et 5.10 affichent les périodes de retour de diverses combinaisons de niveau d'eau et de hauteur de vagues en provenance de l'ESE et du sud respectivement. Il est à noter que les dépendances indiquées en blanc sont des estimations (par extrapolation) pour certaines combinaisons de variables qui n'ont jamais été observées durant les 32 ans de données disponibles (1980-2011). Ces combinaisons découlent d'événements de hauteurs de vagues et de niveaux d'eau élevés caractérisés par des périodes de retour de plus de 30 ans.

Le tableau 5.8 dresse une liste de tempêtes typiques à Port-Cartier ainsi que leur période de retour correspondante. Ces scénarios de tempête seront considérés dans les sections concernant le transport sédimentaire généré par les tempêtes ponctuelles (section 6.3). Il est à noter que la tempête B est la seule tempête parmi les 5 à être en provenance du sud.

Tableau 5.8 : Périodes de retour d'événements de tempête

Tempête	T (année)	Niveau d'eau (m)	Vagues		
			Hs (m)	T (s)	Direction
A	10	2.8	3.1	7.0	115° (ESE)
B	25	2.0	1.5	5.3	185° (S)
C	25	3.1	3.1	7.0	115° (ESE)
D	50	3.2	3.6	7.5	115° (ESE)
E	100	3.4	4.0	8.0	115° (ESE)

Tableau 5.9 : Période de retour des combinaisons de niveaux d'eau et de hauteur de vagues de l'ESE

<

Tableau 5.10 : Période de retour des combinaisons de niveaux d'eau et de hauteur de vagues du sud

a) Période de retour des hauteurs de vagues maximales annuelles

Hs (m)	T
1.0	1.010
1.5	2.00
2.0	12.0

En provenance du Sud

b) Dépendance entre les hauteurs de vagues à proximité de Port-Cartier et la surcote

p		Surcote (m)			
		0.4	0.6	0.8	1
Hs (m)	1	20%	19%	22%	21%
	1.5	21%	23%	24%	24%
	2	25%	25%	25%	25%

Note: Les nombres en blancs sont des estimations de la dépendance

c) Période de retour des événements combinés de hauteur de vagues et de surcote

T (Année)		Surcote (m)			
		0.4	0.6	0.8	1
Hs (m)	1	5	5	5	5
	1.5	9	9	8	8
	2	48	48	48	48

d) Probabilité d'occurrence du niveau d'eau maximum pour un cycle de marée donné

NMM (m)	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
p	95%	84%	67%	49%	29%	15%	7%	2%

e) Période de retour des événements combinés de hauteur de vagues et de niveaux d'eau

T (Année)		Niveau d'eau (m)				
		1.4	1.6	1.8	2	2.2
Hs (m)	1	5	6	7	10	16
	1.5	8.8	10	13	17	28
	2	51	57	72	99	164

Note: La période de retour est calculée en considérant la combinaison surcote-marée la plus probable

5.4.3 Occurrence des événements fréquents

Il avait été mentionné, dans la section 5.3.6, qu'il était nécessaire de discrétiser la rose des vagues afin de modéliser le transport littoral à long-terme (plusieurs années). Puisque la bathymétrie du secteur à l'étude se caractérise par plusieurs ilots et hauts-fonds, il devient impératif de tenir compte de l'influence du niveau d'eau sur la transformation des vagues et donc du transport littoral.

Ainsi, chacun des 12 cas de vagues présentés à la section 5.3.6 a été discrétisé en 6 paliers de niveaux d'eau compris entre 0,6 m et 2,1 m (intervalle de 30 cm) pour un grand total de 72 événements combinant vagues et niveaux d'eau tel qu'énuméré au tableau 5.11. La probabilité d'occurrence de chacun de ces 72 événements a, en premier lieu, été calculée en multipliant la probabilité d'occurrence du cas de vague (issu de la discrétisation de la rose des vagues) avec la probabilité d'occurrence du niveau d'eau (section 5.2.3). En second lieu, des facteurs de majoration distincts ont été appliqués à chacun de ces 72 événements afin de tenir compte du niveau de dépendance entre les vagues et les niveaux d'eau. À cet effet, les événements possédant les combinaisons de hauteurs de vagues et de niveaux d'eau les plus élevées ont été majorés (de 0% jusqu'à 200% dépendamment de l'événement). Pour compenser, certains événements moins intenses ont été minorés (de 0% jusqu'à -30%) d'une manière à équilibrer la somme totale de l'occurrence.

Les niveaux d'eau en deçà de 0,6 m n'ont pas été considérés dans le calcul du transport littoral puisque les résultats de modélisation 2D ont montré que les événements de vagues survenant à niveau bas n'engendrent pas de transport sédimentaire notable au niveau de la plage de Port-Cartier.

Il est important de noter que les cas de vagues-niveaux d'eau définis ici sont les cas dits fréquents qui, par leur récurrence, orientent la tendance à long terme de l'évolution de la plage. Ainsi, les niveaux d'eau au-delà de 2,1 m n'ont pas été considérés dans le calcul du transport littoral longitudinal puisque ces événements surviennent rarement (12 h/année et moins) et ne représente que 0,5% de l'énergie de l'ensemble des cas de vagues. Une telle fraction ne représente pas une contribution significative d'un point de vue du bilan sédimentaire à long terme dû au transport littoral longitudinal. En revanche, ce type d'événement rare est déterminant quant à son impact ponctuel sur l'érosion du haut de plage du fait de l'attaque frontale qui génère un transport transversal important vers le pied de la plage et qui résulte en général en un recul significatif rapide (à l'échelle d'une tempête) de la plage, souvent d'un ordre de grandeur supérieur au recul annuel engendré par les gradients de transport longitudinal à long terme. Tel que décrit à la section 2, ces deux composantes du transport sédimentaire sont étudiées séparément essentiellement à cause de la différence d'échelle de temps qui les caractérise. On réfère à la section 6.4 pour la description de la méthodologie et les résultats de calcul du transport longitudinal à long terme. Le transport transversal, caractéristique des fortes tempêtes plus rares est présenté en détail à la section 6.3.

Tableau 5.11 : Énumération des événements combinant niveaux d'eau, hauteur de vagues et direction

Cas de vagues					Occurrence combinaison Niveau - Hs					
					Événements	Événements	Événements	Événements	Événements	Événements
					1 à 12	13 à 24	25 à 36	37 à 48	49 à 60	61 à 72
Cas	Dir	hs (m)	Tp (s)	E (J/s/m/h)	Niv=0.6m	Niv=0.9m	Niv=1.2m	Niv=1.5m	Niv=1.8m	Niv=2.1m
1	106.0	0.8	4.3	2 778	0.603%	0.592%	0.475%	0.293%	0.126%	0.038%
2	106.0	1.5	5.0	10 872	0.226%	0.223%	0.176%	0.106%	0.044%	0.013%
3	106.0	2.3	5.8	31 283	0.085%	0.082%	0.063%	0.037%	0.016%	0.005%
4	119.0	0.8	5.9	3 433	0.206%	0.201%	0.161%	0.100%	0.043%	0.013%
5	119.0	1.5	6.8	14 376	0.077%	0.076%	0.060%	0.036%	0.015%	0.005%
6	119.0	2.6	7.4	48 817	0.025%	0.024%	0.019%	0.011%	0.005%	0.001%
7	153.4	0.7	4.0	1 753	0.094%	0.091%	0.073%	0.046%	0.020%	0.006%
8	153.4	1.1	4.5	5 189	0.042%	0.042%	0.034%	0.020%	0.009%	0.003%
9	153.4	1.7	5.1	15 215	0.013%	0.013%	0.010%	0.006%	0.003%	0.001%
10	185.7	0.6	3.4	1 184	0.196%	0.189%	0.152%	0.096%	0.042%	0.013%
11	185.7	0.8	3.7	2 272	0.139%	0.137%	0.109%	0.067%	0.029%	0.009%
12	185.7	1.1	4.1	5 251	0.088%	0.087%	0.069%	0.041%	0.017%	0.005%

Occurrence totale des événements de vagues considérés (hs>0.5 m) : 21,6%

Occurrence totale des événements de niveaux d'eau considérés (0.5 m<Niv<2.2 m) : 29%

Occurrence totale des combinaisons considérées d'événement de vagues et de niveaux d'eau : 6,3%

5.5 Récapitulatif des conditions maritimes

Les éléments clés à retenir sont les suivants :

- Le climat de vagues à Port-Cartier se caractérise par deux directions dominantes, soit l'ESE et le Sud.
- Les vagues de l'ESE sont plus énergétiques et plus fréquentes. La période de retour des vagues de plus de 2 m de hauteur est d'environ 1 an pour celles en provenance de l'ESE et de 12 ans pour celles du Sud.
- La présence d'un couvert de glace dans le golfe entre la mi-janvier et la fin mars constitue un mécanisme naturel d'atténuation d'énergie des vagues. Il est toutefois prévu que la protection offerte par ce couvert de glace sera réduite dans le futur en raison du réchauffement climatique.
- En considérant uniquement la marée, le niveau d'eau n'excède jamais l'élévation de 2 m (NMM). Toutefois en additionnant la contribution des surcotes, le niveau d'eau peut facilement dépasser ce seuil.
- La période de retour des niveaux d'eau supérieurs à 2 m (NMM) est d'environ 1 an alors que pour les niveaux excédant 3 m, elle est de 13 ans.
- Les fortes vagues en provenance de l'ESE sont souvent accompagnées de niveaux d'eau élevés en raison de la forte dépendance entre ces éléments (jusqu'à 70%). Toutefois les vagues en provenance du Sud ne sont pas nécessairement associées à des niveaux d'eau élevés en raison d'une faible dépendance.
- Dans le but de modéliser le transport littoral à long-terme (plusieurs années), la rose des vagues a été discrétisée en 12 cas de vagues afin de schématiser la série temporelle complète de données de vagues. Chacun de ces 12 cas de vagues a été discrétisé en 6 paliers de niveaux d'eau compris entre 0,6 m et 2,1 m pour un total de 72 événements combinant vagues et niveaux d'eau.

6. DYNAMIQUE HYDROSÉDIMENTAIRE

Ce chapitre aborde la question de la dynamique sédimentaire de l'ensemble de la plage Rochelois (longueur d'environ 700 m). L'analyse porte sur une zone s'étalant jusqu'à environ 500 m au large de la plage. Toutefois, une emphase particulière est mise sur la plage (élevations variant principalement entre 0 m et 4 m) afin de bien analyser le comportement et l'efficacité d'une éventuelle recharge granulaire.

La section 6.1 débute avec une analyse historique de la dynamique sédimentaire en se basant principalement sur des photos historiques. La section 6.2 enchaîne ensuite avec la modélisation 2D d'événements fréquents dans le but de compléter l'analyse de la section précédente. Par la suite, la section 6.3 se concentre sur la modélisation (1D & 2D) des événements de fortes tempêtes en conditions actuelles ainsi qu'en conditions futures (avec recharge granulaire). Finalement, la section 6.4 aborde la question du transport littoral à long terme, celui-ci étant calculé sur plusieurs années et ce, en conditions actuelles et futures.

6.1 Analyse historique de la dynamique sédimentaire du site

La figure 6.1 affiche une comparaison de l'étendue de la plage Rochelois pour des niveaux de marée semblables (1976 par rapport à 1996 et 2004 par rapport 2013) grâce à des photos aériennes et satellites historiques. À cet effet, la comparaison de photos ayant été prises à des niveaux d'eau semblables permet d'évaluer l'évolution de la plage pour une isobathe donnée.

Les comparaisons présentées à la figure 6.1 pour des intervalles de 10, 20 ou 30 ans, ne révèlent pas de recul notable de la ligne de plage (0 m NMM) de la plage Rochelois; cette remarque s'applique également pour l'ensemble des photos aériennes et satellites, prises entre 1965 et 2018, ayant été analysées. Cela indique que la problématique d'érosion observée au courant des dernières années n'est pas le produit d'une érosion chronique engendrée par un mécanisme de transport littoral longitudinal conduisant à un bilan sédimentaire déficitaire.

La figure 6.1b révèle l'existence d'une formation de bancs de sable entre la plage Rochelois et l'îlot rocheux situé à environ 400 m au large. Cette formation de bancs de sable présentant une alternance de hautfonds et de dépressions semble migrer vers l'est dans le temps. Comme décrit à la section 6.2, ces observations concordent également avec les résultats de modélisation bidimensionnelle.

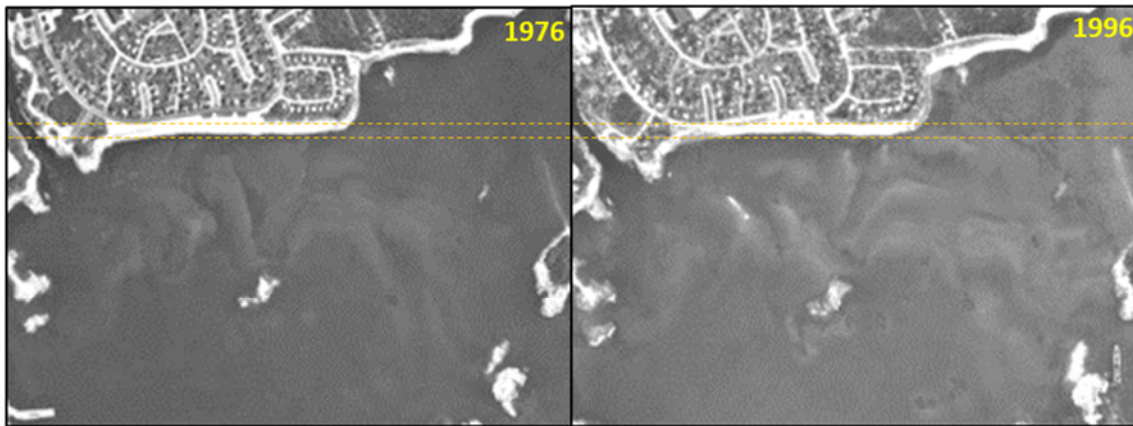
La figure 6.3 montre les résultats d'échantillonnage granulométriques (d_{50}) réalisés par Englobe en automne 2018. Cette figure montre que d'une manière générale, les grains ont tendance à être plus grossiers (0,6 mm) vers l'ouest du site et plus fins (0,2 mm) vers l'est. Cela dénote un comportement de migration des sédiments dans le secteur des bancs de sable entre le pied du talus de la plage et l'îlot rocheux (partie inférieure de l'estran). Sur le talus de la plage (ou partie supérieure de l'estran), la granulométrie semble toutefois relativement uniforme dans l'axe est-ouest. Les données granulométriques ne permettent pas d'établir de tendance claire pour ce qui a trait à la direction du transport littoral dans ce secteur de la plage Rochelois.

Les figures 6.4 à 6.6 affichent une comparaison de la plage Rochelois entre les années 2010 et 2017. Ce type de comparaison permet de mettre en lumière les impacts de la tempête du 30 décembre 2016. À ce

propos, l'analyse du niveau d'eau mesuré à Sept-Îles durant cette tempête permet d'estimer, sur la base des surcotes qui se sont produites, la période de retour de la tempête entre 15 et 25 ans. Toutefois sans données de vagues (le modèle de l'UQAR s'arrêtant en 2015), il est difficile de bien caractériser la sévérité de cette tempête.

L'ensemble des figures 6.4 à 6.6 montre un recul de la ligne de végétation ce qui révèle un processus d'attaque frontale des vagues à niveau d'eau élevé. Ce recul est particulièrement évident à apercevoir sur la figure 6.6 grâce à un repère visuel (sapin). En effet, un recul de plus de 10 m peut être observé à cet endroit. À ce propos, les rapports de visites effectuées par le Ministère de la Sécurité Publique font état de reculs variant de 4 m à 10 m entre les mois de janvier 2016 et 2017 pour les propriétés résidentielles situées sur la 5^e rue (à l'extrémité Est de la plage Rochelois).

En somme, l'ensemble des données photographiques et granulométriques ainsi que les mesures de terrain effectuées par le MSP mettent en évidence une problématique d'érosion qui est particulièrement engendrée par les événements de fortes tempêtes à niveau d'eau élevé. Dans de telles circonstances, le phénomène du transport transversal devient dominant par rapport à celui du transport littoral. Il apparaît donc essentiel de concevoir une recharge offrant non seulement une protection dans la zone intertidale mais aussi dans la zone supratidale, celle-ci étant particulièrement exposée lors des fortes tempêtes à niveau d'eau élevé. Un niveau de crête suffisamment haut est donc nécessaire afin de tenir compte des surcotes et du run-up de vagues qui s'additionneront à la marée.



a) Comparaison de l'étendue de la plage Rochelois pour un niveau de marée semblable entre 1976 et 1996



b) Comparaison de l'étendue de la plage Rochelois pour un niveau de marée semblable entre 2004 et 2013

Figure 6.1 : Comparaison de l'étendue de la plage Rochelois entre 1976 et 2013



Figure 6.2: Comparaison de l'étendue de la plage Rochelois entre 1987 et 2017

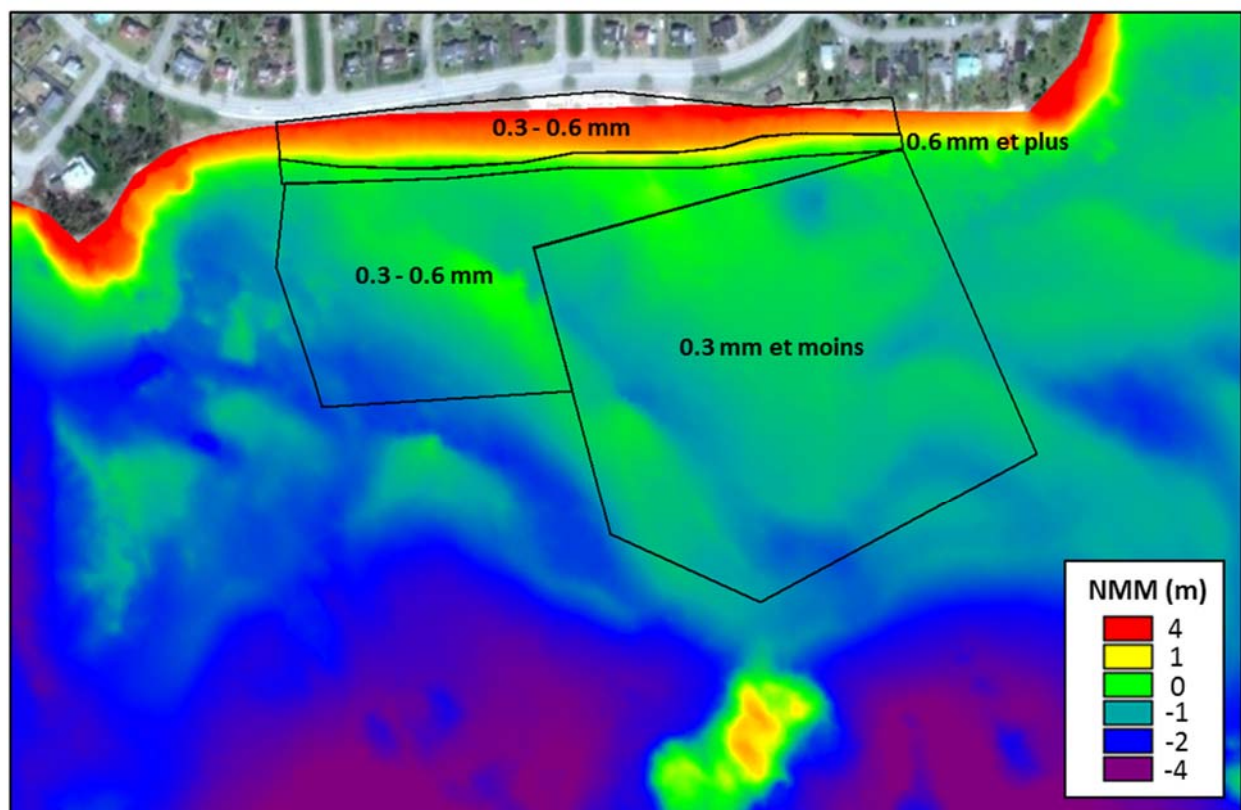
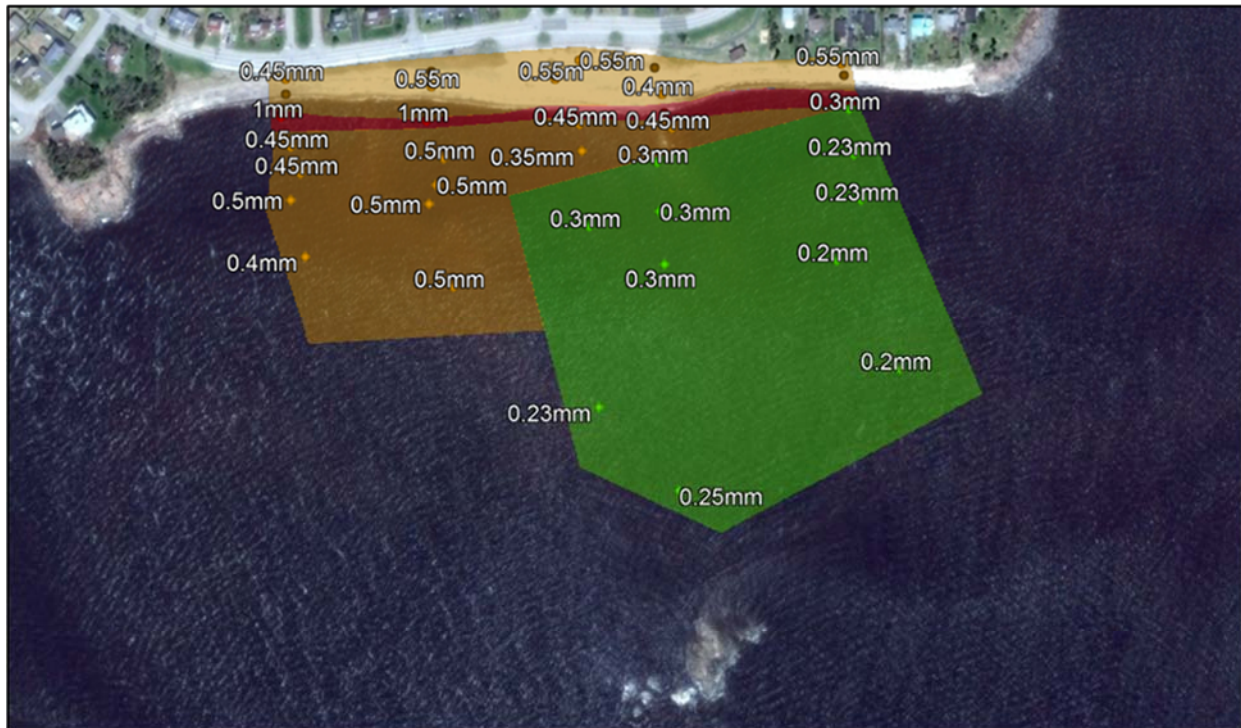


Figure 6.3 : Granulométrie de la plage Rochelois



a) Septembre 2010



b) Septembre 2017

Figure 6.4: Comparaison de la plage Rochelois entre 2010 et 2017



a) Septembre 2010



b) Septembre 2017

Figure 6.5 : Comparaison de la plage Rochelois entre 2010 et 2017 (suite)



a) Septembre 2010



b) Septembre 2017

Figure 6.6: Comparaison de la plage Rochelois entre 2010 et 2017 (suite)

6.2 Modélisation 2D des événements fréquents en conditions actuelles

La modélisation bidimensionnelle des événements fréquents a été effectuée avec les modules SW (*spectral Waves*), HD (*Hydrodynamics*), et ST (*Sand Transport*) de Mike 21. Ces simulations ont pour but d'étudier la sensibilité des variables de niveaux d'eau, hauteur de vagues, provenance des vagues et débit de la rivière aux Rochers sur la dynamique hydro-sédimentaire de la plage Rochelois.

Un total de 6 événements (#3, #12, #27, #36, #63, #72 dans le tableau 5.11 p.48) offrant des combinaisons de cas de vagues et de niveaux d'eau a été analysé par modélisation bidimensionnelle. En addition à cela, trois simulations supplémentaires ont été complétées dans le but d'étudier l'impact de la décharge de la rivière aux Rochers sur la dynamique hydro-sédimentaire de la plage Rochelois. À cet effet, un débit moyen a été considéré pour 3 niveaux d'eau différents (-1 m, 0 m et 1 m). Ainsi, un grand total de 9 simulations a été effectué dans le but d'étudier la dynamique hydro-sédimentaire de la plage sur la base d'événements se produisant fréquemment. D'autres simulations, présentées à la section 6.3, ont également été complétées afin d'analyser la problématique d'érosion engendrée par les fortes tempêtes se produisant plus rarement.

L'ensemble des figures 6.7a à 6.12a montre que, peu importe la direction des vagues entrantes (ESE ou S), l'effet de réfraction fait en sorte que la direction des vagues qui déferlent sur la plage Rochelois est pratiquement perpendiculaire à celle-ci. C'est pour cette raison que les courants littoraux, affichés dans les figures 6.70b à 6.12b, sont relativement faibles dans la zone d'étude (moins de 0.3 m/s). Ainsi, la composante littorale du transport sédimentaire (parallèle à la plage) est nettement inférieure à la composante transversale (perpendiculaire à la plage).

Les figures 6.7a à 6.12a révèlent l'impact de l'îlot rocheux situé au large de la plage. Cet îlot agit d'une manière analogue à un brise-lames détaché en dissipant l'énergie des vagues (réduction de la hauteur de vagues vis-à-vis de l'îlot). À mesure que le niveau d'eau augmente, la protection offerte par cet îlot diminue : les vagues franchissent plus facilement le rocher sans nécessairement déferler, ce qui leur permet de conserver davantage d'énergie (et donc une hauteur plus importante).

La protection naturelle offerte par l'îlot rocheux se limite toutefois à la section Est de la plage, la section Ouest étant impactée plus sévèrement par les vagues. C'est pour cette raison que la ligne de plage montre un trou (forme en « U ») vis-à-vis de la 13^e rue.

Lorsque le niveau d'eau est faible (0,6 m pour les cas #3 et #12), le banc de sable au large de la plage a tendance à migrer vers l'Est sous l'effet des vagues : les sédiments sur le flanc Ouest sont érodés pour ensuite se déposer sur le flanc Est (figures 6.7c et 6.8c). Ce résultat concorde avec les observations faites à partir des photos aériennes historiques présentées à la section 6.1.

À niveau bas, la partie supérieure de l'estran de la plage Rochelois a tendance à être protégée naturellement (érosion minime sur les figures 6.7c et 6.8c) puisque les vagues sont dissipées loin au large de la plage en raison de la faible profondeur d'eau. Lorsque le niveau d'eau devient plus important (2.1 m pour les cas #63 et #72), il se produit une érosion significative des berges de la plage. En effet, les sédiments du haut de plage sont arrachés sous l'effet des vagues puis transportés vers le large pour finalement être déposés au pied du talus de la plage (figures 6.11c et 6.12c).

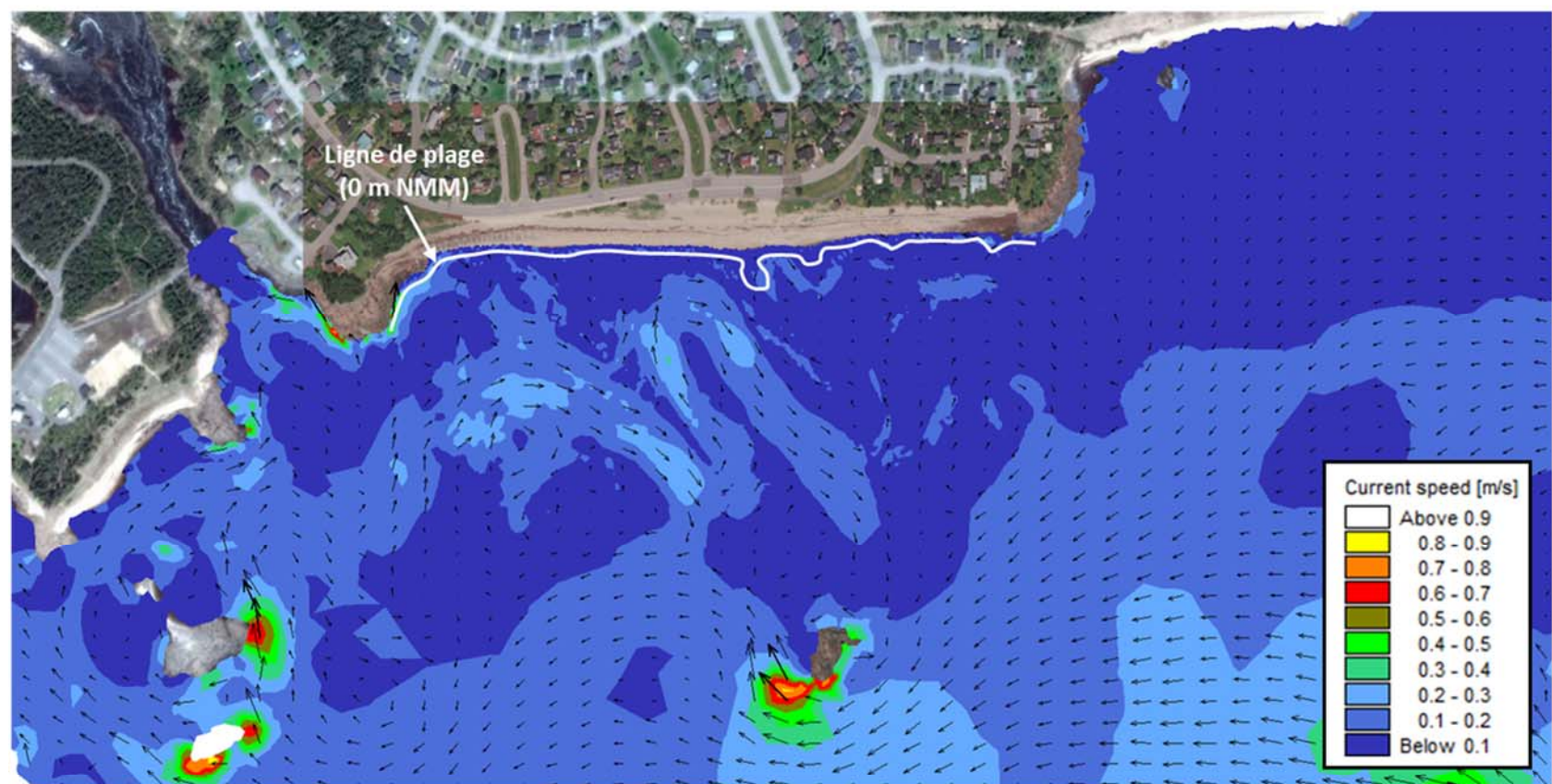
Le niveau d'eau est donc une variable qui influence significativement la dynamique hydrosédimentaire de la plage. En fait, la comparaison des événements #3 et #63 montre que, pour un même cas de vagues donné (2.4 m ESE) se produisant à des niveaux d'eau différents (0.6 m et 2.1 m), la hauteur de vagues vis-à-vis de l'îlot rocheux (au nord) est de 40 cm pour l'événement #3 et de 60 cm pour l'événement #63 (figures 6.7a et 6.11a).

La figure 6.13 illustre les résultats de modélisation en considérant le débit moyen ($95 \text{ m}^3/\text{s}$) de la rivière aux Rochers et ce, pour trois niveaux d'eau différents (-1 m, 0 m et 1 m). Les résultats indiquent que l'axe de l'écoulement à l'embouchure de la rivière varie en fonction du niveau d'eau : à niveau bas l'écoulement est principalement dirigé vers le sud alors qu'à niveau plus haut l'écoulement est dirigé vers le sud-est avec un angle de près de 45° avec le l'axe emprunté à niveau bas. Cette figure montre également que la décharge de la rivière aux Rochers n'engendre pas d'impact direct au niveau de la plage Rochelois. Toutefois, la décharge de cette rivière est une source potentielle de sédiments pouvant être redistribués par les vagues et nourrir les bancs de sable dans la zone inférieure de l'estran.

Les résultats de modélisation bidimensionnelle montrent que la composante transversale du transport sédimentaire est dominante par rapport à la composante littorale. En effet, il est possible de constater qu'à niveau d'eau élevé, les sédiments de haut de plage sont érodés, puis transportés vers le large pour ensuite être déposés au pied de la plage. En augmentant le niveau d'eau, la protection offerte par l'îlot rocheux ainsi que les haut-fonds diminuent, ce qui, en conséquence, augmente la sévérité de l'attaque frontale des vagues. À cet effet, la section 6.3 a pour but d'analyser plus en détails la problématique d'érosion engendrée par les fortes tempêtes.



a) Hauteur de vagues



b) Courants littoraux

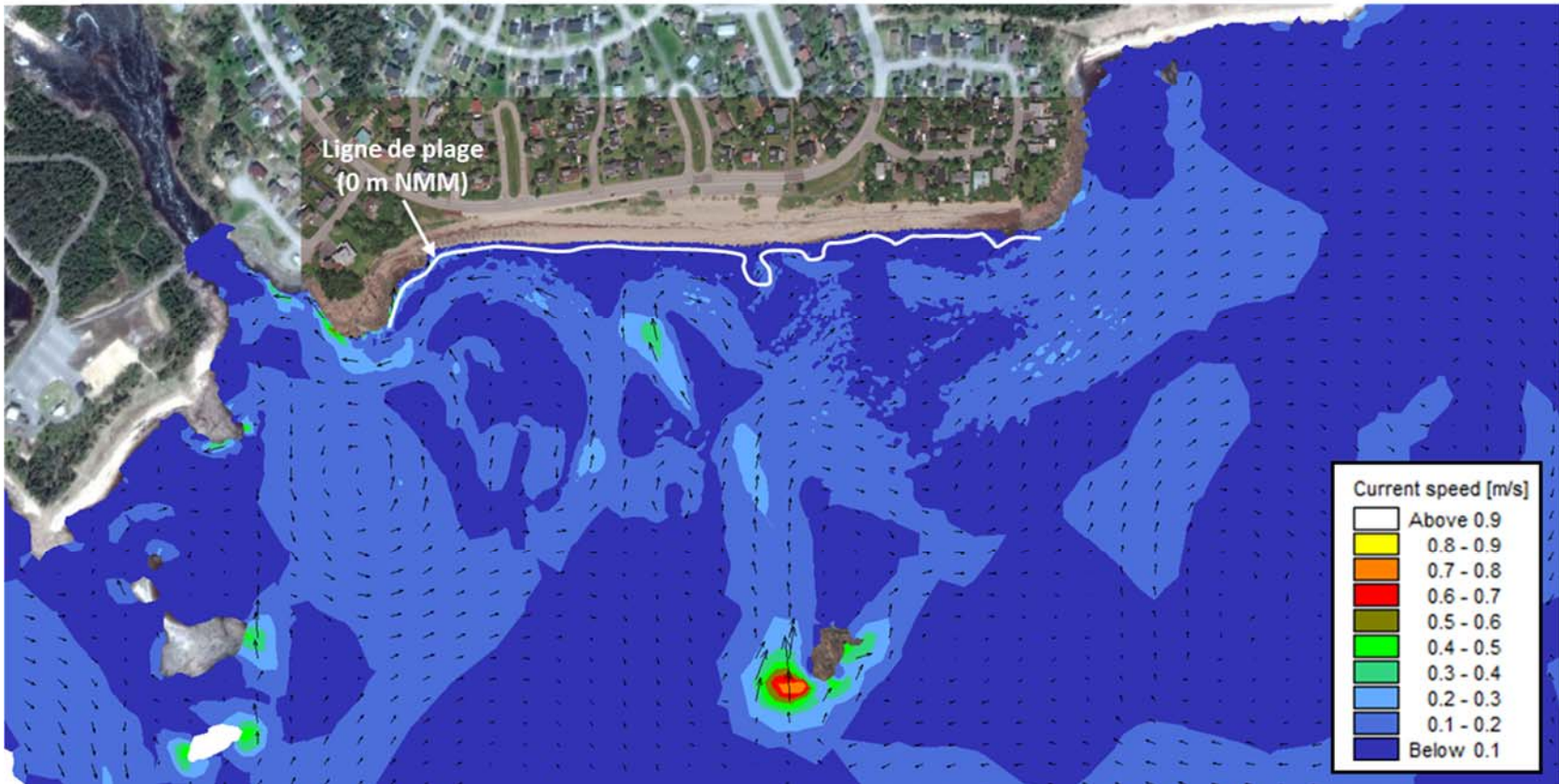


c) Évolution de la bathymétrie

Figure 6.7 : Résultats de modélisation 2D de l'événement #3 en conditions actuelles



a) Hauteur de vagues

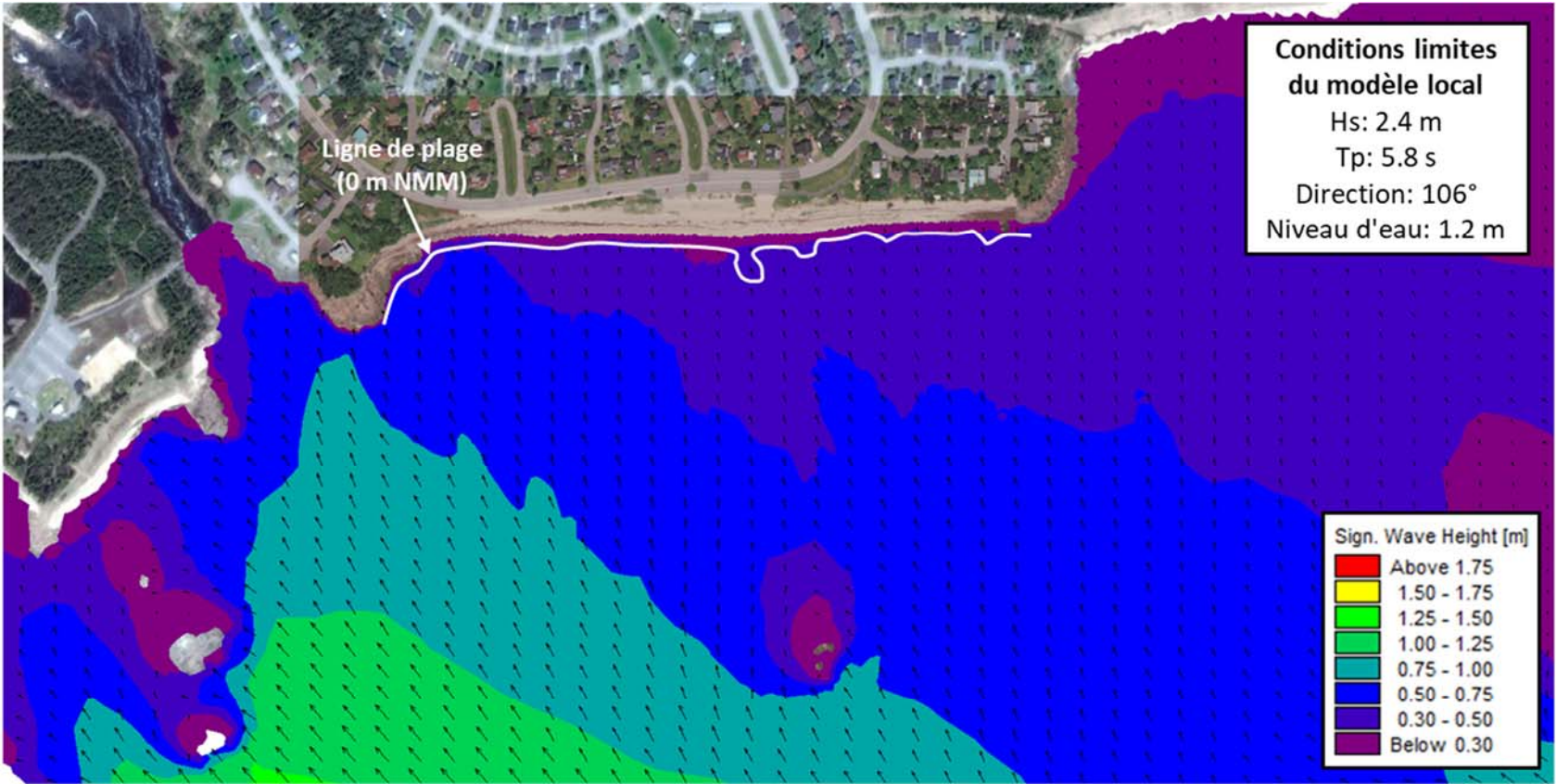


b) Courants littoraux

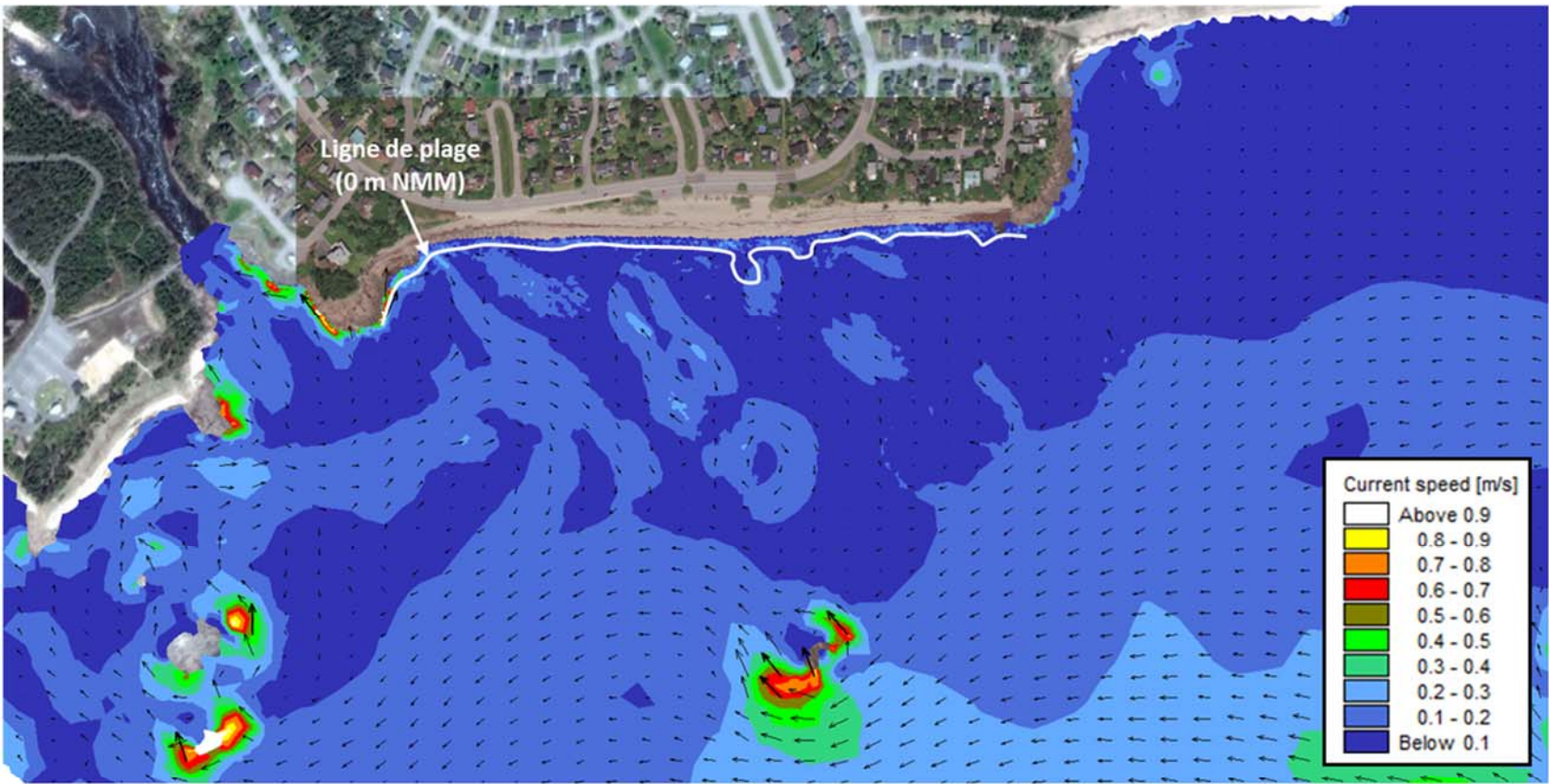


c) Évolution de la bathymétrie

Figure 6.8: Résultats de modélisation 2D de l'événement #12 en conditions actuelles



a) Hauteur de vagues

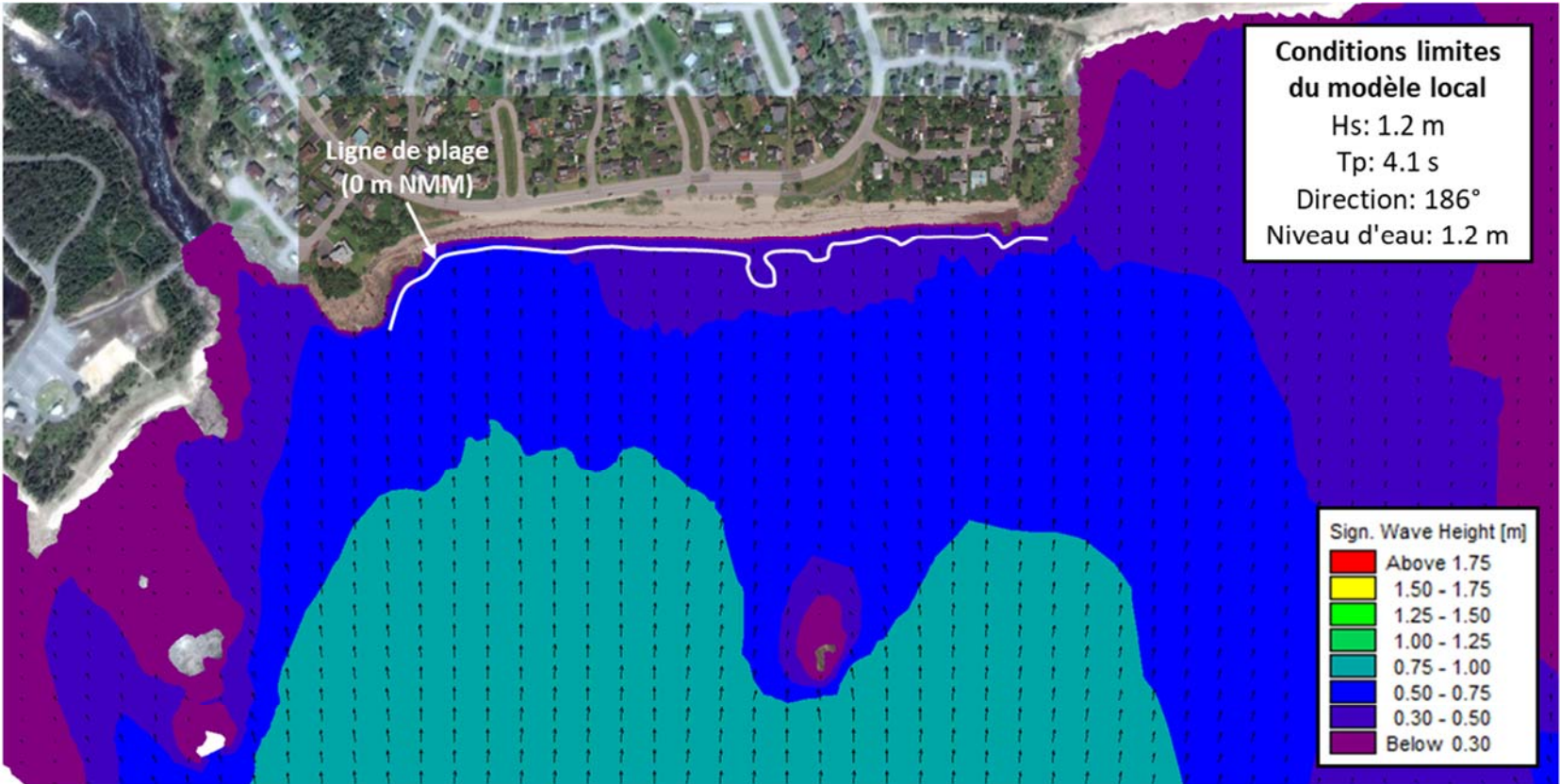


b) Courants littoraux

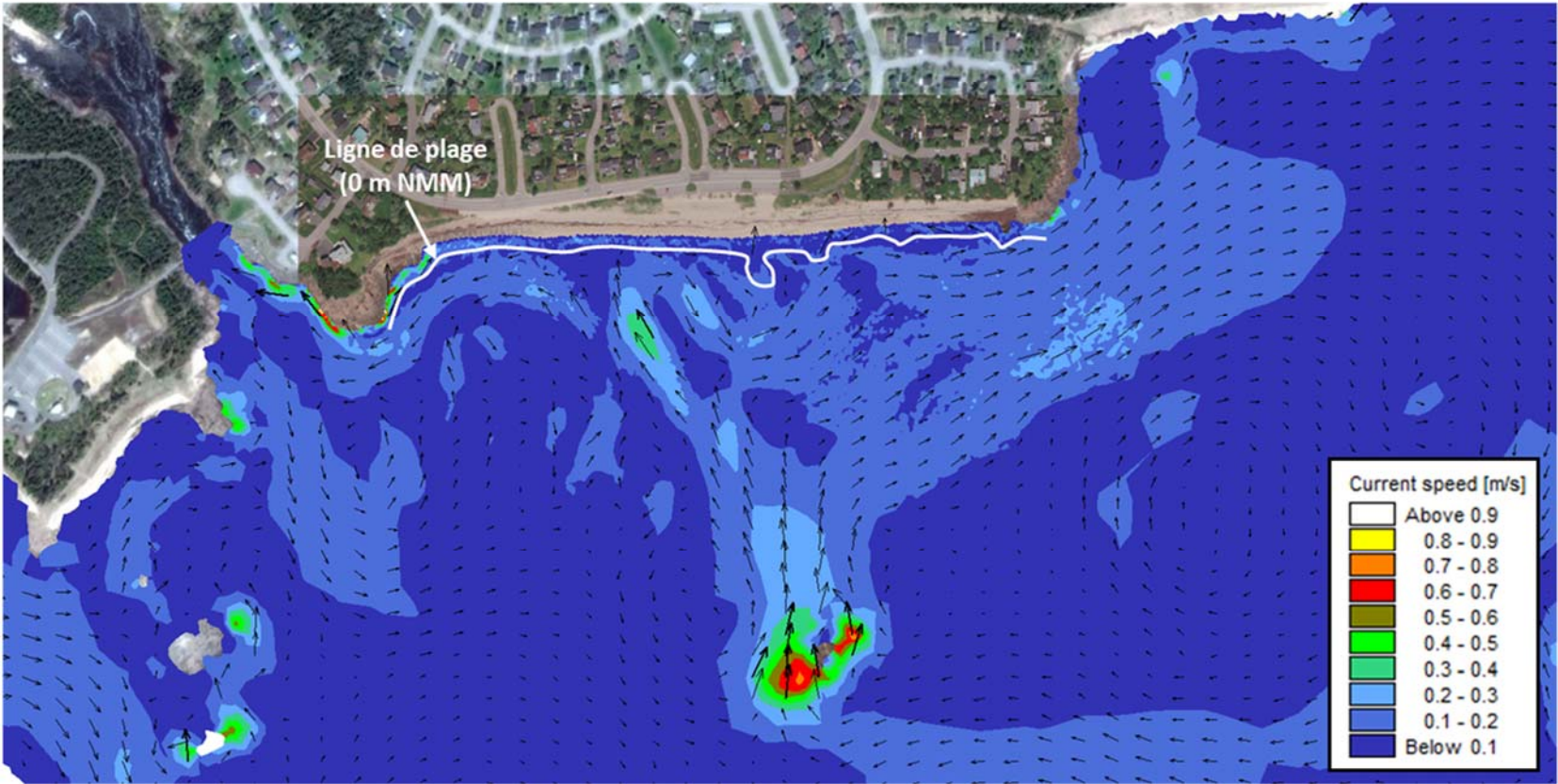


c) Évolution de la bathymétrie

Figure 6.9: Résultats de modélisation 2D de l'événement #27 en conditions actuelles



a) Hauteur de vagues

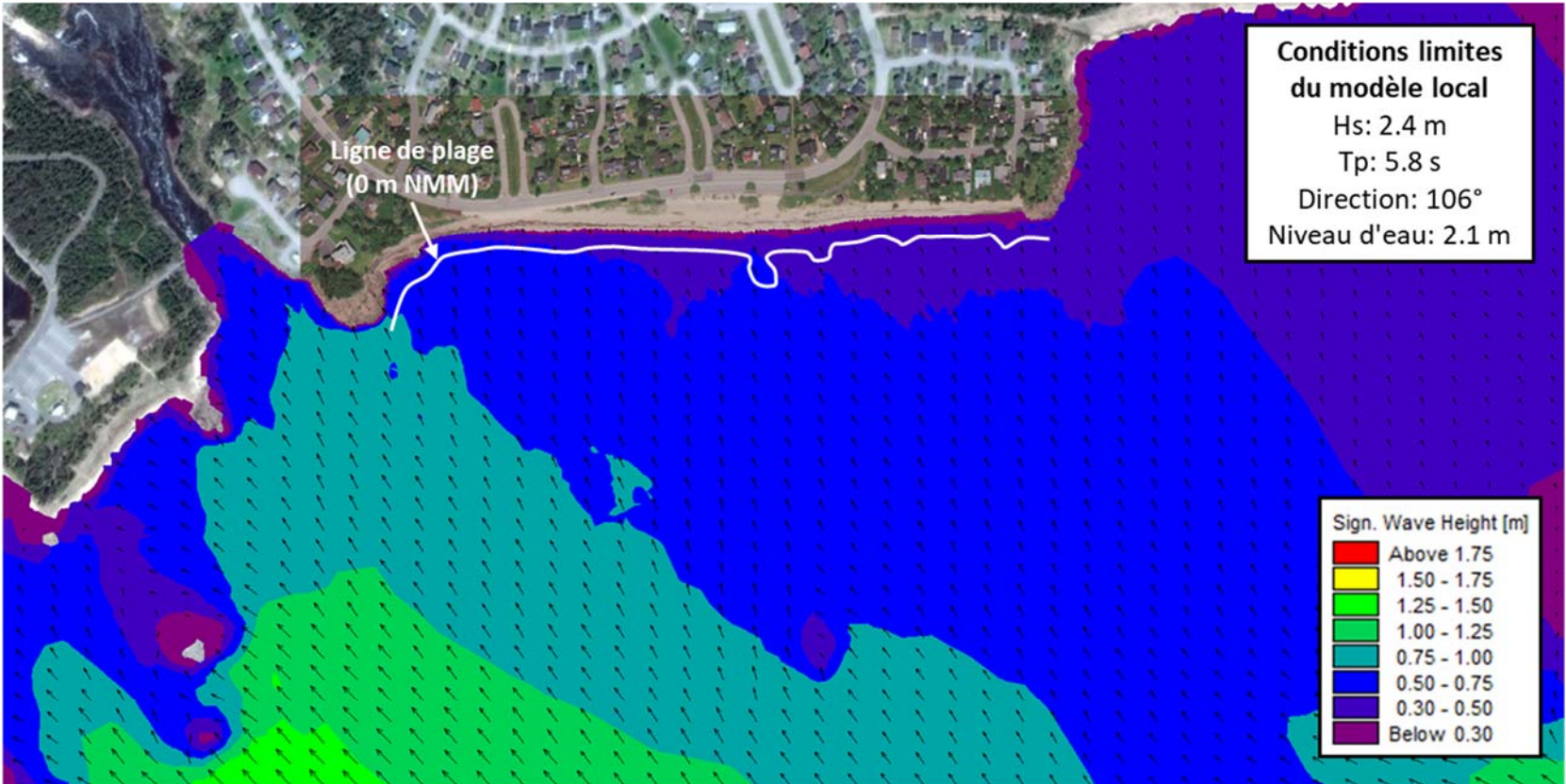


b) Courants littoraux

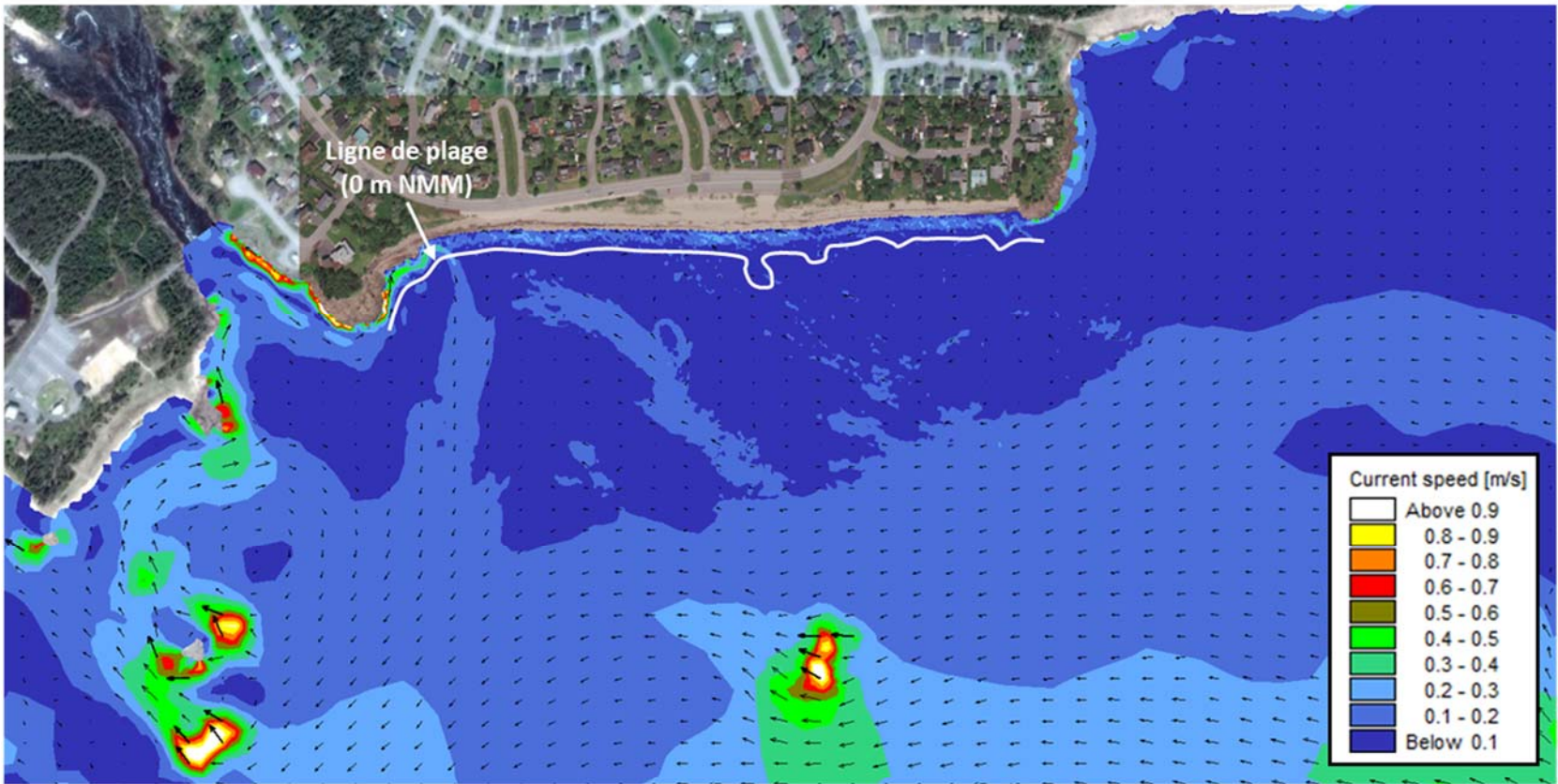


c) Évolution de la bathymétrie

Figure 6.10: Résultats de modélisation 2D de l'événement #36 en conditions actuelles



a) Hauteur de vagues

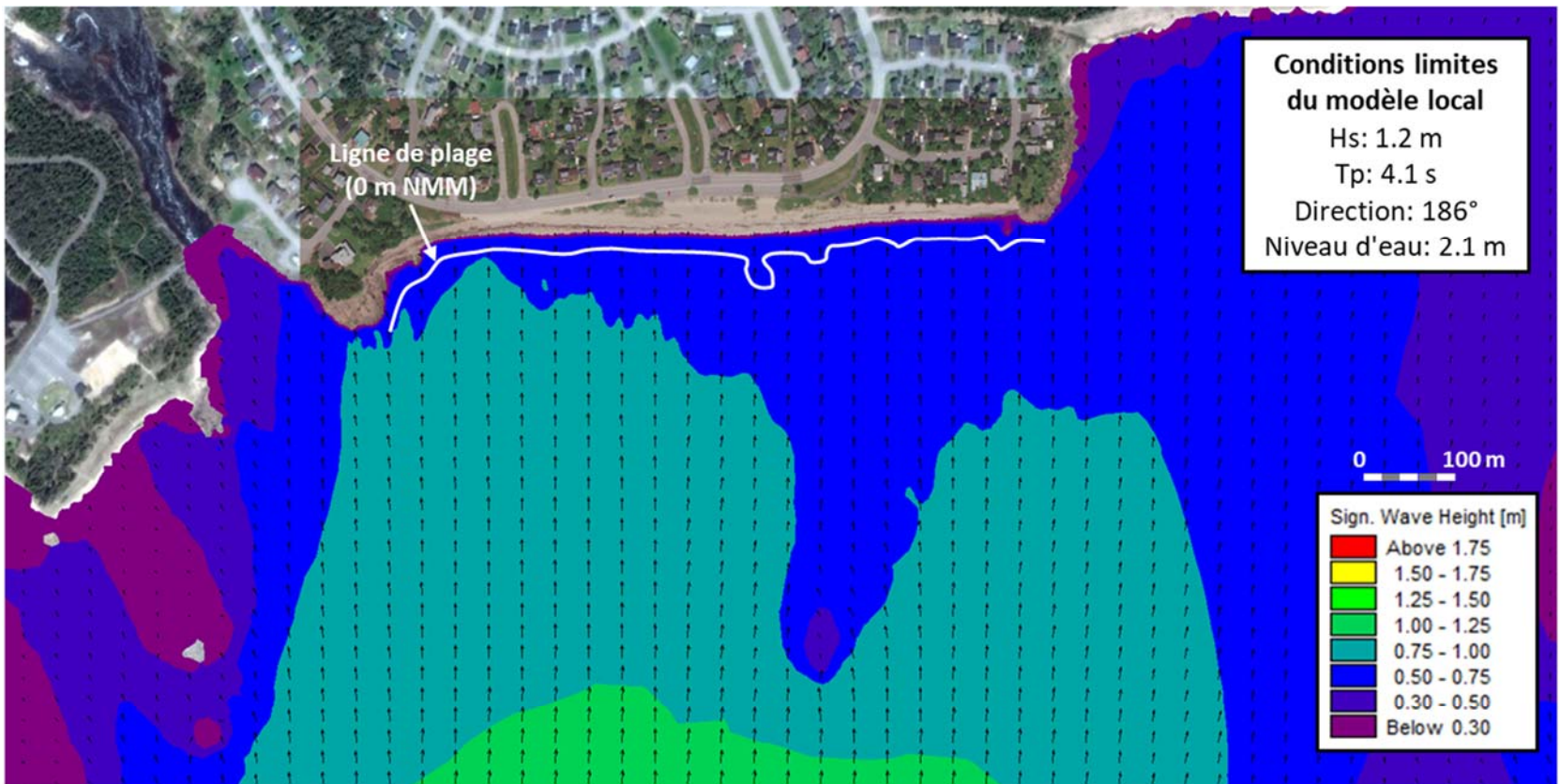


b) Courants littoraux

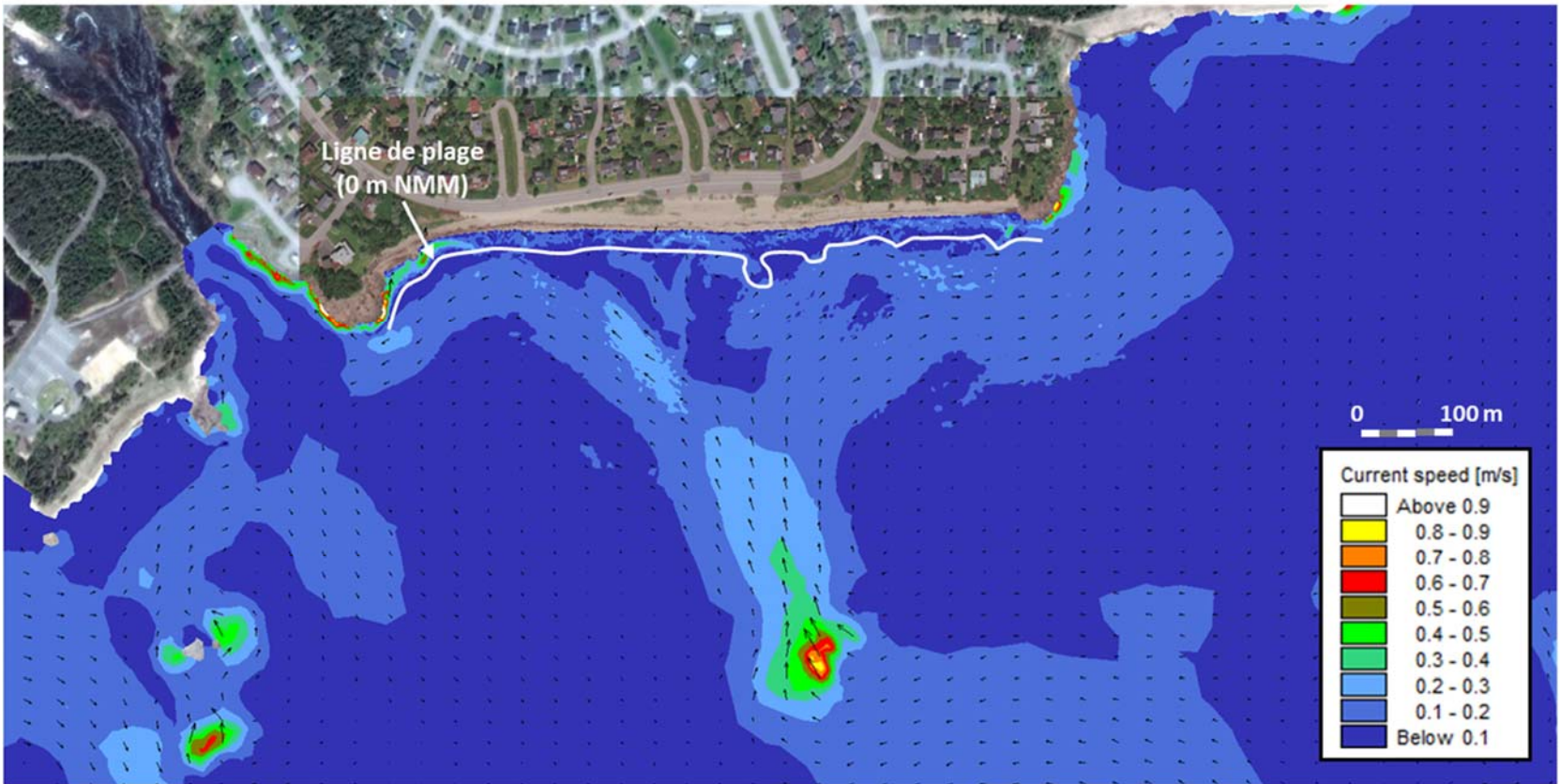


c) Évolution de la bathymétrie

Figure 6.11: Résultats de modélisation 2D de l'événement #63 en conditions actuelles



a) Hauteur de vagues

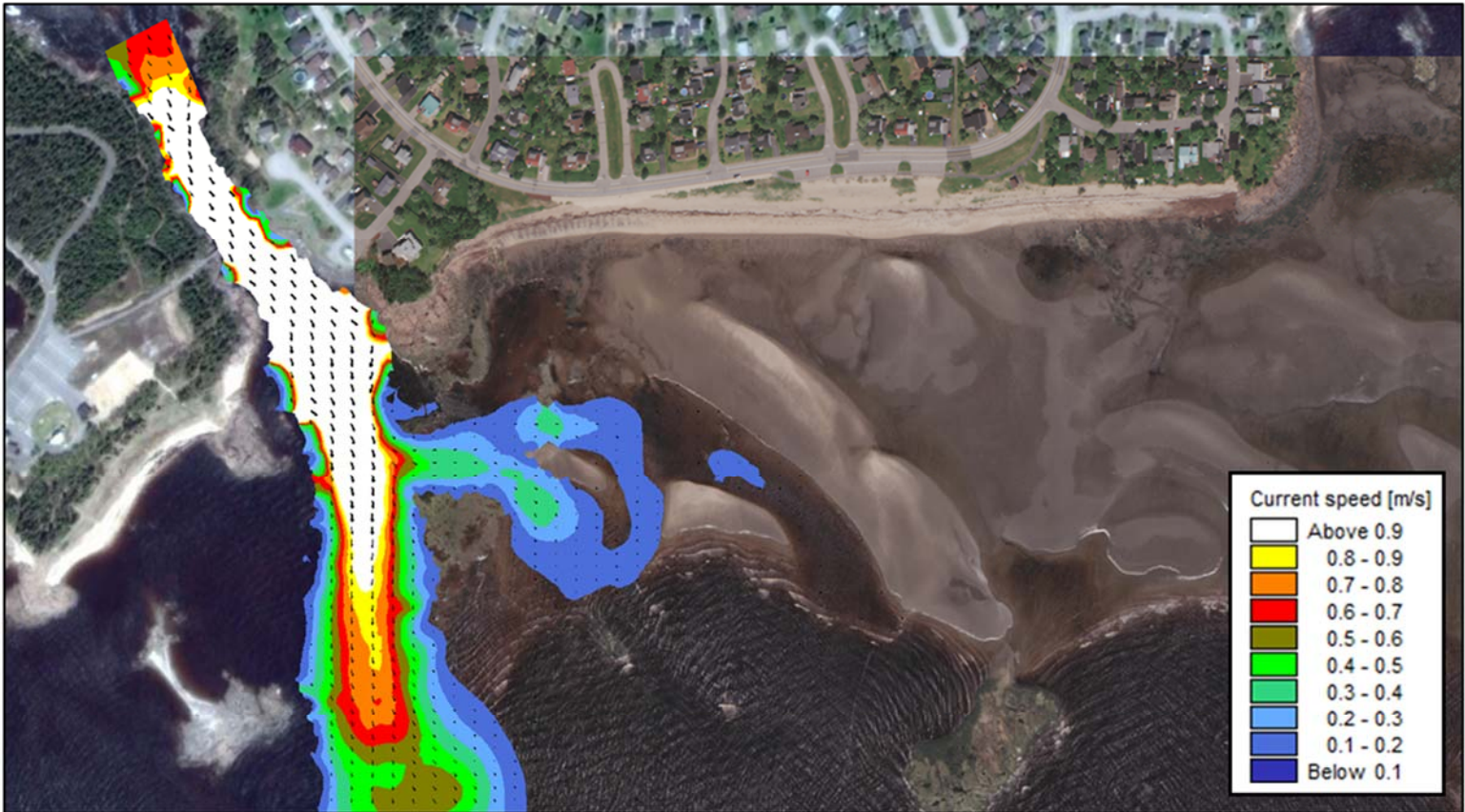


b) Courants littoraux

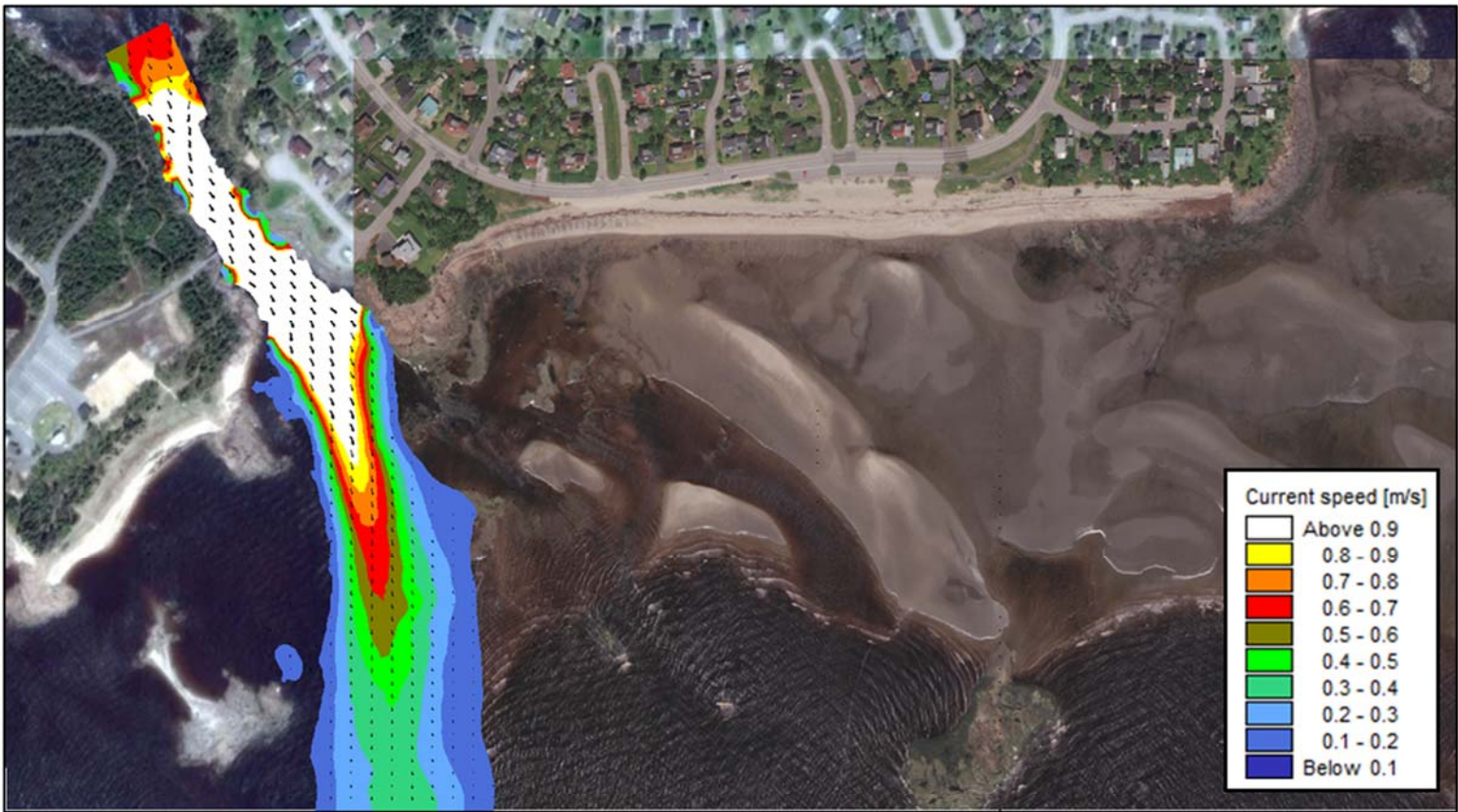


c) Évolution de la bathymétrie

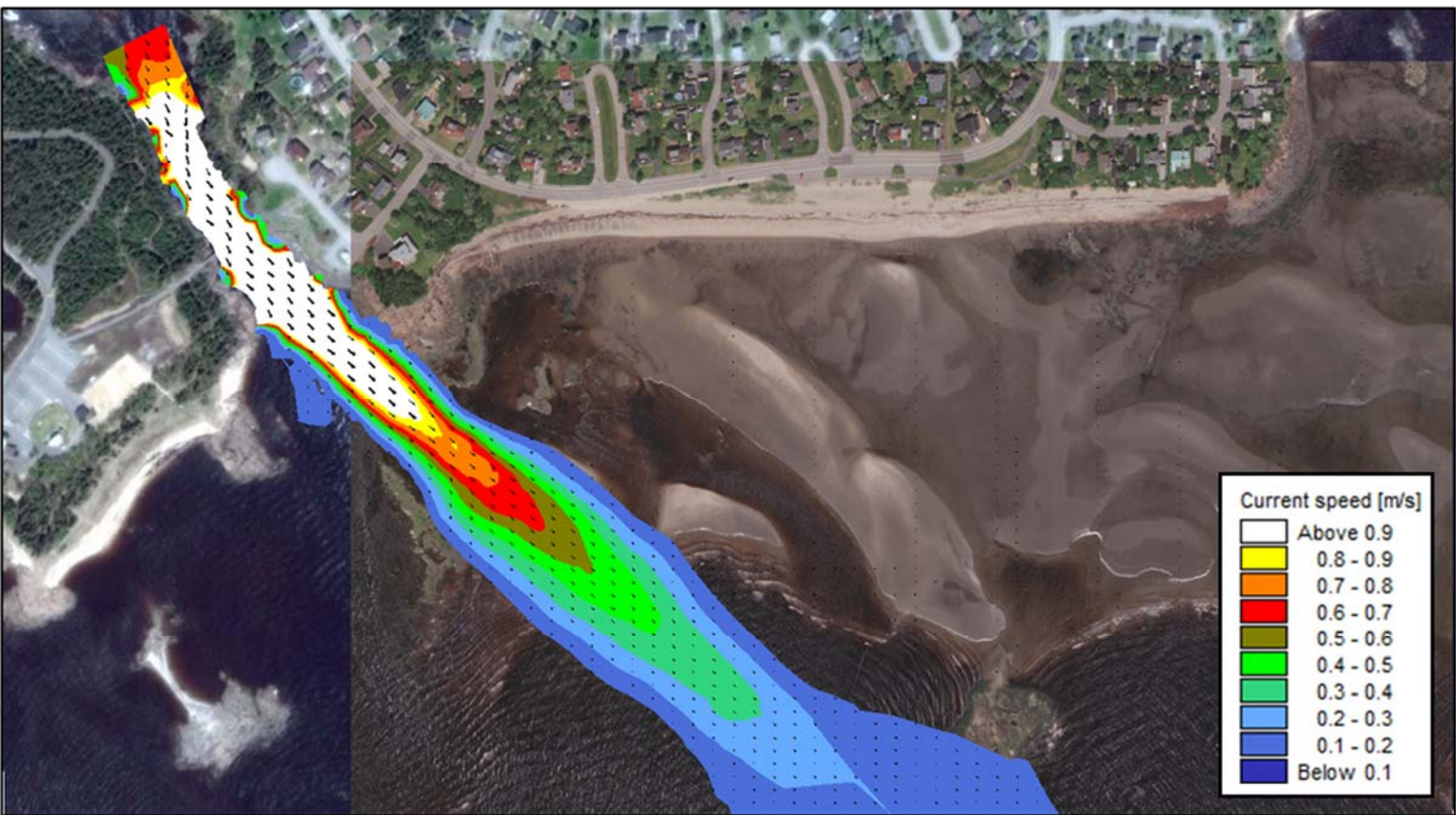
Figure 6.12: Résultats de modélisation 2D de l'événement #72 en conditions actuelles



a) Niveau bas (-1 m NMM)



b) Niveau moyen (0 m NMM)



c) Niveau haut (+1 m NMM)

Figure 6.13: Résultats de modélisation 2D de l'impact du débit moyen de la rivière aux rochers

6.3 Modélisation (1D & 2D) des fortes tempêtes

Les simulations des événements de fortes tempêtes ont été effectuées à l'aide d'outils de modélisation 1D (XBeach par Deltares) et 2D (Mike 21 par DHI). Ces deux modèles offrent des fonctionnalités différentes permettant de compléter l'analyse des impacts engendrés par les fortes tempêtes.

En conditions actuelles (section 6.3.1), les modules SW (*spectral Waves*), HD (*Hydrodynamics*), et ST (*Sand Transport*) de Mike 21 ont été utilisés. Ce modèle bidimensionnel permet de tenir compte des effets hydrodynamiques complexes à proximité de la plage Rochelois. En contrepartie, ce modèle ne permet pas de modéliser la hauteur du run-up des vagues sur la plage. L'ensemble des simulations a été effectué en considérant un d_{50} de 0,5 mm.

En conditions futures incluant la recharge granulaire (section 6.3.2), seuls les modules SW (*spectral Waves*) et HD (*Hydrodynamics*) de Mike 21 ont été utilisés. En fait, le module ST (*Sand Transport*) de Mike 21, tout comme les autres modèles de transport sédimentaires 2D existant sur le marché actuel, ne permet pas de modéliser le transport de matériaux grossiers tels que le gravier et le galet. Tel qu'expliqué à la section 2.3.4, ce type de matériau possède un comportement différent par rapport à celui du sable pour ce qui a trait au transport sédimentaire. Le transport de ce type de matériau peut toutefois être simulé à l'aide de modèle unidimensionnel tel que XBeach-G, qui a été utilisé dans le cadre de la présente étude.

Ainsi pour modéliser l'attaque frontale des vagues sur la recharge granulaire, le modèle XBeach-G (1D) a été utilisé en considérant un d_{50} de 15 mm (section 6.3.3).

6.3.1 Modélisation 2D des conditions hydro-sédimentaires en conditions actuelles

Les figures 6.15 à 6.19 affichent les résultats de modélisation 2D pour 5 cas de tempêtes (définis précédemment au tableau 5.8 p.44) en conditions actuelles. Les résultats de transport sédimentaire ont été obtenus en utilisant un d_{50} de 0.5 mm.

Les tempêtes A, C, D et E, celles-ci étant toutes en provenance de l'ESE, engendrent des courants littoraux orientés vers l'Ouest alors que la tempête B, en provenance du Sud, provoque des courants vers l'Ouest et vers l'Est avec un point d'inversion au milieu de la plage. Dans tous les cas, les courants littoraux sont relativement faibles (0 à 0.5 m/s) en raison de la direction des vagues qui arrivent avec une direction pratiquement perpendiculaire à la plage sous les effets de réfraction.

L'ensemble des résultats de modélisation 2D montre une érosion significative des berges de la plage. En effet, les sédiments du haut de plage sont arrachés sous l'effet des vagues puis transportés vers le large pour finalement être déposés au pied du talus de la plage (voir côté gauche des figures 6.15 à 6.19). Il faut toutefois spécifier que, puisque le modèle 2D ne simule pas le run-up des vagues, les processus d'érosion survenant au-delà du niveau d'eau (à l'extérieur de la surface mouillée du modèle) ne sont pas très bien résolus. Ainsi, bien que le patron général d'érosion soit bien schématisé par le modèle 2D, le recul du haut de talus peut être sous-estimé par celui-ci.

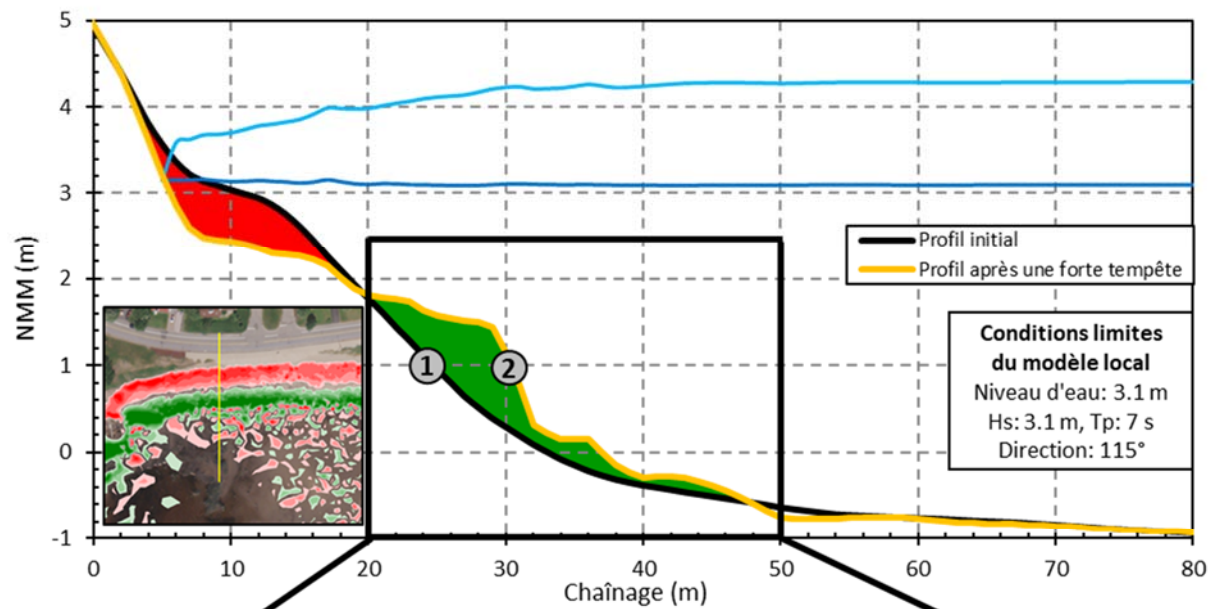
Des simulations exploratoires ont également été réalisées avec le modèle 1D XBeach. Bien que ce modèle ne permette pas de tenir compte des effets hydrodynamiques complexes à proximité de la plage, il permet de mieux représenter les processus d'érosion survenant au-delà du niveau d'eau en incluant le run-up des vagues dans la formulation du transport sédimentaire. D'une manière générale, les résultats issus de ce modèle demeurent similaires à ceux générés par le modèle 2D en termes de volume d'érosion.

Tel que mentionné à la section 6.2, la section Ouest de la plage Rochelois est impactée plus sévèrement par les tempêtes puisqu'il n'y a pas d'îlot rocheux pour dissiper l'énergie des vagues. Par exemple dans le cas de la tempête A ($T=10$ ans), le recul simulé est de 10 m au profil 1 (Ouest de la plage) et de 5 m au profil 3 (Est de la plage). Ces reculs sont d'un ordre de grandeur similaire à ce qui a été observé durant les visites de terrain du MSP en janvier 2017, après la tempête de 2016.

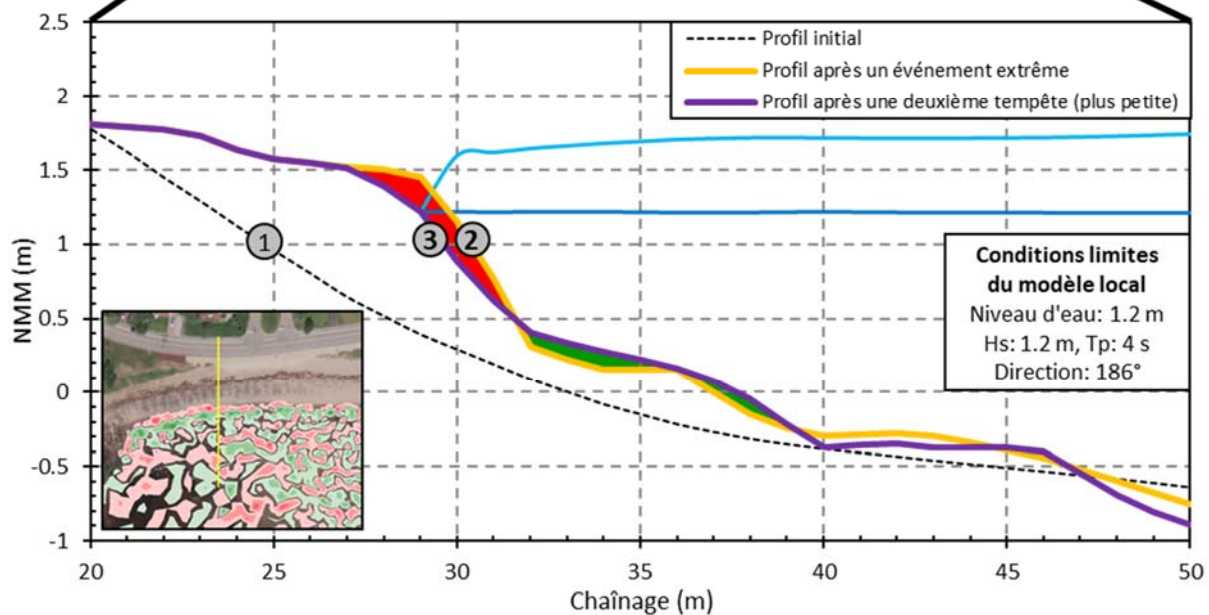
Il avait été mentionné à la section 5.4 qu'en raison de la dépendance entre les variables de niveaux d'eau et de hauteur de vagues, les fortes tempêtes en provenance de l'ESE surviennent souvent durant des épisodes de niveaux d'eau anormalement élevés (plus de 3 m en NMM). En superposant l'énergie libérée par le déferlement des vagues à ces niveaux d'eau élevés, le run-up peut facilement dépasser une élévation de 5 m pour un événement de tempête d'une récurrence 10 ans. L'action des vagues peut ainsi endommager la végétation et les structures en haut de la plage par le dépôt de débris ou par l'érosion du talus manant à un affaissement de la falaise.

La figure 6.14 révèle le processus de l'évolution d'un profil de plage soumis à une succession de tempêtes. Dans cet exemple, les vagues de la première tempête, d'une récurrence de 25 ans, érodent le haut de plage (élévation 2 m à 4 m) pour ensuite former une barre de sable en bas de plage (élévation -0.5 m à 2 m). Cette barre de sable offre ainsi une nouvelle source de sédiments qui sera remaniée durant les événements plus fréquents survenant à niveaux d'eau modérés. C'est d'ailleurs ce qui est observé sur la figure 6.14b : les sédiments localisés dans la section supérieure de la barre de sable (élévation 0.5 m à 1.5 m) se font éroder puis déposer un peu plus bas (élévation -0.5 m à 0.5 m) d'une manière à adoucir le profil de la plage afin d'atteindre la pente d'équilibre.

D'une manière plus générale, la section la plus active de la plage (soit entre -0.5 m et 1.5 m pour la plage Rochelois) sera remaniée fréquemment sous l'action des vagues durant les événements fréquents. Ainsi à l'intérieur d'une petite échelle de temps (moins de 1 an), il sera possible de constater une alternance entre l'érosion et l'accrétion pour cette section de la plage. Toutefois à plus long terme (plusieurs années), c'est le bilan sédimentaire qui dicte la tendance générale pour la portion de cette plage. Cet aspect est traité en détails à la section 6.4.



a) Impact d'une tempête d'une période de retour de 25 ans



b) Impact d'une tempête survenant plusieurs fois par année

Figure 6.14 : Évolution du profil de plage suite à deux événements de tempête

6.3.2 Modélisation 2D de l'hydrodynamique en conditions futures (recharge granulaire)

La figure 6.20 offre une comparaison des courants littoraux modélisés en conditions actuelles ainsi qu'en conditions futures, c'est-à-dire en incluant la recharge granulaire V3. Les résultats issus de deux tempêtes sont affichés sur cette figure, soit les tempêtes B et C en provenance du Sud et de l'ESE respectivement.

La figure 6.20b montre qu'en conditions futures, la tempête B (Sud) engendre des courants littoraux orientés vers l'Est dans l'ensemble de la recharge granulaire. La vitesse des courants littoraux modélisés à l'extrémité Ouest de la plage est plus élevée en conditions futures (figure 6.20b) comparativement aux conditions actuelles (figure 6.20a) en raison de la nouvelle orientation de la plage, celle-ci étant plus inclinée par rapport aux vagues du Sud. Toutefois, la plage en conditions futures contiendra des matériaux beaucoup plus grossiers (gravier 15 mm) comparativement aux conditions actuelles (sable 0,5 mm), ce qui limitera la mise en suspension des sédiments (et donc le transport sédimentaire).

La figure 6.20d montre qu'en conditions futures, la tempête C (ESE) engendre des courants littoraux vers l'Est et vers l'Ouest qui se rejoignent à la section Ouest de la plage. Ces patrons d'écoulement sont similaires aux conditions actuelles (figure 6.20c). Les courants littoraux modélisés sont plus élevés en conditions futures (figure 6.20d) comparativement aux conditions actuelles (figure 6.20c) en raison du lissage de la bathymétrie qui a été engendré par l'ajout de la recharge granulaire. Cette augmentation de la vitesse est toutefois temporaire après la construction de la plage puisque l'action des vagues permettra d'onduler la nouvelle plage ce qui permettra d'augmenter la rugosité et, en conséquence, de réduire les vitesses d'écoulement.

L'analyse des courants littoraux permet d'obtenir un portrait qualitatif du transport sédimentaire sur la plage Rochelois. À cet effet, la section 6.4 traite en détails de l'aspect quantitatif du transport sédimentaire (bilan sédimentaire) sur le long terme (plusieurs années). C'est d'ailleurs par cette analyse approfondie que l'orientation de la recharge granulaire a été révisée à deux reprises au courant de cette étude (recharge V1, V2 puis V3).

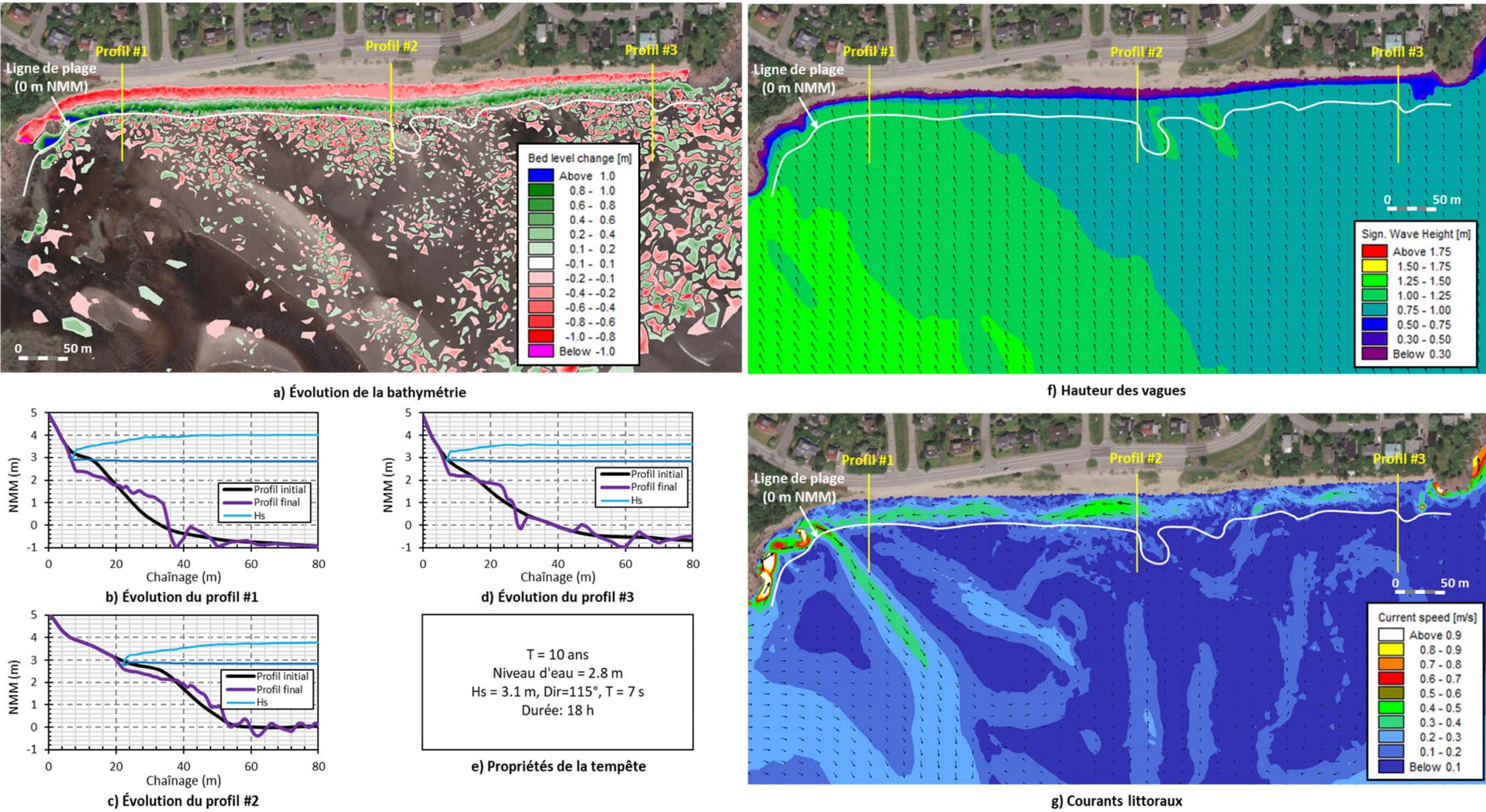
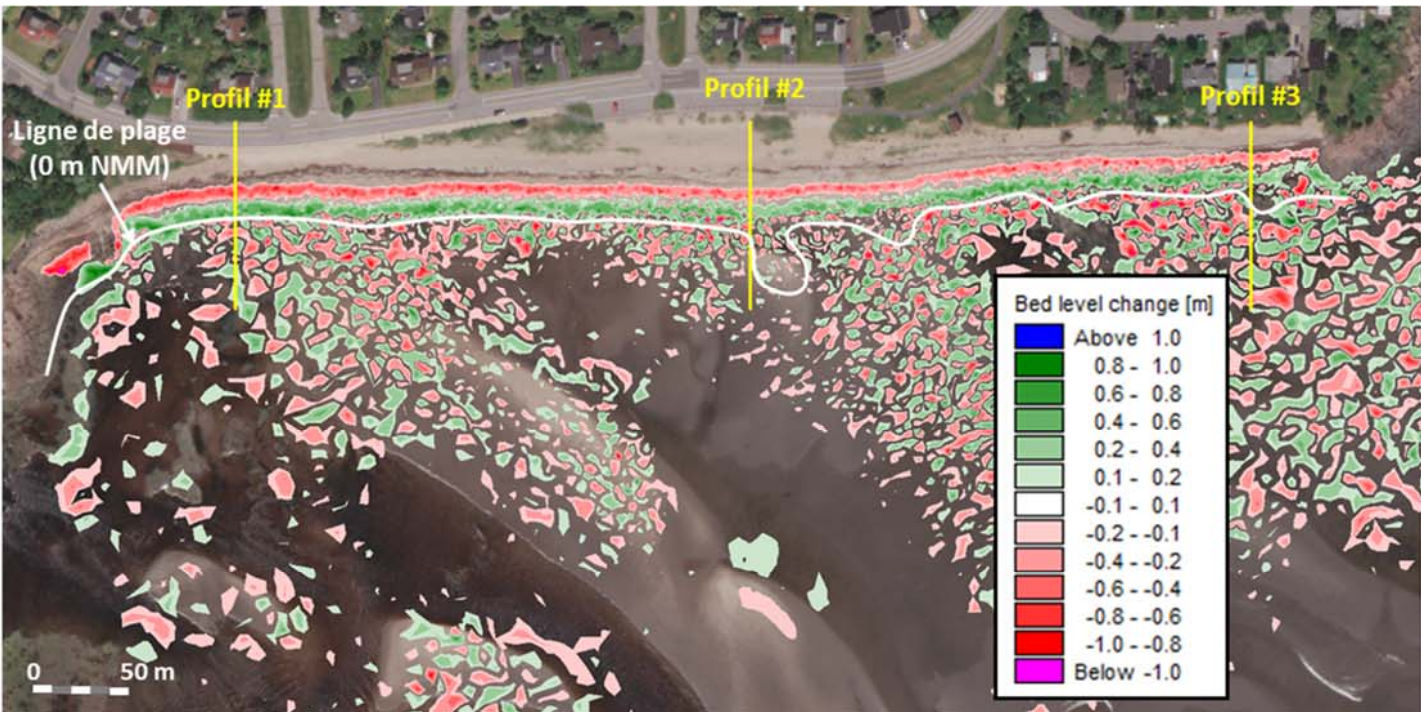
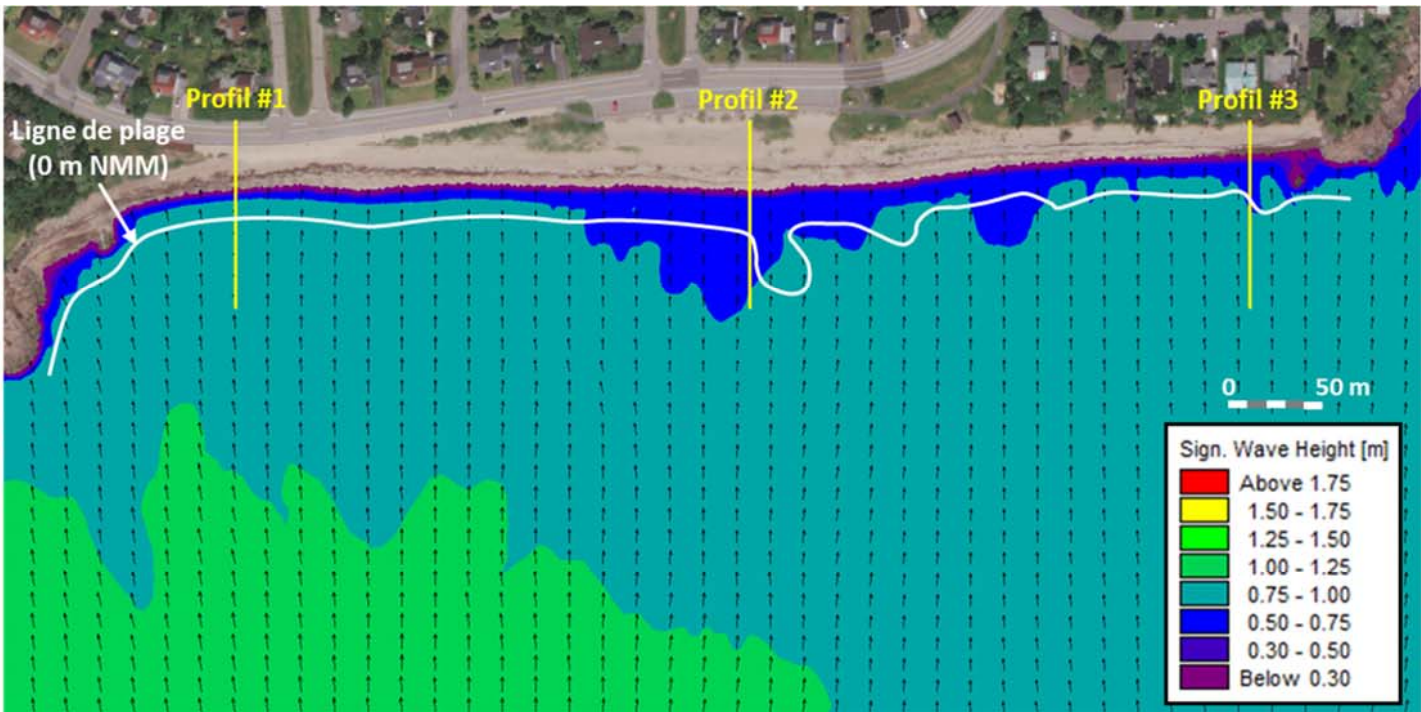


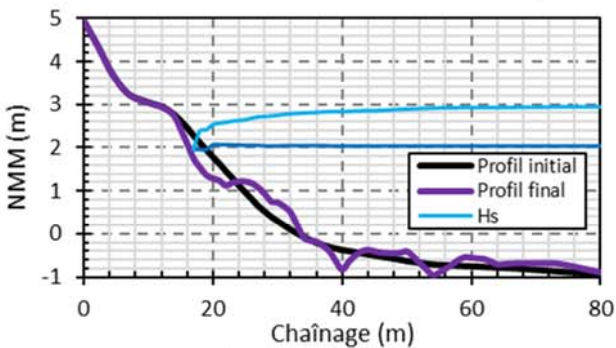
Figure 6.15 : Résultats de modélisation 2D de la tempête A en conditions actuelles



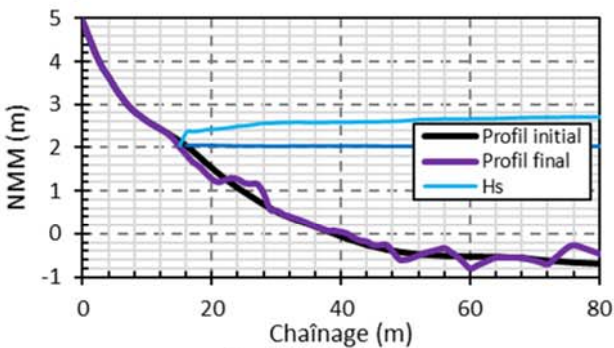
a) Évolution de la bathymétrie



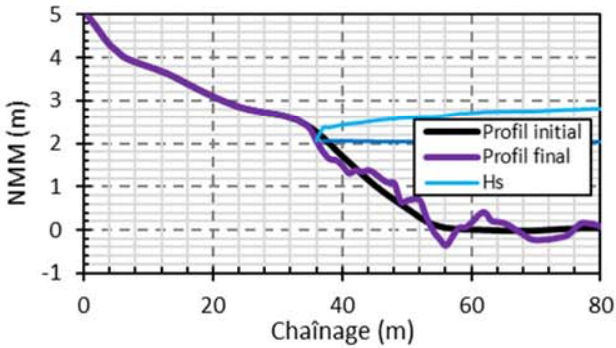
f) Hauteur des vagues



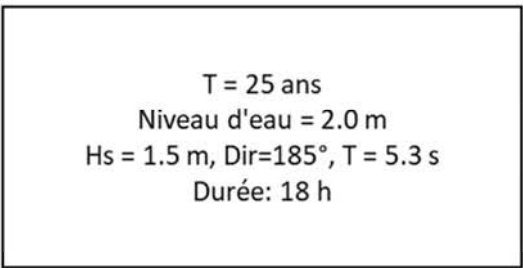
b) Évolution du profil #1



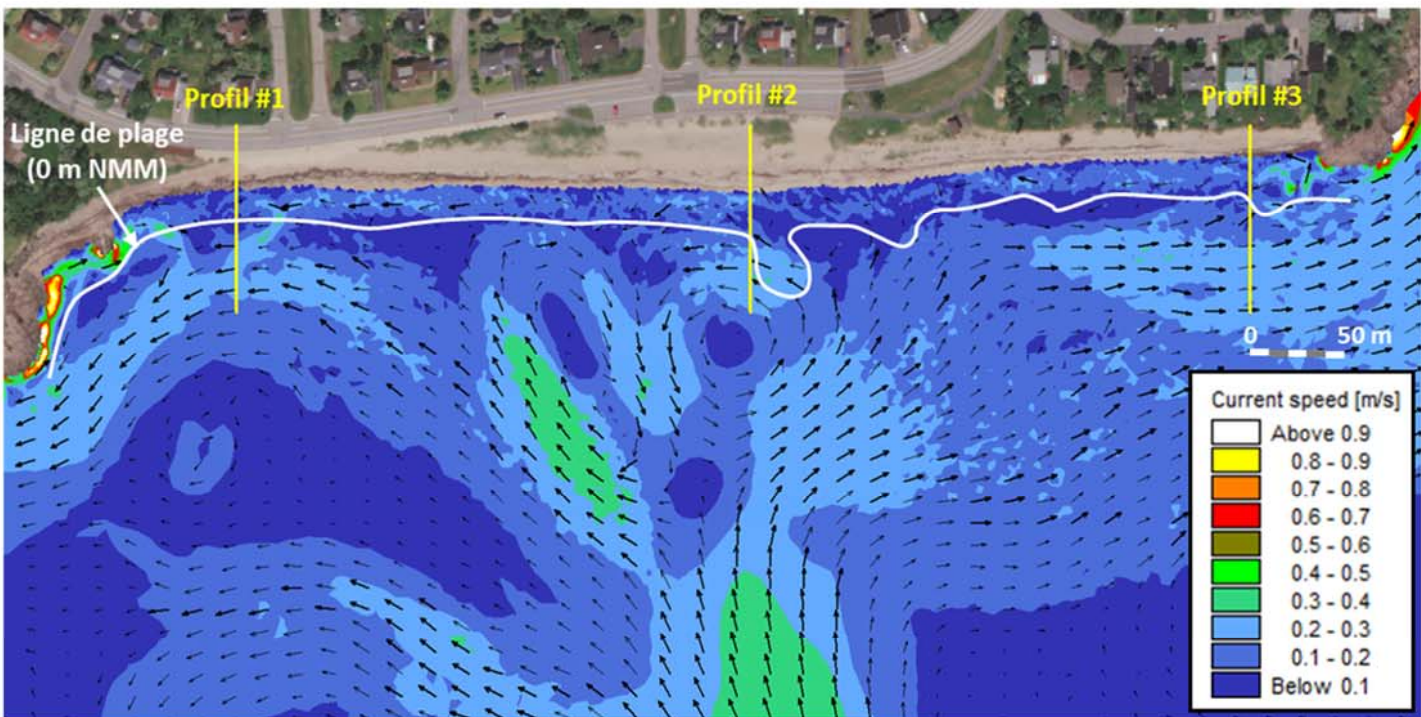
d) Évolution du profil #3



c) Évolution du profil #2



e) Propriétés de la tempête



g) Courants littoraux

Figure 6.16: Résultats de modélisation 2D de la tempête B en conditions actuelles

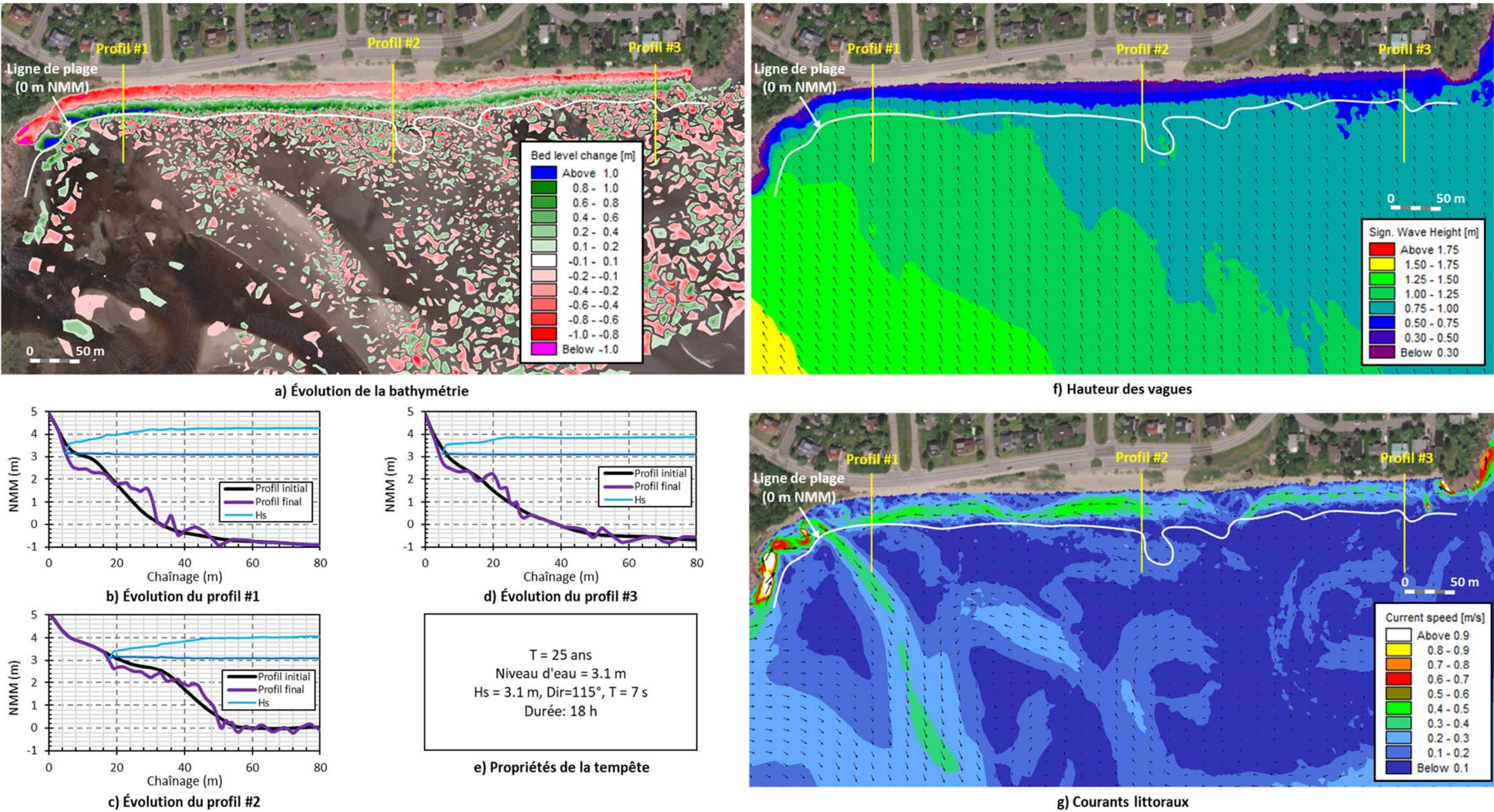


Figure 6.17: Résultats de modélisation 2D de la tempête C en conditions actuelles

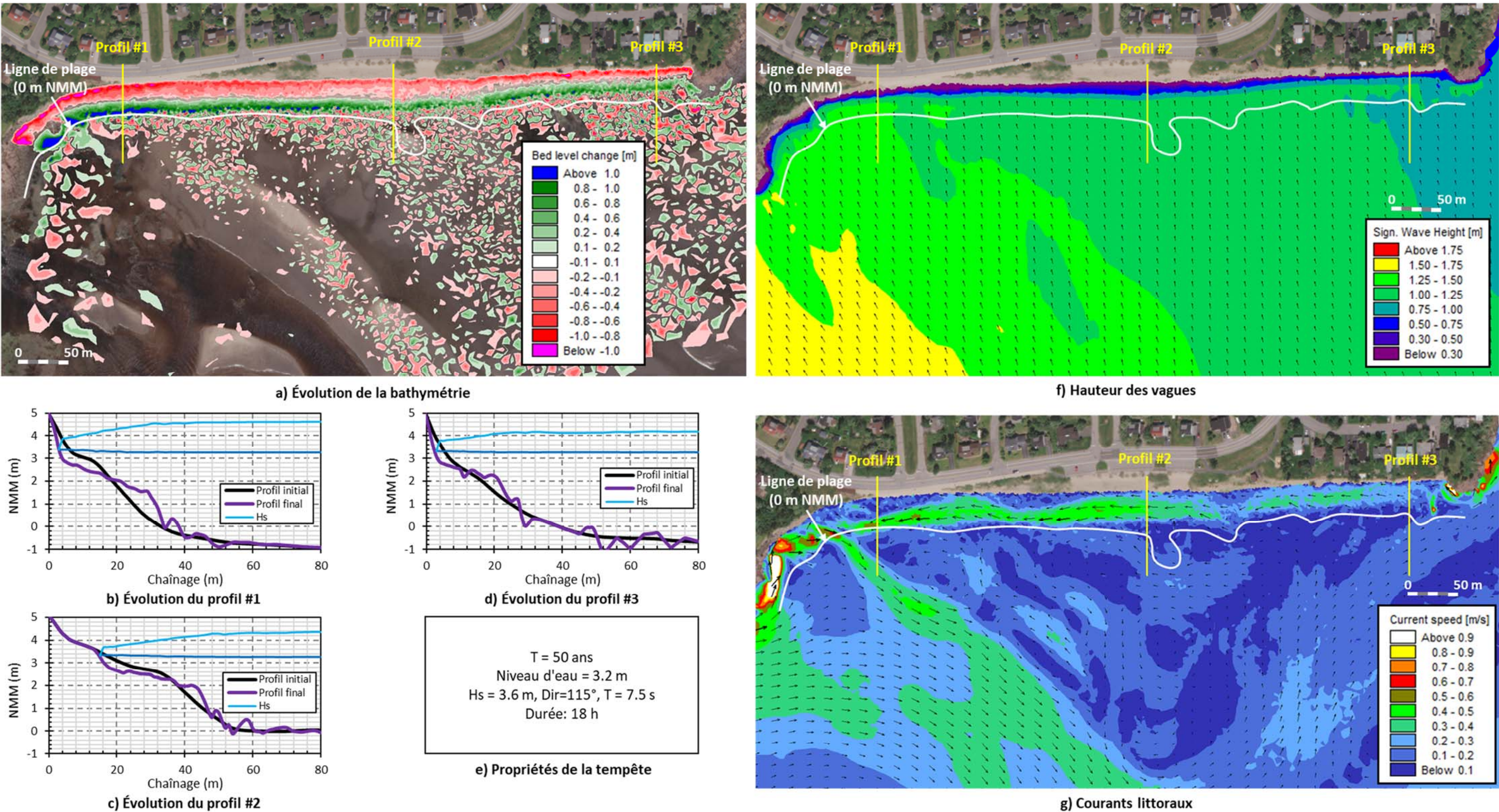
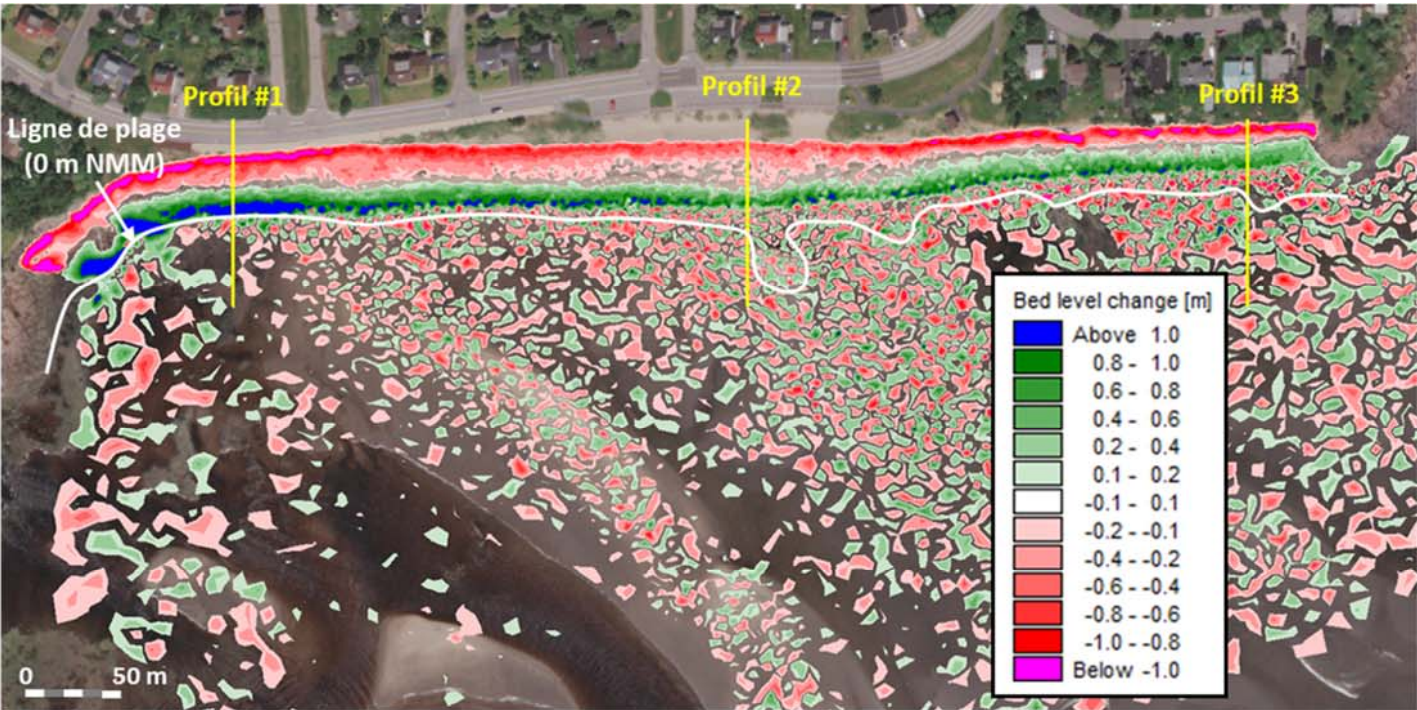
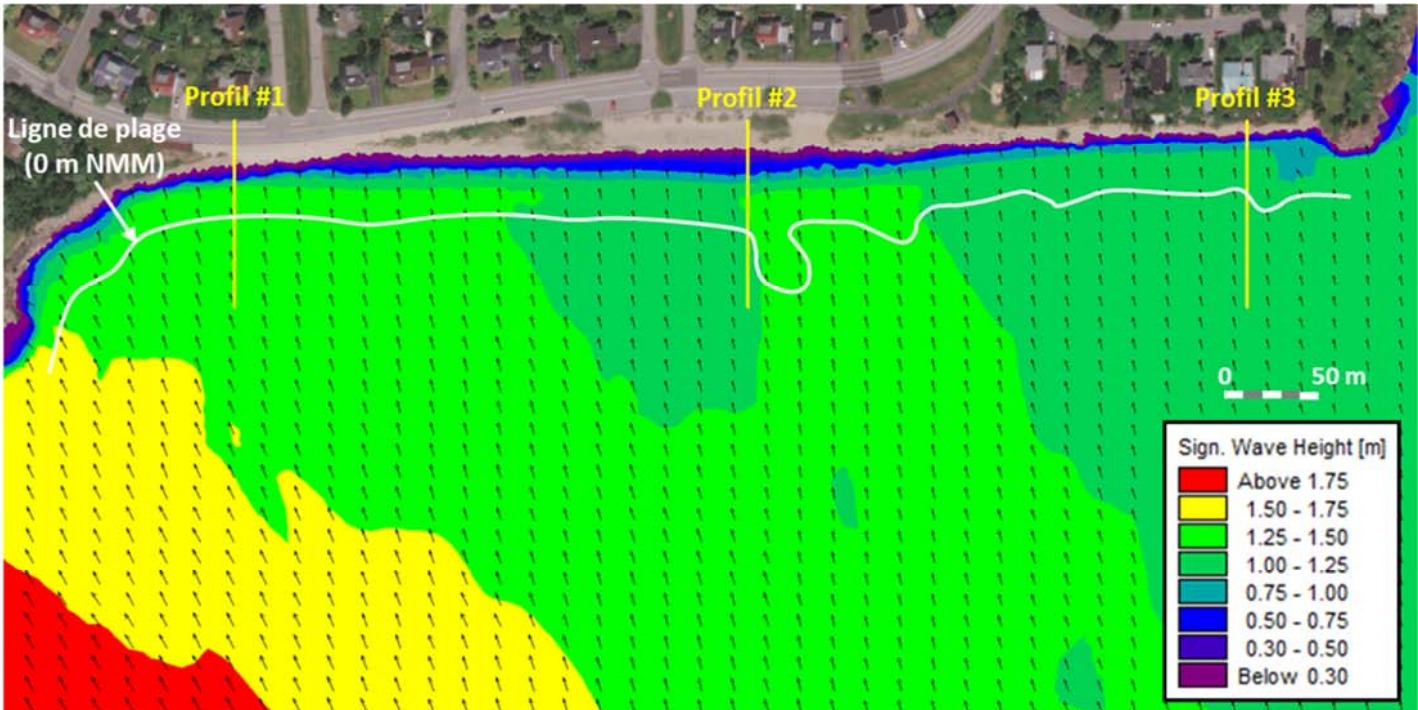


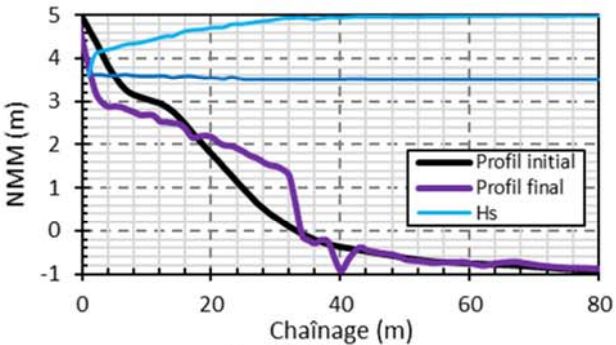
Figure 6.18: Résultats de modélisation 2D de la tempête D en conditions actuelles



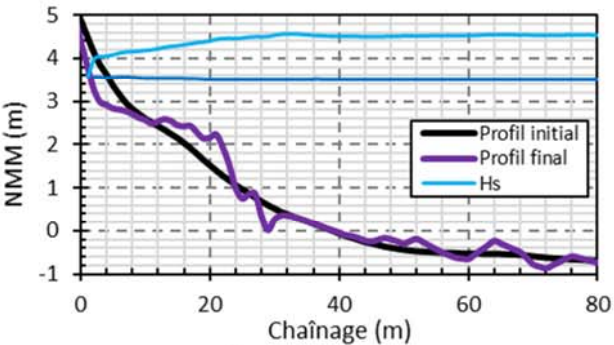
a) Évolution de la bathymétrie



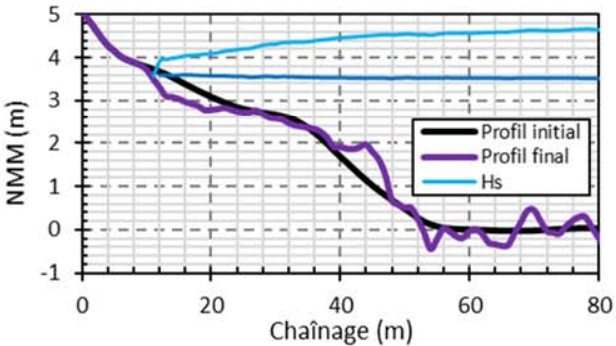
f) Hauteur des vagues



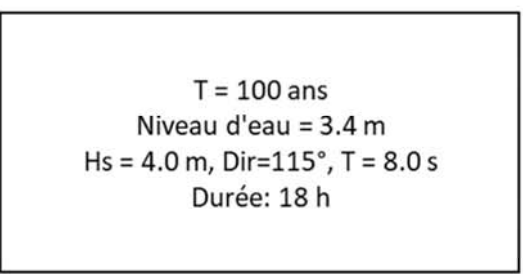
b) Évolution du profil #1



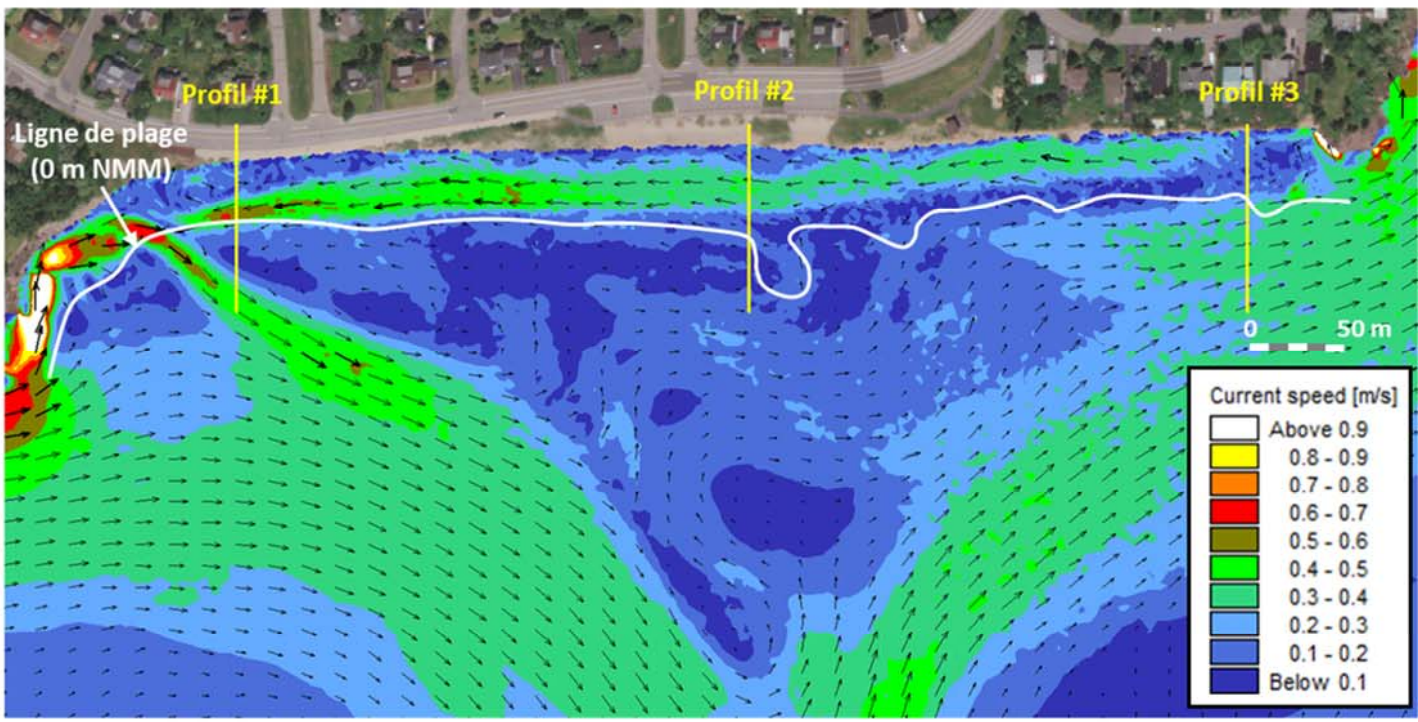
d) Évolution du profil #3



c) Évolution du profil #2

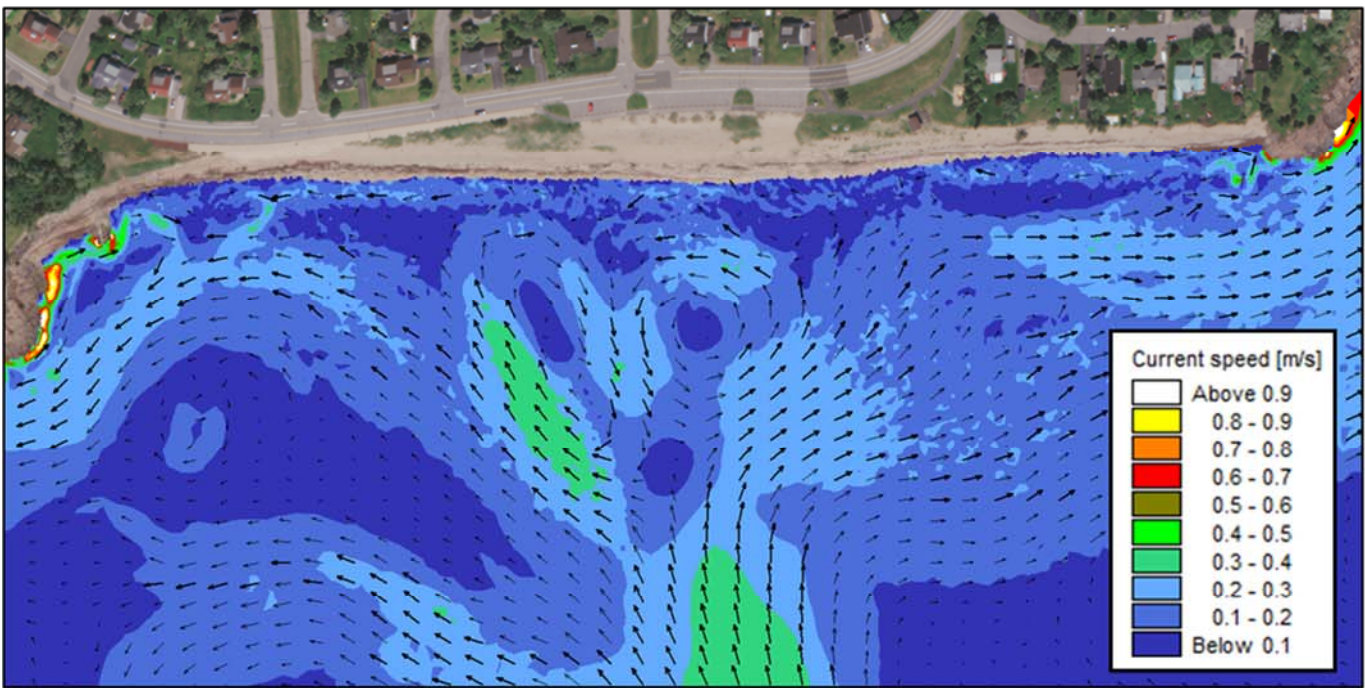


e) Propriétés de la tempête

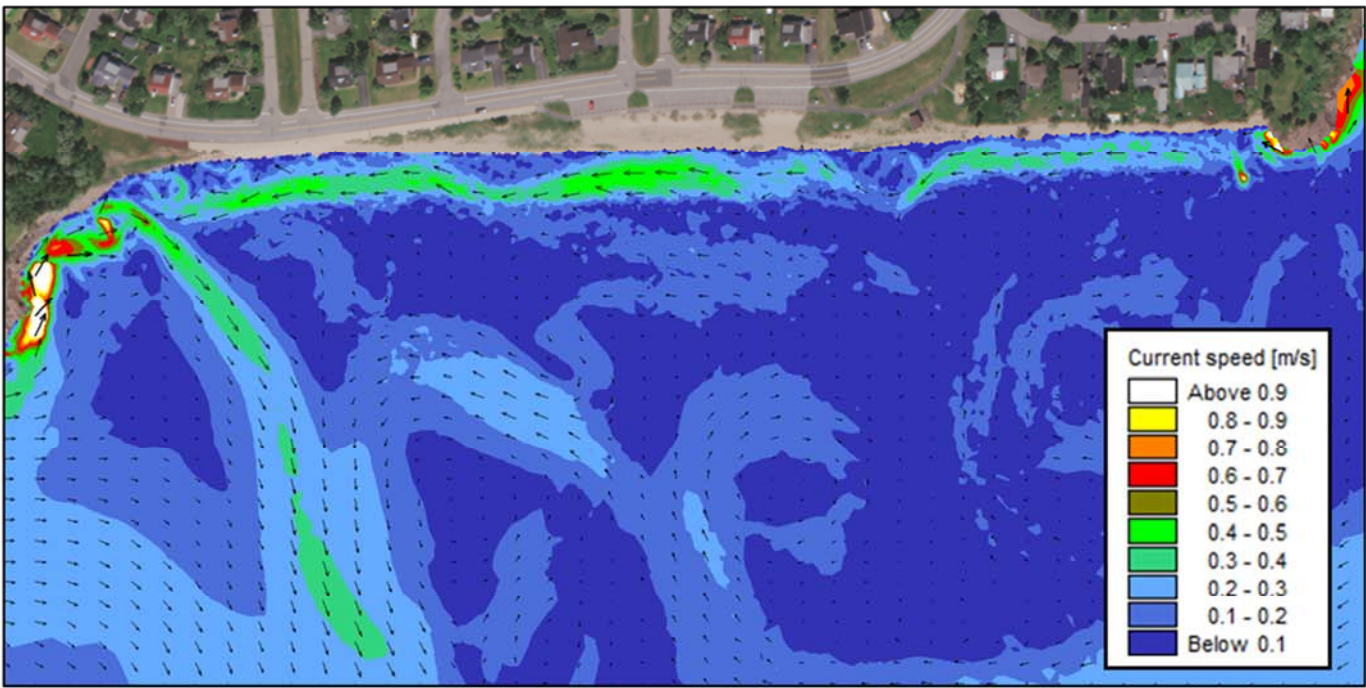


g) Courants littoraux

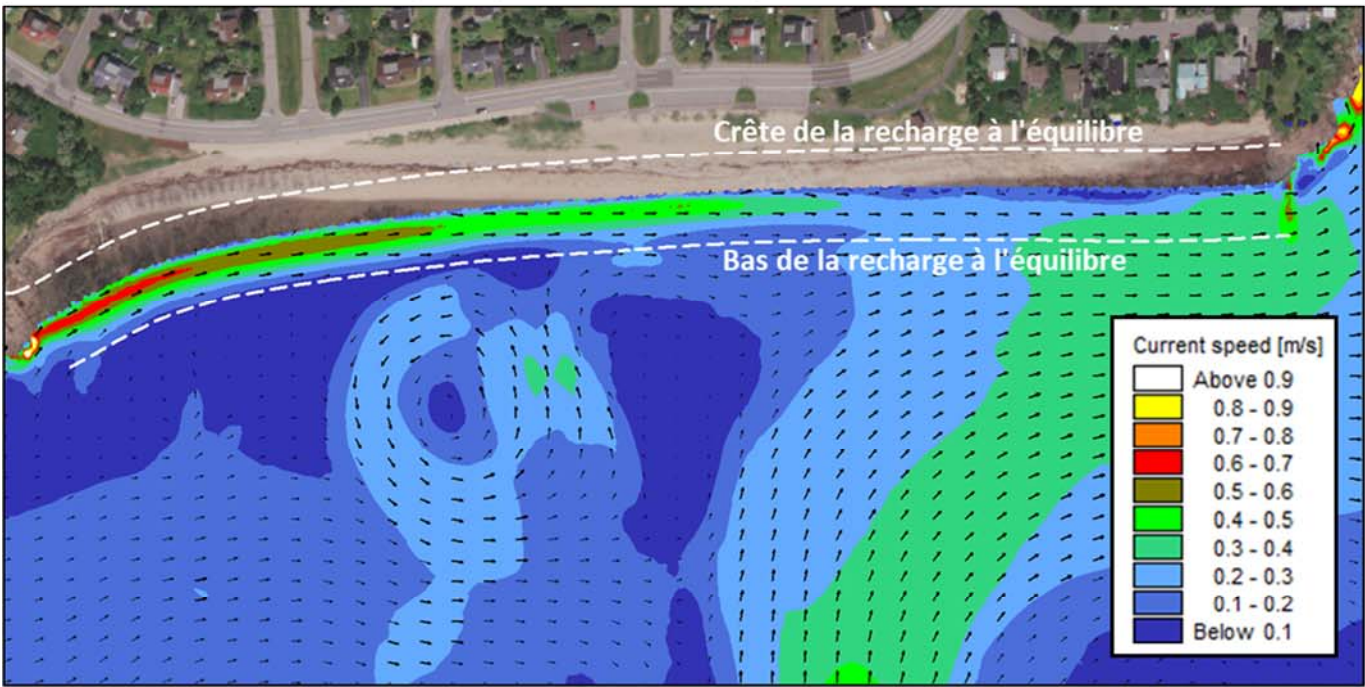
Figure 6.19: Résultats de modélisation 2D de la tempête E en conditions actuelles



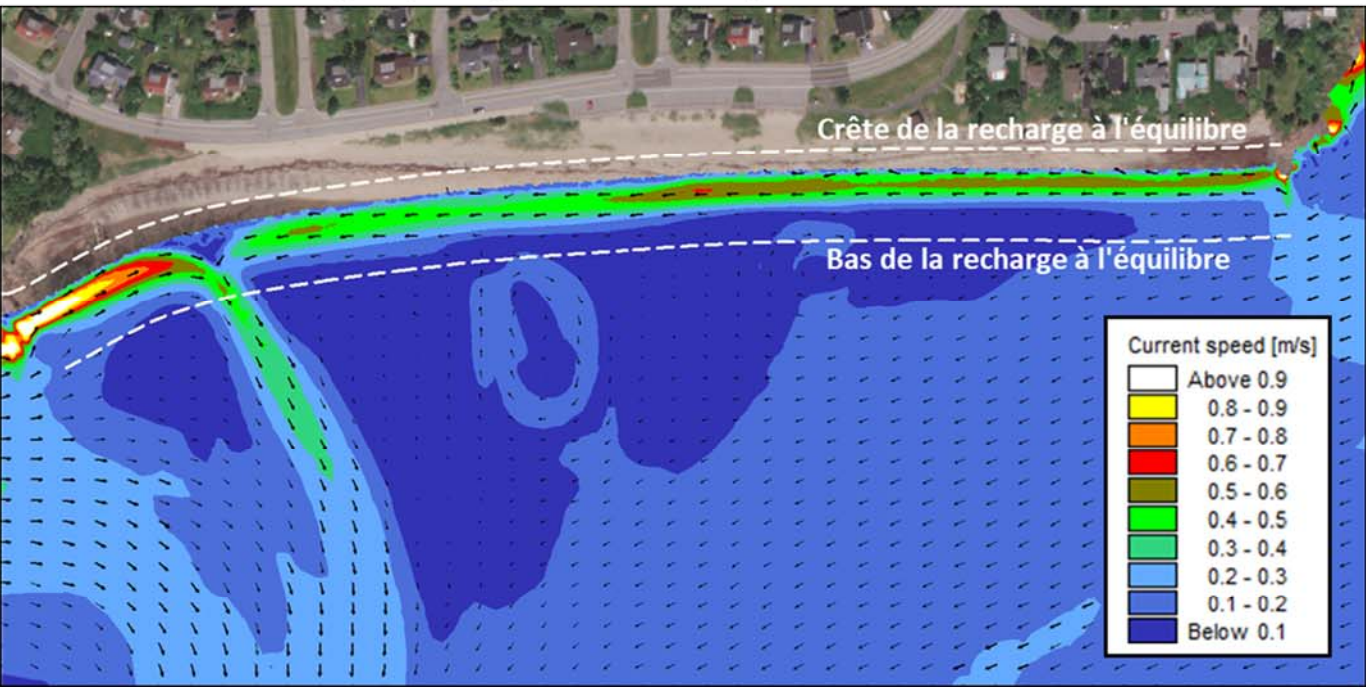
a) Tempête B (Hs=1.5 m & dir=185°) - Conditions naturelles



c) Tempête C (Hs=3.1 m & dir=115°) - Conditions naturelles



b) Tempête B (Hs=1.5 m & dir=185°) - Conditions futures (recharge granulaire V3)



d) Tempête C (Hs=3.1 m & dir=115°) - Conditions futures (recharge granulaire V3)

Figure 6.20 : Résultats de modélisation 2D des tempêtes B et C en conditions actuelles et futures

6.3.3 Modélisation 1D du transport transversal en conditions futures (recharge granulaire)

L'examen des photos historiques (section 6.1) ainsi que les résultats de simulations 2D (section 6.3.1) indiquent clairement que la problématique d'érosion aiguë ou ponctuelle issue des fortes tempêtes domine le processus de recul du haut de plage rendant les infrastructures et les propriétés riveraines vulnérables. Les résultats, indiquent notamment que la combinaison de vagues et de niveau d'eau d'événements extrêmes conduirait à des dommages importants pouvant compromettre l'intégrité de la route.

Pour les conditions actuelles, il a été possible de modéliser le transport transversal en 2D puisque les matériaux de la plage sont composés de sable (voir figures 6.14 à 6.20 à la section 6.3.1). Toutefois en conditions futures, la modélisation du transport transversal en 2D n'est plus possible en raison de la présence de matériaux grossier (gravier et galets), ceux-ci n'étant pas encore pris en compte par les modèles de transport sédimentaires 2D existant sur le marché (voir section 2.3.4 pour la comparaison entre le comportement des plages de sable et de matériaux grossiers). Pour cette raison, le transport transversal en conditions futures a été modélisée avec le modèle 1D XBeach-G spécialement conçu pour ce type d'analyse. Ce modèle permet aussi de modéliser le run-up des vagues, ce qui permet de valider la hauteur de crête de la plage qui est nécessaire pour résister aux tempêtes d'une récurrence donnée.

Aucune donnée de validation n'étant disponible pour la plage de Rochelois, les coefficients ont été réglés sur la base de cas de validation de XBeach-G présentant des similarités avec le site de Port-Cartier et publiés dans le cadre du développement du modèle [3].

Les cinq tempêtes de références établies à la section 5.4.2 ont été simulées pour deux types de profils distincts :

- Profil de construction de la recharge avec un matériau granulaire d'un diamètre typique de 15 mm;
- Profil théorique d'équilibre ($h=Ay^{2/3}$) de la recharge avec matériau granulaire d'un diamètre typique de 15 mm.

Profil de construction

Face à l'action des vagues, il est prévu que le profil initial de la recharge granulaire subisse une déformation afin d'éventuellement atteindre un certain état d'équilibre. Pour cette raison, le comportement du profil initial (à la construction) est d'abord évalué afin de valider que la position du pied de la recharge soit suffisamment éloignée vers le large et que le niveau de crête soit suffisamment élevé pour assurer la protection des infrastructures en haut de plage lors des fortes tempêtes.

La figure 6.21 illustre les résultats de modélisation de l'attaque frontale des vagues fournis par le modèle XBeach-G pour 5 événements de tempête. En guise de rappel, la tempête B est la seule en provenance du Sud (les autres étant en provenance de l'ESE).

Les résultats indiquent que le profil de construction se déforme rapidement sous l'action des tempêtes et tend à s'aligner avec le profil théorique d'équilibre. Cette constatation devient plus évidente à apercevoir dans le cas des tempêtes de forte intensité de l'ESE (tempêtes C, D et E d'une période de retour de 25, 50 et 100 ans respectivement). En effet, le haut de plage a tendance à subir un recul significatif (érosion) alors que le pied de plage subit une avancée (dépôt de sédiments). Le mécanisme induit un transfert de volume du haut de plage vers le pied de la plage avec une courbure générale qui tend vers le profil théorique d'équilibre. Les combinaisons de niveau d'eau et de hauteur de vagues pour les tempêtes A à C (10 ans à 25 ans) conduisent à une figure classique d'érosion de plage alors que les deux plus fortes tempêtes de la série (D et E) conduisent à la formation d'un bourrelet de gravier (swash bar) en haut de plage, à une érosion en milieu de plage et à une accumulation en bas de plage.

Dans le cas des tempêtes A à C (10 à 25 ans), l'action des vagues est maintenue en deçà de la crête de la pente de construction (élévation 5.4 m). À cet effet, l'élévation atteinte par le run-up des vagues (2% du temps) est de 5.2 m, 3.4 m et 5.4 m pour les tempêtes A, B et C respectivement. Ainsi, la combinaison de l'élévation atteinte par le run-up des vagues et de la pente raide de la plage ne permet pas la formation d'un bourrelet de gravier en haut de plage (swash bar) puisque les sédiments poussés vers le haut ont tendance à être ramenés vers le bas de plage.

Dans le cas des tempêtes D et E (50 à 100 ans), l'élévation atteinte par le run-up des vagues (2% du temps) est de 5.7 m et 6.0 m respectivement. Puisque le run-up excède la crête de la pente de construction (élévation 5.4 m), il se forme un bourrelet de gravier en haut de plage (swash bar) s'élevant grossièrement jusqu'à l'élévation du run-up de vagues. La formation du bourrelet de gravier se produit lorsque l'énergie de la remontée des vagues est dissipée en partie dans le mécanisme de transport des sédiments et en partie par percolation dans le massif de gravier, ce qui limite largement le transport des sédiments du haut de plage vers le bas de plage lorsque l'eau se retire, l'énergie de l'écoulement n'étant plus assez grande.

Les résultats de modélisation montrent qu'à partir de la crête de la pente de construction (élévation 5.4 m), le profil sera impacté sur une distance d'environ 20 m vers la terre (recul et bourrelet de gravier). Tel qu'illustré à la figure 4.7 à la p.22, la distance entre la crête de la pente de construction et le terrain existant peut atteindre 50 m pour la section Ouest de la plage rochelais (section la plus exposée). Cela laisse donc une zone tampon de 30 m de recharge granulaire à l'intérieur duquel le modèle numérique ne prévoit pas d'impact au niveau du transport transversal. Toutefois, il est important de garder à l'esprit que le modèle numérique contient une incertitude d'où la nécessité de maintenir cette zone tampon. De plus, cette zone tampon sera en mesure de recevoir les débris échoués issus des fortes tempêtes, ce qui épargnera l'état des infrastructures routières. Un autre aspect à considérer est aussi le recul supplémentaire de la plage qui pourrait survenir en raison d'un gradient de transport littoral. Cet aspect est traité en détails à la section 6.4.

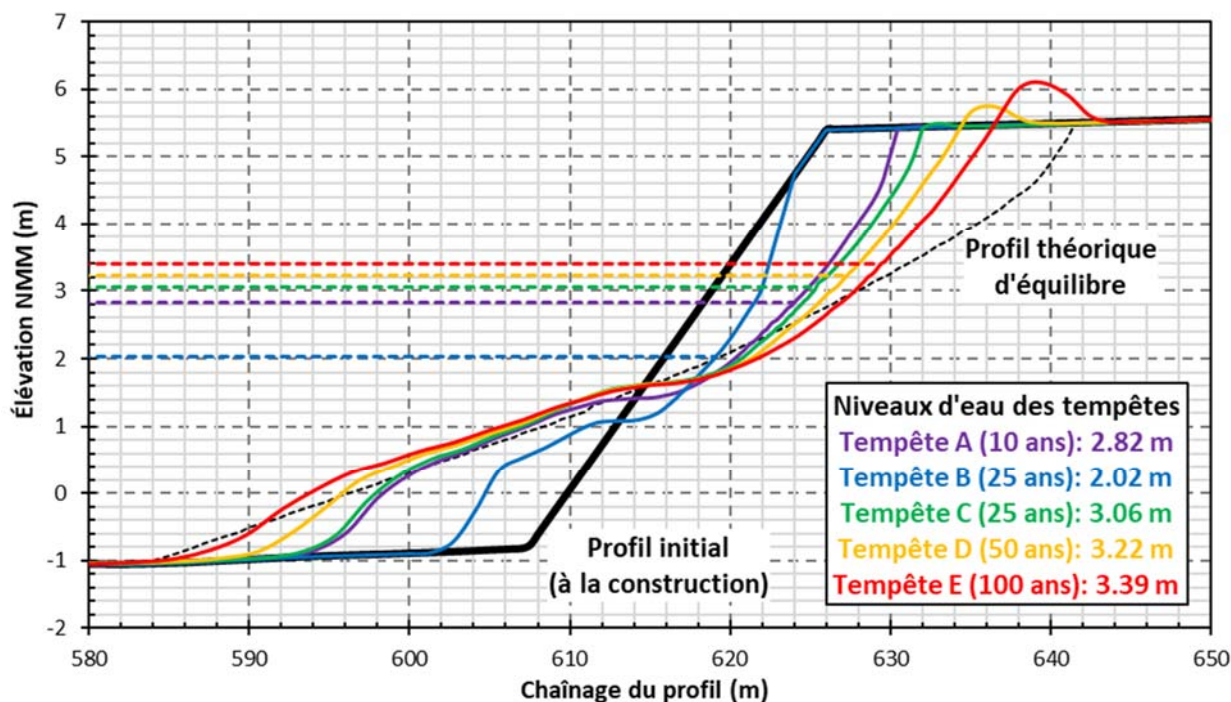


Figure 6.21 : Évolution du profil de construction sous différentes tempêtes

Profil d'équilibre ou profil adapté

Les résultats des simulations effectuées en considérant un profil d'équilibre sont présentés à la figure 6.22. Contrairement au profil de construction, les variations morphologiques sont relativement limitées et se traduisent pour tous les cas par la formation d'un bourrelet de gravier correspondant à la limite de la remontée des vagues en haut de plage. Aucun des cas simulés ne conduit à une érosion du haut de plage. La région du profil qui subit une érosion plus marquée est située directement sous le niveau considéré pour chaque cas. Pour le cas de tempête extrême (tempête E) le recul maximal est de l'ordre de 5 m à l'élévation 2 m soit près de 1,4 m sous le niveau simulé (3,4 m). Les résultats de la tempête B, moins intense et surtout survenant à niveau plus bas (2,02 m), conduit à une évolution morphologique similaire : il se crée un bourrelet de gravier juste au-dessus du niveau d'eau simulé et une érosion en dessous avec un recul maximal de près de 5 m à une profondeur de 1,5 m sous le niveau simulé, le haut de plage n'est pas atteint par la remontée des vagues ni par les mouvements morphologiques.

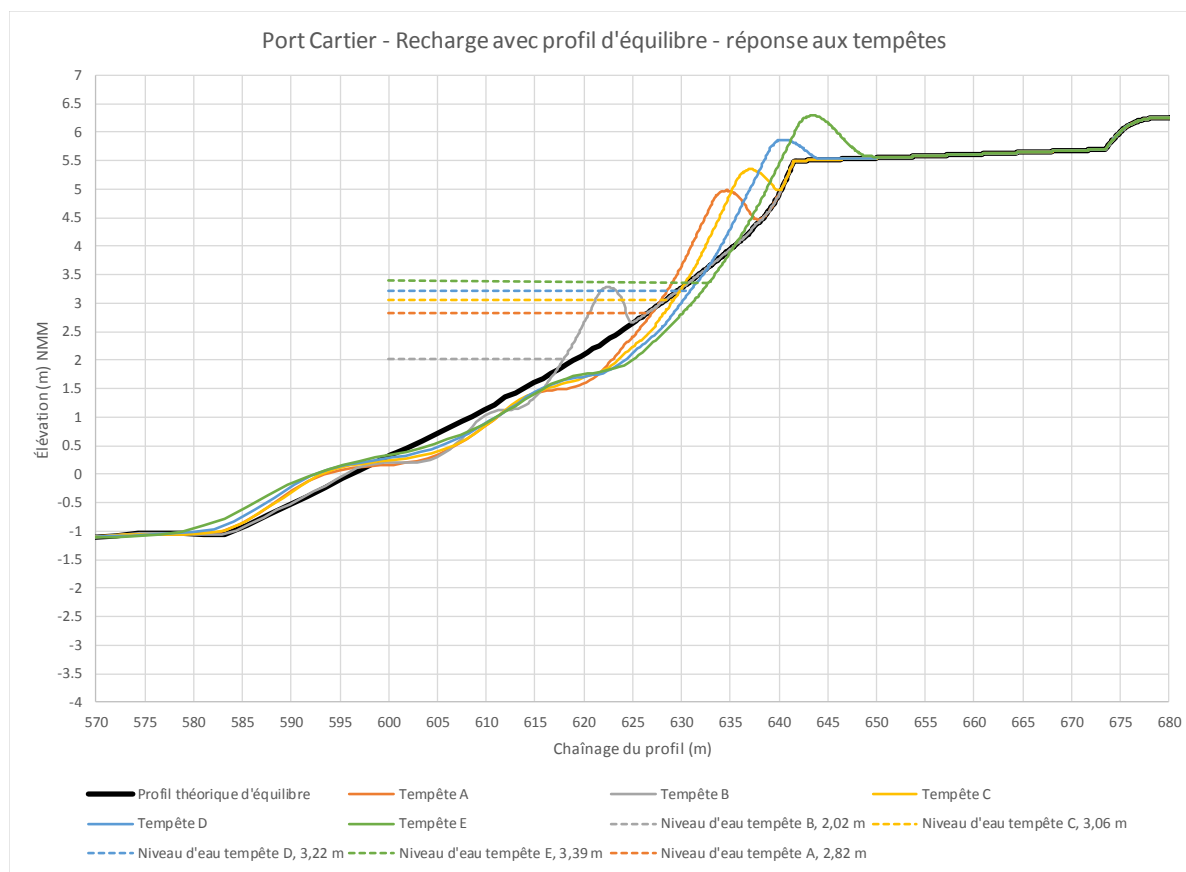


Figure 6.22 : Évolution du profil d'équilibre sous différentes tempêtes

Des essais de sensibilité ont été réalisés pour évaluer la succession de deux tempêtes : tempête B (faible période de retour et niveau d'eau bas de 2,02 m) suivi par la tempête E (très énergétique et niveau d'eau élevé de 3,39 m) et l'inverse, soit tempête E suivi par tempête B. La figure 6.23 illustre les résultats. Ces derniers montrent que la portion érodée du profil s'est adaptée à la tempête E et fait l'objet d'une accumulation lors de la tempête B qui suit du fait de la formation du bourrelet de gravier. La région inférieure du profil subit quant à elle une érosion. Ainsi le comportement de la plage de gravier conduit à un renforcement du haut de plage et du bas de plage et une érosion en milieu de plage. Les résultats pour le deuxième cas de succession de tempête indiquent que la morphologie du profil modelée par la première tempête de moindre intensité a peu d'influence sur la morphologie finale due à la tempête extrême qui suit. En effet on retrouve le profil engendré par la tempête E seulement.

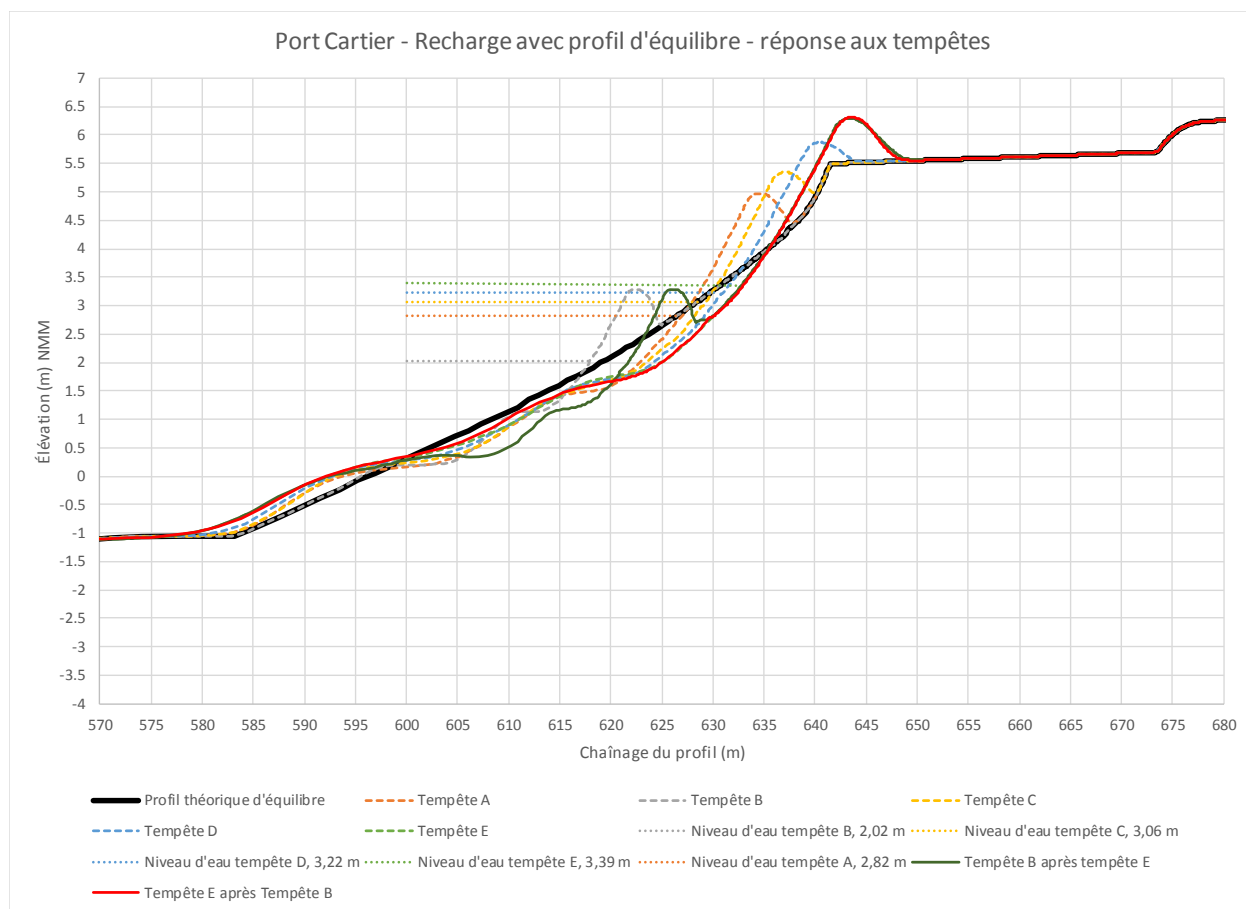


Figure 6.23 : évolution du profil d'équilibre sous différentes tempêtes – essais de sensibilité

Les résultats précédents proviennent de simulations qui ont été effectuées en considérant un niveau d'eau fixe pendant la durée de la tempête établie à 18 heures (voir détails section 5.3.4). Afin d'évaluer les effets du marnage en période de vive en eau de l'ordre de 3,3 m, les simulations ont été reprises en appliquant la hauteur de vague pendant 1,5 cycles de marée comprenant deux marées hautes, dont le niveau maximum correspondant au niveau fixe simulé précédemment. L'exercice a été effectué pour les tempêtes C et E. Les résultats obtenus, illustrés à la figure 6.24, montrent que le bourrelet de gravier est plus important en haut de plage et que la région érodée est plus basse dans le profil avec un recul plus marqué qu'avec le niveau fixe, soit près de 8 m contre près de 5 m précédemment. L'évolution morphologique du profil traduit l'impact des vagues sur une plus grande région du profil, ce qui tend vers un comportement plus réaliste qu'un niveau d'eau fixe pendant 18 heures.

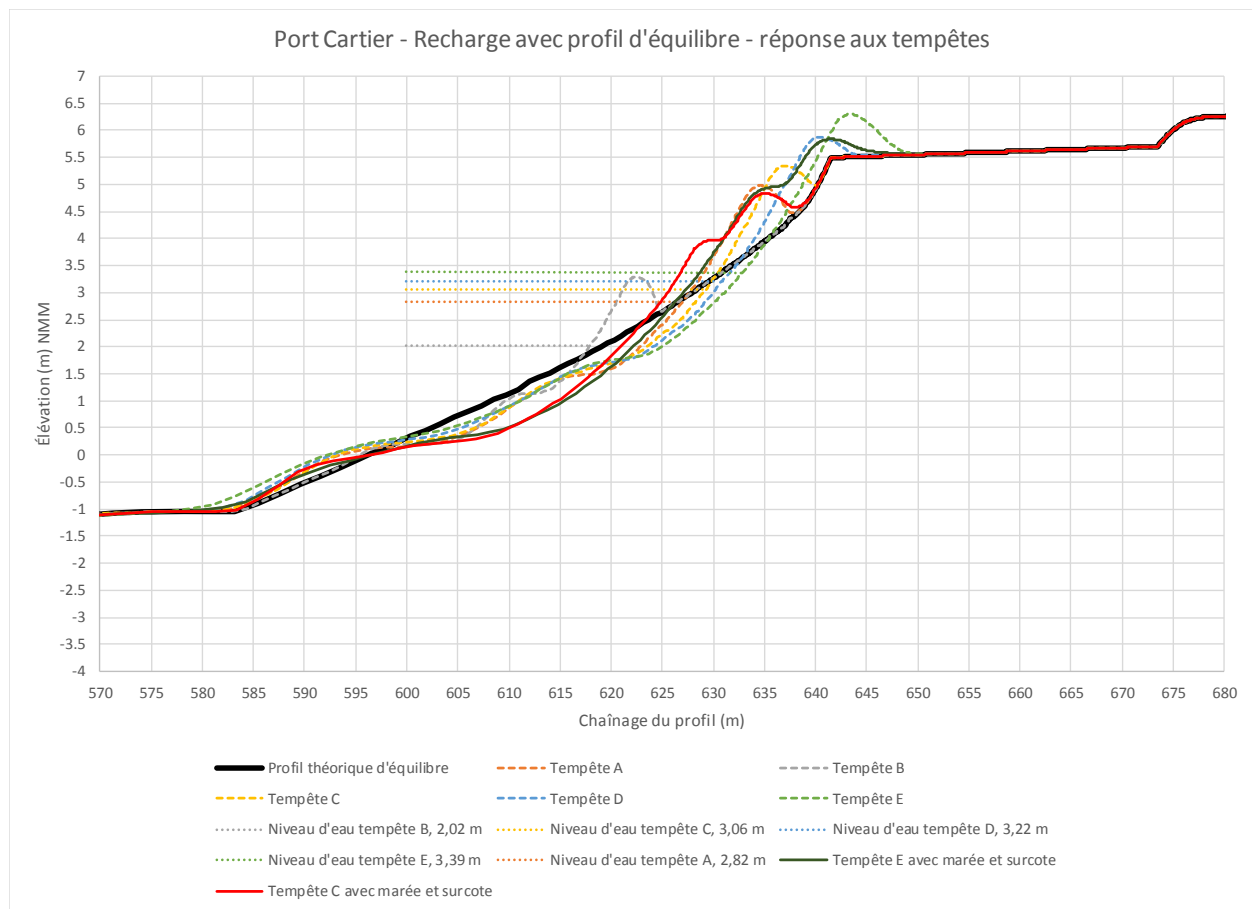


Figure 6.24 : évolution du profil d'équilibre sous différentes tempêtes – essais de sensibilité des marées

Une simulation combinant la succession des tempêtes A à E et des niveaux d'eau variables en fonction de la marée (période de vive eau) et des surcotes associées aux tempêtes a été réalisée afin de tester la stabilité du profil. La figure 6.25 illustrant les résultats indique que le profil se déforme de manière analogue à celui obtenu avec la tempête E avec le niveau d'eau variable en fonction du signal de marée incluant la surcote (figure 6.24) en présentant un bourrelet de gravier en haut de plage qui reflète la variabilité du niveau d'eau et une zone en recul d'environ 8 m à l'élévation 0,5 m.

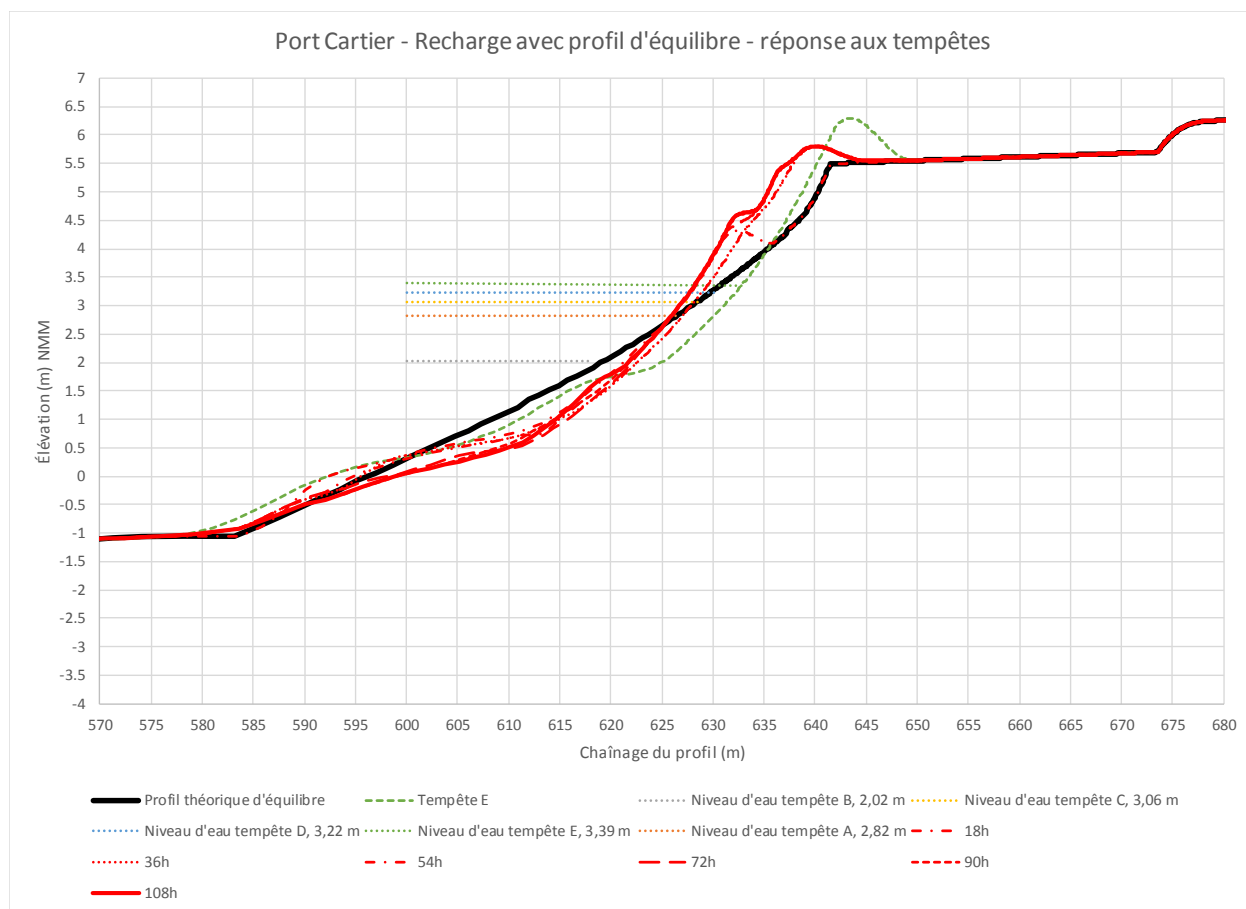


Figure 6.25 : évolution du profil d'équilibre lors de la succession des différentes tempêtes – essais de sensibilité des marées

L'ensemble des résultats indiquent que le profil théorique d'équilibre tend à se déformer sous l'action de tempêtes extrêmes. Toutefois les variations morphologiques conduisent à des profils d'adaptation aux tempêtes qui s'approchent du profil théorique initial. Soulignons que c'est la tempête la plus intense qui a tendance à dominer l'évolution morphologique, la succession des autres tempêtes conduit à des mouvements sédimentaires le long du profil sans réellement contribuer à augmenter le recul puisque la zone sous l'élévation 2 m est alternativement en érosion et en accumulation. Notons aussi que les profils post-tempête obtenus s'apparentent à ceux décrits par le modèle empirique de Powell [13].

Les résultats montrent essentiellement que la recharge avec un gravier de calibre $d_{50}=15$ mm et une berme à l'élévation 5,4 m d'une largeur pouvant atteindre 50 m offre une protection adéquate du haut de talus existant et des infrastructures routières adjacentes.

6.4 Modélisation 1D du transport littoral (long-terme)

6.4.1 Méthodologie employée

La modélisation du transport littoral à long-terme (plusieurs années) permet d’anticiper l’évolution de la ligne de plage au fil des années. Les modèles conventionnels de transport sédimentaire bidimensionnels ne permettent pas d’effectuer ce type d’analyse puisqu’à long-terme, l’accumulation des petites erreurs numériques sur une longue période devient problématique envers le calcul de l’évolution morphologique.

Afin de calculer l’évolution morphologique à long-terme, les modèles conventionnels de transport littoral utilisent une approche filaire (1D). Une telle approche consiste brièvement à discrétiser une ligne de plage en un nombre défini de transects et de calculer le transport littoral à chacun de ces transects. En analysant la variation du transport littoral d’un transect à un autre, il est ainsi possible de déduire si la ligne de plage sera en érosion ou en accrétion.

Il existe actuellement quelques modèles filaires sur le marché qui permettent de modéliser le transport littoral à long-terme et le modèle LITPACK par la firme DHI en est un exemple. Toutefois dans le cadre de l’étude de Port-Cartier, il ne s’est pas avéré possible d’utiliser cet outil puisque la bathymétrie à proximité de la plage Rochelois est trop complexe pour respecter l’hypothèse de quasi-uniformité de ce modèle.

Compte tenu de la spécificité du secteur de la plage Rochelois, une méthode hybride 1D-2D a été utilisée pour modéliser le transport littoral à long-terme. À cet effet, la transformation des vagues a été modélisée en 2D alors que le transport littoral (issu des vagues du modèle 2D) a été calculé en 1D. Les détails concernant la méthodologie utilisée suivent dans cette section.

Tel qu’illustré sur la figure 6.26, la plage Rochelois a été discrétisée en 70 profils perpendiculaires à celle-ci. L’espacement entre chacun de ces profils est de 10 m et leur résolution est 1 m.

Les 72 événements présentant différentes combinaisons de niveaux d’eau, hauteurs et directions de vagues (voir tableau 5.11 p.48) ont été modélisés en 2D. Pour chacun de ces 72 événements, les propriétés des vagues ont été extraites au point de déferlement et ce, pour chacun des 70 profils considérés de la plage Rochelois.

À partir des propriétés des vagues au point de déferlement, le transport littoral a été calculé à l’aide de l’équation Kamphuis 1986. À cet effet, l’équation Kamphuis 1991 n’a pas été utilisée dans la présente étude puisque les travaux de recherche effectués par Van Wellen en mars 2000 ont démontré que la version plus récente de cette équation surestime fortement le transport de gravier et galets puisque cette équation a originalement été dérivée pour le transport de sable [11], [12].

Équation Kamphuis 1986 :

$$Q = 1.28 \frac{m \times H_{sb}^{3.5}}{D} \sin 2\theta_b$$

Q: Transport littoral (kg/s)

m: Pente de la plage

H_{sb}: Hauteur significative de la vague au déferlement (m)

D: Diamètre du granulat (m)

θ_b: Angle entre la provenance de la vague et l’orientation de la ligne de côte (°)

La formulation de Kamphuis tient compte de l'orientation de la ligne de plage dans le calcul du transport littoral. Toutefois, il peut parfois être difficile de définir, pour un profil donné, l'angle de la ligne de plage à cet endroit et ce particulièrement dans un cas où la bathymétrie est complexe. Pour cette raison, le calcul du transport littoral a été effectué en considérant différentes isobathes pour définir l'angle de la ligne de plage à utiliser. Une telle approche permet ainsi d'analyser le bruit induit par le paramètre de la direction.

À partir des résultats de transport littoral calculés pour les 72 événements de vagues, les occurrences (h/année) de chacun de ces 72 événements ont été utilisées pour calculer un bilan annuel. Cette opération a été réalisée pour chacun des 70 profils considérés de la plage Rochelois.

La méthodologie employée dans cette étude permet ainsi d'obtenir la magnitude (brut et net) du transport littoral, le gradient de transport ainsi que la direction dominante du transport. Cette méthodologie a été appliquée pour calculer le transport littoral en conditions actuelles ainsi qu'en conditions futures. À ce propos, les résultats obtenus en conditions futures ont permis d'optimiser l'orientation de la recharge granulaire afin d'obtenir les variantes V1, puis V2 et finalement V3. Les sections 6.4.2 et 6.4.3 présentent les résultats en conditions actuelles et futures respectivement.

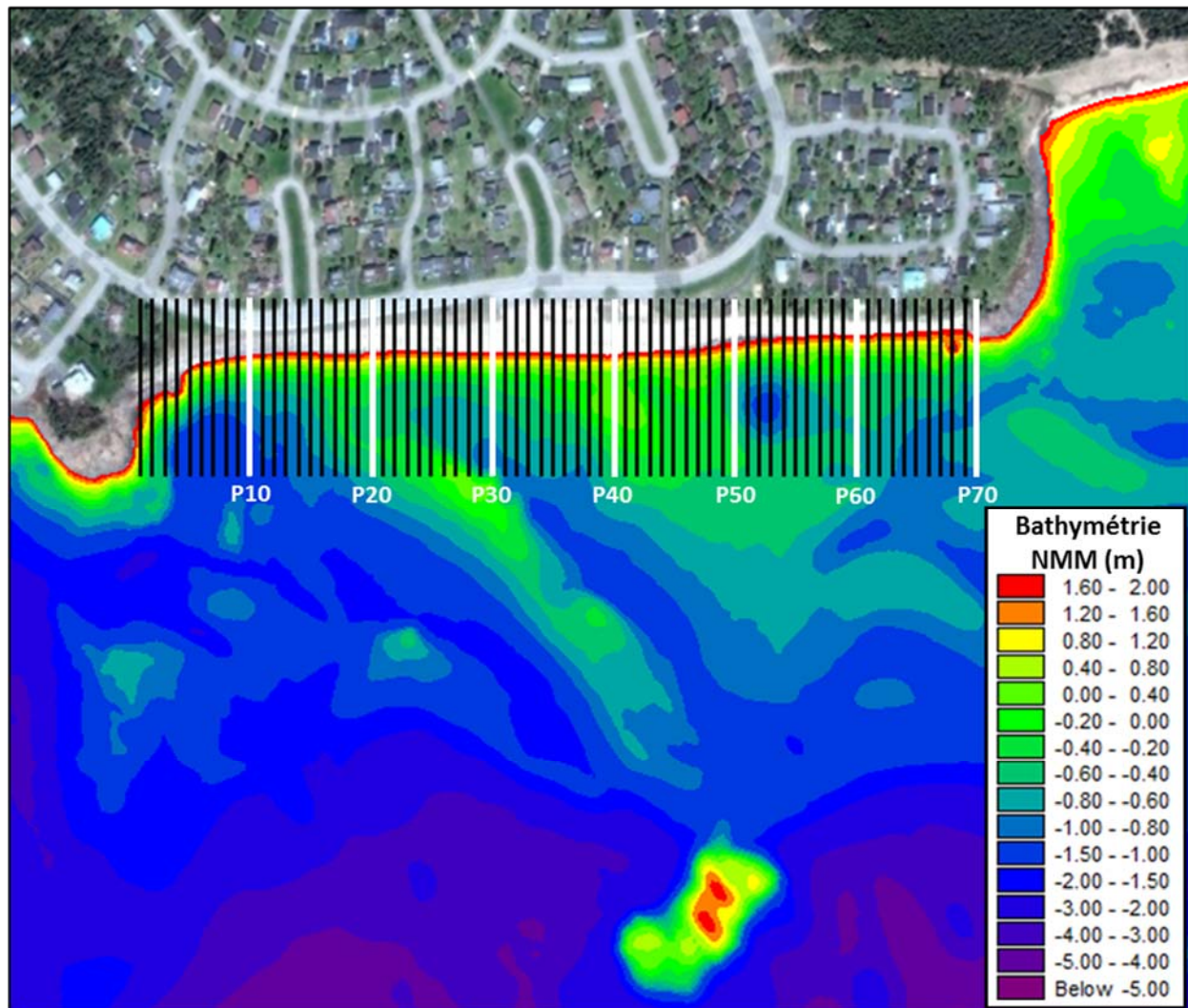


Figure 6.26 : Profils de calcul pour le transport littoral

6.4.2 Modélisation du transport littoral en conditions actuelles

La figure 6.27 présente les résultats de modélisation du transport littoral en conditions actuelles. Tel que mentionné précédemment, le calcul du transport littoral a été effectué en considérant différentes isobathes pour définir l'angle de la ligne de plage à utiliser pour un profil donné (lignes jaunes sur les graphiques). Ce même calcul a également été effectué en considérant l'angle moyen des isobathes (lignes rouges). L'ensemble de ces résultats a été obtenu en considérant une granulométrie (d_{50}) constante de 0,5 mm.

Sur ces graphiques, un transport négatif indique que le transport est orienté vers la droite alors qu'un transport positif implique un transport orienté vers la gauche (l'axe des Y est inversée sur les graphiques).

Lorsque le gradient du transport littoral est positif (transport croissant de gauche à droite), il se produit un déficit en sédiments : la quantité de sédiments en provenance de l'amont (par rapport à la direction du transport) est insuffisante pour combler le départ de sédiments vers l'aval. Une telle situation engendre une zone d'érosion (recul de la plage). À ce propos, un gradient élevé du transport (pente croissante abrupte) engendre une forte érosion alors qu'un gradient faible de ce transport (pente croissante douce) résulte en une faible érosion.

Lorsque, au contraire, le gradient du transport littoral est négatif (transport décroissant de gauche à droite), il se forme un excédent de sédiments : la quantité de sédiments en provenance de l'amont excède la quantité de sédiments nécessaires pour combler le départ de sédiments vers l'aval. Une telle situation engendre ainsi une zone d'accrétion (avancée de la plage). Une pente décroissante abrupte de la courbe de transport engendre une forte accrétion alors qu'une pente décroissante douce de la courbe de transport résulte en une faible accrétion.

La figure 6.27b montre que, d'une manière générale, le transport brut (dans les deux directions en valeur absolue) est plus important à l'Ouest du profil 20 (P20). En effet à l'Est de ce profil, l'énergie des vagues est dissipée par le rocher qui agit d'une manière analogue à un brise-lames détaché, ce qui tend à réduire le transport littoral. Ces résultats concordent avec ceux issus de la modélisation 2D présentés précédemment à la section 6.3.2.

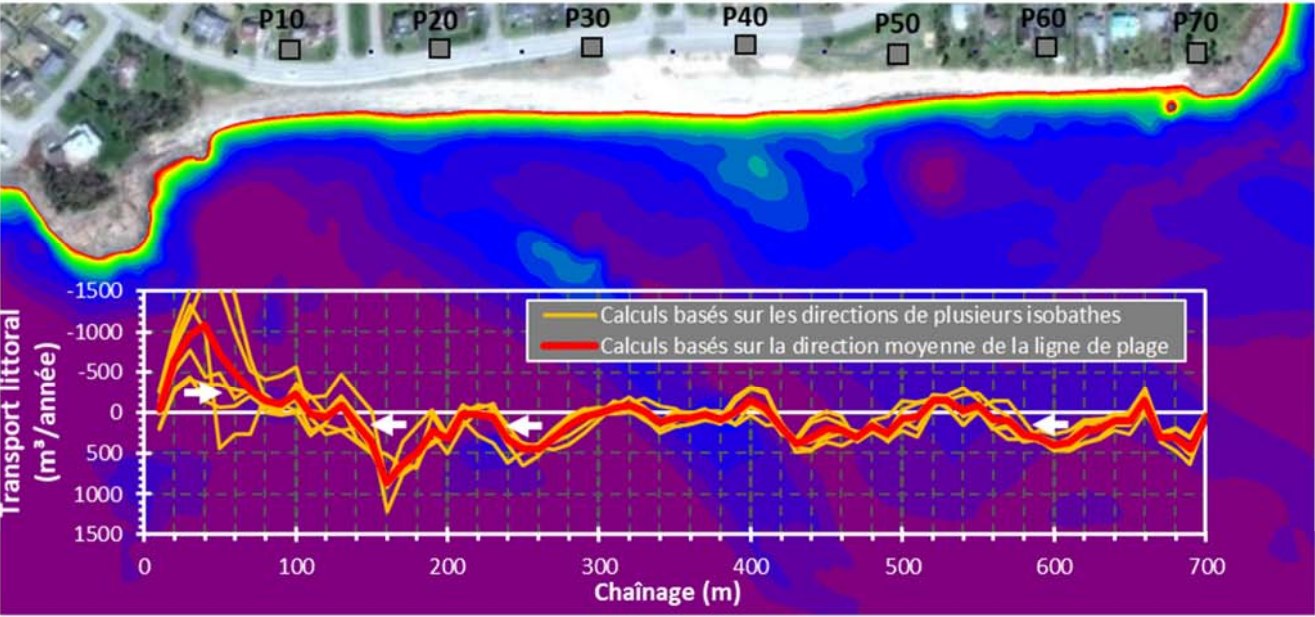
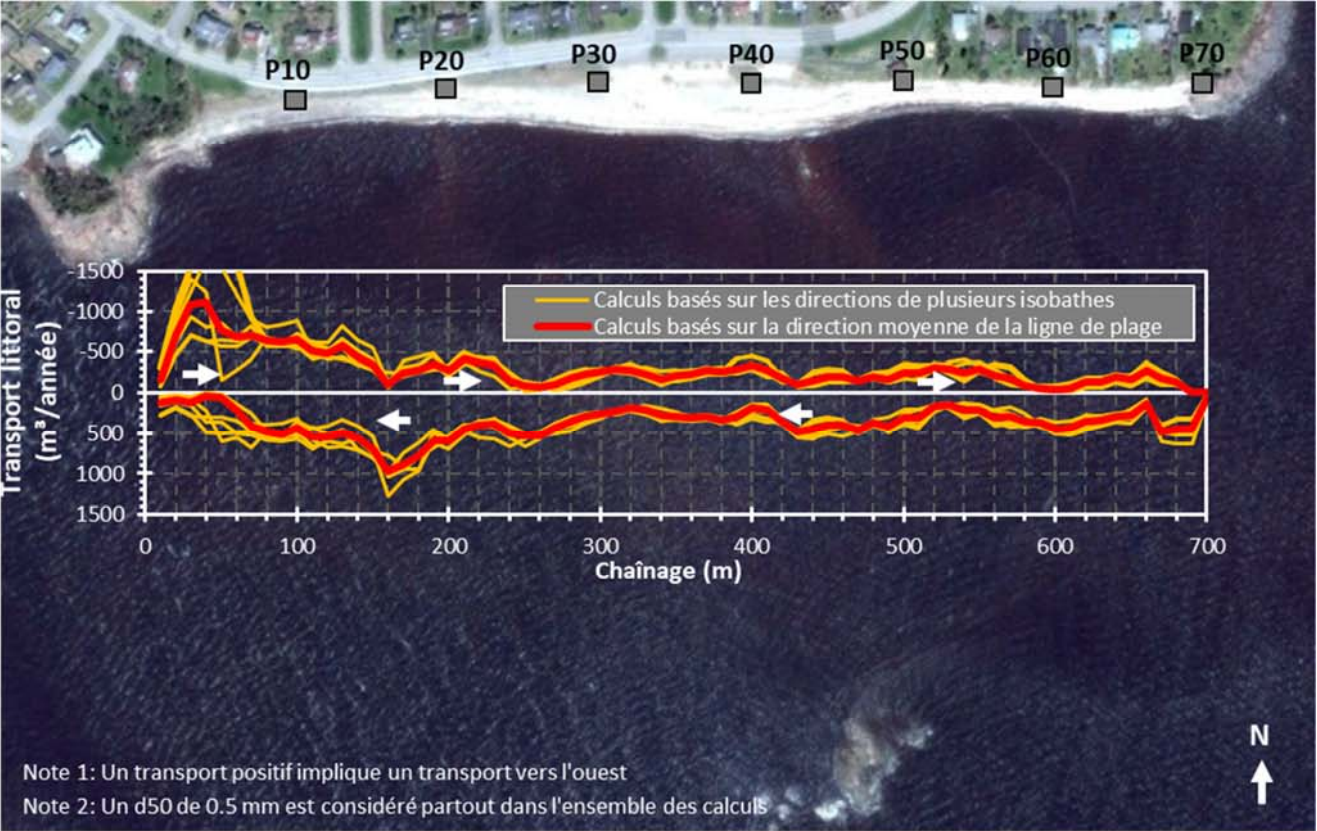
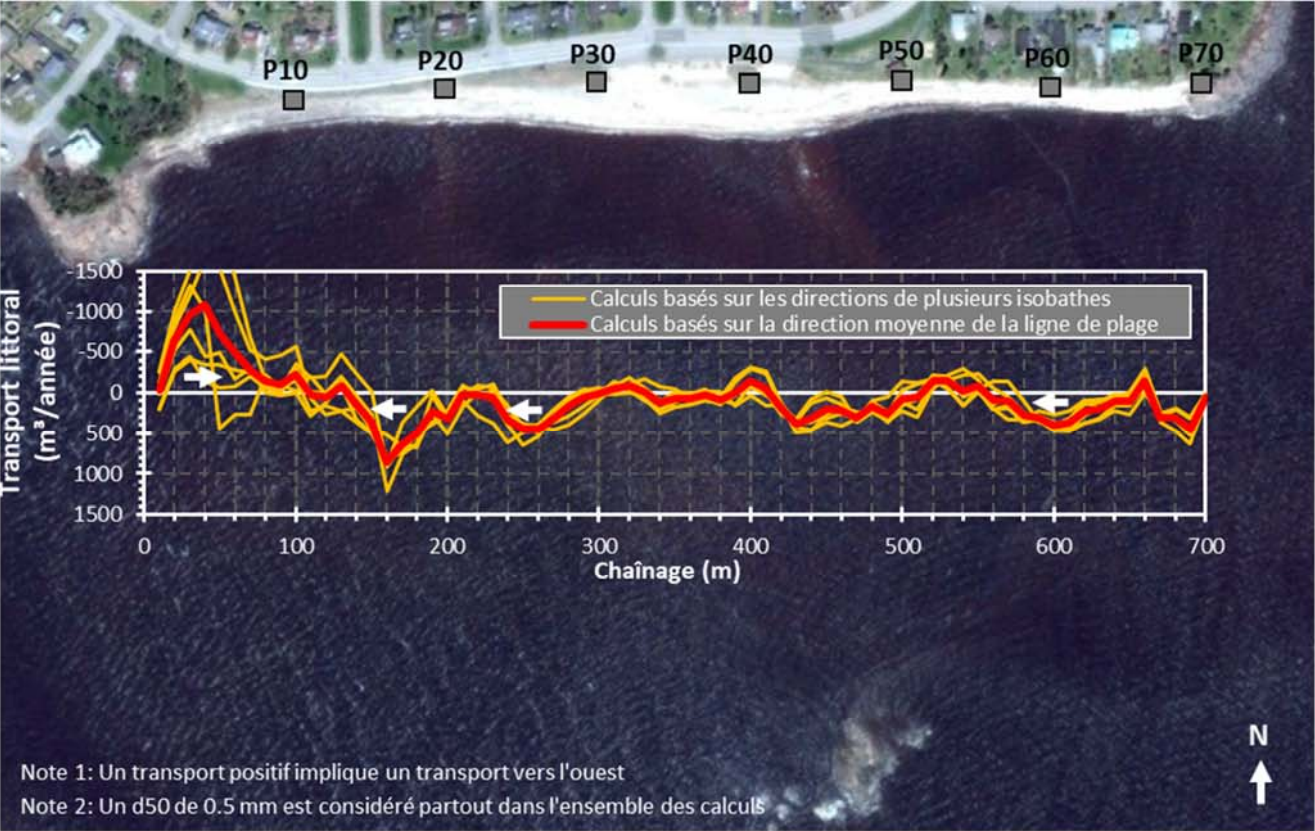
La figure 6.27a montre qu'entre les chaînages 0 m et 80 m, le transport littoral net est essentiellement orienté vers l'Est. Cela concorde avec la direction des courants littoraux modélisés en 2D, ceux-ci étant générés par les vagues qui frappent les rochers à l'extrémité Ouest de la plage Rochelois (voir section 6.3.2). Il faut toutefois mentionner que la magnitude du transport littoral modélisé pour cette section de la plage est fort probablement surestimée puisqu'une granulométrie constante de 0,5 mm a été considérée dans le calcul malgré le fait qu'une bonne portion de cette plage soit non érodable (présence de rochers).

La figure 6.27a montre qu'à l'est du chaînage 80 m, le transport littoral net est voisin de 0 m³/année avec un léger penchant vers l'Ouest. Cette constatation concorde avec les résultats de modélisation 2D qui révèlent des courants littoraux de faible vitesse orientés vers l'Ouest. Cela indique donc que l'effet à long

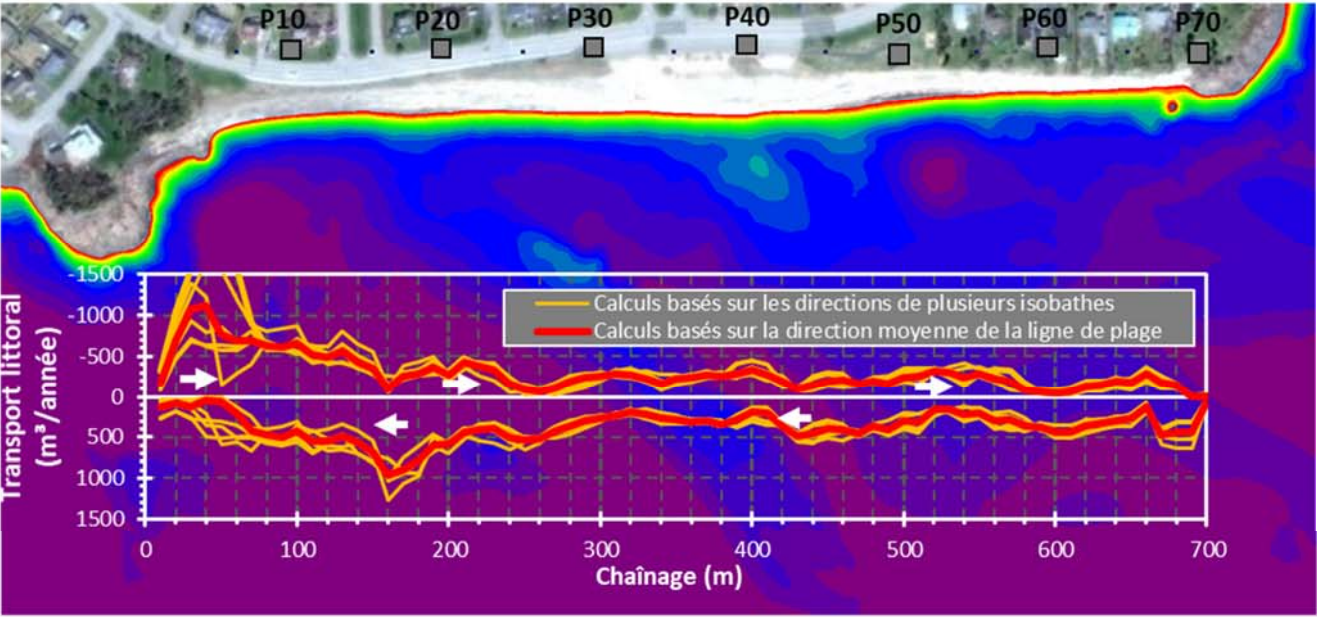
terme du transport littoral de cette zone est faible par rapport au transport transversal, ce qui concorde avec les conclusions de l'analyse historique du site (section 6.1).

La figure 6.29 montre le transport littoral pour quelques événements de vagues. En comparant les événements 27 et 63 entre eux, de même que les événements 36 et 72 (mêmes propriétés de vagues, mais niveau d'eau différent), il est possible de constater l'impact majeur du niveau d'eau sur la magnitude du transport sédimentaire. En effet lorsque le niveau d'eau est modéré (1,2 m), l'énergie des vagues a tendance à être dissipée plus facilement par la bathymétrie peu profonde au large de la plage Rochelois ce qui tend à réduire la magnitude du transport sédimentaire. Toutefois lorsque le niveau d'eau est relativement élevé (2,1 m), l'énergie des vagues a tendance à se maintenir davantage avant d'atteindre la plage Rochelois ce qui tend à augmenter le transport sédimentaire.

La figure 6.28 présente les propriétés moyennes des vagues (pondérées sur l'occurrence des événements) au point de déferlement pour l'ensemble de la plage Rochelois. La figure 6.28a montre que la hauteur moyenne des vagues (H_s) est plus élevée à la section Ouest de la plage puisque la section Est subit une certaine protection naturelle grâce à l'îlot rocheux. La figure 6.28b montre, quant à elle, la direction moyenne des vagues et offre également une comparaison avec l'orientation de la ligne de plage. Cette figure révèle ainsi que la direction des vagues au point de déferlement est pratiquement perpendiculaire (à 10 degrés près) à la ligne de plage de la plage Rochelois. Cette constatation explique les faibles vitesses des courants littoraux modélisés, ce qui, en conséquence, se traduit en un relativement faible transport littoral.

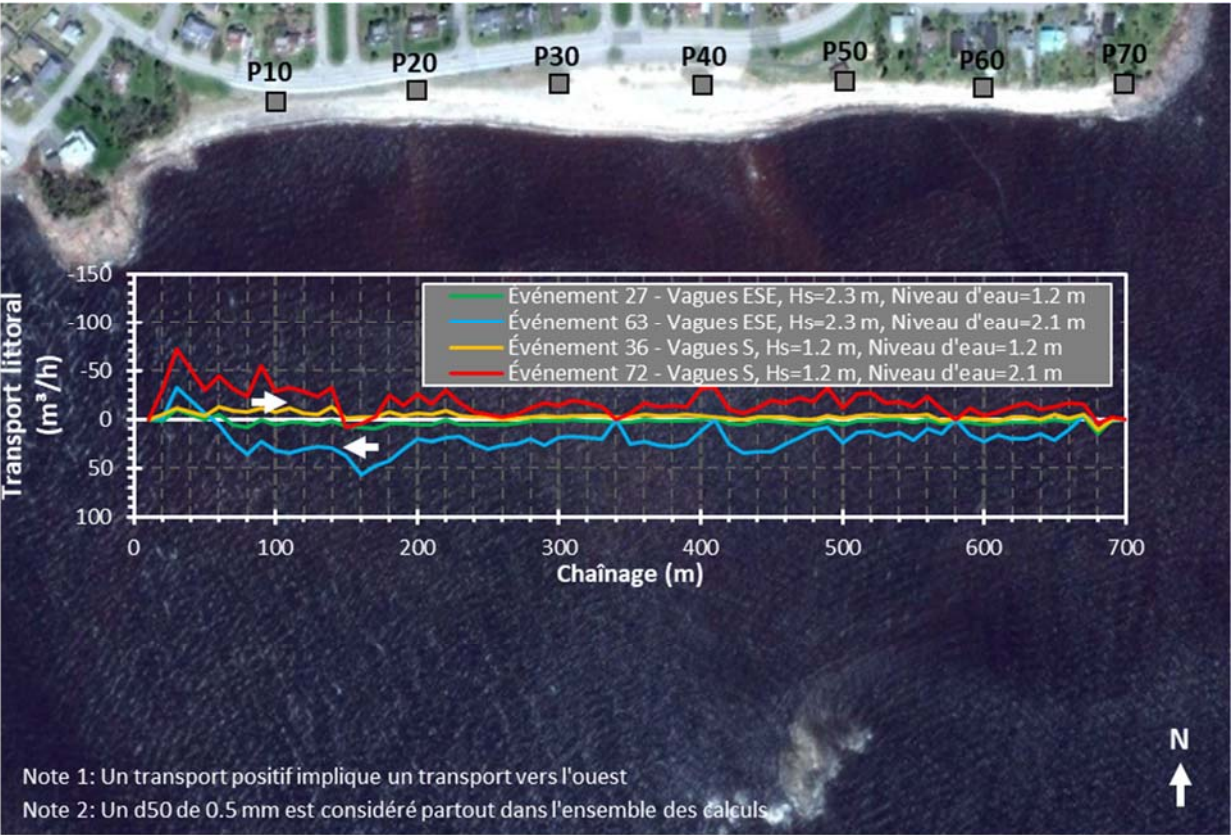


a) Transport littoral net - Image satellite (haut) et bathymétrie (bas) en arrière plan



b) Transport littoral brut - Image satellite (haut) et bathymétrie (bas) en arrière plan

Figure 6.27 : Résultats de modélisation du transport littoral en conditions actuelles



a) Transport littoral de quelques événements typiques de vagues - Vue Google Earth

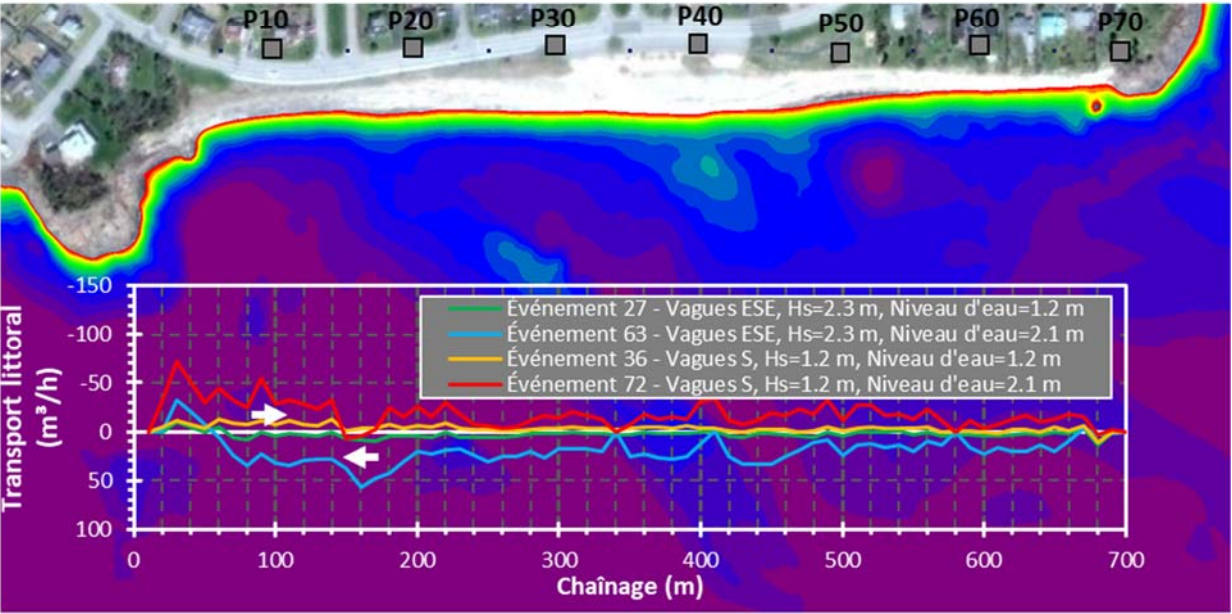


Figure 6.29 : Transport littoral pour quelques événements typiques de vagues

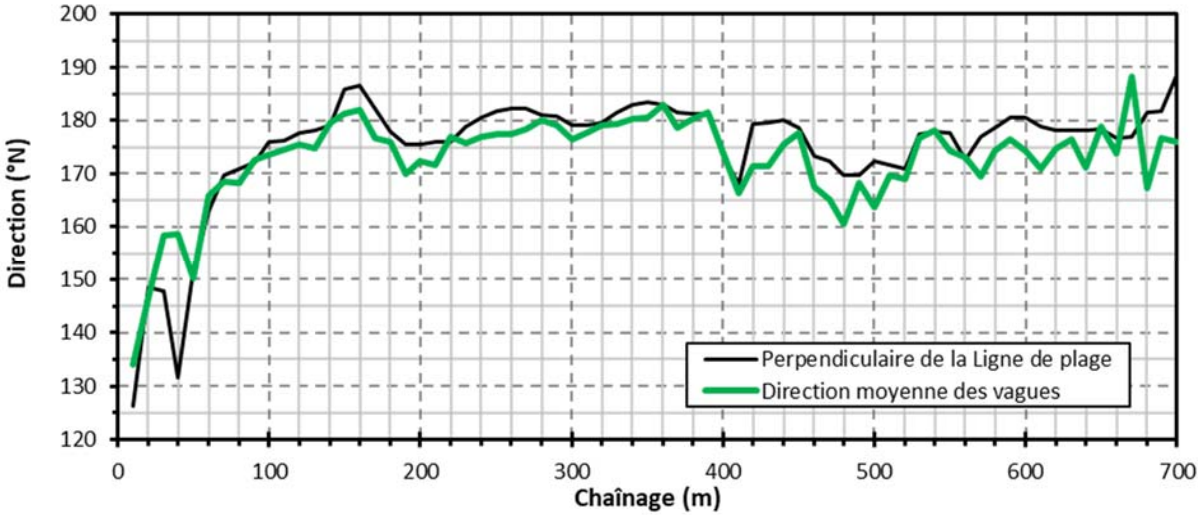
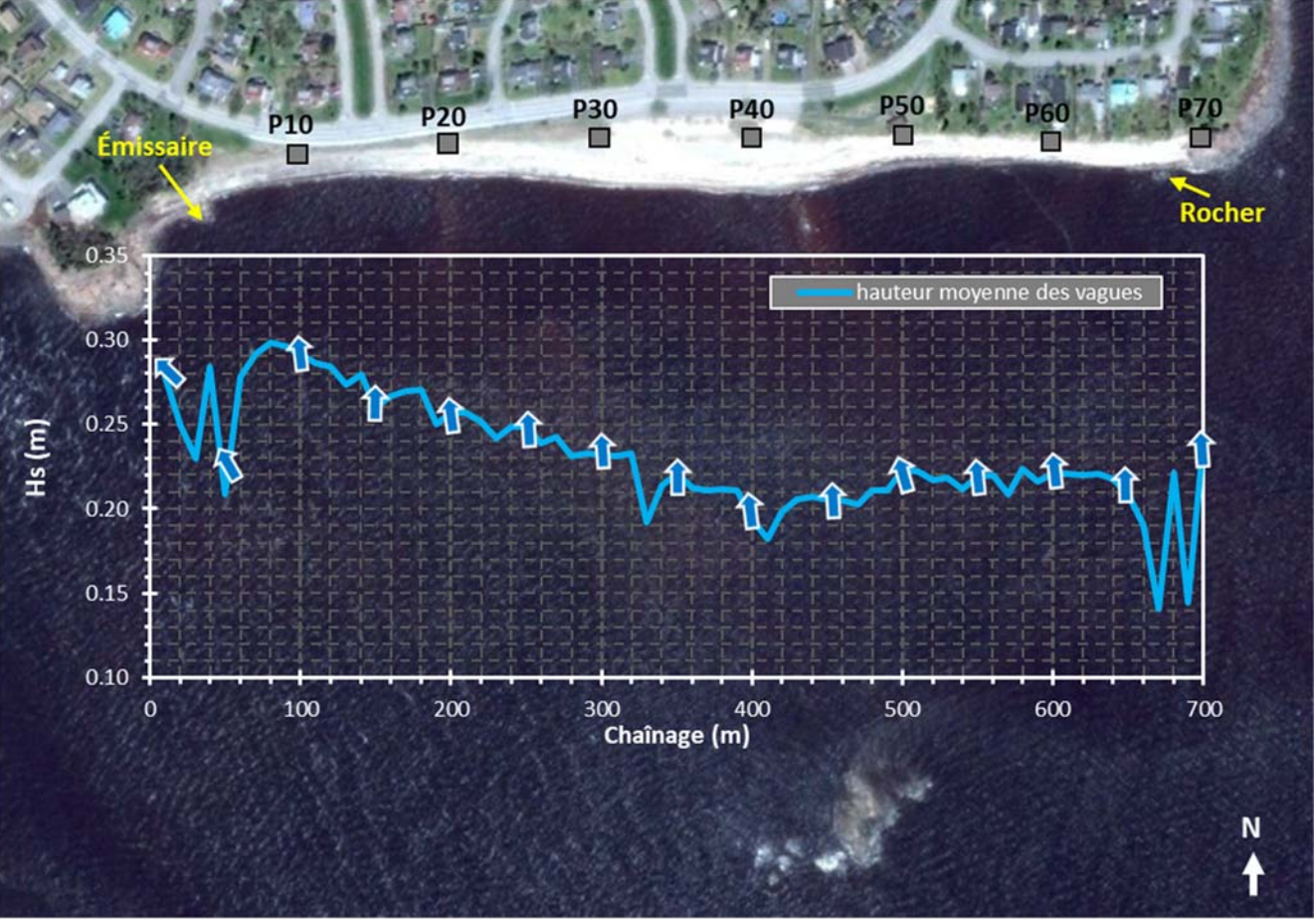


Figure 6.28 : Hauteur (Hs) et direction des vagues au déferlement en conditions actuelles

6.4.3 Modélisation du transport littoral en conditions futures (recharge granulaire)

Cette section présente les résultats de modélisation du transport littoral en conditions futures, c'est-à-dire en tenant compte de la géométrie de la recharge granulaire dans la méthodologie présentée à la section 6.4.1. Tel que mentionné à la section 4.5, les travaux de modélisation du comportement hydro-sédimentaire ont permis d'optimiser la recharge granulaire (initialement la variante V1) afin d'obtenir la « Variante V2 » en premier lieu, puis la « Variante V3 » en second lieu.

Cette section a pour but de présenter les éléments ayant permis d'optimiser la géométrie et l'orientation de la recharge granulaire. À cet effet, une plus grande emphase sera mise sur la présentation des résultats du transport littoral pour la recharge granulaire optimisée, soit la variante V3, dans le but de mettre en lumière le comportement qui sera prévu pour cette recharge granulaire dans le futur.

La figure 6.32 présente les résultats de modélisation du transport littoral en conditions futures (avec la recharge granulaire V3). Les figures 6.30 et 6.31 affichent, quant à elles, les résultats de modélisation pour les variantes de recharge intermédiaires (V1 et V2) permettant l'optimisation de la recharge granulaire. Dans tous les cas, les résultats ont été obtenus en considérant une granulométrie (d_{50}) constante de 15 mm.

Recharge granulaire V1 (variante intermédiaire)

La variante V1 de la recharge granulaire, présentée à la figure 6.30, s'étend de l'émissaire (à l'Ouest de la plage) jusqu'à l'extrémité Est de la plage rochelais où est prévue un épi.

La figure 6.30 révèle une discontinuité au niveau du transport littoral à l'extrémité Ouest de la recharge granulaire. Cette discontinuité est due à l'orientation de la ligne de plage qui varie brusquement à l'extrémité Ouest de la recharge granulaire, celle-ci n'étant pas appuyée sur des rochers ou un épi.

Un gradient positif du transport littoral net est ainsi observé au chaînage 50 m sur la figure 6.30a, ce qui se traduit en une zone d'érosion. À cet effet, cette section de la recharge est jugée comme étant instable puisqu'en se basant sur les gradients de transport calculés ($+7 \text{ m}^3/\text{m}/\text{année}$), le recul anticipé serait de 3,5 m pour la première année¹. La recharge granulaire serait donc remodelée très rapidement à son extrémité Ouest, un secteur critique étant donné la forte exposition aux vagues.

Afin de bonifier la protection du littoral à long-terme, la prochaine variante (V2) présente quelques ajustements au niveau de la géométrie afin de corriger la problématique de la discontinuité à l'extrémité Ouest de la recharge.

¹ Ce recul est calculé uniquement sur la base du gradient de transport littoral et ne tient pas compte du recul supplémentaire engendré par le transport transversal issu des tempêtes ponctuelles.

Recharge granulaire V2 (variante intermédiaire)

La variante V2 de la recharge granulaire, présentée à la figure 6.31, s'étend des rochers à l'Ouest de la plage Rochelois jusqu'à l'extrémité Est de cette plage. Contrairement à la version antérieure, la variante V2 ne contient pas d'épi à son extrémité Est.

La figure 6.31a montre que la problématique de discontinuité à l'Ouest de la recharge a été réglée en prolongeant la recharge jusqu'aux rochers à l'Ouest de la plage Rochelois. Toutefois, un gradient positif notable ($+0,7 \text{ m}^3/\text{m}/\text{année}$) persiste au chaînage 50 m ce qui équivaut en un recul de 0,4 m pour la première année¹.

Un autre aspect à considérer est la possibilité de perte de matériaux granulaires par dérive littorale à l'extrémité Est de la recharge. En effet, la figure 6.31b révèle un transport littoral non-négligeable vers l'Est au chaînage 700 m, soit à l'extrémité de la recharge. De plus, la figure 6.31a montre que le transport littoral net (en intégrant les deux directions) n'est pas nul à cet endroit ce qui indique que les matériaux étant transportés vers l'Est durant une tempête ne seront pas nécessairement ramenés vers l'Ouest durant une autre tempête.

Dans le but d'augmenter la stabilité de la recharge, une autre variante (V3) permet de régler la problématique du gradient de transport au chaînage 50 m en plus de traiter de la possibilité de perte de matériaux granulaires par dérive littorale à l'extrémité Est de la recharge.

Recharge granulaire V3 (variante optimisée)

La variante V3 de la recharge granulaire, présentée à la figure 6.32, s'étend des rochers à l'Ouest de la plage Rochelois jusqu'à l'extrémité Est de cette plage où est prévue un épi submersible.

La figure 6.32b montre que le transport littoral brut est orienté vers l'Est entre les chaînages 0 et 400 m et vers l'Ouest entre les chaînages 400 et 700 m. Un point de convergence est ainsi localisé vers le milieu de la recharge, soit au chaînage 400 m. Un tel patron de transport littoral est bénéfique puisque cela permet à la recharge granulaire de conserver ses matériaux à l'intérieur de son périmètre plutôt que de les perdre par dérive littorale vers ses extrémités.

La figure 6.32a montre trois zones de gradient de transport positif. La première zone est située à l'extrémité Ouest (chaînage 10 m) de la recharge granulaire. Ce gradient positif est dû à la transition de la zone non-érodable (rocher à l'Ouest de la plage Rochelois) vers le début de la recharge granulaire (son extrémité Ouest). Cela résulte ainsi en un gradient positif ($+3,6 \text{ m}^3/\text{m}/\text{année}$) résultant en un recul de 1,8 m pour la première année². La vitesse de recul devrait toutefois diminuer au fil des années puisque l'orientation de la ligne de plage s'adaptera d'une manière à se rapprocher de son état d'équilibre. De plus, il est important de préciser que cette section est très éloignée des infrastructures vulnérables telles que la route.

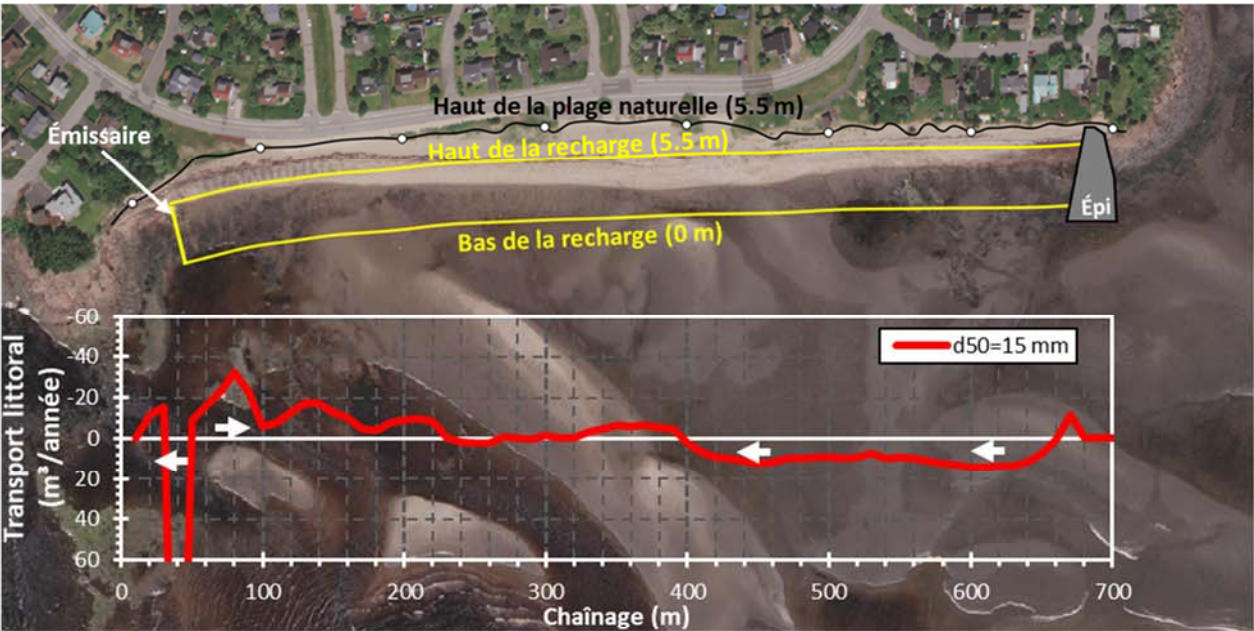
² Ce recul est calculé uniquement sur la base du gradient de transport littoral et ne tient pas compte du recul supplémentaire engendré par le transport transversal issu des tempêtes ponctuelles.

La deuxième zone, localisée au chaînage 320 m, se caractérise par un gradient positif faible ($+0,13 \text{ m}^3/\text{m}/\text{année}$) ce qui équivaut à un recul de 6 cm pour la première année². La troisième, localisée au chaînage 650 m, se caractérise par un gradient positif faible ($+0,19 \text{ m}^3/\text{m}/\text{année}$) ce qui équivaut à un recul de 9 cm pour la première année². Dans les deux cas, le recul anticipé demeure d'un ordre de grandeur largement inférieur au recul pouvant être généré par le transport transversal issu des fortes tempêtes (recul aux alentours de 10 m).

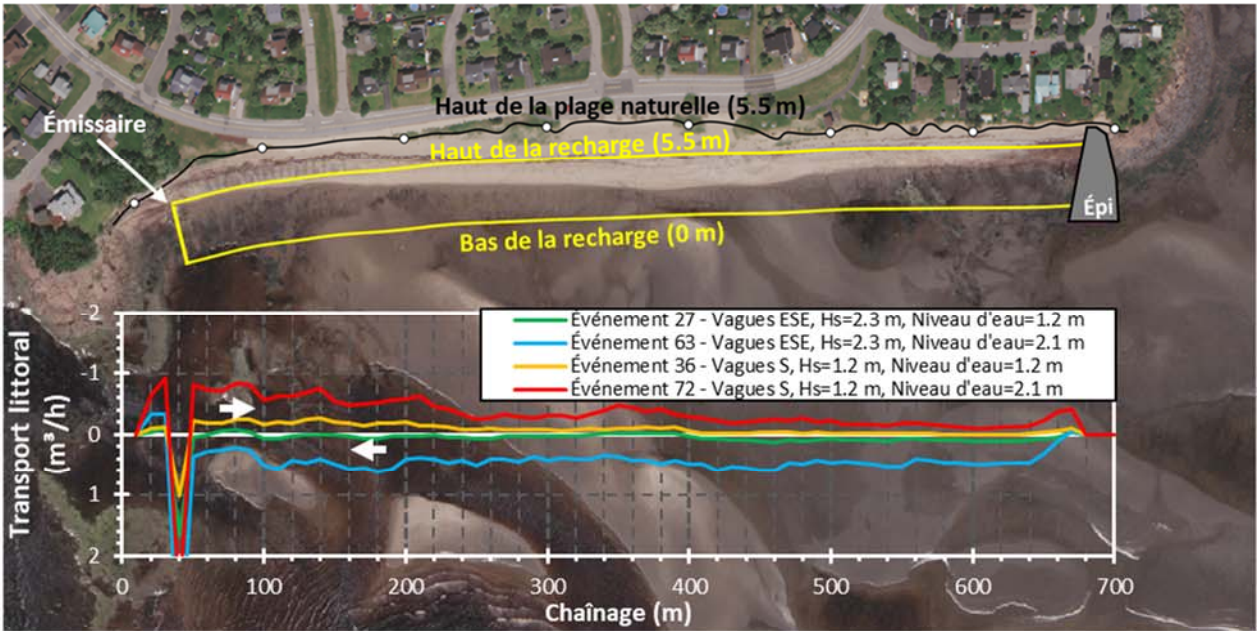
Les résultats de modélisation du transport littoral permettent ainsi de valider l'efficacité de la configuration de la recharge granulaire V3. Bien que cette variante exige davantage de matériaux granulaires par rapport aux variantes précédentes, sa stabilité est améliorée, son intégration visuelle est bonifiée grâce à l'utilisation d'un épi submersible (au lieu d'un épi conventionnel) et la grande majorité des matériaux granulaires demeureront à l'intérieur du périmètre de la recharge granulaire.

Dans le but de documenter la performance de la recharge de gravier dans le futur, il est recommandé d'effectuer un suivi de l'évolution morphologique de la recharge granulaire. Le protocole de ce suivi devra être établi en détail (méthode, fréquence, etc.) après de la mise en œuvre de la recharge. D'une manière générale, ce suivi devrait contenir au minimum :

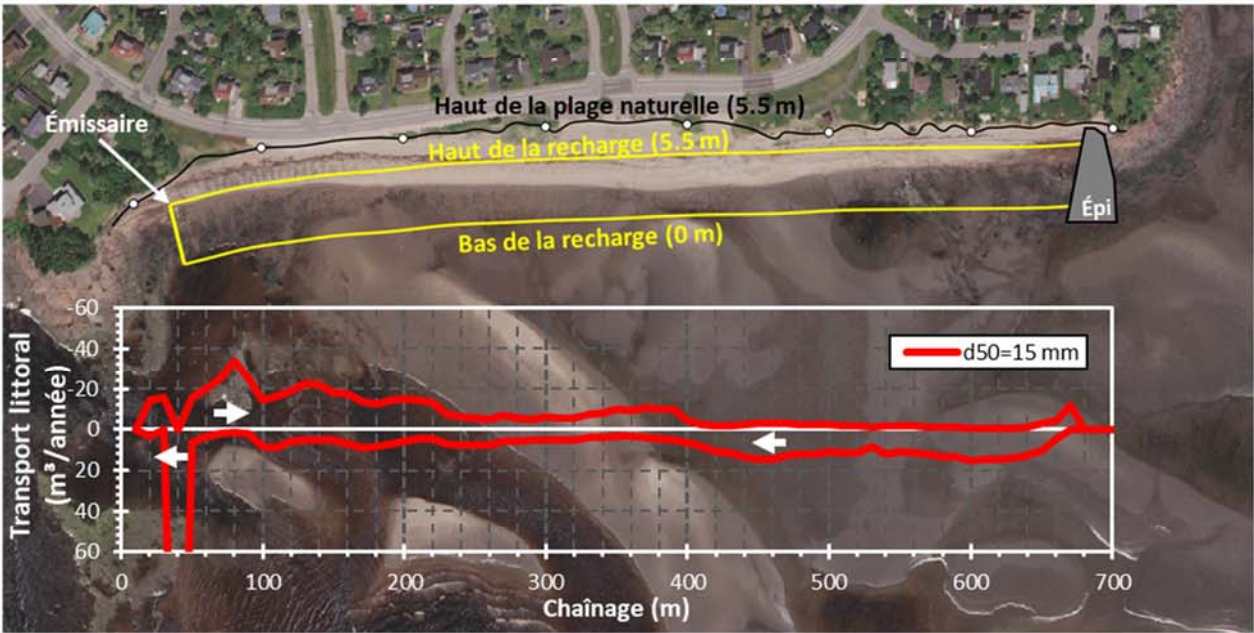
- Un registre des interventions d'entretien de la recharge attendues (date, quantités, granulométrie des matériaux, localisation des recharges d'appoint);
- Des campagnes de mesures annuelles durant les premières années (photos géoréférencées et relevés LiDAR ou à tout le moins des mesures d'élévation à plusieurs transects permettant des calculs de volume).



a) Transport littoral net

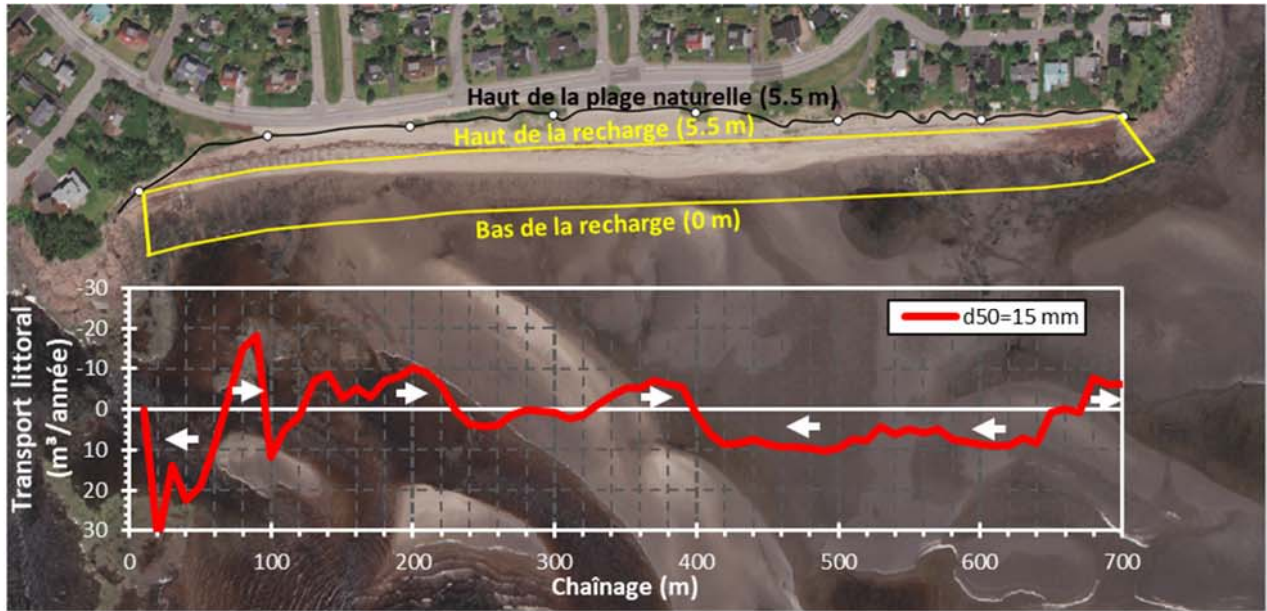


c) Transport littoral de quelques événements typiques de vagues

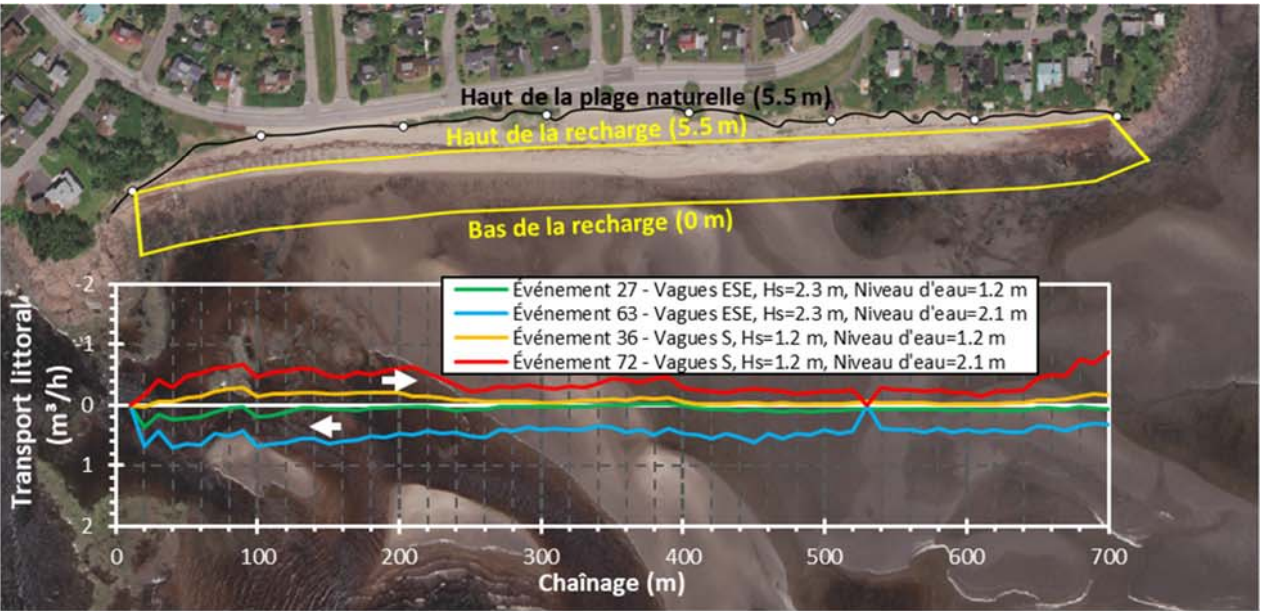


b) Transport littoral brut

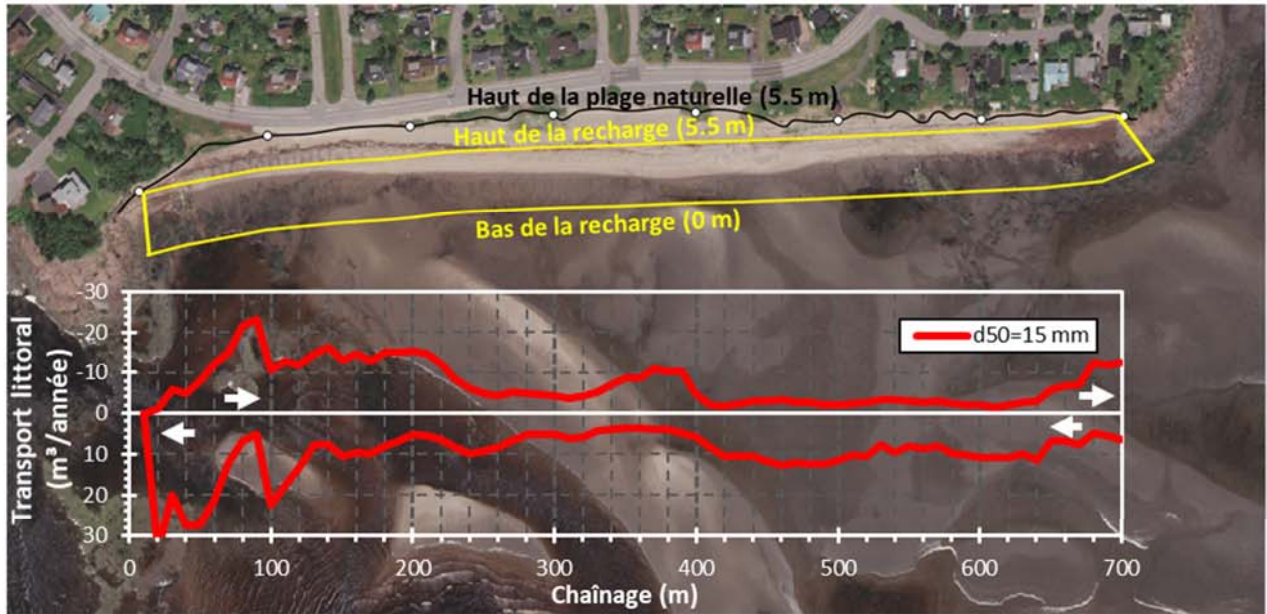
Figure 6.30 : Résultats de modélisation du transport littoral de la recharge granulaire V1 (variante intermédiaire)



a) Transport littoral net



c) Transport littoral de quelques événements typiques de vagues



b) Transport littoral brut

Figure 6.31 : Résultats de modélisation du transport littoral de la recharge granulaire V2 (variante intermédiaire)

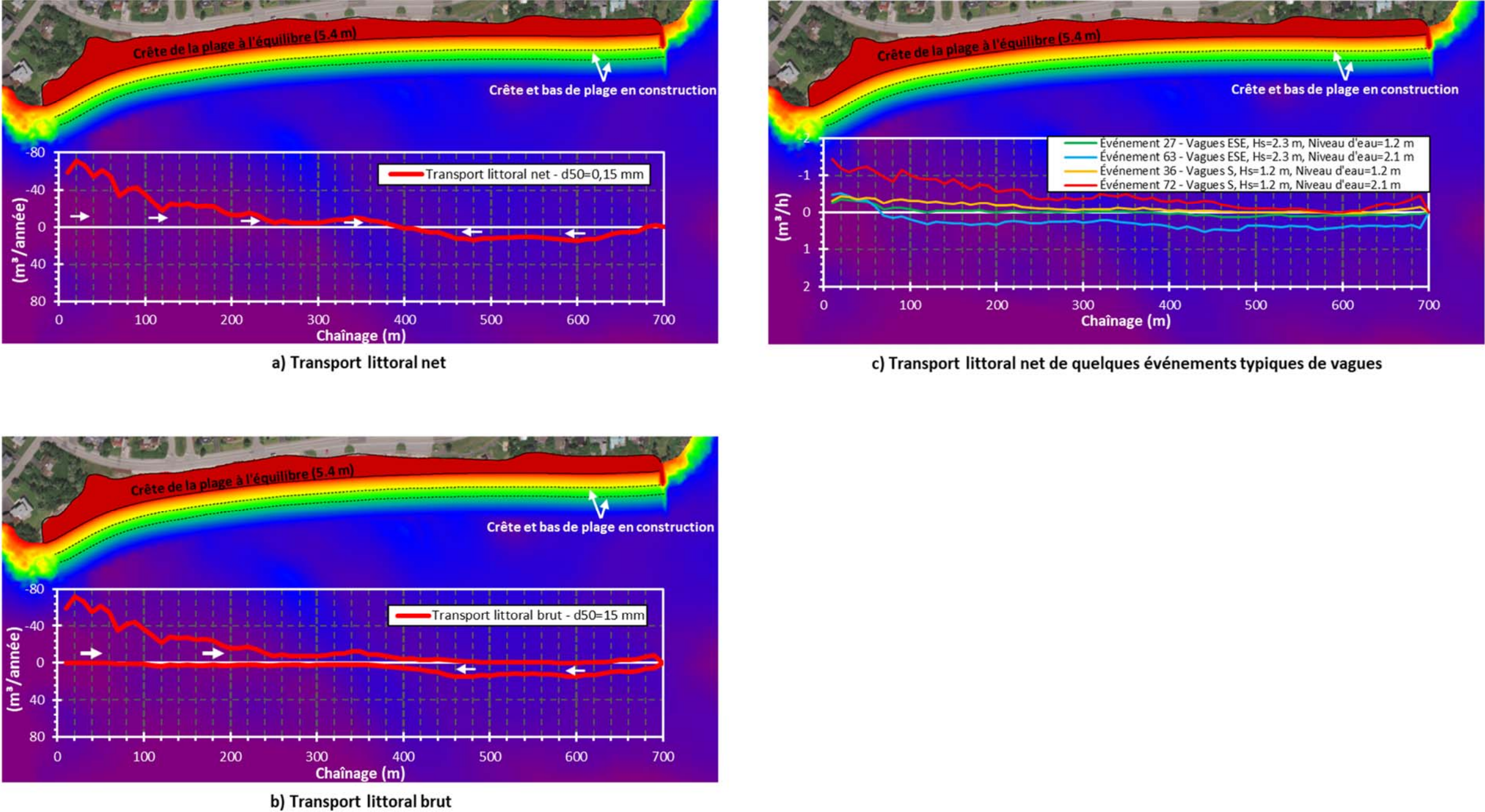


Figure 6.32: Résultats de modélisation du transport littoral en conditions futures - Recharge granulaire V3

6.5 Récapitulatif de la dynamique sédimentaire & recommandations

Les éléments clés à retenir sont les suivants :

Problématique d'érosion observée au courant des dernières années

- Le transport transversal, issu de l'attaque frontale des vagues, est dominant par rapport au transport littoral.
- Les fortes tempêtes, qui surviennent très souvent à niveau d'eau élevé en raison de la dépendance entre les vagues et les niveaux d'eau, peuvent générer des reculs importants de la ligne de végétation. À titre d'exemple, la tempête 2016 a généré des reculs de plus de 10 m à certains endroits.
- La section Ouest de la plage Rochelois est plus fortement exposée aux vagues par rapport à la section Est puisque cette dernière subit une certaine protection naturelle par un îlot rocheux qui agit d'une manière analogue à un brise-lames détaché.
- La vitesse des courants littoraux générée par les vagues est relativement faible puisque l'effet de réfraction fait en sorte que la direction des vagues qui déferlent sur la plage Rochelois est pratiquement perpendiculaire à celle-ci.
- La problématique d'érosion observée au courant des dernières années n'est pas le produit d'une érosion chronique engendrée par un mécanisme de transport littoral longitudinal conduisant à un bilan sédimentaire déficitaire à long terme.

Intervention de protection proposée

- L'intervention recommandée est la recharge granulaire V3 (voir figures 4.7 et 4.8 à la p.22).
- La recharge granulaire V3 nécessite un volume total d'environ 113 000 m³ de gravier (estimé à partir du modèle numérique de terrain tiré des données LiDAR terrestre et bathymétrique 2017). Les échantillons des bancs d'emprunt de la recharge granulaire indiquent un d₅₀ variant entre 7 mm et 20 mm pour une moyenne d'environ 15 mm.
- L'élévation recommandée de la crête de la pente de construction est de 5,4 m (NMM).
- La recharge granulaire V3 nécessite aussi la construction d'un épi submersible à l'extrémité Est de la plage Rochelois.
- L'émissaire devra être déplacé afin de permettre la mise en place de la recharge granulaire.

Évolution morphologique anticipée de la recharge granulaire proposée

- Face à l'action des vagues, il est prévu que le profil initial de la recharge granulaire subisse une déformation afin d'atteindre un certain état d'équilibre. À partir de la crête de la pente de construction (élévation 5,4 m), le profil sera impacté sur une distance d'environ 20 m vers la terre (recul et bourrelet de gravier).
- Un recul supplémentaire (estimé à 1,8 m pour la première année) est également prévu à l'extrémité Ouest de la recharge granulaire en raison d'un gradient de transport littoral. La vitesse de recul devrait toutefois diminuer au fil des années puisque l'orientation de la ligne de plage s'adaptera d'une manière à se rapprocher de son état d'équilibre.

- En raison du recul anticipé de la crête de la pente de construction, il est important d'empêcher toute construction sur les nouveaux terrains offerts par la mise en place de la recharge granulaire.

Suivi de l'évolution de la recharge granulaire

- Dans le but de documenter la performance de la recharge de gravier dans le futur, il est recommandé d'effectuer un suivi de l'évolution morphologique de la recharge granulaire. Le protocole de ce suivi devra être établi en détail (méthode, fréquence, etc.) après de la mise en œuvre de la recharge. D'une manière générale, ce suivi devrait contenir au minimum :
 - Un registre des interventions d'entretien de la recharge attendues (date, quantités, granulométrie des matériaux, localisation des recharges d'appoint);
 - Des campagnes de mesures annuelles durant les premières années (photos géoréférencées et relevés LiDAR ou à tout le moins des mesures d'élévation à plusieurs transects permettant des calculs de volume).

7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La plage Rochelois de la municipalité de Port-Cartier a subi une érosion notable dans les dernières années, en particulier à cause de l'impact des tempêtes automnales et hivernales qui surviennent dans le golfe du Saint-Laurent. Dans ce contexte, le Gouvernement du Québec (Ministère de la Sécurité Publique) envisage une intervention de protection sous la forme d'une recharge de plage à l'aide de matériaux granulaires de façon à stabiliser le littoral.

Lasalle|NHC a été mandaté par le Ministère de la Sécurité Publique afin d'étudier les conditions hydro-sédimentaires de la plage Rochelois pour appuyer la conception de la recharge de plage (avec ou sans épis) et d'évaluer leur efficacité à long terme. Pour ce faire, plusieurs outils de modélisation numérique (1D & 2D) ont notamment été utilisés pour réaliser l'étude.

L'étude des conditions maritimes de la région de Port-Cartier a permis de constater que le climat de vagues à Port-Cartier se caractérise par deux directions dominantes, soit l'ESE et le Sud. Les vagues de l'ESE sont plus énergétiques et plus fréquentes. Aussi, les vagues de l'ESE d'une hauteur importante ont souvent tendance à être accompagnées par un niveau d'eau élevé en raison de la dépendance entre ces deux éléments.

L'analyse historique de la dynamique sédimentaire met en évidence une problématique d'érosion qui est particulièrement engendrée par les événements de fortes tempêtes à niveau d'eau élevé. Dans de telles circonstances, le phénomène du transport transversal (attaque frontale des vagues) devient dominant par rapport à celui du transport littoral (bilan sédimentaire déficitaire).

La modélisation numérique du transport sédimentaire a couvert les composantes transversales et littorale. La modélisation du transport transversal a été réalisée en 2D pour les conditions actuelles (plage de sable) et en 1D en conditions futures (recharge de gravier). La modélisation du transport littoral à long-terme a été réalisée par une méthode hybride 1D-2D qui a permis de modéliser la transformation des vagues en 2D et le transport littoral en 1D. Une telle approche fut nécessaire en raison de la complexité de la bathymétrie à proximité de la plage Rochelois.

Les résultats de modélisation ont permis d'optimiser la configuration et les dimensions de la recharge granulaire. À la lumière des résultats de modélisation numérique, la variante V3 de la recharge est celle qui est recommandée. Cette variante nécessite un volume total (estimé à partir du modèle numérique de terrain tiré du LiDAR terrestre et bathymétrique 2017) d'environ 113 000 m³ de gravier ($d_{50}=15$ mm), la mise en place d'un épi submersible à l'Est de la plage Rochelois et le déplacement de l'émissaire existant dans la section Ouest de la plage. L'élévation recommandée de la crête de la pente de construction est de 5.4 m (NMM).

Les résultats de modélisation montrent qu'à partir de la crête de la pente de construction (élévation 5.4 m) et compte tenu des fortes tempêtes, le profil sera impacté sur une distance d'environ 20 m vers la terre (recul et bourrelet de gravier). Un recul supplémentaire (estimé à 1.8 m pour la première année) est également prévu à l'extrémité Ouest de la recharge granulaire. La vitesse de recul devrait toutefois diminuer au fil des années puisque l'orientation de la ligne de plage s'adaptera d'une manière à se

rapprocher de son état d'équilibre. En raison du recul anticipé de la crête de la pente de construction, il est important d'empêcher toute construction sur les nouveaux terrains offerts par la mise en place de la recharge granulaire.

Dans le but de documenter la performance de la recharge de gravier dans le futur, il est recommandé d'effectuer un suivi de l'évolution morphologique de la recharge granulaire. Le protocole de ce suivi devra être établi en détail (méthode, fréquence, etc.) après de la mise en œuvre de la recharge. D'une manière générale, ce suivi devrait contenir au minimum :

- Un registre des interventions d'entretien de la recharge attendues (date, quantités, granulométrie des matériaux, localisation des recharges d'appoint);
- Des campagnes de mesures annuelles durant les premières années (photos géoréférencées et relevés LiDAR ou à tout le moins des mesures d'élévation à plusieurs transects permettant des calculs de volume).

8. RÉFÉRENCES

- [1] Z. Xu et D. Lefavre, « Prévion des niveaux d'eau dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en fonction des changements climatiques », janv. 2015.
- [2] Y. Ropars, « Rochelois - Recharge de plage - Port-Cartier, Québec », mars 2018.
- [3] R. T. McCall, « Process-based modelling of storm impacts on gravel coasts », nov. 2015.
- [4] J. Williams *et al.*, « BARDEX (Barrier Dynamics Experiment): Taking the Beach into the Labotary », 2009.
- [5] J. Williams, D. Buscombe, G. Masselink, I. Turner, et C. Swinkels, « Barrier Dynamics Experiment (BARDEX): Aims, Design and Procedures », 2010.
- [6] J. T.S., H. J.A., L. L.J., D. A., F. D.L., et C. M., « Relative Sea-level Projections in Canada and the Adjacent Mainland United States », 2014.
- [7] ISMER & UQAR, « Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques », sept. 2013.
- [8] L. Benedet, J. P. F. Dobrochinski, D. J. R. Walstra, A. H. F. Klein, et R. Ranasinghe, « A morphological modeling study to compare different methods of wave climate schematization and evaluate strategies to reduce erosion losses from a beach nourishment project », 2016.
- [9] Lasalle|NHC, « RS&DE - Discrétisation d'une rose de vagues - Analyse des paramètres de discrétisation », nov. 2019.
- [10] Queensland Government, « Coincident Flooding in Queensland: Joint probability and dependence methodologies », 2012.
- [11] E. Van Wellen, A. J. Chadwick, M. Lee, B. Braily, et J. Morfett, « Evaluation of Longshore Sediment Transport Models on Coarse Grained Beaches Using Fields Data: A Preliminary Investigation », 1998.
- [12] E. V. Wellen, A. J. Chadwick, et T. Mason, « A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches », 2000.
- [13] K.A. Powell, "Predicting Short Term Profile Response For Shingle Beaches", 1990

ANNEXE A – DÉPENDANCE ENTRE LES VARIABLES

		Résiduel à Port-Cartier (m)									
		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
Hs à proximité de Port-Cartier (m)	0.25	14%	19%	20%	19%	18%	16%	15%	13%	11%	4%
	0.5	19%	30%	36%	36%	34%	30%	27%	23%	21%	12%
	0.75	22%	37%	47%	49%	47%	42%	39%	34%	32%	22%
	1	22%	40%	52%	56%	55%	51%	48%	44%	42%	32%
	1.25	23%	41%	54%	60%	60%	56%	53%	48%	46%	38%
	1.5	22%	41%	56%	63%	62%	60%	56%	52%	49%	37%
	1.75	21%	40%	57%	64%	65%	63%	61%	55%	52%	40%
	2	20%	39%	56%	65%	68%	67%	64%	59%	55%	28%
	2.25	19%	37%	55%	64%	68%	68%	67%	61%	58%	
	2.5	18%	35%	54%	64%	68%	70%	69%	63%	58%	
	2.75	17%	34%	52%	60%	62%	65%	67%	66%	64%	
	3	16%	32%	49%	55%	58%	62%	67%	69%	67%	
	3.25	15%	30%	46%	48%	51%	58%	66%	66%	67%	
	3.5	13%	28%	43%	45%	53%	62%	69%	68%	70%	

*Toutes directions de vagues confondues

		Niveau d'eau à Port-Cartier (m)											
		0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3	
Résiduel à Port-Cartier (m)	0	22%	25%	27%	27%	26%	26%	24%	19%	15%	14%	12%	
	0.2	23%	27%	32%	35%	38%	40%	41%	37%	31%	28%	25%	
	0.4	23%	26%	32%	39%	44%	49%	53%	54%	49%	44%	40%	
	0.6	23%	26%	32%	39%	46%	53%	61%	65%	63%	57%	53%	
	0.8	23%	26%	31%	38%	47%	55%	64%	70%	72%	68%	63%	
	1	21%	26%	30%	37%	46%	56%	66%	73%	77%	76%	71%	
	1.2	19%	24%	30%	36%	45%	56%	67%	75%	80%	81%	79%	
	1.4	17%	24%	30%	37%	45%	56%	68%	78%	83%	84%	81%	
	1.6	16%	22%	28%	36%	43%	53%	65%	77%	83%	83%	80%	
	1.8	14%	19%	25%	32%	39%	49%	60%	73%	81%	84%	79%	

		Niveau d'eau à Port-Cartier (m)											
		0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3	
Marée PC (m)	0	87%	80%	67%	54%	42%	33%	25%	19%	16%	14%	13%	
	0.3	80%	87%	81%	68%	54%	43%	34%	26%	21%	19%	18%	
	0.6	66%	80%	86%	81%	68%	55%	44%	34%	29%	26%	24%	
	0.9	52%	65%	78%	86%	81%	69%	57%	44%	36%	33%	31%	
	1.2	40%	52%	64%	78%	85%	81%	69%	56%	45%	41%	39%	
	1.5	29%	39%	50%	63%	75%	83%	78%	65%	54%	48%	46%	
	1.8	20%	26%	35%	45%	57%	69%	75%	69%	51%	50%	51%	

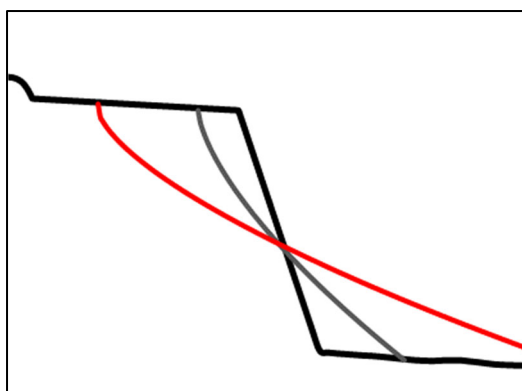
Annexe 2 Étude de scénarios alternatifs de protection de plage



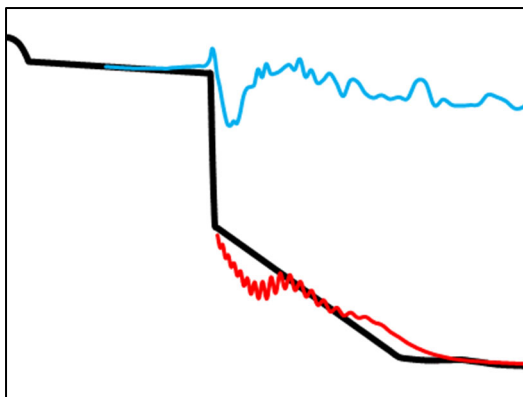
PLAGE ROCHELOIS, PORT-CARTIER MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES CONDITIONS HYDRO-SÉDIMENTAIRES

ÉTUDE DE SCÉNARIOS ALTERNATIFS DE
PROTECTION DE LA PLAGE

RAPPORT R.0371



Préparé pour:



15 septembre 2021

No référence lasalle | NHC 08006024

PLAGE ROCHELOIS, PORT-CARTIER
MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES CONDITIONS HYDRO-SÉDIMENTAIRES
ÉTUDE DE SCÉNARIOS ALTERNATIFS DE PROTECTION DE LA PLAGE

RAPPORT R.0371

Préparé pour:

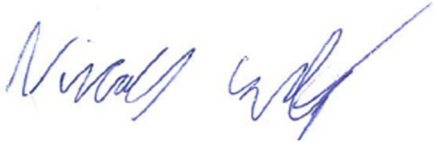
Ville de Port-Cartier
Port-Cartier, Québec

Préparé par:

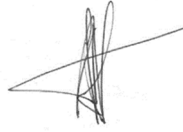
Lasalle | NHC
Montréal, Québec

15 septembre 2021

Préparé par:



Nicolas Gallant, ing., M. Ing.
Ingénieur de projets
No OIQ : 5047189



Tristan Aubel, ing., M.Ing.
Ingénieur, associé
No OIQ : 129611

CLAUSE DE LIMITATION DE RESPONSABILITÉ

Ce document a été préparé par Lasalle|NHC de façon conforme aux bonnes pratiques d'ingénierie et est destiné à l'usage exclusif de la **ville de Port-Cartier** et de leurs représentants autorisés dans le cadre spécifique du projet **Plage Rochelois, Port-Cartier - Modélisation numérique des conditions hydro-sédimentaires – Étude de scénarios alternatifs de protection de la plage**. Le contenu de ce document ne peut être appliqué ou utilisé, en tout ou en partie, par ou à l'avantage d'autres parties sans l'autorisation écrite de Lasalle|NHC. Aucune autre garantie, expresse ou tacite, n'est accordée.

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

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	2
1. INTRODUCTION	3
2. FAITS SAILLANTS DE L'ANALYSE DU CLIMAT MARITIME	4
3. ANALYSE DES SCÉNARIOS ALTERNATIFS	7
3.1 Présentation des scénarios considérés	7
3.2 Scénario D – Recharge de sable.....	9
3.2.1 Différence de comportement hydrosédimentaire entre le sable et le gravier	9
3.2.2 Modélisation de l'attaque frontale des vagues (tempêtes ponctuelles)	10
3.2.3 Modélisation du transport littoral (long-terme)	13
3.2.4 Synthèse des résultats.....	17
3.3 Scénario E – Palplanches avec recharge de sable	18
3.3.1 Principes de base en lien avec les palplanches	18
3.3.2 Modélisation de l'attaque frontale des vagues (tempêtes ponctuelles)	18
3.3.3 Modélisation du transport littoral (long-terme)	20
3.3.4 Synthèse des résultats.....	22
3.4 Scénario F – Recharge avec gravier et sable.....	23
3.4.1 Élaboration du concept de recharge avec gravier et sable	23
3.4.2 Synthèse des résultats.....	23
4. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	26
5. RÉFÉRENCES	28

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Amplitude de la marée à Port-Cartier (marée seulement).....	4
Figure 2.2: Occurrence des niveaux d'eau à Port-Cartier (marée + surcotes).....	5
Figure 2.3: Rose des vagues et occurrence des vagues à Port-Cartier	6
Figure 3.1 : Résultats de modélisation XBeach-G (Tempête ponctuelle) – Scénario D	11
Figure 3.2 : Profils d'équilibre théorique – Vue en coupe	12
Figure 3.3: Profils d'équilibre théorique – Vue en plan	13
Figure 3.4 : Résultats de modélisation du transport littoral (long-terme) – Scénario D	16
Figure 3.5: Résultats de modélisation XBeach-G (Tempête ponctuelle) – Scénario E.....	19
Figure 3.6 : Défaillance structurelle des palplanches (source : Coastal Engineering Manual)	20
Figure 3.7: Résultats de modélisation du transport littoral (long-terme) – Scénario E.....	25

1. INTRODUCTION

Les berges de la municipalité de Port-Cartier subissent une érosion notable, en particulier à cause de l'impact des tempêtes automnales et hivernales qui surviennent dans le golfe du Saint-Laurent. Dans ce contexte, le Gouvernement du Québec (Ministère de la Sécurité publique) envisage présentement une intervention de protection sous la forme d'une recharge de plage à l'aide de matériaux granulaires (gravier), de façon à stabiliser le littoral et à éviter que les dommages ne s'étendent à la route adjacente à la plage (rue des Rochelois) ainsi qu'aux infrastructures municipales et privées qui se trouvent à proximité.

Sur la base des informations transmises par la Ville de Port-Cartier, suite aux consultations publiques, le concept de recharge de gravier mis en avant par le MSP a fait l'objet de questionnements au sein de la municipalité de Port-Cartier qui ont conduit les représentants de la ville à réfléchir à des scénarios alternatifs à la recharge. Les concepts de scénarios alternatifs évoqués par les représentants de la Ville incluent notamment l'utilisation de matériaux plus fins (sable) au lieu du gravier ainsi que la construction d'ouvrages côtiers. Ce présent rapport offre une étude de faisabilité, d'un point de vue hydrosédimentaire, de trois concepts de scénarios alternatifs.

Le rapport est divisé en 4 chapitres. Le chapitre 2 résume les faits saillants en lien avec le climat maritime à Port-Cartier. Le chapitre 3 enchaîne ensuite avec la présentation et l'analyse des trois concepts de scénarios alternatifs. Le chapitre 4 termine avec la conclusion et les recommandations.

2. FAITS SAILLANTS DE L'ANALYSE DU CLIMAT MARITIME

L'analyse détaillée du climat maritime à Port-Cartier est présentée dans l'étude de modélisation numérique des conditions hydrosédimentaires à Port-Cartier réalisée pour le compte du MSP en 2020 [1]. La présente section a pour but d'afficher les éléments clés à retenir durant l'analyse des solutions complémentaires. La figure 2.1 illustre l'amplitude de la marée (en excluant les surcotes), la figure 2.2 affiche les statistiques de niveaux d'eau (en incluant la marée et les surcotes) et la figure 2.3 montre la rose des vagues. Les éléments clés à retenir sont les suivants :

- Sous l'effet de la marée seulement, les niveaux d'eau peuvent monter jusqu'à une élévation de 2 m;
- En superposant la marée aux surcotes, générées durant les événements de tempête, les niveaux d'eau peuvent aisément excéder une élévation de 2 m;
- Compte tenu de la nature des tempêtes dans la région du golfe du Saint-Laurent, les fortes vagues générées durant ces tempêtes sont souvent accompagnées par des niveaux d'eau élevé (plus de 2 m);
- La portion de la plage comprise au-delà de l'élévation 2 m est donc majoritairement impactée par les événements relativement rares de fortes tempêtes alors que la portion comprise en deçà de l'élévation 2 m est plutôt impactée par des événements fréquents.

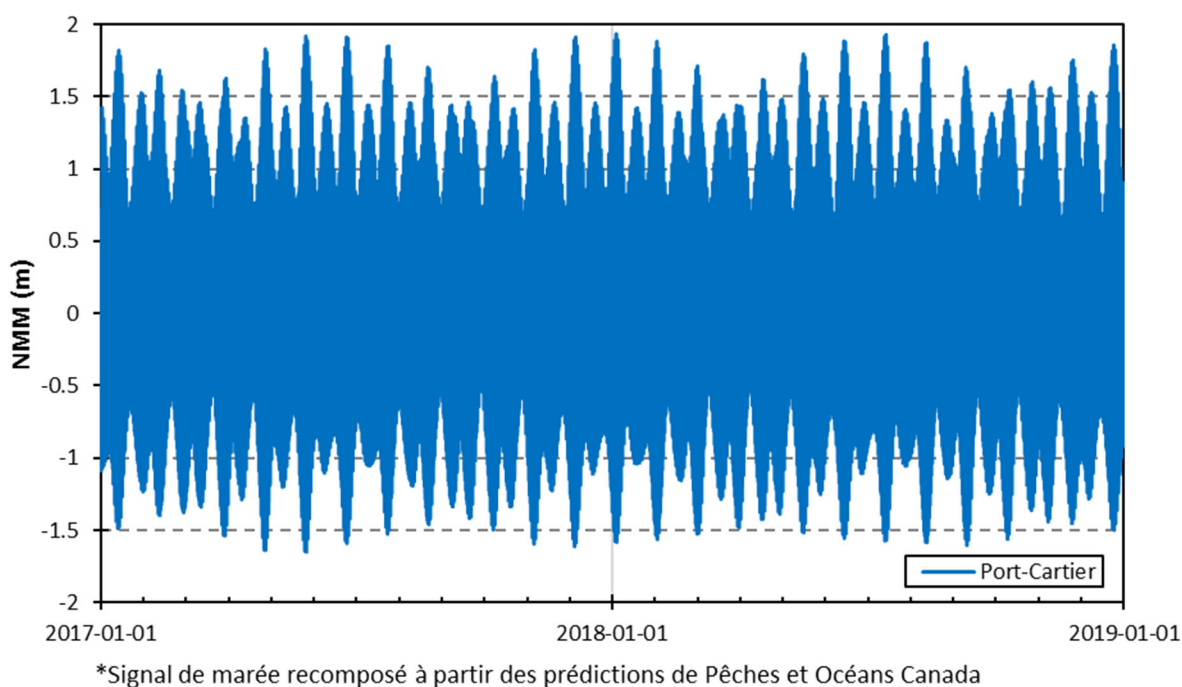


Figure 2.1: Amplitude de la marée à Port-Cartier (marée seulement)

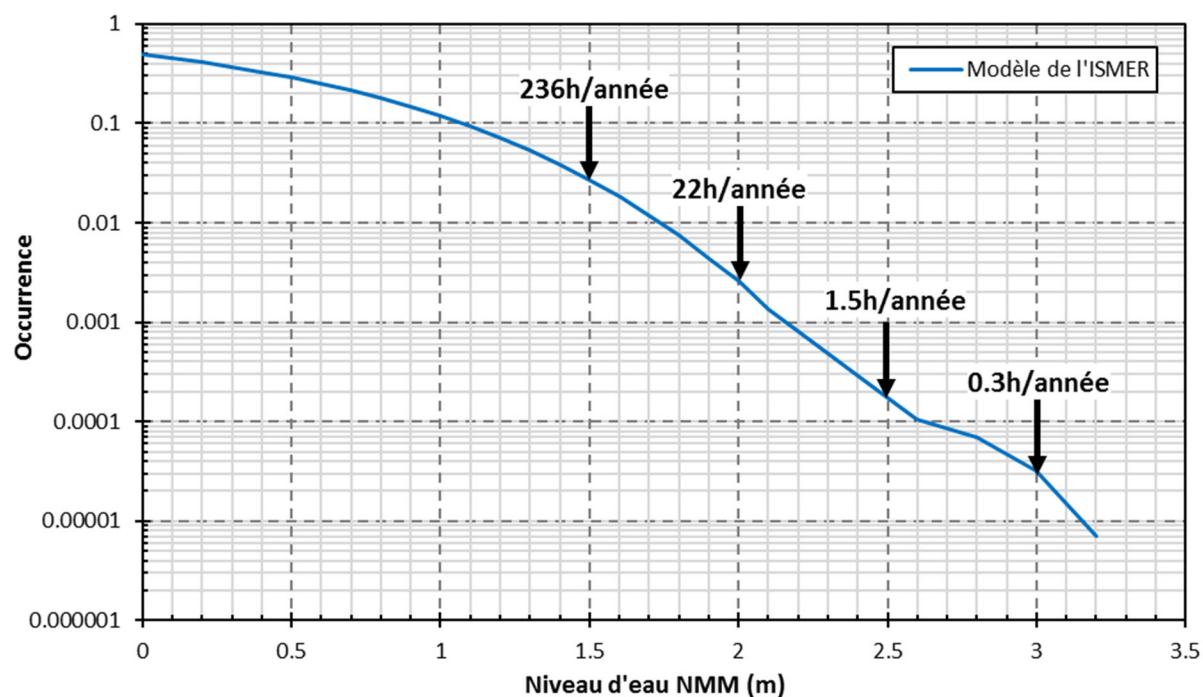
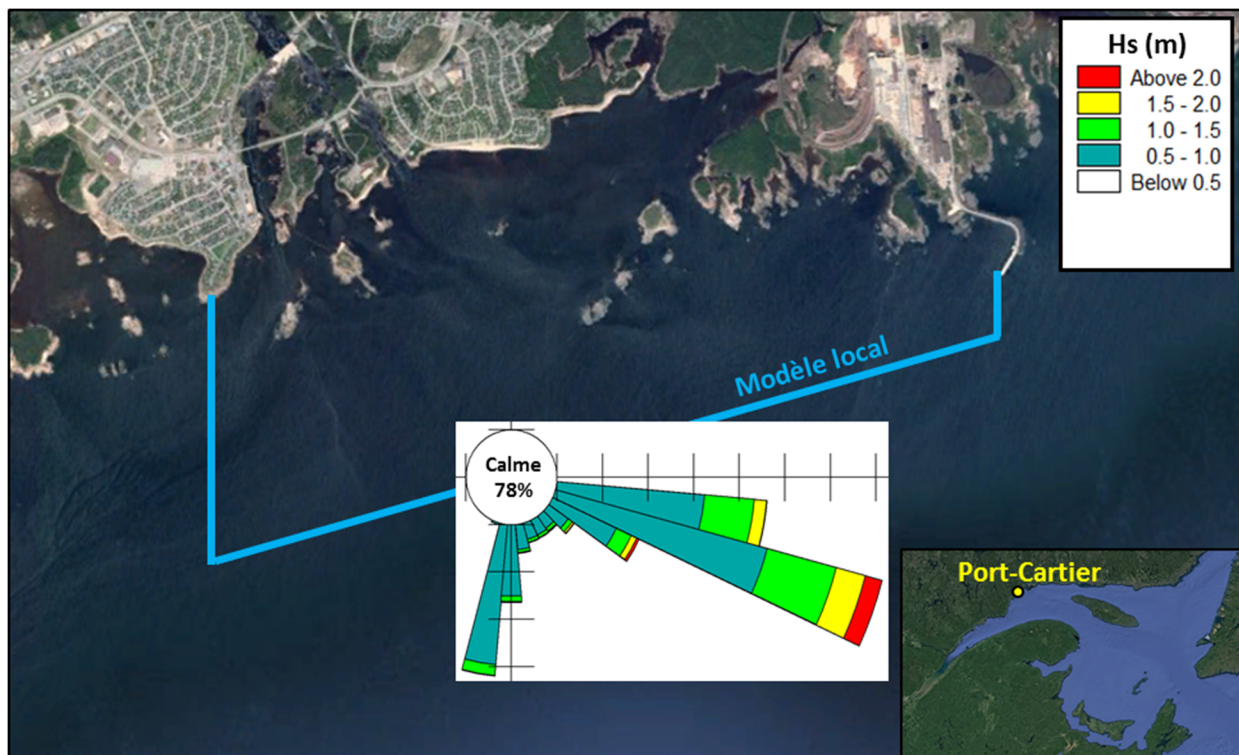
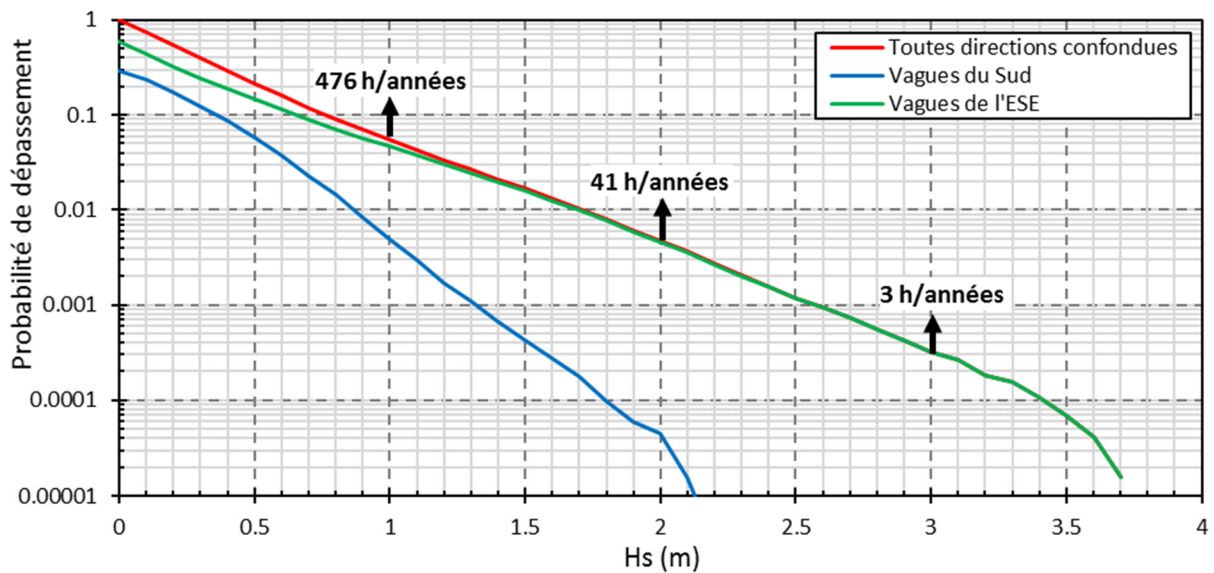


Figure 2.2: Occurrence des niveaux d'eau à Port-Cartier (marée + surcotes)



a) Rose des vagues



b) Occurrence des vagues

Figure 2.3: Rose des vagues et occurrence des vagues à Port-Cartier

3. ANALYSE DES SCÉNARIOS ALTERNATIFS

3.1 Présentation des scénarios considérés

Lasalle|NHC avait réalisé une étude de modélisation hydro-sédimentaire dans le but d’optimiser et de documenter les performances d’une recharge de gravier. Le rapport final de cette étude a été déposé au printemps 2020 [1]. Dans ce qui suit, cette étude sera désignée par « étude de 2020. ».

Préparé à la demande de la ville de Port-Cartier, le présent rapport a pour but d’analyser la faisabilité de divers scénarios alternatifs à la recharge de gravier. Un total de 6 scénarios alternatifs, désignés par Scénario A à Scénario F, ont été identifiés par la Ville. Parmi ces 6 scénarios, il a été décidé par la ville de Port-Cartier d’en étudier 3 en premier lieu, soit les scénarios D, E et F. Les différents scénarios sont énumérés ci-dessous :

- Scénario A : Brise-lames (non étudié)
- Scénario B : Brise-lames + recharge sable (non étudié)
- Scénario C : mur littoral en palplanche seul (non étudié)
- Scénario D : recharge sable
- Scénario E : recharge sable + mur littoral en palplanche
- Scénario F : recharge avec gravier et sable

Scénario D : recharge de sable

Ce scénario consiste à remplacer la recharge de gravier V3 de l’étude de 2020 par une recharge de sable. Dans un premier temps, les dimensions de cette recharge de sable sont identiques à celles de la recharge de gravier V3 dans le but de faciliter le comparatif entre les deux scénarios d’ouvrages de protection du littoral. Les travaux de modélisation numérique de la recharge de sable ont été réalisés en considérant 4 granulométries différentes (0.5, 1.0, 1.5 et 2.0 mm) pour analyser la sensibilité du type de sable utilisé dans la recharge granulaire.

Scénario E : recharge sable + palplanche

Le principe est de construire un mur côtier en enfonçant des palplanches dans le sol et de recharger avec du sable en contrebas du mur (côté mer) dans le but d’aménager une plage. La combinaison des palplanches et de la recharge de sable peut se faire selon deux stratégies distinctes.

En premier lieu, une recharge massive de sable similaire à celle étudiée au scénario D pourrait être mise en place en contrebas du mur de palplanche. Tant que la recharge demeurera en place avec suffisamment de largeur et de hauteur, c’est celle-ci qui procurera la protection nécessaire envers les événements de tempête, le mur n’étant pas sollicité. Toutefois sur le plus long terme, l’érosion récurrente de la recharge mènera éventuellement à une exposition du mur de palplanche face aux vagues. Dans ce cas-ci, le mur jouerait plutôt le rôle d’une protection ultime ou d’urgence du haut de talus et des infrastructures le temps qu’une nouvelle recharge soit mise en place. Cette stratégie de combinaison des palplanches et de la recharge de sable a ainsi pour but primaire de maximiser la durée de vie du concept de protection du

littoral. Cette stratégie peut toutefois s'avérer particulièrement coûteuse puisqu'elle combine les coûts nécessaires à la mise en place d'une recharge massive et à la construction d'un mur de palplanches.

En second lieu, une recharge de sable à pente douce, de moindre envergure, pourrait être mise en place en contrebas du mur de palplanche plage. Cette stratégie de combinaison des palplanches et de la recharge de sable a pour but primaire de réduire la quantité de matériau nécessaire dans la recharge de sable tout en permettant l'aménagement d'une plage récréotouristique au pied du mur de palplanches. C'est cette stratégie qui est considérée dans la présente étude.

Le scénario étudié considère une plage en contrebas à pente douce (1:15) en remblayant une couche de sable jusqu'à une élévation de 2.0 m (CGVD28). Cette couche de sable permet, d'une part, d'offrir une largeur de la plage pouvant être utilisée à des fins récréative et, d'autre part, de fournir une couche de sable sur laquelle les vagues seront libre de déferler. À ce propos, il est primordial que la majorité des vagues continuent de déferler sur le sable (et non directement sur les palplanches) afin d'éviter de modifier significativement la dynamique sédimentaire de la plage sur le long-terme. Ainsi, les vagues issues d'événements fréquents survenant à niveau d'eau modéré (moins de 2 m) déferleront sur le sable alors les vagues issues d'événement relativement rare de fortes tempêtes ponctuelles à niveau d'eau élevé (plus de 2 m) déferleront directement sur les palplanches. L'utilité primaire des palplanches est donc d'offrir une protection face à l'attaque frontale des vagues issues de fortes tempêtes ponctuelles.

Scénario F : recharge avec gravier et sable

Ce scénario consiste à maintenir les matériaux de type gravier de la recharge de gravier V3 (étude de 2020) dans les portions de la plage qui sont les plus sévèrement exposées aux vagues de tempête et d'utiliser des matériaux de type sable dans les portions les moins exposées.

3.2 Scénario D – Recharge de sable

3.2.1 Différence de comportement hydrosédimentaire entre le sable et le gravier

Le choix du matériau de remblai à utiliser dans une recharge granulaire engendre des impacts sur deux aspects du comportement hydrosédimentaire. Le premier est au niveau du taux de transport sédimentaire alors que le second est au niveau de l'adaptation du profil de la plage. Des explications supplémentaires sont également fournies dans la section 2.3 de l'étude de 2020 de modélisation numérique des conditions hydrosédimentaires à Port-Cartier [1].

Taux de transport sédimentaire

D'une manière générale, l'utilisation des matériaux plus fins tend à augmenter les taux de transport sédimentaire. En conséquence, les phénomènes d'érosion et d'accrétion sont généralement accélérés lorsque le sable est utilisé au lieu du gravier dans la construction d'une recharge granulaire.

L'utilisation du sable au lieu du gravier dans une recharge granulaire engendre aussi une répercussion sur le mode de transport sédimentaire qui sera dominant sur la plage en question. Dans le cas des matériaux de type sable, les sédiments composant la plage sont facilement mis en suspension par les vagues et sont ensuite déplacés dans l'eau sous l'effet des courants littoraux (transport par suspension). Dans le cas des matériaux plus grossiers de type gravier, les sédiments ont plutôt tendance à rouler sur le fond marin (transport par charriage) sous l'action des vagues et des courants littoraux puisque ces sédiments sont plus lourds.

Puisque le sable est principalement transporté par suspension, il est plus facile pour ces sédiments de contourner les obstacles tels que les épis. À l'opposé, le gravier est principalement transporté par charriage ce qui augmente la quantité de sédiments qui seront interceptés par l'obstacle.

Adaptation du profil de la plage

D'une manière générale, la pente d'équilibre d'une plage tend à être plus douce lorsque les matériaux composant celles-ci sont plus fins. En conséquence, un plus grand recul du haut de plage ainsi qu'une plus grande avancée du bas de plage sera nécessaire dans le cas d'une recharge granulaire à sédiments fins pour que cette plage puisse atteindre le profil d'équilibre théorique.

Plus spécifiquement, l'utilisation du sable au lieu du gravier dans une recharge granulaire engendre aussi une répercussion sur les mécanismes de transport de sédiments. En effet dans le cas d'une recharge de gravier, il se forme généralement un bourrelet de gravier en haut de plage (« swash bar ») en période de tempête puisque les matériaux en haut de plage ont tendance à être poussés vers le haut. Dans le cas d'une recharge de sable, aucun bourrelet de gravier n'est formé puisque les sédiments composant la plage ont plutôt tendance à se déplacer du haut de la plage vers le pied de la plage.

La formation d'un bourrelet de gravier en haut de plage offre un avantage intéressant pour les recharges de gravier par rapport aux recharges de sable. En effet durant les événements de fortes tempêtes à niveau d'eau élevé, les plages de gravier ont tendance à s'adapter par le biais d'une formation de bourrelet de

gravier en haut de plage pour mieux résister à la tempête. Ainsi d’une manière générale, c’est la tempête la plus énergétique qui définit le profil de la plage; un événement de tempête encore plus énergétique devient nécessaire pour transformer davantage la portion supérieure du profil. Dans le cas d’une plage de sable, un événement de forte tempête à niveau d’eau élevé aura plutôt tendance à éroder le haut de plage, puis à transporter ces sédiments érodés vers large pour ensuite les déposer au pied de la plage. À ce propos, chacune des prochaines tempêtes à survenir, incluant les moins énergétiques, auront tendance à éroder une portion supplémentaire du haut de la plage de sable.

3.2.2 Modélisation de l’attaque frontale des vagues (tempêtes ponctuelles)

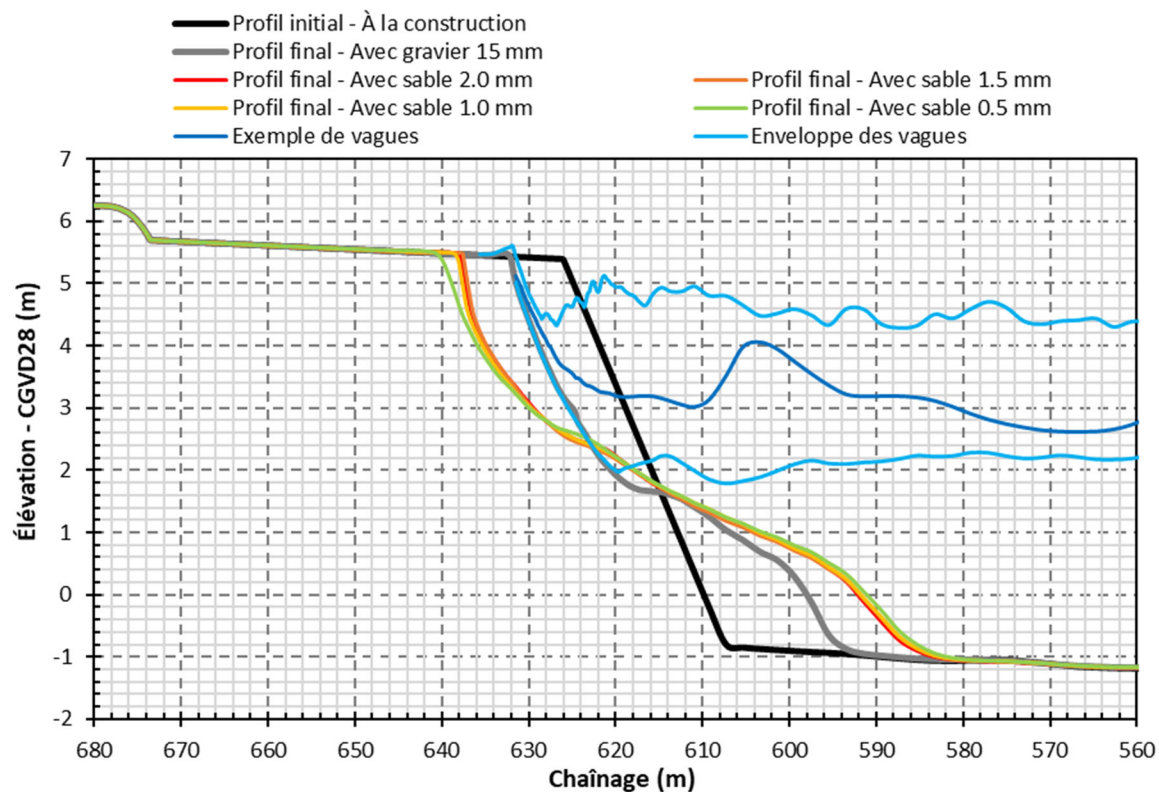
La modélisation de l’attaque frontale des vagues a été réalisée en appliquant la méthodologie mise au point dans l’étude de 2020 de modélisation numérique des conditions hydrosédimentaires à Port-Cartier [1]. En guise d’information, c’est la tempête synthétique surnommé « C », d’une période de retour d’environ 25 ans, qui est considérée dans la présente étude.

Le modèle XBeach-G par Deltares a été utilisé pour modéliser l’attaque frontale des vagues. Ce modèle permet de tenir compte des particularités en lien avec le transport de gravier. La discrétisation du profil varie d’ailleurs entre 2.5 m dans les zones profondes et 0.1 m dans les zones critiques du transport sédimentaire. La discrétisation du pas de temps est quant à elle d’une durée de 0.1 s. Un tel niveau de raffinement permet ainsi de résoudre le run-up de vagues dans les simulations d’attaque frontale des vagues.

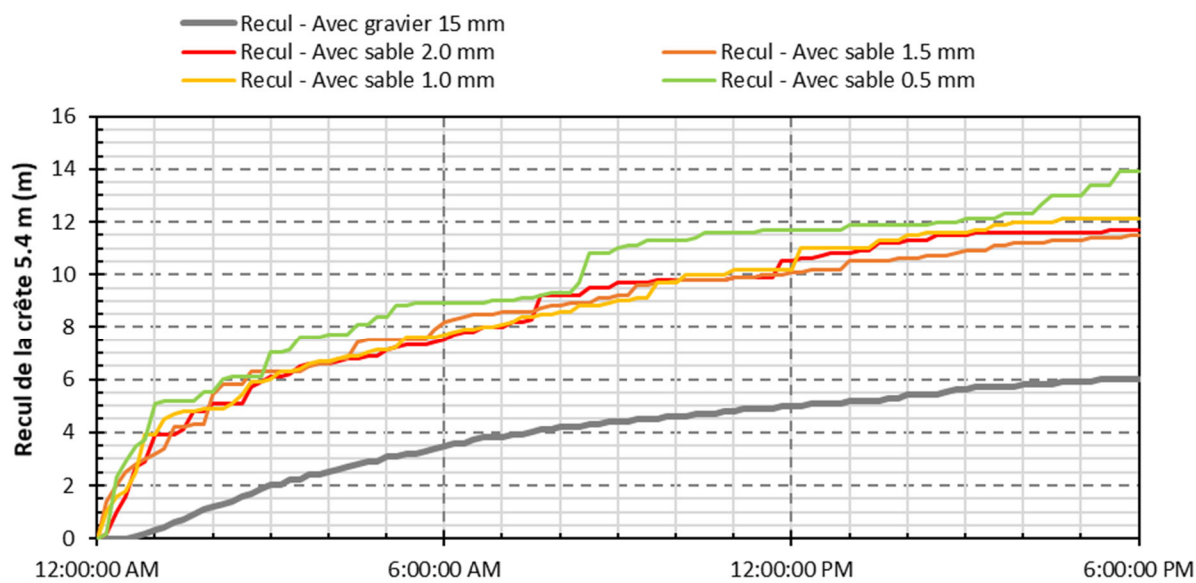
La figure 3.1 affiche les résultats de modélisation de l’attaque frontale des vagues en considérant une plage de sable de 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm et 2.0 mm ainsi qu’une plage de gravier de 15 mm. La figure 3.1a montre que, suite à la tempête, le recul de la crête est deux fois plus élevé lorsque le sable est utilisé dans la recharge granulaire au lieu du gravier. De plus, la figure 3.1b montre que la vitesse de recul est beaucoup plus élevée pour la plage de sable que pour celle de gravier. En effet, le taux de recul est jusqu’à 4 fois plus élevé au cours des deux premières heures de la tempête.

Les résultats affichés sur la figure 3.1 ne représentent toutefois pas les profils d’équilibre théorique¹, mais bien seulement les profils modélisés à la fin de la tempête considérée. À cet effet, un profil de plage peut nécessiter des mois, voir même des années de tempêtes, avant de se rapprocher de son profil d’équilibre théorique. À ce propos, il est plus adapté d’utiliser des équations empiriques pour calculer les profils d’équilibre théorique en fonction de la granulométrie de la plage plutôt que d’utiliser des modèles numériques. Ces profils théoriques sont d’ailleurs présentés sur la figure 3.2.

¹ Le profil théorique d’équilibre théorique représente le profil moyen entre le profil en saison estivale (temps généralement plus calme) et celui en saison hivernal (tempêtes généralement plus fréquentes).



a) Transformation du profil suite à la tempête



b) Recul de la crête en fonction du temps

Figure 3.1 : Résultats de modélisation XBeach-G (Tempête ponctuelle) – Scénario D

La figure 3.2 représentent les profils d'équilibre ayant été calculés à l'aide des équations empiriques du *Coastal Engineering Manual* [2]. Cette figure montre que dans le cas de la plage de gravier de 15 mm, un recul d'environ 10 m de la crête est nécessaire pour que le profil de la recharge granulaire puisse atteindre le profil d'équilibre théorique, à partir d'un profil de construction. Dans le cas d'une plage de sable, les reculs nécessaires montent à 33 m, 39 m, 49 m et 70 m en considérant les granulométries de 2 mm, 1.5 mm, 1 mm et 0.5 mm respectivement. À cela peut également s'ajouter des reculs supplémentaires en raison de la dérive littorale des sédiments. Cet aspect est abordé à la section 3.2.3. À titre indicatif, la largeur de la crête de la variante V3 de la recharge granulaire est d'environ 45 m dans la portion ouest et d'environ 30 m dans la portion est de celle-ci. Ainsi, une recharge granulaire de sable nécessiterait un entretien fréquent sous forme de rechargement supplémentaire en haut de plage puisque, comme illustré sur la figure 3.3, le profil théorique d'équilibre empiète la limite de la recharge granulaire. Une option serait d'augmenter le volume de la recharge afin d'élargir la crête pour tenir compte des reculs anticipés. Toutefois, les volumes résultants deviendraient considérables avec un empiètement sur le milieu marin important. À cet effet, un volume supplémentaire d'environ 100 000 m³ de sable (2 mm) serait nécessaire pour que la crête à l'état d'équilibre puisse être à une position similaire à celle de la crête de la recharge de gravier à l'équilibre (chaînage 635 m sur la figure 3.2). À titre indicatif, le volume nécessaire de gravier pour la recharge granulaire V3 (étude de 2020) est évalué à environ 113 000 m³.

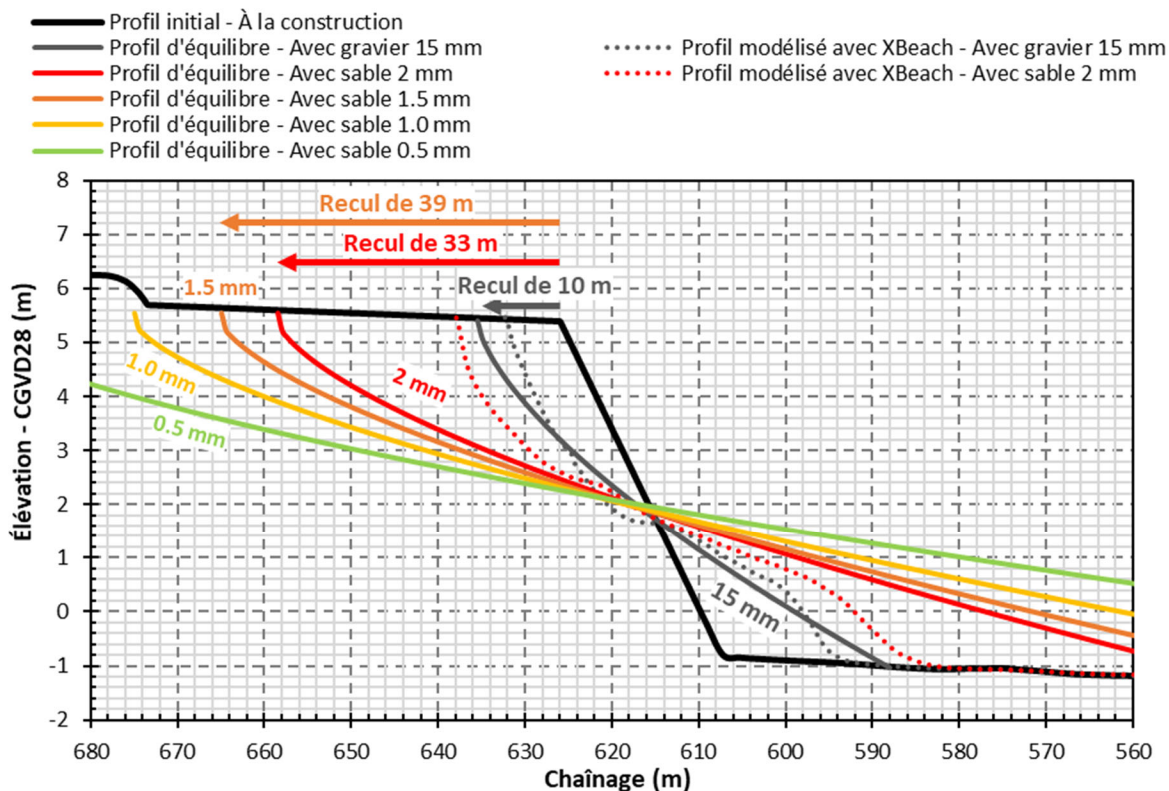


Figure 3.2 : Profils d'équilibre théorique – Vue en coupe

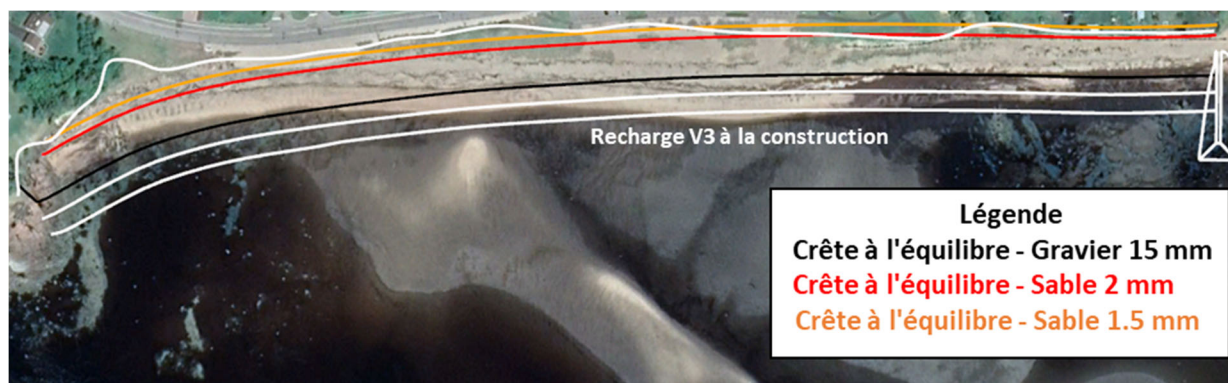


Figure 3.3: Profils d'équilibre théorique – Vue en plan

Afin de limiter le recul de la crête, une autre option possible est de construire un mur de soutènement sous forme de palplanches. Une telle option possède toutefois certains inconvénients d'un point de vue hydrosédimentaire. Cette option est traitée en détails à la section 3.3 de ce rapport.

3.2.3 Modélisation du transport littoral (long-terme)

La modélisation du transport littoral à long-terme a été réalisée en appliquant la méthodologie mise au point dans l'étude de 2020 de modélisation numérique des conditions hydrosédimentaires à Port-Cartier [1]. En guise d'information, les années 1980 à 2011 avaient été considérées dans cette étude pour calculer le transport littoral.

La figure 3.4 affiche les résultats de modélisation du transport littoral en considérant une plage de sable de 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm et 2.0 mm ainsi qu'une plage de gravier de 15 mm. La figure 3.4b montre que le transport brut dans les deux directions peut être jusqu'à 20 fois plus grand lorsque le sable est considéré dans le calcul au lieu du gravier. De même, la figure 3.4a montre que le transport littoral net, qui intègre les deux directions, peut aussi être jusqu'à 20 fois plus grand dans le cas d'une plage de sable.

Les augmentations des taux de transport littoral se répercutent souvent en une augmentation du gradient de transport, c'est-à-dire que le transport littoral varie plus brusquement le long de la plage. En conséquence, les phénomènes d'érosion et d'accrétion progresseront plus rapidement dans le cas de la plage de sable par rapport à celui de la plage de gravier. À cet effet, deux sections de la recharge granulaire sont particulièrement vulnérables en raison du gradient positif (transport croissant de gauche à droite), ce qui signifie que la quantité de sédiments en provenance de l'amont (par rapport à la direction du transport) est insuffisante pour combler le départ de sédiments vers l'aval.

Dans l'extrémité est de la recharge de gravier (15 mm), le transport net augmente de 0 m³/année à 15 m³/année sur une distance d'environ 100 m ce qui équivaut à un recul d'environ 10 cm lors de la

première année². En considérant une recharge de sable, le transport net peut augmenter de 0 m³/année jusqu'à 110, 150, 220 et 440 m³/année en considérant une granulométrie de 2.0 mm, 1.5 mm, 1.0 mm et 0.5 mm respectivement et ce, toujours sur la même distance d'environ 100 m. Cela équivaut donc à un recul d'environ 70 cm, 90 cm, 140 cm et 280 cm durant la première année en considérant une granulométrie de 2.0 mm, 1.5 mm, 1.0 mm et 0.5 mm respectivement.

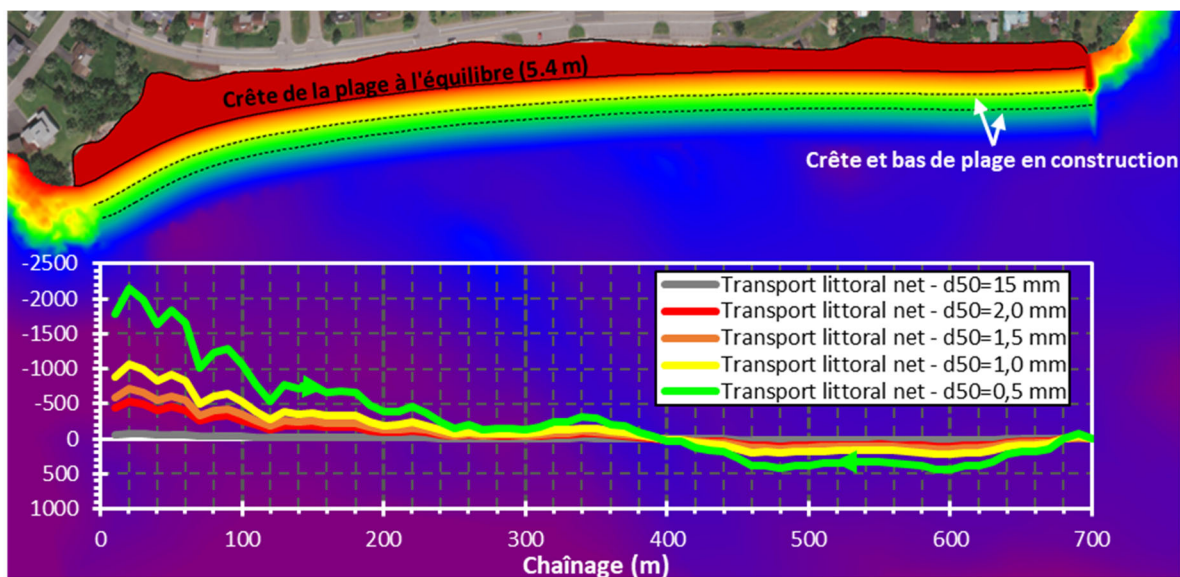
Ainsi dans la section est de la recharge, le taux de recul anticipé au tout début peut être de 7 à 28 fois plus rapide en utilisant du sable plutôt que du gravier. Ce taux de recul aura toutefois tendance à ralentir au fil des années au fur et à mesure que la plage se réoriente pour atteindre une forme qui se rapprochera de son état d'équilibre naturel. Pour que cet équilibre soit atteint, il demeure toutefois primordial que les sédiments soient contenus à l'intérieur de la recharge granulaire et qu'ils ne soient pas perdus par dérive littorale vers l'est de l'épi. Dans le cas d'une recharge de gravier, l'épi submersible à l'extrémité est de la recharge permettra d'intercepter le gravier transporté par charriage (roulement sur le fond marin) vers l'est. Toutefois dans le cas d'une recharge de sable, il est probable que l'épi submersible ne soit pas adéquat pour intercepter le sable transporté par suspension dans l'eau. Ainsi dans le but de permettre au sable d'être contenu à l'intérieur de la recharge et ainsi favoriser l'atteinte d'un état d'équilibre, il est préférable que la structure à l'extrémité est de la recharge soit un épi conventionnel, prolongé vers le large, plutôt qu'un épi submersible s'il est décidé de procéder à la recharge granulaire avec du sable au lieu du gravier. Des analyses approfondies, non couvertes par le présent mandat, seraient toutefois nécessaires pour raffiner les dimensions nécessaires d'un tel épi conventionnel.

Dans l'extrémité ouest de la recharge de gravier (15 m), le transport net augmente de 0 m³/année à 70 m³/année sur une distance d'environ 20 m ce qui équivaut à un recul d'environ 0.15 m lors du premier mois. En considérant une recharge de sable, le transport net peut augmenter de 0 m³/année jusqu'à 540, 720, 1070 et 2140 m³/année en considérant une granulométrie de 2.0 mm, 1.5 mm, 1.0 mm et 0.5 mm respectivement et ce, toujours sur la même distance d'environ 20 m. Cela équivaut donc à un recul d'environ 1.1 m, 1.5 m, 2.2 m et 4.5 m durant le premier mois en considérant une granulométrie de 2.0 mm, 1.5 mm, 1.0 mm et 0.5 mm respectivement.

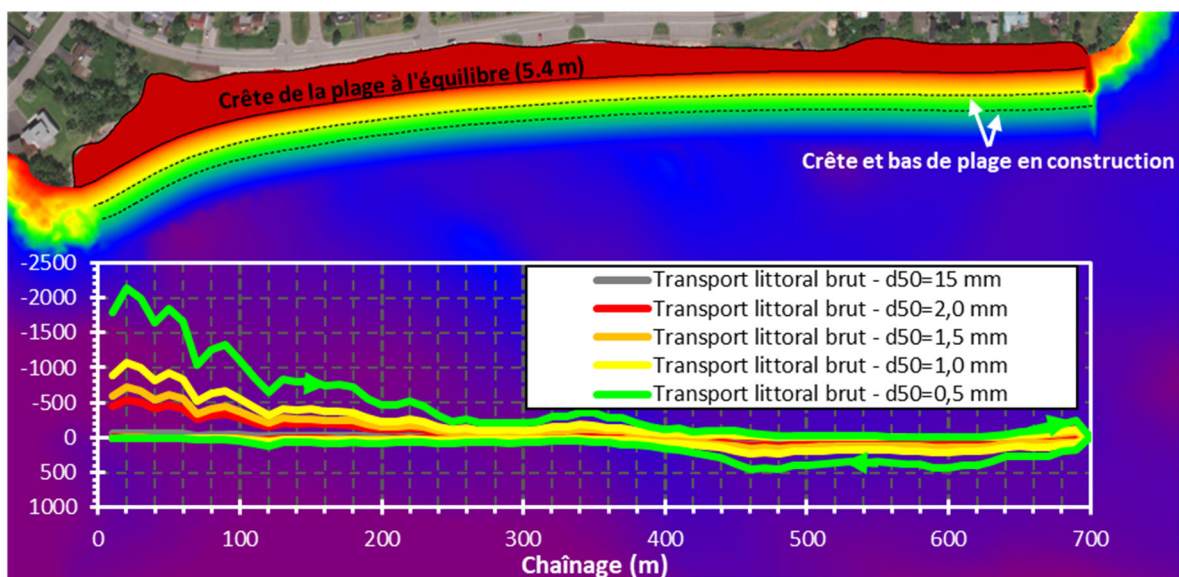
Ainsi dans la section ouest de la recharge, le taux de recul anticipé au tout début peut être de 8 à 30 fois plus rapide en utilisant du sable plutôt que du gravier. Ce taux de recul aura toutefois tendance à ralentir au fil des années au fur et à mesure que la plage se réoriente pour atteindre une forme qui se rapprochera de son état d'équilibre naturel. Bien qu'il soit difficile de définir avec précision la géométrie de cet état d'équilibre, il est estimé qu'un recul d'environ 15 m dans l'extrémité ouest de la recharge sera nécessaire pour atteindre un état relativement à l'équilibre pour ce qui a trait à l'orientation de la plage. À ce recul s'ajoutera également un recul supplémentaire d'au moins 33 m pour que le profil de plage puisse atteindre la pente d'équilibre théorique (section 3.2.2). Ainsi dans la portion ouest de la recharge, une érosion de la crête sera observée jusqu'à ce que le recul atteigne une distance d'au moins 48 m. S'il est décidé de procéder à la recharge granulaire avec du sable et non avec gravier, il deviendra donc nécessaire

² Ce recul est calculé uniquement sur la base du gradient de transport littoral et ne tient pas compte du recul supplémentaire engendré par le transport transversal issu des tempêtes ponctuelles

de recharger fréquemment cette portion de la recharge. L'augmentation du volume initial de la recharge de sable pour avoir des performances comparables à celle de la recharge de gravier n'apparaît pas réaliste. Aussi, la mise en place d'un mur littoral visant à assurer une certaine sécurité dans les zones en érosion pourrait être une option à envisager, la section 3.3 aborde ce scénario et met en évidence les contraintes associées.



a) Transport littoral net ($\text{m}^3/\text{année}$)



b) Transport littoral brut ($\text{m}^3/\text{année}$)

Figure 3.4 : Résultats de modélisation du transport littoral (long-terme) – Scénario D

3.2.4 Synthèse des résultats

L'utilisation du sable plutôt que du gravier dans la recharge granulaire aura pour effet d'accélérer les phénomènes d'érosion et d'accrétion. En utilisant un sable de 2.0 mm, un recul de la crête d'environ 33 m est nécessaire sur l'ensemble de la recharge pour que le profil théorique d'équilibre puisse être atteint. Puisque la largeur de la crête de la variante V3 de la recharge granulaire est d'environ 30 m dans la portion est de celle-ci, le profil théorique d'équilibre empièterait sur la limite de la recharge granulaire à certain endroit. Cela nécessiterait donc un entretien fréquent sous forme de rechargement supplémentaire en haut de plage.

De plus, des reculs supplémentaires seront également engendrés par la dérive littorale des sédiments et ce, surtout à l'extrémités ouest de la recharge granulaire. S'il est décidé de procéder à la recharge granulaire avec du sable et non avec gravier, il deviendra donc nécessaire de recharger fréquemment cette portion de la recharge ou de tout simplement accepter des éventuels dégâts en haut de talus à cet endroit. L'augmentation nécessaire du volume initial de la recharge de sable pour avoir des performances comparables à celle de la recharge de gravier n'apparaît pas réaliste. Néanmoins, il faudra tout de même envisager une augmentation du volume de matériau s'il est décidé de procéder à la recharge granulaire avec du sable au lieu du gravier. Pour fixer un ordre de grandeur, de manière schématique, les calculs ont montré que l'érosion se produisait 8 fois plus rapidement avec un sable de 2 mm (par rapport au gravier de 15 mm), donc pour un volume donné et une largeur donnée, la durée de vie utile serait typiquement 8 fois inférieure. Il faut ajouter à cela la déformation du profil vers un profil d'équilibre.

L'option d'utiliser du sable de 1.5 mm ou moins pour la recharge granulaire ne paraît pas réaliste en raison des reculs trop importants de la crête que cela engendrerait. Néanmoins, l'utilisation d'un sable de 2.0 mm nécessiterait des analyses approfondies, réalisées dans un mandat séparé, pour raffiner les dimensions de la recharge granulaire ainsi que de l'épi à l'extrémité est. À cet effet, il apparaît fort probable que les dimensions de ces ouvrages devront être révisées à la hausse s'il est décidé de procéder à la recharge granulaire avec du sable au lieu du gravier. D'ailleurs, la construction d'un épi conventionnel plutôt qu'un épi submersible serait recommandé à l'extrémité est de la recharge dans le scénario d'une recharge de sable.

3.3 Scénario E – Palplanches avec recharge de sable

3.3.1 Principes de base en lien avec les palplanches

En milieu côtier, les palplanches ont une double utilité. Premièrement, elles permettent de supporter le sol dans les situations où une pente abrupte empêche ce sol de se supporter sans assistance. Deuxièmement, les palplanches permettent d'offrir une protection face à l'attaque frontale des vagues.

L'utilisation de palplanches en milieu côtier vient toutefois avec des inconvénients. D'abord, les parois verticales du mur facilitent le franchissement des vagues (*wave overtopping*) au-dessus du mur. Ensuite, les vagues qui frappent le mur auront tendance à être réfléchies sur le mur, ce qui favorisera l'érosion de la plage au pied des palplanches. Finalement, les murs de palplanches, étant non-érodables, diminuent le transport littoral ce qui a pour conséquence de réduire l'apport sédimentaire en aval de celui-ci ce qui peut potentiellement créer une zone d'érosion. Tous ces aspects seront abordés dans les sections 3.3.2 et 3.3.3.

3.3.2 Modélisation de l'attaque frontale des vagues (tempêtes ponctuelles)

La modélisation de l'attaque frontale des vagues a été réalisée en appliquant la méthodologie mise au point dans l'étude de 2020 de modélisation numérique des conditions hydrosédimentaires à Port-Cartier [1]. En guise d'information, c'est la tempête synthétique surnommé « C », d'une période de retour d'environ 25 ans, qui est considérée dans la présente étude.

Le modèle XBeach-G par Deltares a été utilisé pour modéliser l'attaque frontale des vagues. Ce modèle permet de tenir compte des particularités en lien avec le transport de gravier. La discrétisation du profil varie d'ailleurs entre 2.5 m dans les zones profondes et 0.1 m dans les zones critiques du transport sédimentaire. La discrétisation du pas de temps est quant à elle d'une durée de seulement 0.1 s. Un tel niveau de raffinement permet ainsi de résoudre le run-up de vagues dans les simulations d'attaque frontale des vagues.

La figure 3.5 affiche les résultats de modélisation de l'attaque frontale des vagues en considérant une plage de sable de 2.0 m muni d'un mur de palplanches débutant à l'élévation 2.0 m (CGVD28) et s'étendant jusqu'à 5.4 m, soit la même élévation que celle de crête de la recharge de sable du scénario D. La portion du profil au-delà de l'élévation 2.0 m est donc considérée comme étant non-érodable par le modèle XBeach-G. En guise de rappel, cette configuration de palplanches permet d'offrir la protection nécessaire face aux événements de fortes tempêtes à niveau d'eau élevé (plus de 2 m) tout en minimisant l'ampleur des impacts engendrés sur le transport sédimentaire des événements fréquents à niveau d'eau modéré (moins de 2 m).

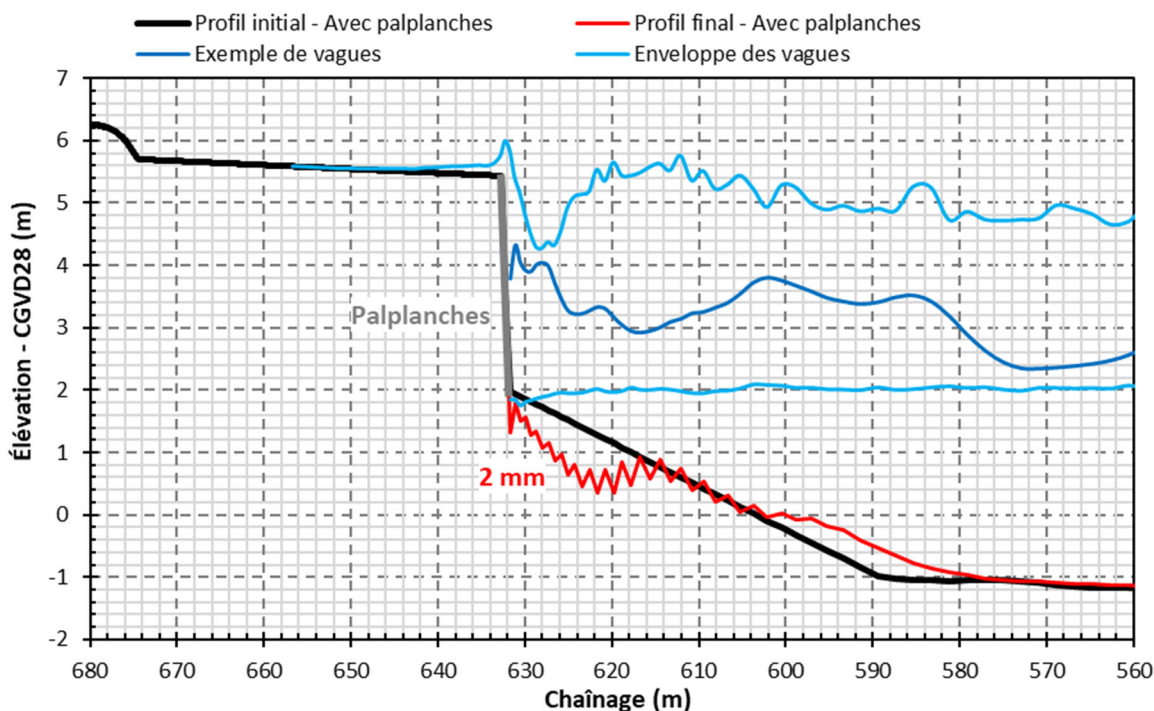


Figure 3.5: Résultats de modélisation XBeach-G (Tempête ponctuelle) – Scénario E

Les résultats de modélisation montrent qu’avec l’ajout du mur de palplanches, un franchissement des vagues est observé sur une longueur de plus de 20 m au-dessus de la structure. À titre indicatif, aucun franchissement de vagues n’était observé dans le scénario de la recharge de sable dépourvu de palplanches (voir figure 3.1 p.11).

Un franchissement des vagues au-dessus de la structure peut être problématique pour diverses raisons et ce, particulièrement dans un contexte où une route et une passerelle seraient situées immédiatement derrière la structure. D’abord, cela peut poser un danger pour les piétons circulant sur la passerelle. Ensuite, le franchissement des vagues peut projeter des débris flottants (bois, glace, etc.) sur la route. Finalement, un franchissement fréquent des vagues projettera de l’eau salée au-dessus de la structure ce qui pourrait impacter la végétation ou des infrastructures n’ayant pas été conçu pour résister à un tel niveau de salinité. Néanmoins, la fréquence de franchissement des vagues peut être réduite en étendant le mur de palplanches vers le haut à une élévation d’au moins 6 m.

Les résultats de modélisation révèlent aussi une érosion de la plage au pied des palplanches. Cette érosion est le résultat des vagues qui frappent le mur de palplanches et qui sont réfléchies. Les vagues réfléchies se superposent aux vagues incidentes ce qui tend à accentuer l’érosion au pied du mur. L’érosion au pied des palplanches est problématique pour deux raisons :

- D’abord d’un point de vue de conception côtière, il est critique que la fondation des palplanches ne soit pas érodée, sans quoi cela engendrerait une défaillance structurelle des palplanches tel qu’illustrée sur la figure 3.6. Il devient donc primordial que l’encastrement des palplanches soient suffisamment profond dans le sol puisque les résultats de modélisation montrent que

l'affouillement au pied des palplanches peut facilement descendre jusqu'à l'élévation 0 m (CGVD28) suite à l'action des tempêtes ponctuelles.

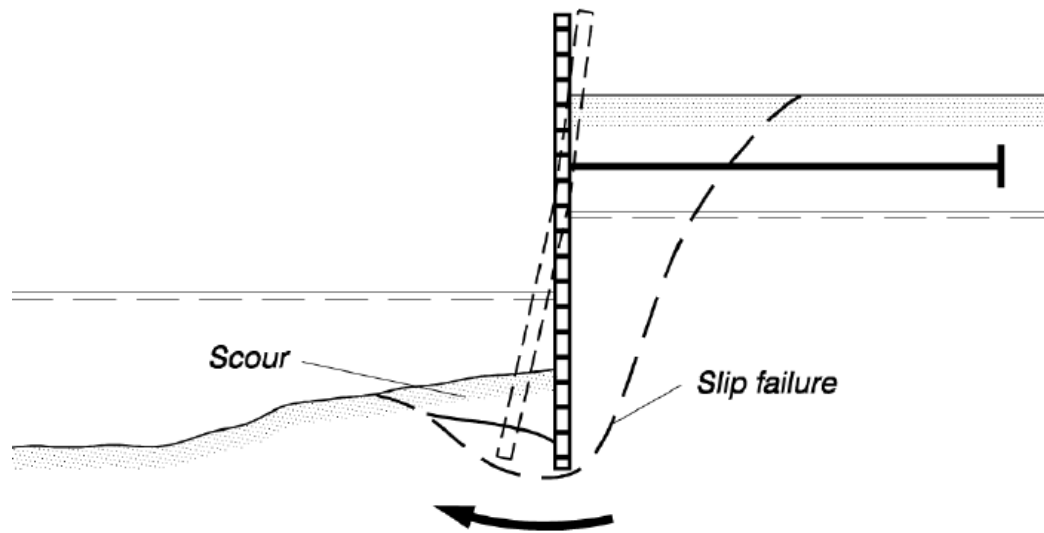


Figure 3.6 : Défaillance structurelle des palplanches (source : Coastal Engineering Manual)

- Ensuite, l'érosion au pied des palplanches fait en sorte que la pente de la plage devient abrupte et que, en conséquence, la plage devient beaucoup plus étroite. En effet, la figure 3.5 montre que la portion de la plage au-dessus de l'élévation 1 m s'étendait initialement sur une distance de 14 m et que suite à l'érosion, cette distance est réduite à 4 m. La largeur de la plage pouvant être utilisée à des fins récréative devient donc amplement réduite suite à l'érosion.

3.3.3 Modélisation du transport littoral (long-terme)

Les murs de palplanches, étant non érodables, ont tendance à faire diminuer le taux de transport sédimentaire vis-à-vis ceux-ci. Dans certaines situations, cette diminution peut devenir problématique sur la stabilité de la plage sur le long-terme. À ce propos, un exemple de situation problématique survient lorsque le taux de transport littoral est plus élevé en aval (par rapport à la direction du transport) du mur de palplanches que vis-à-vis celui-ci. Dans ce cas-ci, la quantité de sédiments en provenance de l'amont devient insuffisante pour combler le départ de sédiments vers l'aval ce qui résulte en un déficit sédimentaire et donc, à la formation d'une zone d'érosion en aval des palplanches.

Afin d'éviter autant que possible les problématiques de déficit sédimentaire sur le long-terme, les murs de palplanches doivent être configurés d'une manière à minimiser l'ampleur des impacts engendrés sur le transport littoral. C'est d'ailleurs pour cette raison que la configuration de palplanches proposée dans ce présent rapport inclut un remblai de sable jusqu'à une élévation de 2 m au-dessus des palplanches. Ainsi d'une telle manière, le mur de palplanches permet d'offrir la protection nécessaire face aux événements de fortes tempêtes à niveau d'eau élevé (plus de 2 m) tout en minimisant l'ampleur des

impacts engendrés sur le transport sédimentaire des événements fréquents à niveau d'eau modéré (moins de 2 m).

Dans la section 3.2.3, deux sections de la recharge granulaire avaient été identifiées comme étant particulièrement vulnérables en raison du gradient positif du transport littoral, ce qui signifie que la quantité de sédiments en provenance de l'amont (par rapport à la direction du transport) est insuffisante pour combler le départ de sédiments vers l'aval. Dans ces deux sections, soit aux extrémités ouest et est de la recharge, la présence d'un mur littoral offrirait une protection additionnelle du haut de talus dans les cas critiques. Toutefois l'érosion mise en évidence peut poser un défi particulier pour la conception d'un mur de palplanches en raison du risque accrue d'érosion au pied de ceux-ci. Bien qu'un mur de palplanches ne soit pas érodable, le sol sur lequel repose celui-ci peut être érodé ce qui résulterait éventuellement en un affaissement de la structure. Il sera dans ce cas important d'enfoncer les palplanches suffisamment profondément, ce qui pourrait tendre à surdimensionner l'ouvrage. Un tel scénario peut être évité par la réalisation de recharge granulaire récurrente au pied du mur de palplanches. Une telle solution s'avère toutefois coûteuse sur le long-terme.

Il est bien sûr possible d'étendre cette plage avec une recharge plus volumineuse comme celle présentée au scénario D. Tant que la recharge demeurera en place avec suffisamment de largeur et de hauteur, c'est celle-ci qui procurera la protection nécessaire envers les événements de tempête, le mur n'étant pas sollicité. Toutefois dans les zones en érosion (extrémités ouest et est), la perte de matériaux pourra éventuellement conduire à une configuration comparable à celle décrite précédemment (en fin de vue utile de la recharge dans ces zones), c'est-à-dire avec le mur en palplanche sollicité par les vagues de tempête. Dans ce cas, le rôle du mur est d'offrir une protection ultime ou d'urgence du haut de plage et des infrastructures le temps que la recharge d'entretien soit mise en place. Cette stratégie peut toutefois s'avérer particulièrement coûteuse puisqu'elle combine les coûts nécessaires à la mise en place d'une recharge massive et à la construction d'un mur de palplanches.

Une autre solution moins coûteuse sur le long-terme implique d'optimiser l'orientation du mur de palplanche d'une manière à minimiser l'érosion du sable au pied de celui-ci. Une telle optimisation, qui serait réalisées dans un mandat séparé, impliquerait d'orienter la plage ainsi que les palplanches d'une manière à ce que le gradient de transport soit nul, c'est à dire qu'il y aurait suffisamment de sédiments en provenance de l'amont (par rapport à la direction du transport) pour combler le départ de sédiments vers l'aval.

3.3.4 Synthèse des résultats

La mise en place d'un mur de palplanches vient avec des défis de conception en raison du risque accrue d'érosion au pied de celui-ci ce qui peut être problématique pour la stabilité de la structure sur le long-terme. L'orientation du mur de palplanches peut être optimisée dans le but de minimiser l'érosion du sable au pied de celui-ci. Une telle analyse nécessiterait toutefois une autre étude de modélisation hydrosédimentaire réalisé dans le cadre d'un mandat séparé. L'optimisation de l'orientation de ce mur ne réglerait toutefois pas la deuxième problématique en lien avec l'érosion au pied du mur de palplanches, soit la réduction importante de la largeur de la plage pouvant être utilisée à des fins récréative.

Les parois verticales du mur de palplanches facilitent le franchissement des vagues (*wave overtopping*) au-dessus du mur ce qui peut être problématique pour diverses raisons et ce, particulièrement dans un contexte où une route et une passerelle seraient situées immédiatement derrière la structure. La fréquence de franchissement des vagues peut être réduite en rehaussant le mur de à une élévation d'au moins 6 m. Encore une fois, une autre étude, réalisé dans le cadre d'un mandat séparé, permettrait d'optimiser la hauteur du mur de palplanches.

3.4 Scénario F – Recharge avec gravier et sable

3.4.1 Élaboration du concept de recharge avec gravier et sable

Dans la section 3.2, des reculs importants de la crête ont été mis en lumière dans le scénario de la recharge de sable (2 mm). En guise de rappel, un recul d'environ 33 m est nécessaire pour que le profil de la recharge puisse atteindre le profil d'équilibre théorique. À titre indicatif, ce même recul serait d'environ 10 m en utilisant du gravier (15 mm) au lieu du sable. Des reculs supplémentaires seront également engendrés par la dérive littorale des sédiments et ce, surtout à l'extrémités ouest de la recharge granulaire. À l'extrémité est de la recharge, une perte de sédiments par dérive littorale vers l'est de l'épi est probable ce qui engendrerait également des reculs supplémentaires de la crête à cet endroit.

Puisque l'utilisation du sable plutôt que du gravier est particulièrement problématique aux extrémités ouest et est de la recharge, une option à investiguer est d'utiliser du gravier à ces extrémités ainsi que du sable au milieu de la recharge. Ainsi, le Scénario F considère une recharge granulaire avec du gravier (15 mm) sur 200 m à chaque extrémité (400 m au total) et du sable (2 mm) au centre sur 300 m.

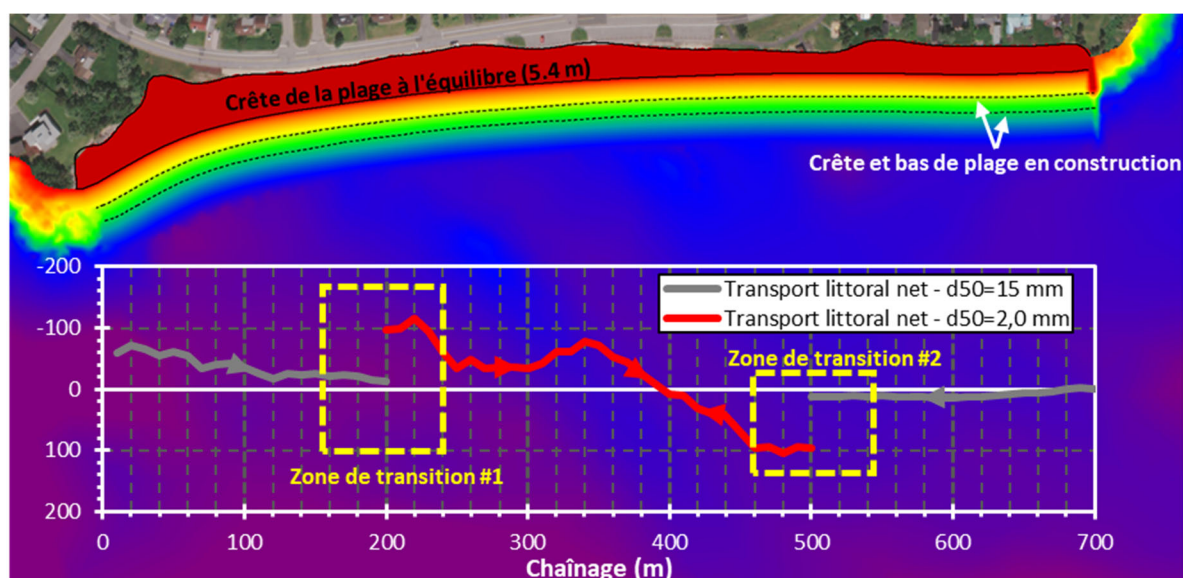
3.4.2 Synthèse des résultats

La figure 3.7 illustre les résultats de modélisation du transport littoral en considérant du gravier (15 mm) sur 200 m à chaque extrémité de la plage (400 m au total) et du sable (2 mm) au centre de celle-ci sur 300 m. Cette figure révèle deux zones de transition entre les matériaux de gravier et de sable. Dans la zone de transition #1, le transport littoral net, orienté vers l'est, passe du gravier vers le sable ce qui résulte en une augmentation du transport littoral le long de la plage, celui-ci passant d'environ 20 m³/année à 100 m³/année sur une distance d'environ 40 m. Dans la zone de transition #2, le transport littoral net, orienté vers l'ouest, passe du gravier vers le sable ce qui résulte en une augmentation du transport littoral le long de la plage, celui-ci passant d'environ 10 m³/année à 100 m³/année sur une distance d'environ 40 m. Dans les deux zones de transition, l'augmentation du transport littoral le long de la plage correspond à un recul de la crête d'environ 1 m durant la première année.

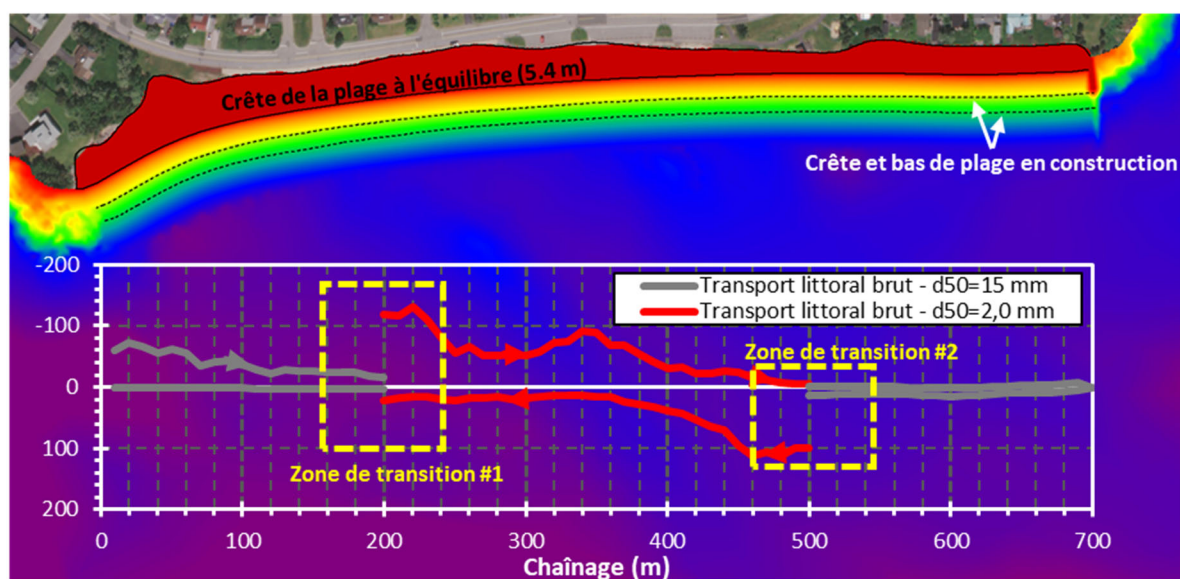
Il a été vu dans la section 3.2.2 que, pour atteindre le profil d'équilibre théorique, des reculs de la crête de 33 m et 10 m sont nécessaires dans les cas d'une recharge de sable (2 mm) et de gravier (15 mm) respectivement. En raison de ces différents taux de reculs, il est donc prévu que la portion centre de la recharge, celle-ci étant composée de sable, se remodèle selon une forme de « U » inversé puisque le recul initial à cet endroit sera plus important. Une telle forme, souvent appelé « pocket beach », peut générer des phénomènes hydrodynamiques 2D locaux pouvant accélérer l'érosion à certains endroits.

Ainsi dans la portion sable de la recharge, la crête subira un recul de 33 m pour atteindre le profil d'équilibre théorique, puis un recul supplémentaire de 1 m par année dans les zones de transition et finalement un recul additionnel potentiel en raison des phénomènes hydrodynamiques 2D locaux. Or, la largeur de la crête de la variante V3 de la recharge granulaire est d'environ 30 m à certains endroits au centre de celle-ci. Ainsi, la portion sable de la recharge nécessiterait un entretien fréquent sous forme de rechargement supplémentaire en haut de plage puisque le recul anticipé empiète sur la limite de la recharge granulaire.

Finalement, un dernier élément à considérer est la question du mélange de sable et de gravier sur la plage. À ce propos, la figure 3.7 montre qu'à l'ouest du chaînage 400 m, le transport net est orienté vers l'est alors qu'à l'est de ce chaînage, le transport est orienté vers l'ouest. Le chaînage 400 m constitue donc un point de convergence du transport littoral net. Ainsi sur le plus long terme, il est prévu qu'une fraction du gravier localisé aux extrémités ouest et est de la recharge granulaire transitera vers le centre de la plage. En conséquence, la portion centre de la recharge granulaire se caractérisera par un certain mélange de sable et de gravier sur le long-terme.



a) Transport littoral net ($\text{m}^3/\text{année}$)



b) Transport littoral brut ($\text{m}^3/\text{année}$)

Figure 3.7: Résultats de modélisation du transport littoral (long-terme) – Scénario E

4. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les berges de la municipalité de Port-Cartier subissent une érosion notable, en particulier à cause de l'impact des tempêtes automnales et hivernales qui surviennent dans le golfe du Saint-Laurent. Dans ce contexte, le Gouvernement du Québec (Ministère de la Sécurité publique) envisage présentement une intervention de protection sous la forme d'une recharge de plage à l'aide de matériaux granulaires (gravier).

Des concepts de scénarios alternatifs ont été évoqués par les représentants de la Ville de Port-Cartier. Ces concepts incluent notamment l'utilisation de matériaux de sable au lieu du gravier ainsi que la construction d'ouvrages côtiers. Trois concepts de scénarios alternatifs ont été considérés dans cette étude, soit les scénarios D, E et F, qui impliquent l'utilisation de matériaux de sable, l'utilisation de palplanches et l'utilisation d'une combinaison de matériaux de sable et de gravier respectivement.

Les scénarios D et F, qui impliquent l'utilisation de matériaux de sable, conduisent à des reculs importants de la ligne de crête. Dans ces deux cas, la recharge granulaire nécessiterait un entretien fréquent sous forme de rechargements complémentaires en haut de plage puisque le recul anticipé dépasse la limite de la recharge granulaire. L'utilisation du sable au lieu du gravier a également pour effet d'augmenter le transport littoral ce qui, en conséquence, accélère le déficit sédimentaire à certains endroits. Ainsi, les phénomènes d'érosion, principalement observés aux deux extrémités de la recharge, seront accélérés dans un scénario d'utilisation du sable comparativement à celui de l'utilisation du gravier. Le scénario F, qui implique d'utiliser du gravier aux extrémités de la recharge ainsi que du sable au centre de celle-ci, est à éviter puisque les zones de transition entre le gravier et le sable résulteront en un déficit sédimentaire et donc, à un recul accéléré de la crête de la plage.

Le scénario E, qui implique l'utilisation de murs de palplanches, vient avec des défis de conception en raison du risque accrue d'érosion au pied de celui-ci ce qui peut être problématique pour la stabilité de la structure sur le long-terme. De plus, l'érosion du pied de la plage fait en sorte que la largeur de la plage pouvant être utilisée à des fins récréative devient amplement réduite. Les parois verticales du mur de palplanches facilitent aussi le franchissement des vagues (*wave overtopping*) au-dessus du mur ce qui peut être problématique pour diverses raisons, dont celle, en particulier, s'inscrivant dans un contexte où une route et une passerelle seraient situées immédiatement derrière la structure. Un rehaussement de la crête à une élévation d'environ 6 m permettrait de réduire ce franchissement. La combinaison du mur littoral et d'une recharge (nécessitant des recharges d'entretien fréquent) serait potentiellement très coûteuse.

Parmi les trois scénarios considérés, le scénario D, qui implique l'utilisation de matériaux de sable (2 mm) sur l'ensemble de la recharge granulaire, est le seul qui pourrait être implanté de manière réaliste. Un tel scénario nécessiterait toutefois des analyses approfondies, réalisées dans un mandat séparé, pour raffiner les dimensions de la recharge granulaire ainsi que de l'épi à l'extrémité est. À cet effet, il apparaît fort probable que les dimensions de ces ouvrages (recharge et épi) devront être révisées à la hausse s'il est décidé de procéder à la recharge granulaire avec du sable au lieu du gravier. La largeur de la crête devra être augmentée pour compenser le recul accru et contenir un profil d'équilibre ayant une pente plus faible qu'avec du gravier. De plus, la construction d'un épi conventionnel plutôt qu'un épi submersible serait recommandé à l'extrémité est de la recharge dans le scénario d'une recharge de sable.

Néanmoins, il importe de rappeler que le scénario original de l'intervention de protection était d'utiliser du gravier pour recharger la plage en raison des avantages rattachés à ce matériau par rapport à celui du sable. En effet, l'utilisation du gravier permet de réduire le transport sédimentaire en plus d'offrir une protection accrue face aux événements rares de fortes tempêtes tout en maintenant des dimensions raisonnables pour la recharge granulaire. Bien qu'une recharge de sable puisse être plus attrayante d'un point de vue récréotouristique, les dimensions d'une telle recharge doivent être revues à la hausse pour compenser l'absence des avantages rattachés à l'utilisation du gravier dans la recharge granulaire.

5. RÉFÉRENCES

- [1] Lasalle, NHC, « Projet de recharge de la plage de Rochelois à Port-Cartier. Modélisation numérique des conditions hydro-sédimentaires », mars 2019.
- [2] US Army Corps of Engineers, « Coastal Engineering Manual », 2008.

Annexe 3 Plans de localisation des bancs d'emprunt



Format d'origine : 11x17 (1 : 65 000)

- Site d'emprunt
- Site de recharge de plage
- ▼ 3,0 ▼ Trajet inter-sites et distance (km)
- Trajet alternatif

Les éléments cartographiés sur ce document ne doivent pas servir à des fins de délimitation foncière. Aucun relevé n'a été effectué par un arpenteur-géomètre.

Caractérisation de bancs d'emprunt pour deux projets de recharge de plage à Port-Cartier

Localisation des sites d'emprunts

Sources :
Service d'imagerie du gouvernement du Québec
Adresses Québec, © Gouvernement du Québec, 2019
CanVec, 1 : 50 000, © Ressources naturelles Canada, 2017
MNT, 1 : 20 000, MRNF, © Gouvernement du Québec

0 650 1 300 m

UTM, fuseau 19, NAD83

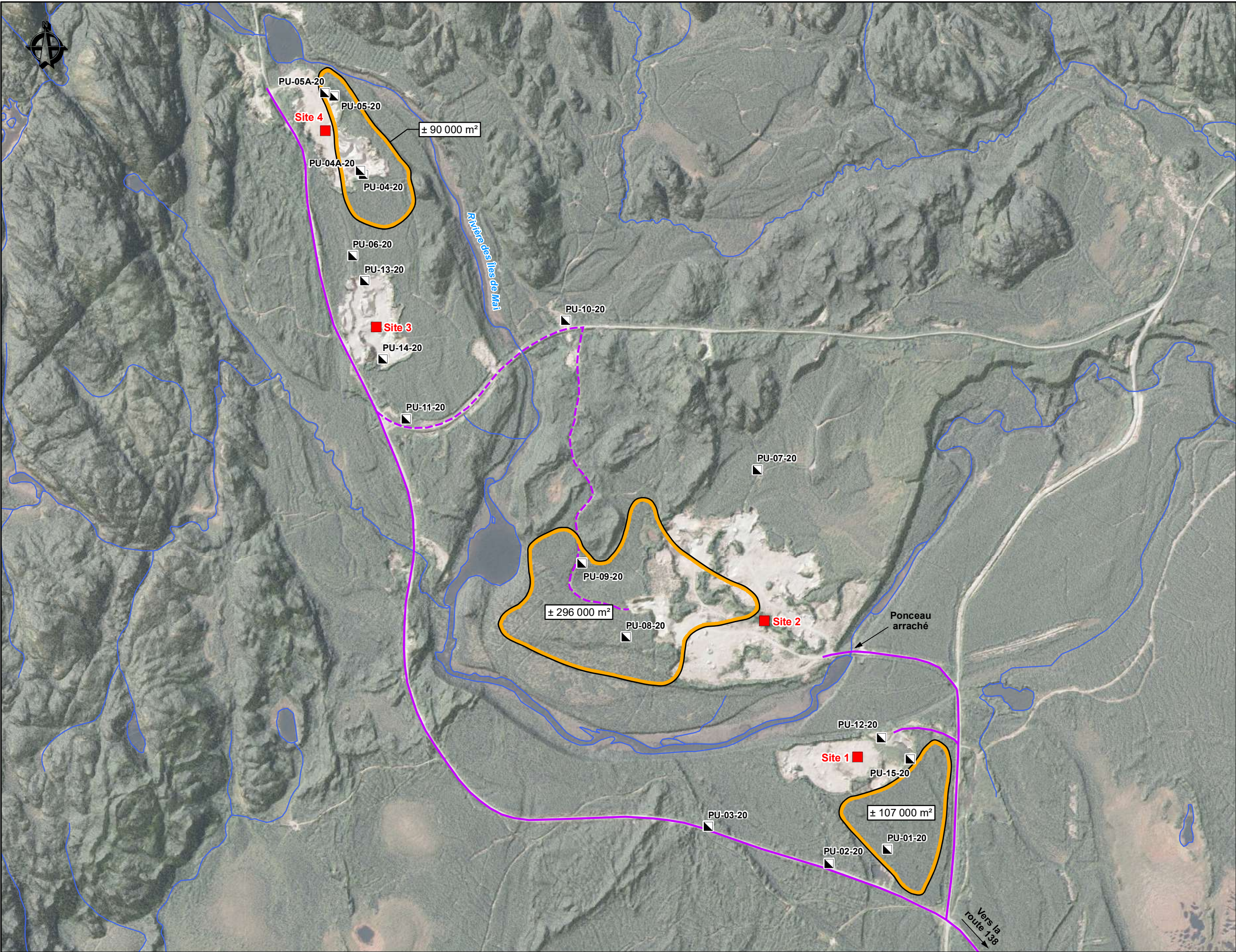
Juillet 2020

PRÉLIMINAIRE

Approuvé par :

Fichier : F1902094001K002_trajets_200707_SG.mxd





Format d'origine : 11x17 (1 : 12 500)

PU-XX-20

Puits d'exploration

Site d'emprunt

Chemin d'accès

Chemin d'accès alternatif

Secteur à fort potentiel

COORDONNÉES UTM NAD 83 FUSEAU 19

No FORAGE	NORD (Y)	EST (X)
PU-01-20	638 404,3	5 532 244,9
PU-02-20	638 208,5	5 532 197,5
PU-03-20	637 805,9	5 532 322,9
PU-04-20	636 653,5	5 534 500,1
PU-04A-20	636 643,9	5 534 513,3
PU-05-20	636 555,4	5 534 762,0
PU-05A-20	636 524,0	5 534 773,1
PU-06-20	636 618,2	5 534 228,4
PU-07-20	637 969,3	5 533 513,6
PU-08-20	637 531,3	5 532 955,7
PU-09-20	637 383,6	5 533 201,4
PU-10-20	637 329,0	5 534 012,8
PU-11-20	636 796,3	5 533 683,4
PU-12-20	638 384,4	5 532 617,5
PU-13-20	636 658,1	5 534 144,8
PU-14-20	636 718,0	5 533 883,1
PU-15-20	638 480,6	5 532 547,0

Les éléments cartographiés sur ce document ne doivent pas servir à des fins de délimitation foncière. Aucun relevé n'a été effectué par un arpenteur-géomètre.

Caractérisation de bancs d'emprunt pour deux projets de recharge de plage à Port-Cartier

Localisation des sondages

Source(s) :

Service d'imagerie du gouvernement du Québec
CanVec, 1/50 000, RNCan, 2017
LIDAR – Produits dérivés, MFFP

0125250 m

UTM, fuseau 19, NAD83

Juillet 2020

PRÉLIMINAIRE

Approuvé par :

Fichier : F1902094001K001_sondages_200707_SG.mxd

Annexe 4 Documents consultatifs



QUESTIONS - RÉPONSES

Pourquoi faites-vous ce projet ?

Depuis les dix dernières années, nous observons de l'érosion qui a provoqué un recul des terrains sur plus de 10 mètres derrière la plage Rochelois, en particulier à la suite des tempêtes du 6 décembre 2010 et celle du 30 décembre 2016. D'ailleurs, le trottoir de bois a dû être démantelé après avoir été sévèrement endommagé par cette dernière tempête. Nous constatons maintenant que plusieurs infrastructures essentielles sont menacées à court terme : 550 m de la rue des Rochelois et 160 m de la 5^e rue, incluant les infrastructures municipales qui s'y trouvent (aqueduc et égout), ainsi que les 29 résidences principales longeant la berge. Et ce, sans parler des résidences dont l'accès serait perturbé, sinon interdit, si des dommages affectaient la rue des Rochelois.

Le projet prévoit la mise en place d'une grande quantité de matériau granulaire sur toute la plage Rochelois, dans le but d'assurer une protection durable des infrastructures menacées. Cette solution comporte beaucoup moins d'impacts environnementaux qu'un enrochement ou qu'un mur vertical, puis permet de préserver les usages récréotouristiques actuels de la plage.

Advenant qu'aucun projet de protection ne se réalise, le scénario anticipé inclut une destruction des infrastructures identifiées à risque. Un déversement d'une grande quantité d'eaux usées dans l'environnement est également à prévoir puisque les égouts s'avèrent une conduite principale à cet endroit. Dans ce scénario, d'autres résidences et rues deviendraient éventuellement à risque en raison du recul de la berge. Nous considérons qu'il est préférable de réaliser ce projet avant que ces conséquences ne se concrétisent.

Par ailleurs, la municipalité bénéficie d'un financement important de la part du ministère de la Sécurité publique (MSP), dont la contribution maximale de la municipalité s'élève à 1 800 000 \$, ce qui ne constitue qu'une fraction du coût du projet.

L'aspect de la plage sera-t-il modifié ?

L'aspect de la plage sera modifié. Toutefois, des mesures d'atténuation seront réalisées afin de préserver au maximum l'aspect actuel de la plage Rochelois.

Pour le changement de granulométrie, **du sable sera utilisé pour la couche finale** du plateau supérieur de la recharge, contrairement aux travaux effectués dans le secteur de place McCormick. La partie en pente ne sera toutefois pas recouverte de sable, étant donné que les vagues de tempête l'établiraient trop rapidement. De plus, un phénomène de « granulo-classement naturel » est prévu en raison du brassage des sédiments par les vagues, ce qui aura pour effet de faire remonter les sables à la surface, particulièrement lors des mois d'été. Par la suite, il sera possible pour la municipalité d'effectuer des recharges en sable additionnelles pour préserver au maximum l'aspect esthétique de cette plage.

Il n'y aura aucune obstruction visuelle provoquée par le projet de recharge, puisque la crête de la recharge de plage sera au même niveau ou sous le niveau de la berge actuelle.

L'accès piétonnier à la plage sera intégralement préservé et sera même facilité, car la hauteur du talus sera diminuée, étant donné que la plage sera rehaussée.

Les figures suivantes illustrent des exemples de projets de recharge et l'évolution de l'aspect des plages, démontrant le potentiel des mesures d'atténuation combinées aux processus naturels.



Figure 1 - UN AN APRÈS LA CONSTRUCTION - Recharge de plage à Sainte-Luce en 2015



Figure 2 - CINQ ANS APRÈS LA CONSTRUCTION - Recharge de plage à Sainte-Luce en 2019



Figure 3 – **IMMÉDIATEMENT APRÈS LA CONSTRUCTION** - Recharge de plage à Notre-Dame-du-Portage.



Figure 4 - **DEUX ANS APRÈS LA CONSTRUCTION** - Recharge de plage à Notre-Dame-du-Portage



CONSULTATIONS PUBLIQUES

PROJET DE STABILISATION DU SECTEUR DE LA PLAGE ROCHELOIS

Pourquoi opter pour du gravier ?

Le matériau mis en place dans la recharge est un mélange de sable, graviers et cailloux. Ce choix de matériau granulaire permet une meilleure stabilité de la berge contre l'érosion et une plus grande durée de vie utile de l'ouvrage. Si du sable était utilisé comme matériau de recharge, il faudrait une quantité beaucoup plus importante pour assurer la même protection, de même que des entretiens réguliers, ce qui décuplerait le coût des travaux à court et long terme.

Ce que vous planifiez va-t-il s'éroder avec la première grosse tempête ?

Les matériaux ne seront pas emportés par la première grosse tempête. Il est toutefois prévu que le matériau granulaire mis en place prenne progressivement sa pente d'équilibre lors des premières tempêtes, ce qui aura un effet **d'adoucissement de la pente laissée après la construction**. Ce réajustement de la pente de la recharge n'est en aucun cas une « défaillance » du concept. Il s'agit d'un processus naturel qui permettra à la plage de mieux s'ajuster aux contraintes hydrodynamiques de ce secteur. Par la suite, il est prévu que la plage maintienne une certaine stabilité avec des variations saisonnières similaires à celles des plages naturelles. D'ailleurs, la pente de la nouvelle plage (recharge), une fois à l'équilibre, aura sensiblement la même pente que la plage actuelle, ce qui permettra de préserver les usages récréotouristiques actuels. La plage sera plus large aussi, ce qui donnera encore plus de place pour ces activités.

Pourquoi ne pas protéger seulement la partie touchée par l'érosion ?

Certaines parties de la plage sont effectivement plus à risque à court terme. Toutefois, notre objectif est d'obtenir une protection efficace sur plusieurs années, ce qui nécessite d'intervenir sur l'ensemble de la plage.

Combien de temps ces travaux nous protégeront-ils ?

Plusieurs études, dont des modélisations numériques des conditions hydrosédimentaires ont été réalisées, afin de prévoir le comportement et la performance de la recharge à long terme. Les prévisions indiquent une bonne performance de la recharge pour au moins trente (30) ans, sans entretien.

Quelles sont les solutions qui ont été évaluées ?

La démarche de conception s'est déroulée à la suite de nombreuses autres études faites depuis 2013. Cette démarche suit une réflexion intégrant l'analyse de nombreux projets de protection côtière, dont un grand nombre à l'étranger. L'équipe d'ingénieurs spécialisés derrière la conception du projet de la Plage Rochelois a été active dans de nombreux projets réalisés aussi bien au Canada qu'à l'étranger. Ces experts ont aussi participé à la conception des premiers projets de recharge d'envergure au Québec, soit à Sainte-Luce et Percé, ainsi que ceux à venir à Pointe-aux-Outardes et La Grave aux Îles-de-la-Madeleine.

Une recherche de solutions exhaustive s'est effectuée pour la protection des berges à la Plage Rochelois. Ainsi, en 2013, les consultants Ropars inc. (pour la firme Dessau) procédaient à une étude hydraulique et à une analyse de solutions pour différents secteurs vulnérables à l'érosion côtière à Port-Cartier, incluant le secteur de la Plage Rochelois.



CONSULTATIONS PUBLIQUES

PROJET DE STABILISATION DU SECTEUR DE LA PLAGE ROCHELOIS

L'analyse en ingénierie des différentes variantes a permis de conclure qu'une recharge de plage avec des matériaux grossiers serait la meilleure solution parmi celles considérées :

L'enrochement. Cette solution consiste en la mise en place de grosses roches (± 3 tonnes, 4 pieds de diamètre) le long de la berge afin de protéger celle-ci de l'érosion, en dissipant l'énergie des vagues. L'enrochement est largement appliqué par le ministère des Transports du Québec pour la protection des berges longeant les routes. Ce type d'intervention engendrerait toutefois la disparition totale de la plage à moyen terme. Cette solution a également comme inconvénient de restreindre l'accès au littoral. L'enrochement n'est donc pas adapté au caractère récréotouristique du secteur.

Un mur de soutènement. Cette solution consiste en la construction d'un mur le long de la berge, permettant de retenir le sol sur lequel reposent les infrastructures à protéger. Ce type d'intervention engendrerait la disparition totale de la plage à moyen terme. Par ailleurs, le coût de construction de cette alternative dépasserait largement celui du projet prévu. Cette solution a également comme inconvénient de restreindre l'accès au littoral. Le mur de soutènement n'est donc pas adapté au caractère récréotouristique du secteur.

Le génie végétal. Le génie végétal n'est pas adapté pour résister à l'énergie des vagues qui provoquent l'érosion dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Par contre, il peut venir en soutien à une solution plus en mesure de résister aux grandes forces hydrodynamiques en cause, en végétalisant le haut d'un enrochement ou d'une recharge de plage.

La recharge. La recharge de plage consiste en la mise en place d'une grande quantité de matériaux (gravier, galets, sable) sur la plage. Cette méthode est utilisée depuis plusieurs décennies dans le monde, comme en Europe ou aux États-Unis, mais n'est que récemment appliquée au Québec. L'efficacité de cette méthode a également été démontrée dans le cas de la plage Rochelois par des modélisations numériques très complètes. Cette solution permet de mieux préserver l'accessibilité au littoral et de préserver les activités récréotouristiques sur la plage, contrairement aux autres solutions analysées.

D'ailleurs, plusieurs scénarios de recharge ont été évalués, afin de déterminer les caractéristiques optimales du matériau qui sera utilisé. Ces scénarios incluaient des matériaux avec un diamètre moyen de 5 mm, 10 mm et 15 mm.

À Port-Cartier, le lundi 9 novembre 2020

Monsieur le Maire,
Mesdames, Messieurs, les Conseillers municipaux
Citoyennes, citoyens

Nous sommes présents ce soir pour vous faire part de notre opposition au projet, dans son état actuel, de recharge de la plage Rochelois prévu d'être effectué à l'été 2021.

J'ai été délégué par notre comité citoyen, nouvellement formé en octobre 2020, pour vous transmettre notre position sur ce sujet, position qui s'appuie sur une pétition signée par déjà plus d'un milliers de personne et qui grossit de jour en jour.

Nous tenons tout d'abord à remercier la municipalité pour le travail diligent d'information qu'elle a fait dans les derniers mois par le biais de capsules vidéo disponibles sur le site internet de la ville pour informer sa population. Cette information claire, facilement accessible et de bonne qualité a été cruciale dans notre compréhension du dossier. Il est également important de mentionner ici la transparence de la municipalité pour répondre aux questions techniques soulevées et qui nous ont été répondues avec rapidité par le personnel compétent de vos services. Dans ce même esprit de transparence envers ses citoyens, nous ne doutons pas que la municipalité accordera une réponse rapide et favorable à notre demande d'avoir accès aux rapports complets d'étude de ce projet :

- L'étude de 2013 privilégiant la recharge de plage comme meilleure solution technique disponible pour lutter contre l'érosion côtière dans notre cas ;
- les deux rapports techniques commandés à la firme Ropars en 2020 ;
- le rapport d'étude d'impact commandé à la firme Englobe en 2020.

Le règlement des factures concernant ces trois derniers rapports ayant été votés et approuvés au dernier conseil municipal d'octobre 2020, nous croyons la version finale de ceux-ci déjà entre vos mains.

Malgré la bonne volonté affichée de la municipalité, force est de constater, qu'en ces temps de pandémie, les présentations et discussions publiques sur ce sujet, représentant la véritable vitalité de notre démocratie locale, n'ont pu jouer leur vrai rôle. Nous serions intéressé à savoir comment la municipalité compte procéder à une consultation de sa population et s'assurer d'une acceptabilité sociale pleine et entière sur ce sujet qui intéresse au premier chef ses concitoyens ?

Le qualificatif le plus fréquemment utilisé par les signataires de notre pétition pour qualifier la plage Rochelois est « joyau », le joyau de Port-Cartier. C'est vous dire tout l'attachement affectif, intrinsèque et même identitaire qui lie la plage Rochelois à quiconque, port-cartois de naissance, d'adoption ou de passage, qui l'a vue ou la côtoie. Qui en effet ne l'associe pas à un bon moment passée en famille durant nos belles journées d'été, à une agréable promenade, à marée basse, lorsque la mer se retire pour nous laisser profiter de ces bancs de sable fin à perte de vue, à la pratique d'un sport aquatique dans un cadre enchanteur, à l'observation patrimoniale du Lady Era, changeante au gré des tempêtes, à un symbole de cette nature maritime qui est la nôtre, tantôt calme, tantôt tumultueuse, mais toujours magnifique, et

ce, en plein centre-ville. Avec sa popularité auprès des touristes de toute la province lors du dernier été, son attractivité récréo-touristique et son rayonnement hors de nos frontières municipales ne sont plus à démontrer. Pour tous les propriétaires de résidences du secteur Rochelois, qu'ils aient décidé de s'y installer pour élever leur famille, pour y couler les jours heureux d'une retraite bien méritée ou pour habiter à deux pas et à la vue du magnifique Golfe du Saint-Laurent qui est notre voisin, l'attrait, l'accessibilité et l'usage actuelle de la plage Rochelois a représenté et représente toujours une caractéristique pour laquelle ils ont accepté de payer le prix financier au moment de leur achat et sur laquelle il compte bien profiter lors d'une revente éventuelle.

Alors bien sûr, nous savons que la beauté de cette nature peut se révéler destructrice et menaçante et nous sommes tous en accord, nous acceptons et nous supportons la volonté de la municipalité de vouloir protéger les infrastructures côtières et les résidences riveraines de la plage. L'érosion des berges est un fléau du Québec au XXI^e siècle et Port-Cartier n'en est pas épargné, nous y avons d'ailleurs payé un lourd tribut dans les dernières années. Les différents paliers de gouvernement, y compris le vôtre, prennent le sujet au sérieux et ont rendu disponibles fonds et programmes pour y faire face. Le risque est cependant d'adopter une approche systématique, appliquant des solutions génériques mur à mur à toutes les situations, ne tenant pas compte des spécificités locales.

Prenons-garde également à ce que cette aide ne devienne pas notre piège par ses promesses de subventions alléchantes et son échéancier aussi serré que rigide. Nous pensons que le programme gouvernemental de subvention, expirant en mars 2022, impose une pression indue sur le processus décisionnel devant aboutir à la meilleure solution technique. Celle-ci a de bien nombreux objectifs à concilier : protection des infrastructures, limitation de l'impact environnemental sur la faune et la flore, conservation et protection des caractères récréo-touristiques et naturelles de la plage, faisabilité technique, contrôle des coûts et soutenabilité de ceux-ci pour notre municipalité dans le futur. Le projet est complexe et les parties prenantes nombreuses. En pareil contexte, urgence et précipitation sont bien mauvaises conseillères. Et malheureusement, nous avons déjà pu constater cette année leurs effets avec la recharge effectuée à la plage McCormick. Qui n'a, en effet, pas été stupéfait, choqué, atterré par le procédé employé lors de la recharge de la plage McCormick ? De la « garnotte », à grande largeur, certaines roches plus grosses que le poing, une pente tellement abrupte à son extrémité que l'accès sécuritaire à l'eau n'est même plus envisageable. Alors, fermant les yeux et s'imaginant la même chose dès l'année prochaine à la pleine largeur de la plage Rochelois, la simple idée en est douloureuse et insoutenable.

C'est pourquoi nous demandons aujourd'hui à notre municipalité et à nos élus que, pour cette décision qui engage Port-Cartier et ses habitants pour les prochaines décennies, une alternative socialement acceptable soit trouvée, ce qui n'est pas le cas pour l'instant. La recharge de la plage Rochelois telle qu'actuellement planifiée pour l'été 2021 bien qu'elle prétend protéger les infrastructures ne garantit pas, à notre sens, la conservation des aspects familiaux, plaisanciers et touristiques de la plage Rochelois. L'atteinte de ce double objectif est et sera la condition indispensable à l'acceptabilité sociale d'un tel projet.

Comité citoyen pour la sauvegarde de la plage Rochelois

**PÉRIODE DE QUESTIONS
LORS DE LA SÉANCE DU 9 NOVEMBRE 2020**

1. [REDACTED]

Q. : Il se présente, il est le porte-parole du Comité citoyen pour la sauvegarde de la plage Rochelois. Il est présent avec ses collègues du comité afin de faire part de leur opposition au projet, dans son état actuel, de recharge de plage. Le comité a à ce jour, une pétition signée par 1 400 citoyens. Il demande à avoir accès aux rapports complets d'étude de ce projet, soit l'étude de 2013 privilégiant la recharge de plage comme meilleure solution technique disponible pour lutter contre l'érosion côtière dans notre cas, les deux rapports techniques commandés à la firme Ropars en 2020 et le rapport d'étude d'impact commandé à la firme Englobe en 2020. Il demande comment la municipalité compte procéder à une consultation de sa population et s'assurer d'une acceptabilité sociale. Il demande qu'une alternative socialement acceptable soit trouvée. La recharge de la plage Rochelois, telle qu'actuellement planifiée pour l'été 2021, bien qu'elle prétend protéger les infrastructures ne garantit pas la conservation des aspects familiaux, plaisanciers et touristiques de la plage Rochelois. Il demande finalement l'opinion des élus.

R. : *M. le maire Alain THIBAUT répond qu'une séance d'information aura lieu prochainement. Des représentants régionaux du ministère de la Sécurité publique viendront pour fournir toutes les explications et répondre aux questions des citoyens dans la meilleure transparence. Ce sera l'occasion pour les gens du ministère de voir la réaction des gens. Il ajoute qu'il y aurait également une audience publique au printemps prochain. Il faut faire preuve de stratégie et suivre les étapes du processus. Il mentionne comprendre la position du comité citoyen. Il est important de donner l'opportunité à tous de recevoir l'information. La Ville compte 6 500 habitants et il faut tenir compte de tous.*

2. [REDACTED] **(également du Comité citoyen)**

Q. : Elle mentionne que pour la séance d'informations, seulement 50 personnes pourront y assister et que cela ne sera pas représentatif.

R. : *M. le maire Alain THIBAUT répond que nous sommes limités en raison des mesures de distanciation. L'Agora a été ciblée comme endroit, car c'est la salle ayant la plus grande capacité. Il y aura possibilité de faire une seconde séance. L'enregistrement est une autre option.*

3. [REDACTED]

Q. : Elle demande pourquoi ne pas attendre d'être capable de se réunir en plus grand nombre. Elle demande la position des conseillers.

R. : *M. le maire Alain THIBAUT mentionne que sa position est de protéger l'intégralité de la plage et les infrastructures, donc le projet de recharge ne remplit pas les deux fonctions. Il mentionne que nous avons tenté de proposer un autre concept il y a quelques mois. Le ministère de la Sécurité publique avait donné son accord et laissait un délai de quelques mois pour étudier d'autres options, notamment les palplanches. Le délai a ensuite été réduit à quelques semaines. Par la suite, des représentants régionaux du ministère de la Sécurité*

publique nous ont mentionné que si nous faisons d'autres démarches en parallèle, notre dossier serait fermé. Ils ont demandé un engagement formel à se concentrer sur le projet de recharge de plage. Engagement qu'ils n'ont jamais reçu. Le conseil a décidé de poursuivre le processus afin de pouvoir donner l'information aux citoyens.

4. [REDACTED] (également du Comité citoyen)

Q. : Il redemande la position des élus.

R. : M. le conseiller Mario GAUMONT et M^{me} la conseillère Patricia COUETTE sont contre le projet actuellement proposé. Ils se désolent que le ministère n'ait pas laissé la possibilité de poursuivre l'étude d'autres options. M^{me} la conseillère Carole CHEVARIE mentionne qu'il est important de suivre tout le processus afin que tous les citoyens puissent avoir accès à l'information et puissent s'exprimer.

5. [REDACTED]

Q. : Demande les résultats de l'étude de la firme ENGLOBE.

R. : Il lui est répondu que la section Questions et réponses a été ajoutée à la suite des questions reçues des citoyens lors de la consultation publique de cet été.

6. [REDACTED]

Q. : Il explique la raison pour laquelle il est important pour lui d'avoir l'opinion des élus. Il mentionne que le comité fera ses représentations au ministère de la Sécurité publique. Le comité a cependant voulu en premier lieu s'adresser au conseil municipal. C'était la première étape de commencer par le palier municipal. Comme citoyen, il a besoin d'avoir le conseil de son côté.

R. : M. le conseiller Daniel CAMIRÉ mentionne qu'il ne nuira pas au Comité citoyen dans sa démarche, qu'il tient à protéger l'intégralité de la plage ainsi que les infrastructures. Il ajoute qu'il est important de faire les choses intelligemment et de respecter les étapes. M^{me} la conseillère Cécile CAMIRÉ mentionne qu'elle veut protéger l'intégralité de la plage, mais qu'il faut bien faire les choses et respecter les étapes. M^{me} la conseillère Marie CORBEY, mentionne que la bonne façon de faire est de suivre le processus pour ne pas se fermer les portes. On ne peut pas prédire l'avenir et les tempêtes. Il est important d'y aller pour une autre solution que la recharge, qui permettra de remplir les deux fonctions.

7. [REDACTED]

Q. : Elle demande pourquoi avoir réagi seulement après la recharge de la plage McCormick.

R. : Bien que le concept et les plans aient été expliqués, on ne pouvait pas savoir concrètement le résultat. Quand on parle de granulométrie, c'est une moyenne.

8. [REDACTED]

Q. : Il demande une confirmation de la date de la séance d'information du ministère de la Sécurité publique.

R. : *Il lui y est répondu que la date n'est pas encore confirmée. Les annonces seront faites dans le journal, sur la page Facebook et sur l'afficheur numérique.*

9. [REDACTED] (*également du Comité citoyen*)

Q. : Il désire souligner qu'une recharge de la plage Rochelois, avec du sable, a été faite en 1975. Il y a travaillé. Il demande comment vont fonctionner les inscriptions pour la séance d'information.

R. : *Il lui est répondu que les citoyens voulant assister à la séance d'information devront s'inscrire à l'avance, et que ce sera par ordre d'inscription (premier à réserver, premier inscrit).*

10. [REDACTED]

Q. : Il désire mentionner que tous les résidents en bordure de la plage Rochelois ont signé la pétition. Même si leurs résidences sont à risque. Il confirme que le comité n'est pas opposé à la protection des infrastructures, mais au projet de recharge dans son état actuel. Il demande d'autres alternatives.

R. : *M. le maire Alain THIBAUT répond que si nous rejetons la solution du ministère, le ministère n'étudiera pas d'autres solutions. La subvention ne serait donc plus disponible. On veut essayer d'aller chercher le maximum possible pour que les citoyens en aient à absorber le moins possible.*

11. [REDACTED]

Q. : Il demande où en sont rendus les travaux de réfection de la conduite.

R. : *Il lui est répondu que les travaux sont suspendus pour l'hiver et recommenceront au printemps prochain, l'ingénieur ou le directeur du Service des travaux publics sont les mieux placés pour lui répondre à quel endroit physique en sont rendus les travaux.*



Par courriel seulement : secretaire.politique@itum.qc.ca

Port-Cartier, le 28 octobre 2021

Monsieur Mike McKenzie
Chef de bande

Objet : Études d'impacts produits par la ville de Port-Cartier en collaboration avec le ministère de la Sécurité Publique dans le cadre du projet de stabilisation du secteur de la plage Rochelois

Monsieur le Chef,

Depuis quelques mois, la ville de Port-Cartier élabore en collaboration avec le ministère de la Sécurité Publique un projet visant la stabilisation des berges du secteur de la plage Rochelois, située au cœur de la ville de Port-Cartier. Dans ce contexte, une étude d'impacts a été produite, laquelle a été présentée au ministère dans le cadre de l'analyse environnementale. Vous trouverez donc, ci-joint une copie de ce document.

Nous vous invitons à nous faire part de vos commentaires ou préoccupations sur les éléments introduits aux documents en lien avec l'information relative à l'utilisation du territoire par les membres de votre communauté, ou sur tout autre élément en lien avec vos intérêts, vos valeurs et vos besoins qui devrait être pris en compte lors de l'élaboration de ce projet. Nous souhaitons recevoir vos commentaires ou préoccupations d'ici le 26 novembre 2021 afin que la ville de Port-Cartier puisse les prendre en compte le plus en amont possible dans le processus d'élaboration du projet.

Pour toute question ou précision relative à cette demande de consultation, vos collaborateurs peuvent communiquer avec M. Pierre-Charles April, ing. au 418-766-5603.

Veuillez agréer, Monsieur le Chef, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Andrée Bouffard
Directrice générale

Annexe 5 Quantification des émissions de gaz à effet de serre

Ville de Port-Cartier

ESTIMATION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE (GES)

**Projet de stabilisation du secteur de la plage
Rochelois à Port-Cartier**

16-P0017164.001-1001-EN-R-0100-00

DÉCEMBRE 2021

VERSION FINALE



Préparé par :

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Elisa Verma".

Elisa Verma, Ing. M.Sc..
Professionnelle en environnement
Études environnementales et
changements climatiques

Vérifié par :

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Jean-Luc Bugnon".

Jean-Luc Bugnon Chef de projet –
secteur industriel
Études environnementales et
changements climatiques

Approuvé par :

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Catherine Lalumière".

Catherine Lalumière, biol., MBA
Chargée de projet et directrice-adjointe
de service
Études environnementales et
changements climatiques

Sommaire

En juin 2020, la Ville de Port-Cartier a soumis le rapport d'étude d'impact sur l'environnement au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) pour le projet de stabilisation du secteur de la plage Rochelois à Port-Cartier. Dans le contexte de la *Procédure sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement* (PÉEIE), le MELCC a émis une première série de questions et de commentaires sur l'étude d'impact sur l'environnement (ÉIE). Le présent document a été produit pour répondre à une des questions posées, laquelle visait à quantifier les émissions de gaz à effet de serre (GES) résultant de la réalisation du projet. Il inclut la justification du choix des sources d'émissions retenues et exclues ainsi que la quantification des GES pour les phases de construction et d'exploitation. Compte tenu de la nature du projet, les sources d'émissions retenues se limitent à la combustion des sources mobiles (p. ex. : transport des matériaux ainsi que fonctionnement de la machinerie et de l'équipement).

Au total, le projet sera responsable de l'émission de 918 t CO₂ eq, qui surviendront au cours des 14 semaines que durera la phase de construction. Les émissions de la phase d'exploitation ainsi que d'entretien représentent moins de 1 % des émissions de GES du projet et constituent donc une contribution négligeable. Ces émissions ont donc été exclues de la quantification.

La Ville de Port-Cartier intégrera des mesures ou des bonnes pratiques dans le contexte de ce projet pour limiter les émissions de GES. Parmi ces mesures, celles qui seront mises en œuvre dans le contexte du projet sont les suivantes :

- ▶ Éviter de laisser les véhicules de chantier fonctionner inutilement au ralenti;
- ▶ S'assurer que les véhicules de chantier et la machinerie soient en bon état de marche afin de limiter les émissions atmosphériques;
- ▶ Utiliser des équipements et mettre en œuvre des normes de construction et d'aménagement ainsi que des procédures et des modes d'exploitation favorisant l'efficacité énergétique.

Équipe de réalisation

Ville de Port-Cartier

Chargé de projet	Pierre-Charles April, ing.
------------------	----------------------------

Englobe Corp.

Directeur de projet	Michel Belles-Isles, biol., Ph. D.
Chargée de projet	Catherine Lalumière, biol., MBA
Collaborateur	Elisa Verma, ing., M. Sc.
Révision et édition	Geneviève Desbiens, B. A.

Registre des révisions et émissions		
N° de révision	Date	Description
00	13 décembre 2021	Émission de la version finale

Propriété et confidentialité

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

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

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

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

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

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
2	MÉTHODOLOGIE	3
2.1	Sources d'émission de gaz à effet de serre	4
2.2	Limitations de l'estimation de la quantification	4
2.3	Données d'entrée pour estimer les gaz à effet de serre produits.....	4
2.4	Émissions directes de gaz à effet de serre de la combustion	4
2.4.1	Émissions attribuables aux systèmes de combustion fixes	4
2.4.2	Émissions attribuables à la combustion par les équipements mobiles.....	5
2.4.3	Autres émissions.....	5
2.5	Émissions indirectes de gaz à effet de serre.....	5
2.5.1	Émissions liées à la consommation d'électricité	5
3	QUANTIFICATION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE	7
4	INCERTITUDE	9
5	ATTÉNUATION.....	11
6	RÉFÉRENCES.....	13

Tableaux

Tableau 1	Potentiels de réchauffement planétaire.....	3
Tableau 2	Facteurs d'émissions.....	3
Tableau 3	Données d'entrée utilisées pour le calcul de l'empreinte carbone de la phase de construction du projet	4
Tableau 4	Hypothèses de consommation de carburant pendant la phase de construction ...	5
Tableau 5	Émissions de GES par source.....	7
Tableau 6	Analyse d'incertitude	9

Annexes

Annexe 1	Plan de surveillance
----------	----------------------

1 Introduction

En juin 2020, la Ville de Port-Cartier a soumis le rapport d'étude d'impact sur l'environnement (ÉIE) au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) pour le projet de stabilisation du secteur de la plage Rochelois, à Port-Cartier. Dans le contexte de la *Procédure sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement* (PÉEIE), le MELCC a émis une première série de questions et de commentaires sur l'ÉIE. Le présent document a été produit pour répondre à une des questions posées, laquelle visait à quantifier les émissions de gaz à effet de serre (GES) résultant de la réalisation du projet.

2 Méthodologie

La quantification des émissions de GES a été réalisée selon le *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre* du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC, 2019). Conformément au guide, les potentiels de réchauffement planétaire pour les principaux GES (carbone, méthane et protoxyde d'azote) ont été établis à partir du quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (tableau 1; GIEC, 2019). Quant aux facteurs d'émissions utilisés, ils proviennent du *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre* (tableau 2; MELCC, 2019).

Tableau 1 Potentiels de réchauffement planétaire

Type de gaz à effet de serre	Potentiel de réchauffement planétaire ¹	Référence
CO ₂	1	Tableau 3. <i>Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre</i> (MELCC, 2019).
CH ₄	25	
N ₂ O	298	

¹ Données provenant du 4^e rapport du GIEC (2007)

Tableau 2 Facteurs d'émissions

Sources	Émissions de CO ₂	Émissions de CH ₄	Émissions de N ₂ O	Unité	Émissions de CO ₂ eq	Unité	Référence
Combustion de carburants							
Combustion du diesel	2,681	0,00011	0,00015	kg/L	2,73	kg CO ₂ eq	Tableau 4. <i>Guide de quantification de gaz à effet de serre</i> (MELCC, 2019).
Combustion du diesel par les véhicules hors route	2,681	0,00007	0,00002	kg/L	2,69	kg CO ₂ eq	Tableau 4. <i>Guide de quantification de gaz à effet de serre</i> (MELCC, 2019).

L'approche de la quantification des émissions de GES respecte les étapes suivantes :

- Identification des données de base (p. ex. : le nombre d'heures de fonctionnement par type de machinerie);
- Définition des limites du système, comme les incertitudes;
- Identification des intrants et extrants de GES comme les facteurs d'émissions ou le litrage de combustible utilisé;
- Identification des émissions directes, sous le contrôle de la Ville de Port-Cartier, et des émissions indirectes;
- Quantification des émissions de GES selon le *Guide de quantification de gaz à effet de serre* du ministère.

2.1 Sources d'émission de gaz à effet de serre

Après une analyse des activités prévues, les sources d'émissions de GES attribuables aux phases de construction et d'exploitation du projet ont été identifiées. Pendant la construction, les sources d'émissions directes sont associées à la combustion de carburant par les camions de transport (camion-benne) et l'équipement de préparation du site.

Pendant la phase d'exploitation, les sources d'émissions sont liées aux travaux d'entretien, qui sont prévus aux dix ans. Comme les travaux de maintenance ne dureront que de 30 à 60 minutes durant chaque intervention, les émissions liées à cette source d'émission sont estimées à moins de 1 % de la quantité totale des GES émis dans le contexte du projet. Par conséquent, elles sont considérées comme négligeables et exclues de la quantification.

2.2 Limitations de l'estimation de la quantification

La quantification des émissions de GES est basée sur le plan du projet fourni par la Ville de Port-Cartier. De plus, les émissions de GES indiquées dans ce rapport ont été établies en fonction de méthodes et de données disponibles au moment de réaliser cette analyse. Spécifiquement, les données de consommation de carburant ont été calculées de façon indirecte en utilisant des estimations du nombre de voyages parcourus par les véhicules de transport et du nombre d'heures d'utilisation d'équipements hors route. La consommation réelle de combustible peut varier de façon marquée en fonction des conditions du site, de l'âge et du niveau d'entretien de l'équipement utilisé, ainsi que du temps de marche au ralenti autorisé.

2.3 Données d'entrée pour estimer les gaz à effet de serre produits

Afin de calculer l'empreinte carbone de la phase de construction, des hypothèses ont été posées sur la base de données d'entrée provenant de l'ÉIE et de communications avec la Ville de Port-Cartier (tableau 3).

Tableau 3 Données d'entrée utilisées pour le calcul de l'empreinte carbone de la phase de construction du projet

Sources	Élément	Quantité	Unité	Référence
Transport des matériaux – camion-benne	Distance	780 000	Kilomètres	Chaque voyage est de 25 km. Communication client.
Équipement – chargeuse	Temps	660	Heures	Communication avec la Ville de Port-Cartier
Équipement – pelle mécanique	Temps	624	Heures	Communication avec la Ville de Port-Cartier
Équipement – camions	Temps	12 253	Heures	Communication avec la Ville de Port-Cartier
Équipement – tout-terrain	Temps	959	Heures	Communication avec la Ville de Port-Cartier
Équipement – bouteur	Temps	606	Heures	Communication avec la Ville de Port-Cartier

2.4 Émissions directes de gaz à effet de serre de la combustion

2.4.1 Émissions attribuables aux systèmes de combustion fixes

Il n'y a aucune émission provenant des systèmes de combustion fixes prévue dans ce projet.

2.4.2 Émissions attribuables à la combustion par les équipements mobiles

En fonction du type de véhicules et de machinerie prévus, des hypothèses ont été posées sur la consommation de carburant pour chacun des équipements considérés (tableau 4).

Tableau 4 Hypothèses de consommation de carburant pendant la phase de construction

Type de véhicule		Consommation moyenne		Référence
		Quantité	Unité	
Transport en Vrac				
Transporteur	Consommation moyenne	38	L/100 km	https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_HDV_FC_lit-review_20150209.pdf
Construction				
Pelle mécanique		22,00	L/h	Medium excavator; https://www.nextgeneration.nz/fuel-edge/
	Au ralenti	3,70	L/h	https://www.nextgeneration.nz/fuel-edge/
	Temps moyen au ralenti	20	%	Estimation Englobe
Bouteur		34,07	L/h	Dozer 982M; https://www.nextgeneration.nz/fuel-edge/
	Au ralenti	3,70	L/h	Dozer 982M; https://www.nextgeneration.nz/fuel-edge/
	Temps moyen au ralenti	50	%	Estimation Englobe
Chargeuse		27,70	L/h	Exhibit 3-8, Fuel Usage Factors in Highway and Bridge Construction. 2013. National Cooperativ
	Au ralenti	4,10	L/h	https://www.cat.com/en_US/articles/ci-articles/ask-the-expert.html
	Temps moyen au ralenti	20	%	Estimation Englobe
Tout-terrain		7,00	L/h	Exhibit 3-8, Fuel Usage Factors in Highway and Bridge Construction. 2013. National Cooperativ Highway Research Program. Transportation Reseach Board.Report 744. https://www.nap.edu/nap-cgi/skimchap.cgi?recid=22629&chap=i%E2%80%93vii
	Au ralenti	4,10	L/h	https://www.cat.com/en_US/articles/ci-articles/ask-the-expert.html
	Temps moyen au ralenti	10	%	Estimation Englobe

2.4.3 Autres émissions

À part la combustion par l'équipement mobile, aucune émission directe de GES, comme de l'utilisation du béton ou du sautage, n'est attendue.

2.5 Émissions indirectes de gaz à effet de serre

2.5.1 Émissions liées à la consommation d'électricité

Aucune émission liée à la consommation d'électricité n'a été considérée dans cette analyse, puisqu'aucune source d'électricité provenant du réseau public n'est requise.

3 Quantification des émissions de gaz à effet de serre

Les calculs sont basés sur des données et des estimations d'utilisation d'équipement fournies par le promoteur qui ont été remises à Englobe pour effectuer les calculs.

Les émissions directes de GES attribuables à des sources de combustion mobiles sont calculées à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Émissions de gaz à effet de serre} = \sum_{i=1}^{i=n} \text{Quantité de carburant } i \text{ consommée} \times \text{facteur d'émission}_i$$

Équation 2. Émissions de GES attribuables à l'utilisation d'équipements mobiles du Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre (MELCC, 2019).

En fonction des hypothèses posées, la quantité annuelle de diesel utilisée pour le transport des matériaux prévu est de 293 085 L, alors que celle utilisée par l'équipement mobile de construction est de 43 975 L (tableau 5). Rappelons que les facteurs d'émissions proviennent du tableau 4 du *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre* (MELCC, 2019).

L'empreinte carbone associée à la phase de construction du projet s'établit annuellement à 918 t CO₂ eq (tableau 5). Du total des émissions estimées, la grande majorité (87 %) est attribuable à la combustion du carburant requis pour le transport des matériaux en vrac.

Tableau 5 Émissions de GES par source

Sources de GES		Quantité	Unité	Émissions de GES			
				t CO ₂	t CH ₄	t N ₂ O	t CO ₂ eq
Phase Construction							
Combustion de carburant	Diesel pour le transport en vrac	293 085	Litres	786	0,032	0,044	800
Combustion de carburant	Utilisation de combustibles par l'équipement de terrain	43 975	Litres	118	0,003	0,001	118
TOTAL				904	0,035	0,045	918

4 Incertitude

L'incertitude du calcul des émissions de GES peut être évaluée à l'aide de la méthode décrite au chapitre 3 du document *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (2019). Pour la quantification des émissions attendue du projet, il existe un faible niveau d'incertitude lié aux facteurs d'émissions. Cependant, les estimations du temps et de la consommation de combustible liées à la construction peuvent varier de façon marquée en fonction des conditions du site, de l'âge et du niveau d'entretien de l'équipement utilisé, ainsi que du temps de marche au ralenti autorisé. Pour cette raison, un niveau élevé d'incertitude a été attribué à la phase de construction de la quantification du projet, qui est de ± 243 t CO₂ eq.

Tableau 6 Analyse d'incertitude

Source	Émissions de GES	Unité	Niveau d'incertitude	Unité
En amont des opérations – transport en vrac	800	t CO ₂ eq	Élevé (30 %)	%
Construction – combustibles utilisés par l'équipement de construction	118	t CO ₂ eq	Élevé (30 %)	%
TOTAL	918	t CO ₂ eq		
Incertain	± 243	t CO ₂ eq		

5 Atténuation

La ville de Port-Cartier intégrera des mesures ou des bonnes pratiques dans le contexte de ce projet pour limiter les émissions de GES. Parmi ces mesures, celles qui seront mises en œuvre dans le contexte du projet sont les suivantes :

- ▶ Éviter de laisser les véhicules de chantier fonctionner inutilement au ralenti;
- ▶ S'assurer que les véhicules de chantier et la machinerie soient en bon état de marche afin de limiter les émissions atmosphériques;
- ▶ Utiliser des équipements et mettre en œuvre des normes de construction et d'aménagement ainsi que des procédures et des modes d'exploitation favorisant l'efficacité énergétique.

Afin de quantifier les émissions de GES engendrées par le projet et d'évaluer l'effectivité des mesures d'atténuation, un plan de surveillance a été élaboré (annexe A).

6 Références

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (GIEC). 2019. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MELCC). 2019. *Guide de la quantification des émissions de gaz à effet de serre*.

Annexe 1 Plan de surveillance

Plan de surveillance et de suivi des émissions de GES

Catégorie	Type de données	Unité	Source des données	Fréquence	Mesures de contrôle de qualité des données	Rétention des données
Équipement motorisé	Consommation de carburant de chacun des véhicules	Litres	Factures	Journalière	À confirmer avec le kilométrage et nombre d'heures utilisés	De façon électronique et sur papier
	Kilométrage de chacun des véhicules	Kilomètres	Odomètres	Journalière	À confirmer avec le carnet de route	De façon électronique
	Heures d'utilisation des véhicules hors route	Heures	Registre des opérations	Journalière	À confirmer avec le carnet de chantier	De façon électronique



