Analyse des solutions

Atténuation du risque d'érosion de berges

Port-Cartier, Québec

Dossier Ville de Port-Cartier : VPS-TP-SPI-20120621-01
Dossier DESSAU : B0004260



Rapport technique FINAL

Par

Yann ROPARS, ing., M.Sc.

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

Juillet 2013

Pour

DESSAU

TABLES DES MATIÈRES

1 Introduction....1
2 Données de base....3
2.1 Plans de bathymétrie / topographie....3
2.2 Plans de bathymétrie....3
2.3 Photos aériennes....4
2.4 Position des profils - secteur Rochelois....4
2.5 Position des profils - secteur Place McCormick....5
2.6 Position des profils - secteurs Portage et Pointe-aux-Anglais....6
2.7 Comparaison LIDAR / GeniArp....8
2.7.1 Secteur Rochelois....8
2.7.2 Secteur McCormick....9
2.7.3 Secteur Portage....10
2.7.4 Secteur Pointe-aux-Anglais....11
3 Inspection du site....13
3.1 Visites de terrain....13
3.2 Observations....13
3.2.1 Secteur Rochelois....13
3.2.2 Secteur Place McCormick....18
3.2.3 Secteur Portage....22
3.2.4 Secteur Pointe-aux-Anglais....25
4 Niveaux d'eau....28
4.1 Sources de l'information....28
4.2 Données du SHC....28
4.3 Base de données de la station de Port-Cartier....29
4.4 Base de données de la station de Sept-Îles....30
4.5 Prévision de niveau d'eau extrême haut à Port-Cartier....32
4.6 Influence des changements climatiques sur les niveaux d'eau hauts....33
4.7 Niveaux d'eau hauts recommandés à Port-Cartier....35
4.8 Profil du rivage – Secteur Rochelois....35
4.9 Profil du rivage – Secteur McCormick....36
4.10 Profil du rivage – Secteur Portage....36
4.11 Profil du rivage – Secteur Pointe-aux-Anglais....38
5 Vagues au large de Port-Cartier....40
5.1 Contexte de l'étude de vagues....40

5.2 Données de vent de la station de Sept-Îles....41
5.3 Données de vent de Port-Menier....42
5.4 Données de vent de la station virtuelle Fleuve-I....43
5.5 Fetchs....44
5.6 Génération des vagues au large....47
5.7 Sélection des paramètres de calcul....48
5.8 Tentative de calibration des paramètres du modèle de vagues....51
5.9 Vagues prédites au large de Port-Cartier....52
5.10 Vagues extrêmes prédites au large....54
6 Vagues près des infrastructures projetées....56
6.1 Réfraction....56
6.2 Réfraction....57
6.3 Résultats des calculs de réfraction....58
6.4 Vagues extrêmes près de la plage....60
6.5 Hauteur de vagues recommandée près de la plage....62
7 Dimensionnement d'une protection en enrochement....64
7.1 Remontée des vagues sur un enrochement....64
7.2 Dimensionnement des pierres de carapace de l'enrochement des berges....66
7.3 Dimensionnement des pierres de carapace des épis de Rochelois (recharge) 68
7.4 Ancrage des pierres en place dans le fond marin....69
7.5 Plan des projets d'enrochement des berges....69
7.6 Évaluation des quantités de pierres - Secteur Rochelois....71
7.7 Coûts estimatifs du projet d'enrochement du secteur Rochelois....71
7.8 Évaluation des quantités de pierres - Secteur McCormick....72
7.9 Coûts estimatifs du projet d'enrochement du secteur McCormick....72
8 Recharge de la plage....73
8.1 Granulométrie du matériel de recharge....73
8.2 Granulométrie des matériaux disponibles dans la région....75
8.3 Profil d'équilibre de la plage actuelle....75
8.4 Remontée des vagues sur une plage....81
8.5 Profils d'équilibre d'une plage rechargée....83
8.6 Dimensionnement de la protection de pied de falaise du secteur McCormick....83
8.7 Coupes-types de recharge de plage du secteur Rochelois....84
8.8 Coupes-types de recharge de plage du secteur McCormick....86
8.9 Coupes-types de recharge de plage du secteur Portage....86
8.10 Coupes-types de recharge de plage du secteur Pointe-aux-Anglais....87

8.11 Évaluation des quantités de matériel de recharge - Secteur Rochelois.....89
8.12 Coûts estimatifs du projet de recharge de plage du secteur Rochelois.....90
8.13 Évaluation des quantités de matériel de recharge - Secteur McCormick.....91
8.14 Coûts estimatifs du projet de recharge de plage du secteur McCormick.....91
8.15 Évaluation des quantités de matériel de recharge - Secteur Portage.....93
8.16 Coûts estimatifs du projet de recharge de plage du secteur Portage.....93
8.17 Évaluation des quantités de matériel de recharge - Secteur Pointe-aux-Anglais.....94
8.18 Coûts estimatifs du projet de recharge de plage du secteur Pointe-aux-Anglais.....94
9 Échéancier et étapes de réalisation.....95
9.1 Étapes de réalisation.....95
9.2 Échéancier de réalisation.....96
10 Méthode de construction.....97
10.1 Origine des matériaux.....97
10.2 Ancrage du pied de l'enrochement.....97
10.3 Mise en place des pierres de protection.....97
10.4 Mise en place de la recharge de plage.....98
11 Expertise hydraulique.....99
11.1 Travaux de protection de berge.....99
11.2 Limites des travaux.....99
11.3 Effets des travaux sur la cellule hydrosédimentaire.....99
11.4 Durée de vie des travaux.....101
11.5 Méthodes de travail.....101
11.6 Inspection et entretien.....101
12 Empiétement sur le milieu marin.....102
12.1 Limite du milieu marin.....102
12.2 Superficies d'empiétement sur le milieu marin.....102
13 Conclusion et recommandations.....103
13.1 Conclusion.....103
13.2 Recommandations.....104

1 Introduction

La municipalité de Port-Cartier est située dans l'estuaire du fleuve Saint-Laurent, sur la rive nord du fleuve, à environ 60 km au sud-ouest de Sept-Îles (figure 1.1).

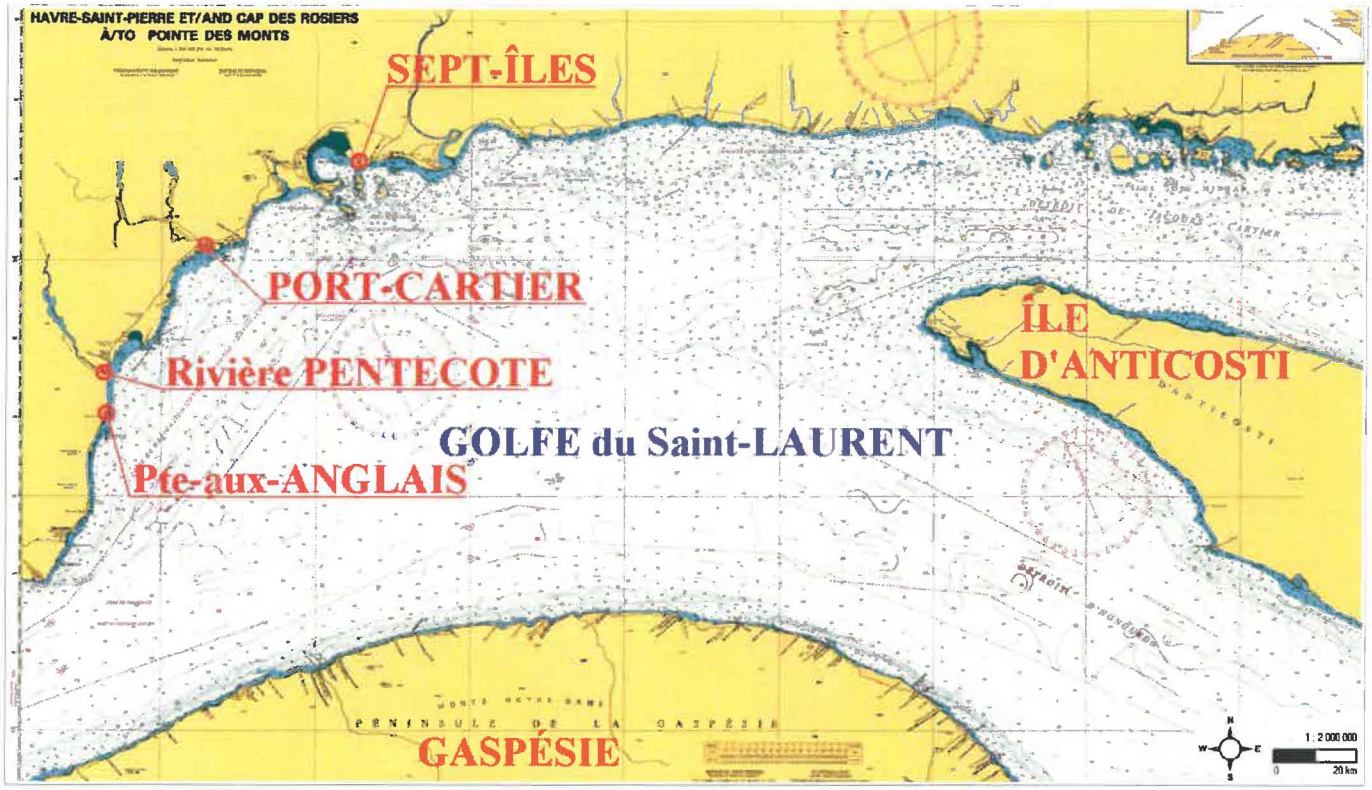


Figure 1.1 Plan de localisation de la municipalité de Port-Cartier (carte marine 4026)

La municipalité de Port-Cartier a demandé une analyse de solutions ainsi que la production de plans et estimations préliminaires visant la prévention et l'atténuation du risque d'érosion des berges dans quatre secteurs ciblés de la municipalité. Une étude préliminaire de la problématique d'érosion des berges avait été réalisée en 2008 par l'UQAR[1] et Ouranos[2]. Cette étude n'avait pas directement visé les berges de Port-Cartier mais, entre autres, celles de Sept-Îles et de Gallix situées près de Port-Cartier.

L'appel d'offre lancé par la municipalité a été remporté par Dessau qui a fait appel aux Consultants Ropars Inc. pour traiter les aspects hydrodynamiques de cette problématique.

[1]Bernatchez, P. & al. « Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques », Rapport de recherche du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (UQAR) remis au consortium Ouranos, Juin 2008

[2]Ouranos, « Étude de sensibilité des côtes et de la vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques », Juin 2008

Le présent rapport fait état des observations faites sur le site et des paramètres hydrodynamiques du projet. Il présente les analyses (génération des vagues au large, réfraction des vagues jusqu'à la berge, analyse des niveaux d'eau, dimensionnement de la protection contre les vagues) faites pour évaluer les solutions de protection de berge dans les différents secteurs et proposer des concepts de gestion des côtes en vue de diminuer leur vulnérabilité.

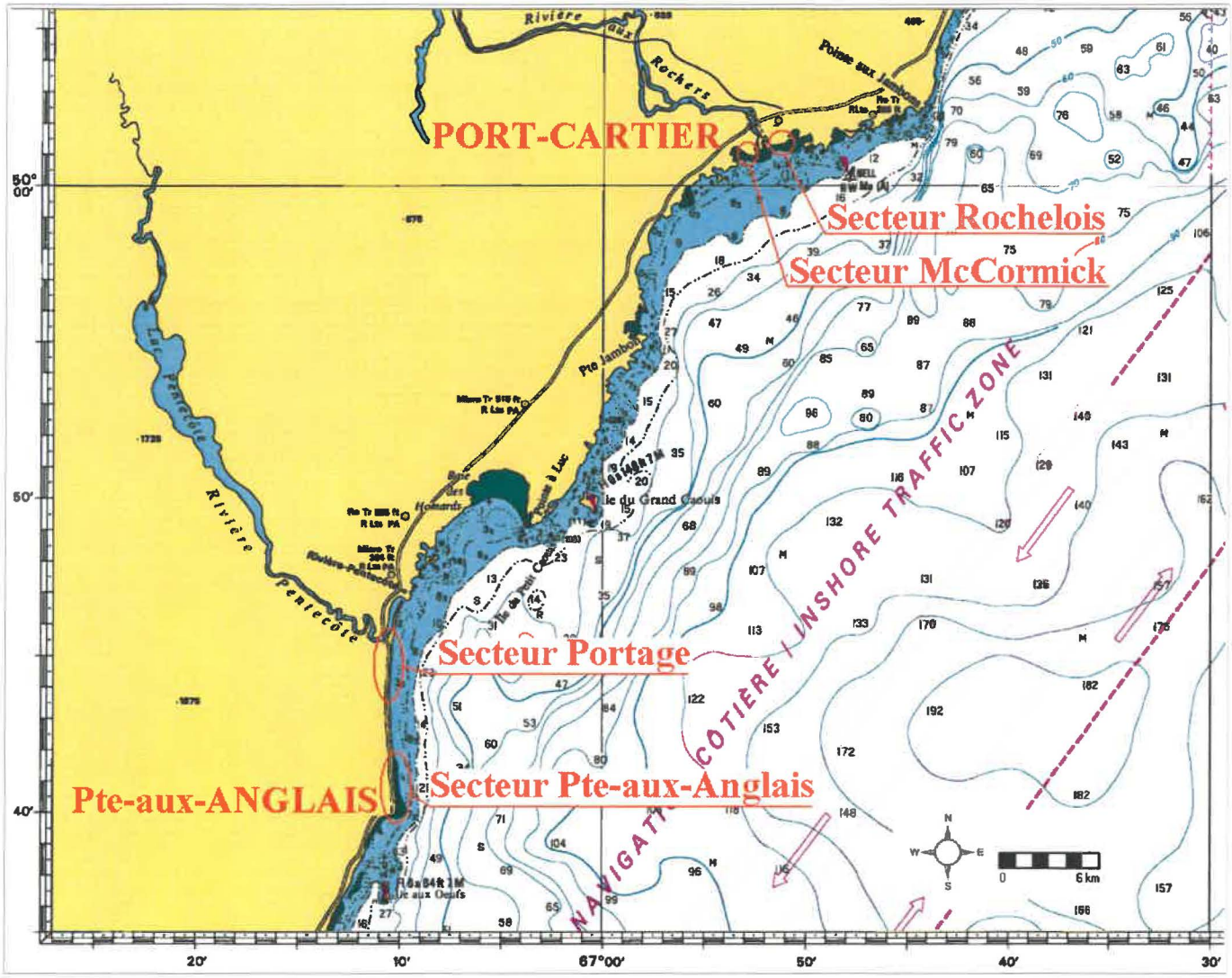


Figure 1.2 Carte marine des différents secteurs à l'étude (carte marine 4026 – Extrait)

2 Données de base

2.1 Plans de bathymétrie / topographie

Les plans des infrastructures en place proviennent de ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP) et de la Municipalité de Port-Cartier :

- Plans de levés LIDAR réalisés en 2008 pour le compte du MTQ,
- Plan du cadastre de la municipalité,
- Relevé topographique des quatre secteurs effectué par GeniArp en avril 2013.

2.2 Plans de bathymétrie

Des données bathymétriques très sommaires sont disponibles sur les cartes marines no 4026 (figure 1.2) et no 1221 (figure 6.1) du Service hydrographique du Canada (SHC). En plus de ces informations, des données bathymétriques plus détaillées ne sont disponibles qu'au large du secteur Rochelois.

Un relevé bathymétrique couvrant la partie peu profonde devant le secteur Rochelois a été effectué en 2009 par NIPPOUR (rapport daté de 2010).

Un relevé bathymétrique couvrant la zone plus profonde au large du secteur Rochelois de Port-Cartier a été effectué en 2009 par le CIDCO.

Aucun relevé bathymétrique autre que ceux effectués par le Service hydrographique du Canada et reproduits sur les cartes marines n'est disponible devant les secteurs Portage et Pointe-aux-Anglais.

Ce manque d'information bathymétrique résulte en des zones non-cartographiées à des endroits où il aurait été important d'avoir ces données pour évaluer correctement la transformation des vagues près de la côte (déferlement en particulier). La figure 2.1 illustre cette zone sans données topo-bathymétriques devant le secteur Rochelois. Les relevés de GeniArp en 2013 ont légèrement amélioré le niveau d'information sur les plages, mais pas dans l'eau.

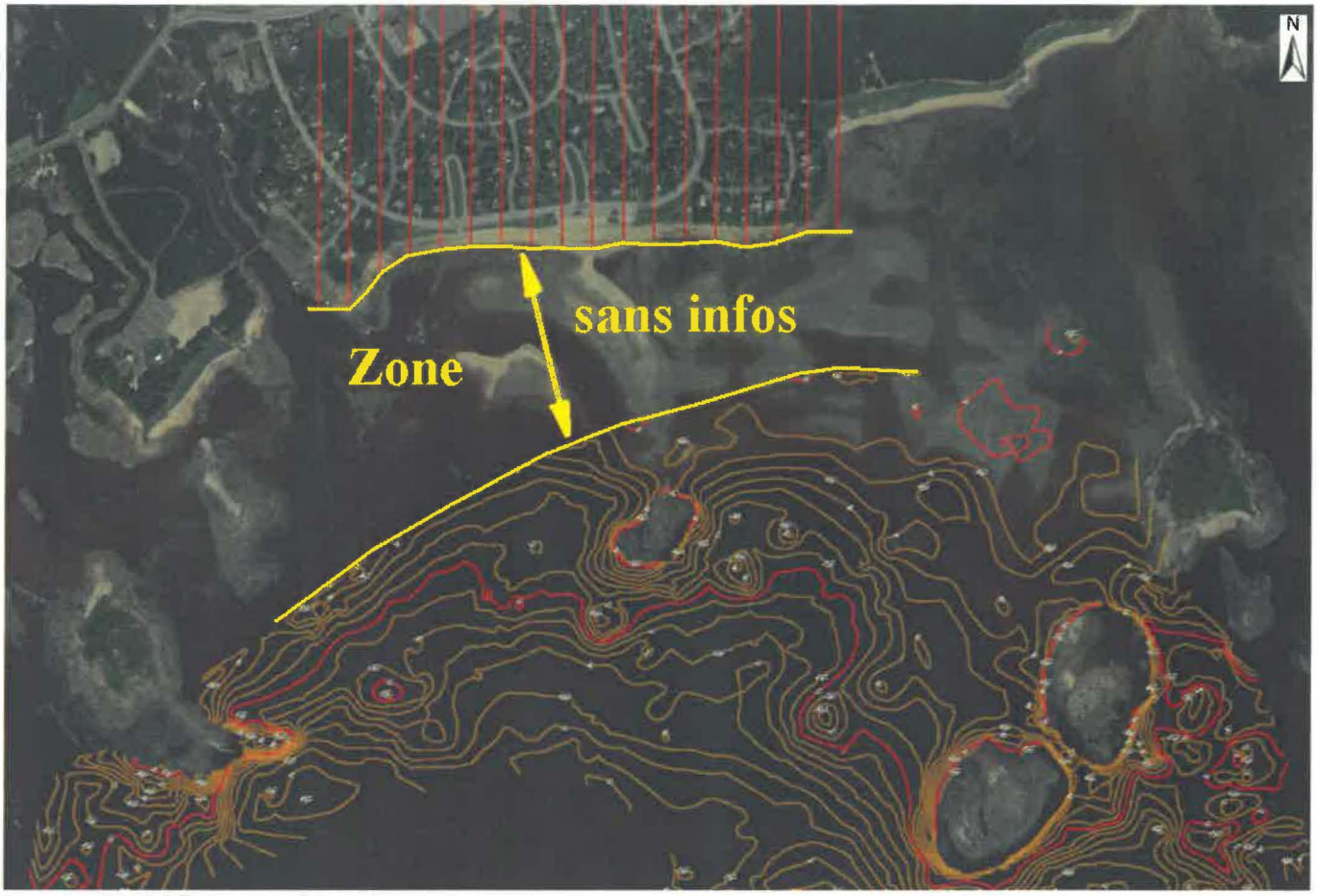


Figure 2.1 Localisation de la zone sans information devant le secteur Rochelois à Port-Cartier

2.3 Photos aériennes

Des photos aériennes de 1930, 2001 et décembre 2010 (MSP) ont été consultées pour compléter l'interprétation de la topographie de la plage.

2.4 Position des profils - secteur Rochelois

La figure 2.2 illustre la position des profils utilisés pour le dimensionnement des ouvrages de protection de la berge dans le secteur Rochelois. La ligne rouge se trouvant à l'extrémité sud des profils est la limite du relevé LIDAR terrestre. La distance entre chaque profil est de 50 m.

Cette figure illustre le peu de données fournies par le relevé LIDAR sur l'avant-plage. Les relevés de GeniArp de 2013 vont un peu plus loin que les relevés LIDAR sur la plage.

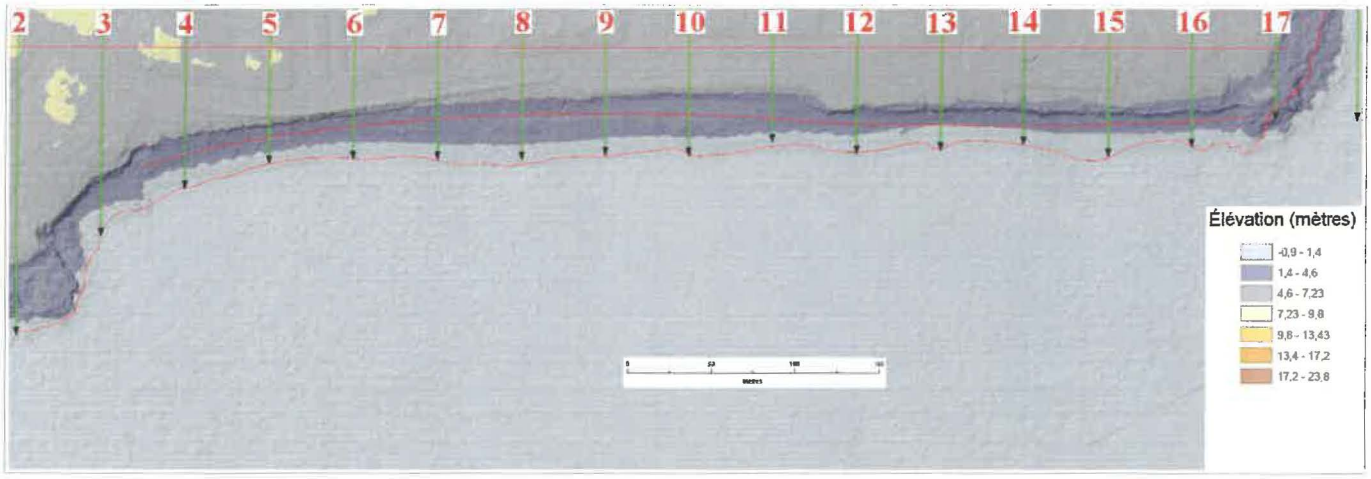


Figure 2.2 Topographie et profils du secteur Rochelois

2.5 Position des profils - secteur Place McCormick

La figure 2.3 illustre la topographie et les profils du secteur Place McCormick. La configuration en courbe de la baie a fait en sorte que les profils ne sont pas uniformément répartis. Une particularité de ce secteur par rapport au secteur Rochelois est que le relevé LIDAR s'étend un peu plus loin de la berge, ce qui minimise le problème de l'absence de données bathymétriques devant ce secteur.

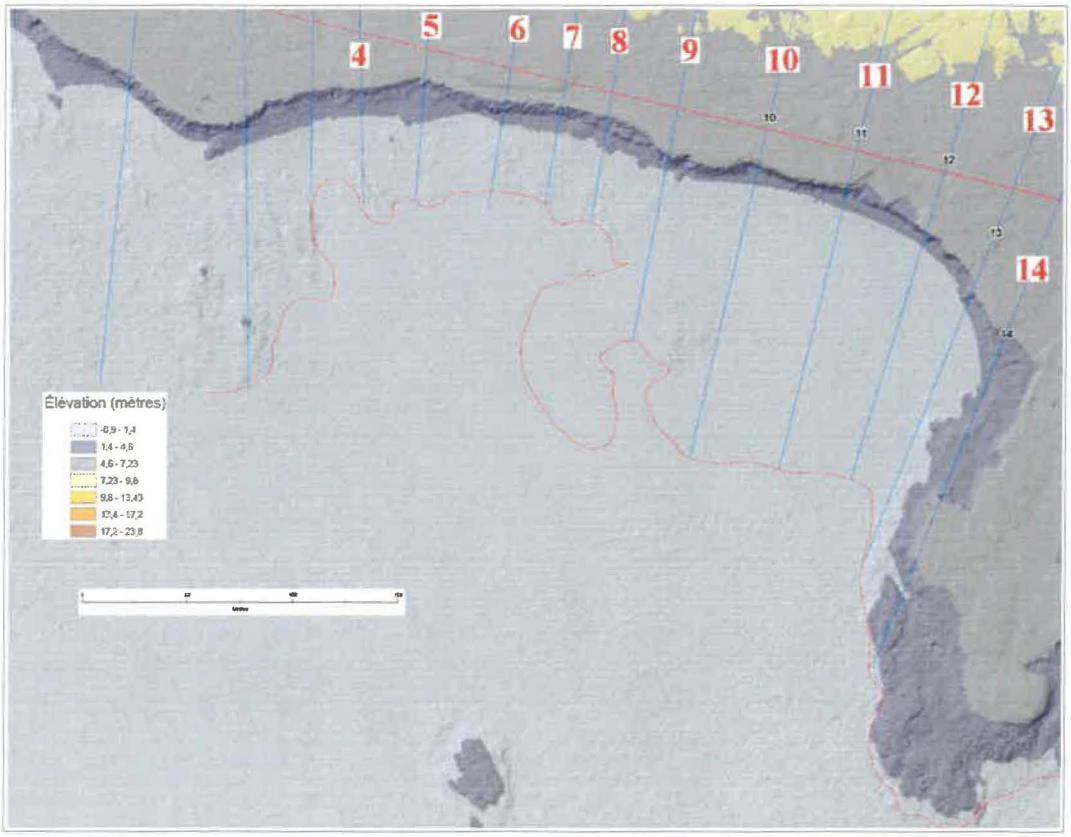
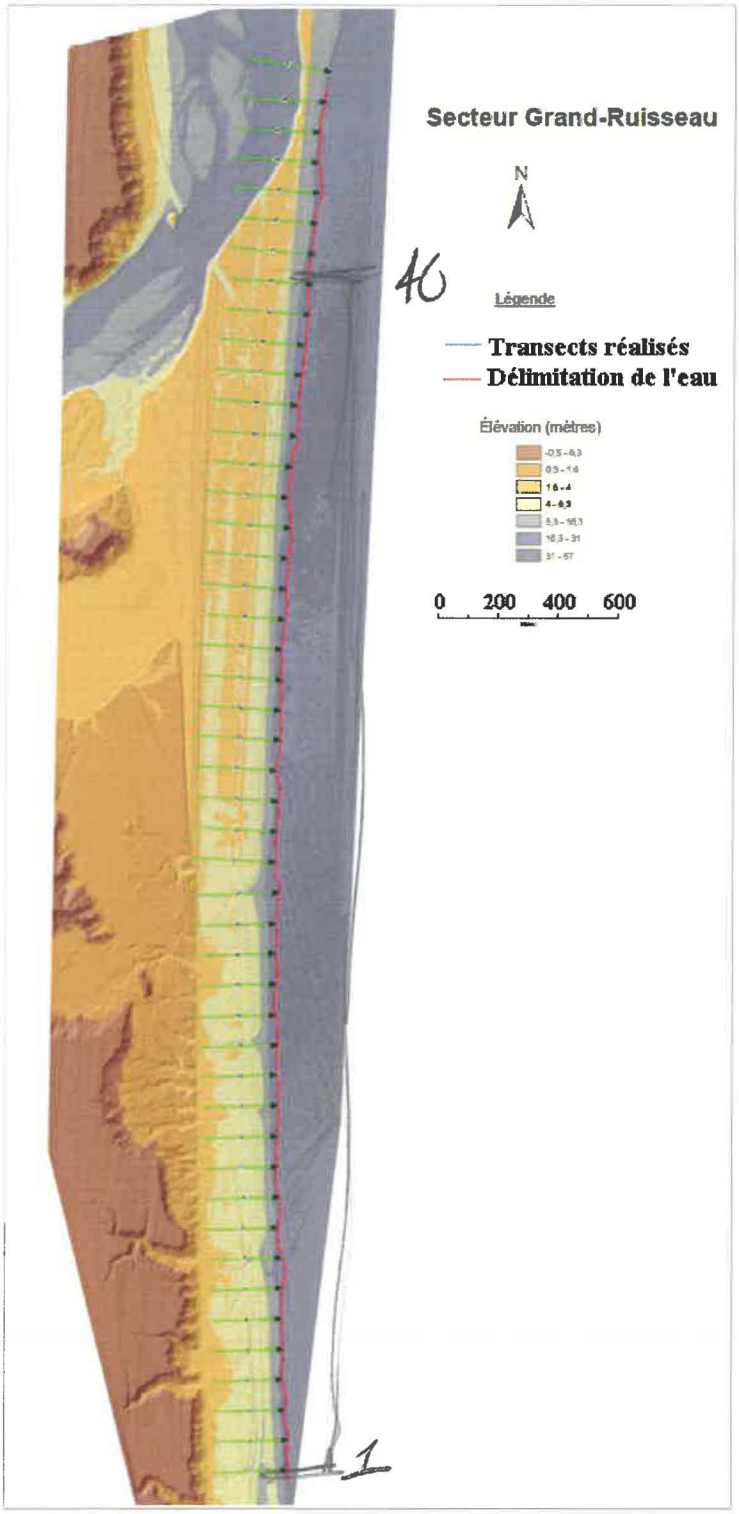


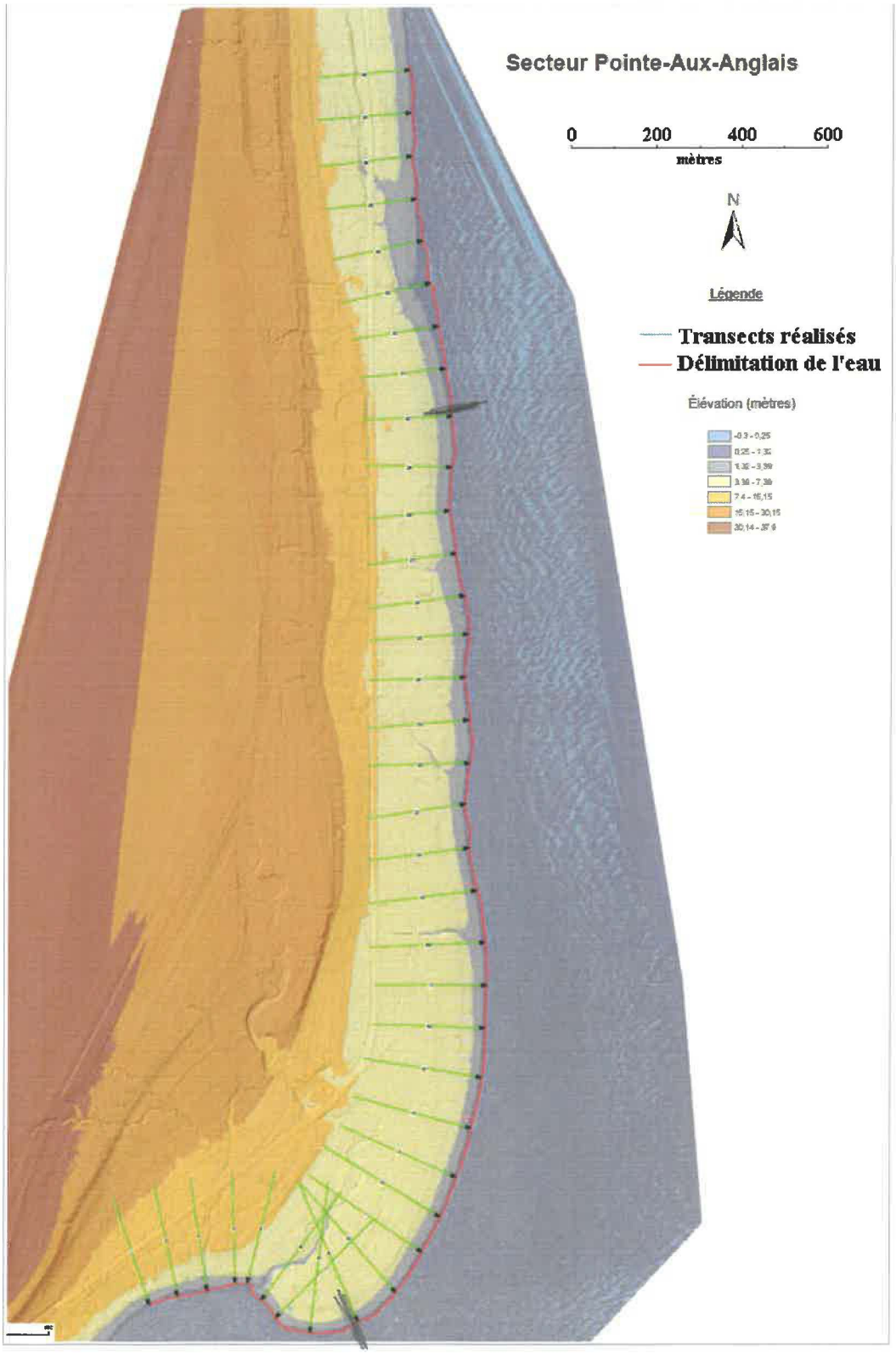
Figure 2.3 Topographie et profils du secteur Place McCormick

2.6 Position des profils - secteurs Portage et Pointe-aux-Anglais

Les figures 2.4 et 2.5 illustrent les profils et la topographie des secteurs Portage et Pointe-aux-Anglais.



Figures 2.4 Topographie et position des profils de berge (Portage)



Figures 2.5 Topographie et position des profils de berge (Pte-aux-Anglais)

2.7 Comparaison LIDAR / GeniArp

2.7.1 Secteur Rochelois

Dans le secteur Rochelois, la comparaison des relevés faits au LIDAR en 2008 (courbes rouges) et ceux de GeniArp faits en avril 2013 (courbes bleues) révèlent des mouvements relativement importants de la berge pour le peu d'années entre ces deux relevés.

La figure 2.6 (profil P07 sur figure 2.2) illustre très peu de différence entre les deux relevés, mais la figure 2.7 (profil P10) illustre une progression de presque 20 m de l'avant plage dans le cas du profil 10 au centre du secteur Rochelois et la figure 2.8 (profil P13) illustre un recul de l'ordre de 7 m du talus de haut de plage dans la partie Est du secteur Rochelois. Il s'agit probablement d'un transfert de sédiments d'une partie de la berge à l'autre en fonction des tempêtes.

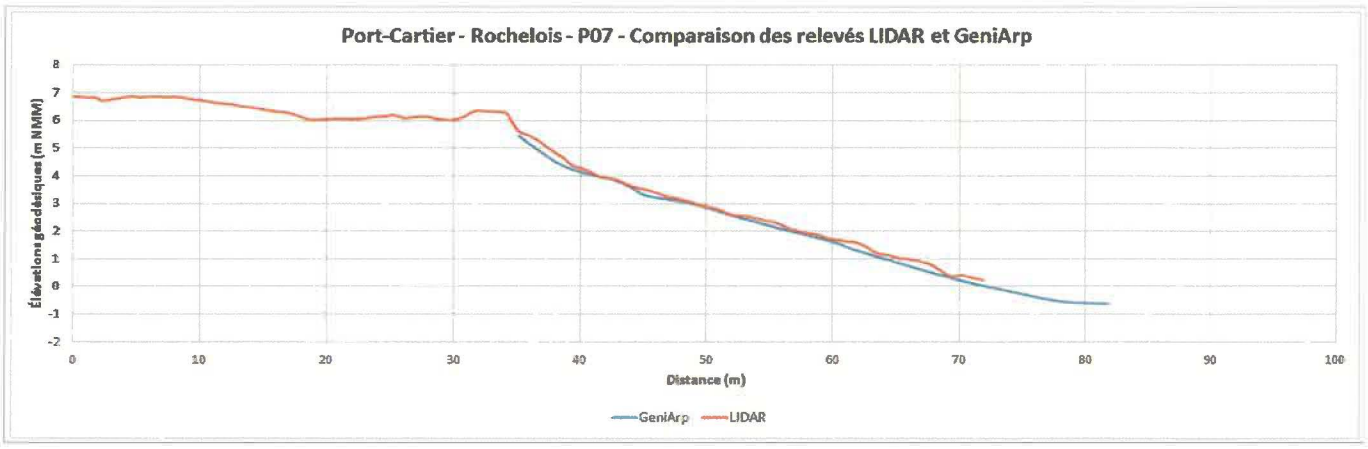


Figure 2.6 Comparaison de la berge de 2008 à 2013 au profil P07 (Rochelois)

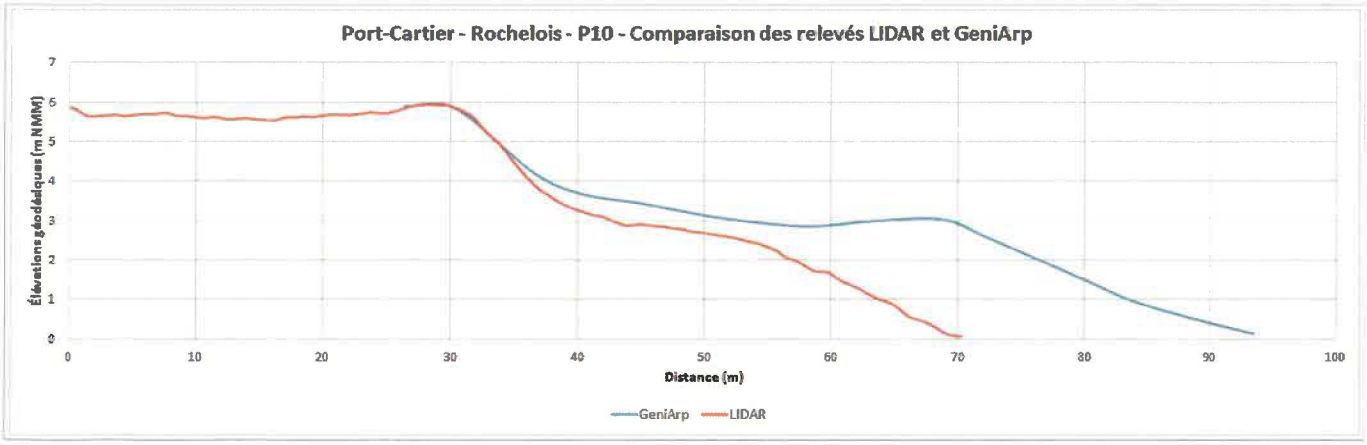


Figure 2.7 Comparaison de la berge en 2008 et en 2013 au profil P10 (Rochelois)

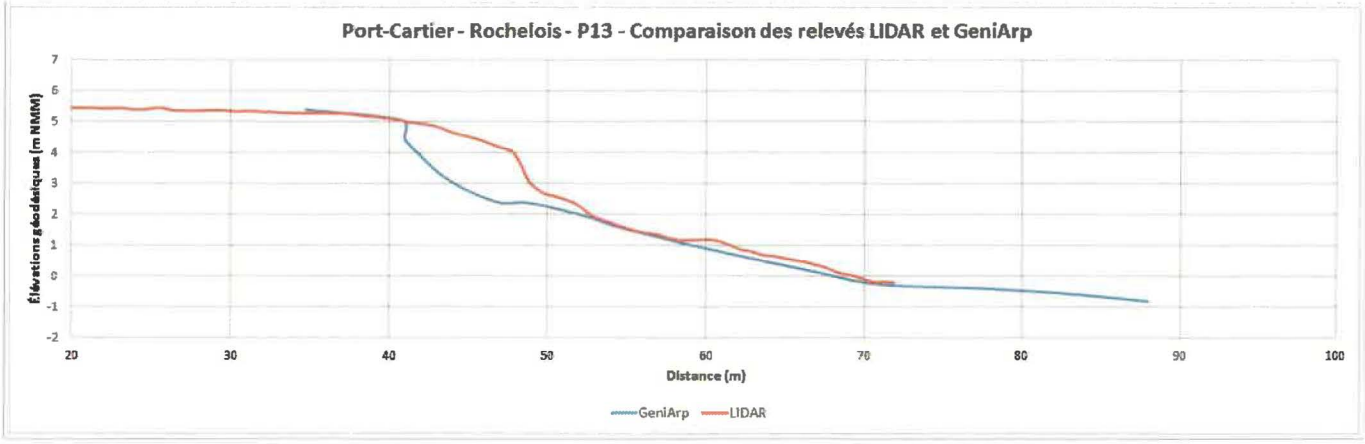


Figure 2.8 Comparaison de la berge de 2008 à 2013 au profil P13 (Rochelois)

2.7.2 Secteur McCormick

Dans le secteur McCormick, la comparaison des relevés faits au LIDAR en 2008 (courbes rouges) et ceux de GeniArp faits en avril 2013 (courbes bleues) révèlent en général très peu de mouvements de la berge entre ces deux relevés (figure 2.9 au profil P10). Il n'y a qu'à l'extrémité Est de l'anse qu'on constate un recul maximal de l'ordre de 3 m (figure 2.10 au profil P12).

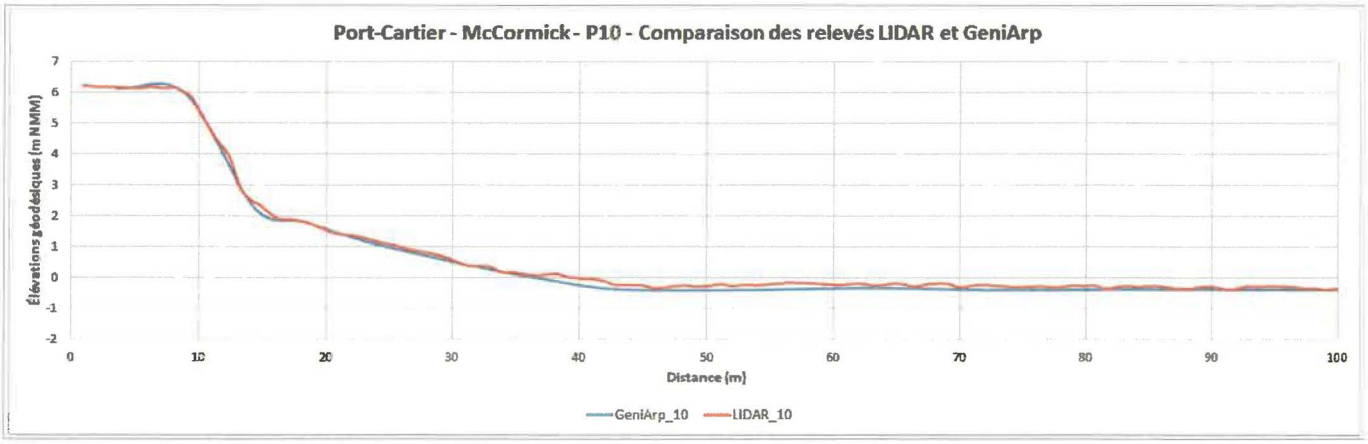


Figure 2.9 Comparaison de la berge en 2008 et en 2013 au profil P10 (McCormick)

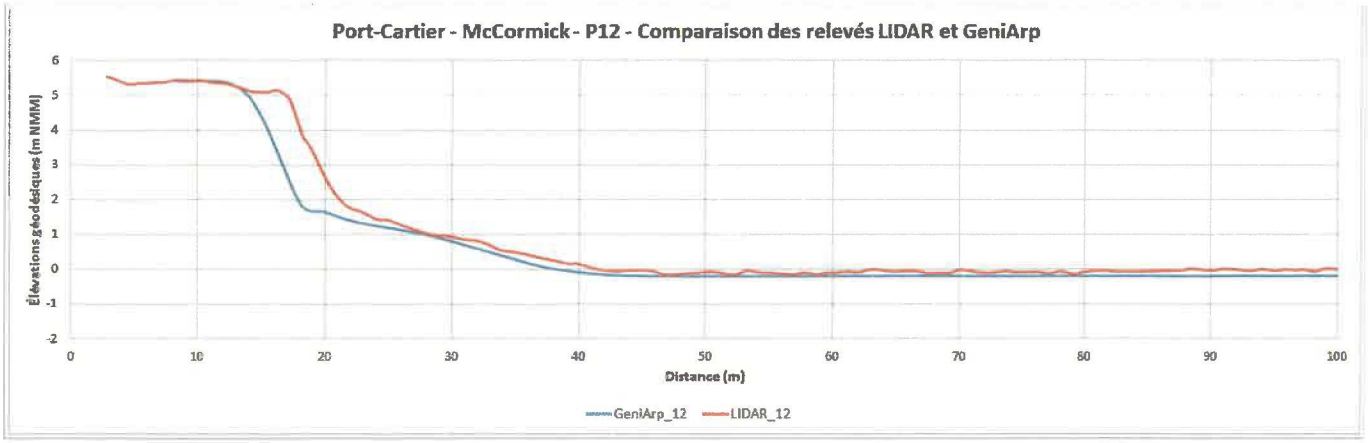


Figure 2.10 Comparaison de la berge en 2008 et en 2013 au profil P12 (McCormick)

2.7.3 Secteur Portage

Dans le secteur Portage, la comparaison des relevés faits au LIDAR en 2008 (courbes rouges) et ceux de GeniArp faits en avril 2013 (courbes bleues) révèlent en général très peu de mouvements de la berge entre ces deux relevés (figure 2.11 au profil P19). Il n'y a qu'à l'extrémité Nord du secteur qu'on constate des différences probablement dues au fait que les relevés de GeniArp ne se sont pas faits exactement au même endroit que les relevés LIDAR (figure 2.12 au profil P41).

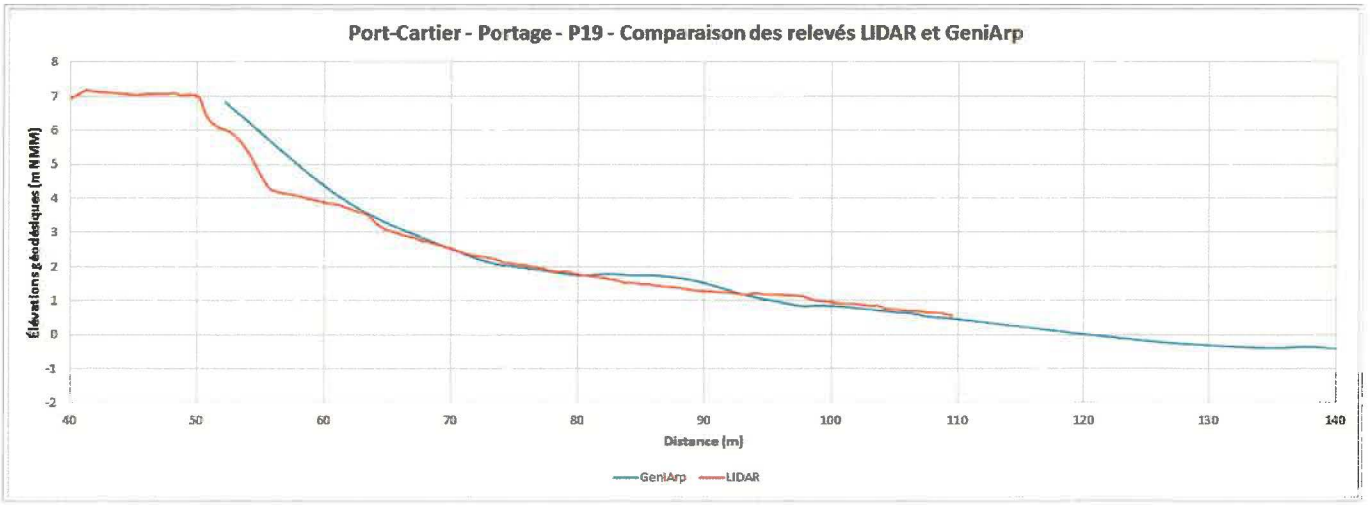


Figure 2.11 Comparaison de la berge en 2008 et en 2013 au profil P19 (Portage)

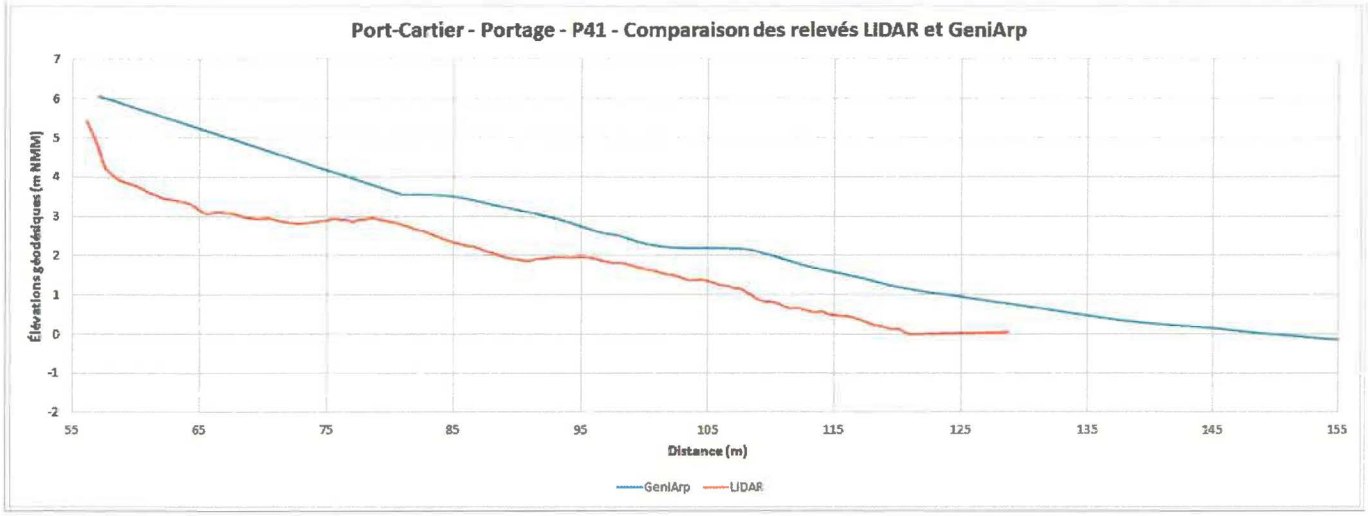


Figure 2.12 Comparaison de la berge en 2008 et en 2013 au profil P41 (Portage)

2.7.4 Secteur Pointe-aux-Anglais

Dans le secteur de Pointe-aux-Anglais, la comparaison des relevés faits au LIDAR en 2008 (courbes rouges) et ceux de GeniArp faits en avril 2013 (courbes bleues) révèlent en général très peu de mouvements de la berge entre ces deux relevés, même au niveau de certains ruisseaux (figure 2.13 au profil P28). Il n'y a qu'au niveau d'un ruisseau au centre du secteur qu'on constate des différences mineures en haut de plage (figure 2.14 au profil P19).

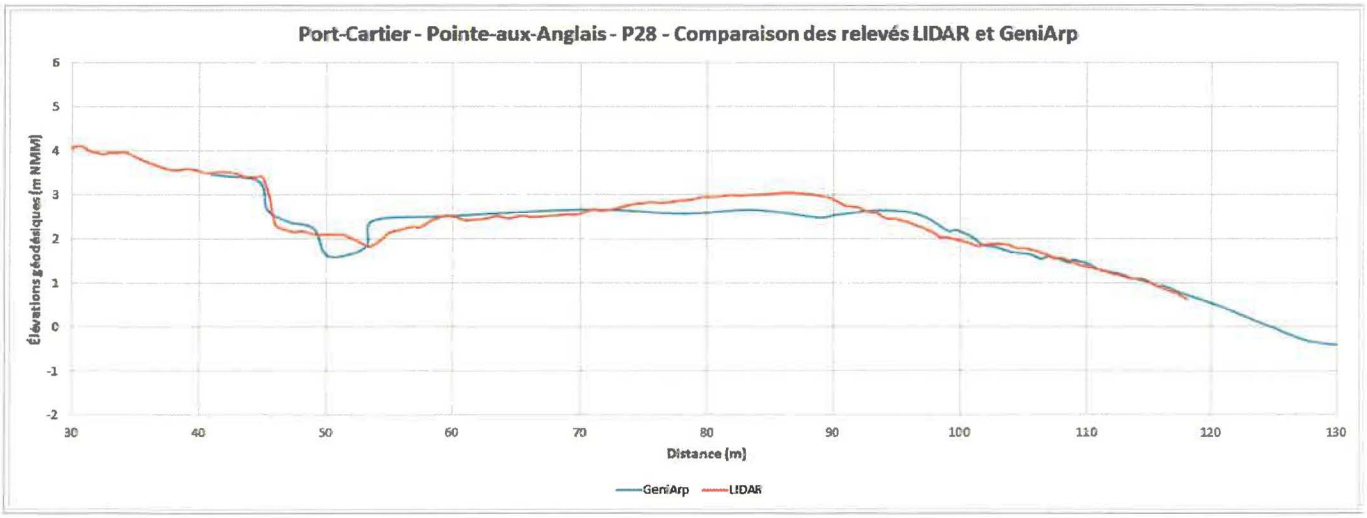


Figure 2.13 Comparaison de la berge en 2008 et en 2013 au profil P28 (Pointe-aux-Anglais)

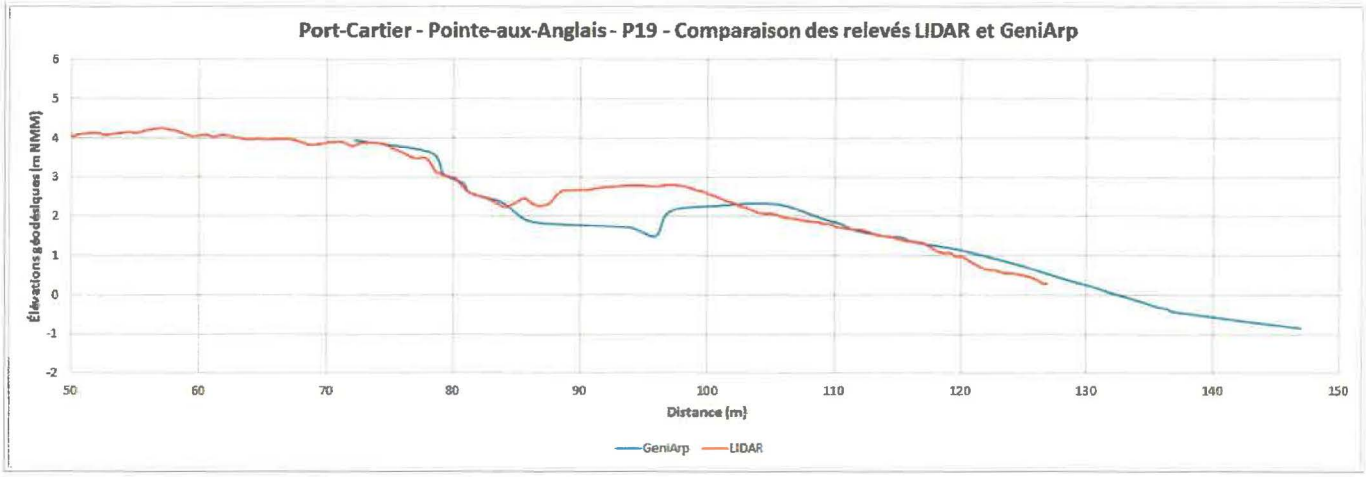


Figure 2.14 Comparaison de la berge en 2008 et en 2013 au profil P19 (Pointe-aux-Anglais)

3 Inspection du site

3.1 Visites de terrain

Des visites de terrain ont été effectuées le 3 octobre 2011 (Rochelois et Place McCormick), le 26 juillet 2012 (Place McCormick), les 13 et 14 décembre 2012 (les quatre sites). La visite du 13 décembre 2012 a été suivie d'une réunion avec le département des services technique de la Ville en après-midi.

Les photos prises en l'absence de neige et de glace ont été utilisées de préférence à celles prises en décembre 2012, alors que la couverture de neige était complète.

3.2 Observations

3.2.1 Secteur Rochelois

Le secteur Rochelois était en 1930 un secteur de dune sablonneuse boisée (figure 3.1). Un ruisseau arrivait au centre de la plage et apportait sans doute régulièrement un peu de sable sur la plage.

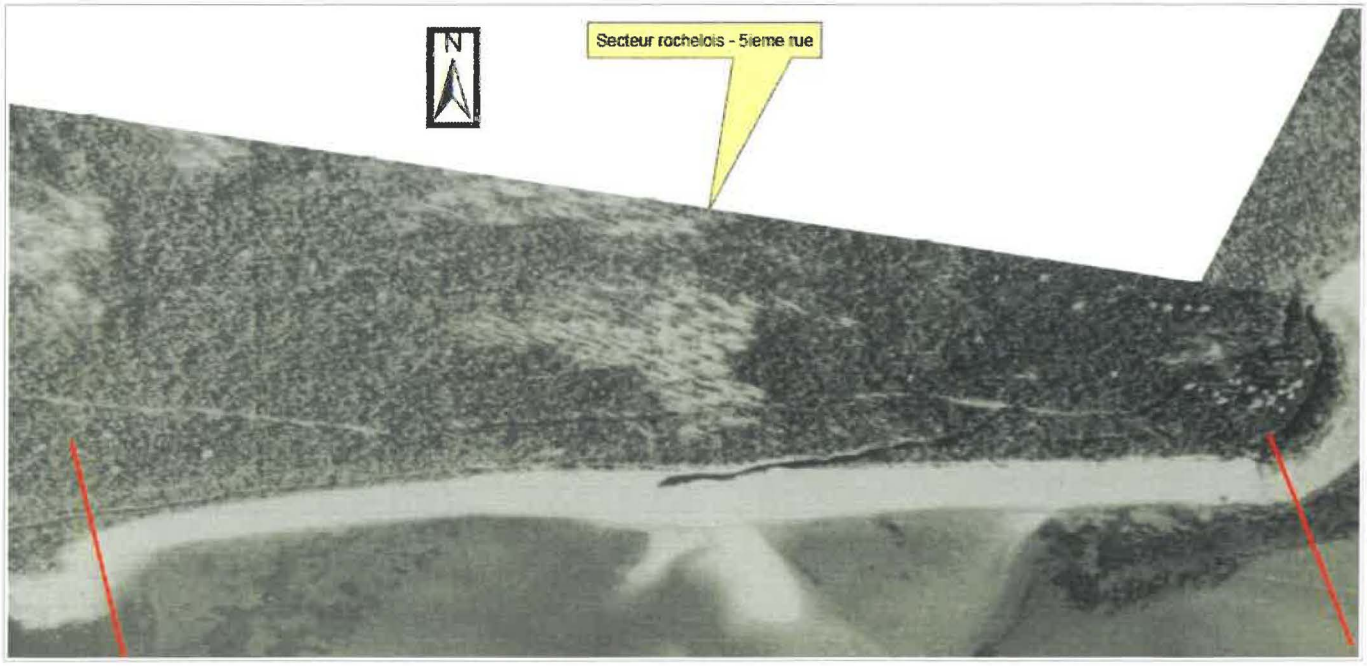


Figure 3.1 Photo aérienne de 1930 – Secteur Rochelois

Ce ruisseau n'existe plus en 2012 (figure 3.2). Seul un émissaire pluvial sort à l'extrémité ouest de la plage. De plus, le secteur est pratiquement entièrement urbanisé et les arbres et arbustes ont disparu du bord de la plage.



Figure 3.2 Photo aérienne de 2004 – Secteur Rochelois (Google™ Earth)

Sur la figure 3.3 prise lors de la visite du 3 octobre 2011 à marée basse, on peut remarquer le caractère caillouteux du bas de plage. On remarque également l'érosion qui s'est produite le long de la promenade qui se retrouve en porte-à-faux par endroits.



Figure 3.3 Plage du secteur Rochelois vue vers l'est (octobre 2011)

L'extrémité ouest de la plage présente une pente relativement forte pour une plage de sable (figure 3.4).



Figure 3.4 Extrémité ouest de la plage du secteur Rochelois

La partie centrale de la plage du secteur Rochelois présentait en octobre 2011 une accumulation de sable probablement en relation avec les différents écueils rocheux et îlots qui se trouvent un peu plus au large (figure 3.5).



Figure 3.5 Accumulation de sable et écueils rocheux au centre de la plage du secteur Rochelois

Le centre de la plage du secteur Rochelois correspond au parc urbain. En octobre 2011, on pouvait clairement voir l'aménagement d'une partie de la plage en vue d'un accès récréotouristique (figure 3.6), alors que la partie orientale du parc subissait une érosion marquée (figure 3.7).



Figure 3.6 Haut de plage au centre du secteur Rochelois



Figure 3.7 Érosion du haut de plage au droit du parc du secteur Rochelois

L'extrémité orientale du secteur Rochelois subit une érosion relativement intense caractérisée par une micro-falaise en haut de plage d'environ 1,2 à 1,5 m de haut (figures 3.8 et 3.9). La plage est nettement plus étroite dans cette zone que partout ailleurs dans le secteur.



Figure 3.8 Érosion du haut de plage à l'extrémité est du secteur Rochelois



Figure 3.9 Érosion du haut de plage à l'extrémité est du secteur Rochelois

3.2.2 Secteur Place McCormick

Le secteur Place McCormick est essentiellement affecté par l'érosion dans la moitié sud-est du secteur, alors que la moitié nord-ouest du secteur est protégée par des enrochements (figure 3.10). On constate que la plage a presque entièrement disparu devant ces enrochements.

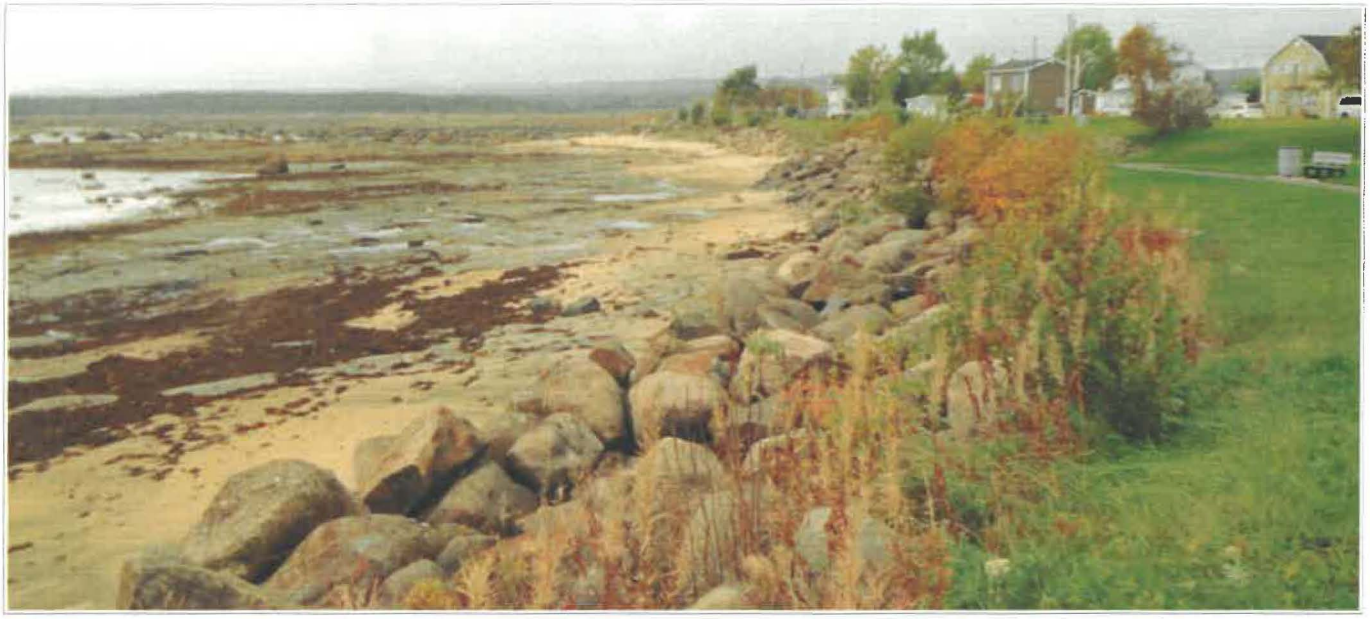


Figure 3.10 Zone de place McCormick protégée par des enrochements

Les figures 3.11 et 3.12 présentent l'ensemble de la zone en érosion dans le secteur Place McCormick.



Figure 3.11 Vue d'ensemble de la rive en érosion en regardant vers le sud-est



Figure 3.12 Vue d'ensemble de la rive en érosion en regardant vers le nord



Figure 3.13 Escalier à l'extrémité nord de la zone en érosion de Place McCormick

À l'extrémité nord de la partie de la Place McCormick en érosion, la rive située au sud-est de l'escalier en bois (figure 3.13) est pratiquement verticale (figure 3.14). Quelques enrochements parsèment le pied de la rive mais n'ont visiblement pas la bonne configuration pour protéger cette rive de façon efficace.



Figure 3.14 Rive en érosion près de l'escalier en bois

En allant vers le sud-est, on retrouve une zone sans enrochement où subsiste un résidu de plage (figure 3.15).



Figure 3.15 Partie nord de la rive de la Place McCormick en érosion

En se déplaçant un peu plus vers le sud-est, on retrouve toutes sortes de débris (en particulier des morceaux de béton, mais également des pierres et des détritus) en pied d'un talus en érosion. Les figures 3.16 et 3.17 montrent cette partie du rivage de laquelle la plage a pratiquement disparu, remplacée par ces débris divers.

La zone au sud de cette partie en érosion sévère devient progressivement rocheuse.



Figure 3.16 Partie centrale de la rive de la Place McCormick en érosion



Figure 3.17 Partie centrale de la rive de la Place McCormick en érosion

3.2.3 Secteur Portage

Le secteur Portage est un secteur de plages à la sortie de la rivière Pentecôte. Les plages sont alimentées par les sédiments charriés par la rivière. Tout ce secteur montre une dérive littorale orientée vers le sud. Cette tendance est particulièrement visible au droit de chacun des ruisseaux qui débouchent sur la plage (figure 3.18).

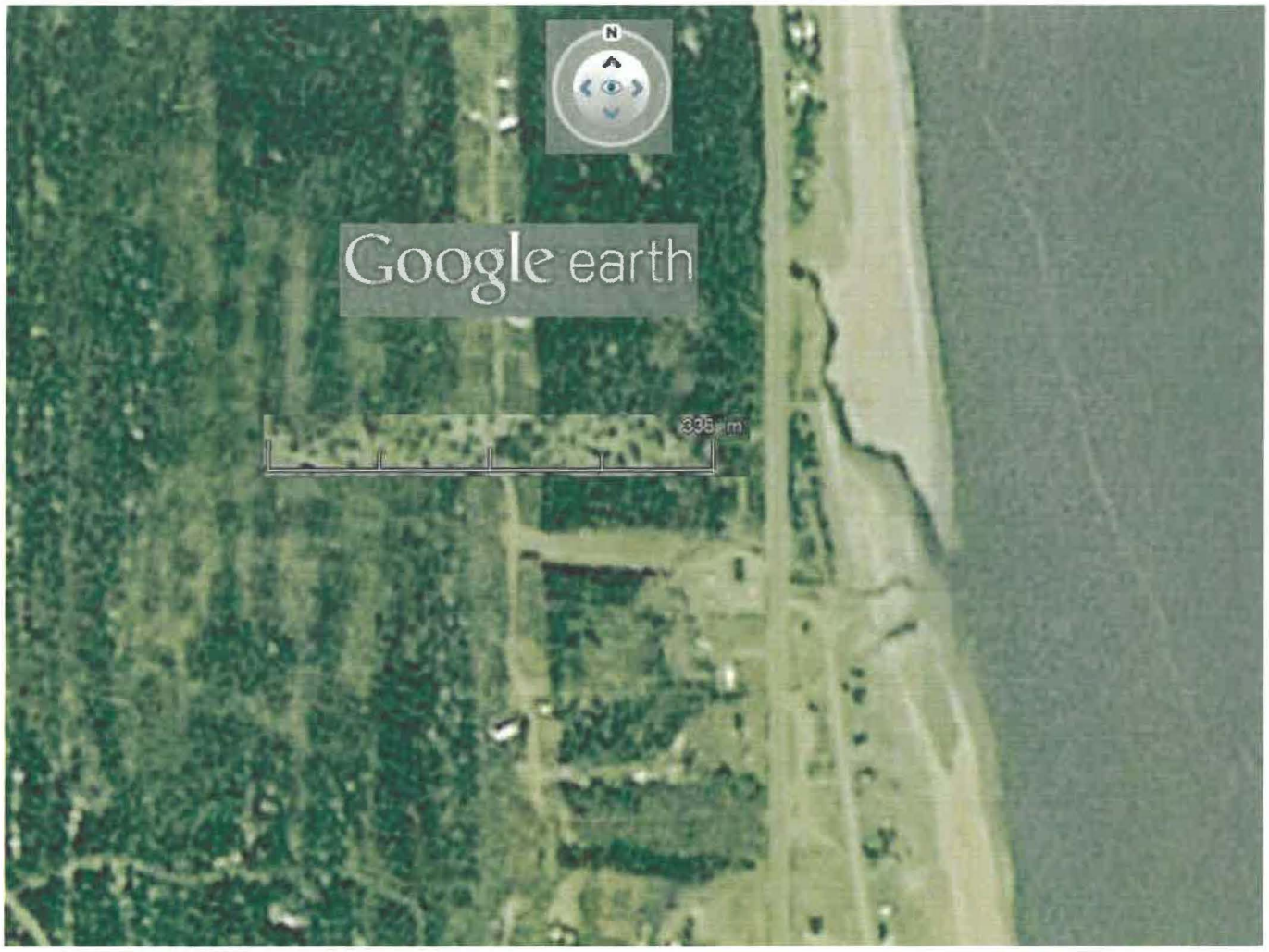


Figure 3.18 Orientation vers le sud de ruisseaux débouchant sur la plage du secteur Portage

En l'absence de ruisseau, en partant de la route 138 et en allant vers le large, le rivage se compose :

- d'une lisière boisée (lorsque l'installation de chalets ou de chemins n'a pas entraîné le déboisement de cette lisière),
- d'un haut de plage recouvert d'une végétation herbacée,
- d'une micro-falaise d'érosion d'une hauteur de l'ordre de quelques décimètres à un mètre,
- d'une plage en pente relativement douce.

La visite de décembre 2012 s'étant effectuée en hiver, la photo de la figure 3.19 ne permet que de deviner cette organisation du littoral.



Figure 3.19 Apparence générale de la plage en l'absence de ruisseaux

Lorsqu'un ruisseau traverse la route 138 et débouche sur la plage, on constate à chaque fois la présence d'une zone sensible à l'érosion. Le couvert de neige n'a pas toujours permis de vérifier la composition du rivage, mais il semble que, presque systématiquement, le MTQ a dû placer des enrochements de part et d'autre des exutoires des ruisseaux du côté est de la route pour contrer l'érosion qui se produisait à ces endroits (figure 3.20).

Ce phénomène d'érosion près des sorties de ruisseaux est actuellement la principale préoccupation concernant la gestion du littoral dans ce secteur. Il y a une fragilité évidente du rivage au droit de chaque sortie de ruisseau. Le problème concerne plus particulièrement le MTQ qui intervient de façon régulière pour contrer cette érosion. Des épisodes de submersion ont été rapportés au droit de certains ruisseaux lors de l'événement du 6 décembre 2010.

À plus grande échelle, il y a des signes de recul généralisé du rivage de ce secteur probablement relié à la disparition progressive des glaces du golfe du Saint-Laurent et à la remontée du niveau moyen des océans.



Figure 3.20 Sortie du ruisseau près du restaurant "Le routier"

L'un des ruisseaux parcourt quelque centaines de mètres le long de la route 138 avant de traverser le cordon littoral. Dans ce cas, l'érosion s'étend sur une distance d'au moins cent mètres avec une double falaise d'érosion en décembre 2012 (figure 3.21).



Figure 3.21 Érosion particulièrement évidente le long de la route 138

3.2.4 Secteur Pointe-aux-Anglais

Le secteur de Pointe-aux-Anglais ressemble beaucoup à celui de Portage, surtout dans la partie nord de ce secteur. Une différence importante apparaît en se déplaçant vers le sud. Un champ relativement dense de blocs glaciels (boulders) occupe la partie inférieure de la batture (figure 3.22). Il est probable que la présence de ces boulders améliore légèrement la protection de la plage contre les vagues de tempête. Cette protection doit cependant avoir des limites lors des épisodes de très hauts niveaux d'eau pendant lesquels l'influence des boulders sur les vagues doit alors significativement diminuer. On constate donc un peu moins d'érosion du haut de plage dans la partie sud du secteur de Pointe-aux-Anglais que dans le secteur de Portage. Une micro-falaise d'érosion est cependant visible en haut de plage malgré la présence des boulders (figure 3.23).

Une autre différence importante entre le secteur de Pointe-aux-Anglais et celui de Portage est la quasi-absence de toute zone boisée près du littoral dans le secteur de Pointe-aux-Anglais. Alors que le secteur de Portage présente encore quelques zones relativement naturelles, ce n'est plus le cas du secteur de Pointe-aux-Anglais qui est beaucoup plus urbanisé, surtout dans sa partie sud.



Figure 3.22 Champ de boulders sur la partie inférieure de la batture de Pointe-aux-Anglais



Figure 3.23 Micro-falaise d'érosion en haut de plage dans le secteur de Pointe-aux-Anglais

Le secteur de Pointe-aux-Anglais présente dans sa partie nord exactement le même problème d'érosion relié à la sortie de ruisseaux sur la plage (figure 3.24). Dans la partie sud, ce problème d'érosion est un peu moins aigu, mais provoque une érosion de la plage (figure 3.25)



Figure 3.24 Érosion reliée à la présence d'un ruisseau dans la partie nord du secteur Pointe-aux-Anglais



Figure 3.25 Érosion reliée à la présence d'un ruisseau dans la partie sud du secteur Pointe-aux-Anglais

4 Niveaux d'eau

4.1 Sources de l'information

La Gestion des données scientifiques intégrées (GDSI) du ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) met à la disposition du public les niveaux d'eau de ses stations sur Internet[3].

Des stations de la GDSI sont disponibles à proximité de la ville de Port-Cartier :

- La station de Port-Cartier (N° 2790) pour laquelle des données horaires sont disponibles en 1961 et 1966 (2755 valeurs horaires),
- La station de référence de Sept-Îles (N° 2780) pour laquelle des données de niveaux d'eau sont disponibles depuis 1972 (plus de 315 000 données horaires).

Les données de la station de référence du Service hydrographique du Canada (SHC[4]) à Sept-Îles ont été utilisées pour déduire les niveaux d'eau probables à Port-Cartier en fonction des corrections proposées par le SHC dans sa Table des marées et courants pour Port-Cartier.

L'influence des changements climatiques sur les futurs niveaux d'eau au droit de Port-Cartier a également été évaluée à l'aide de cette station de référence.

Le SHC donne une différence de 1,482 m entre le Zéro des cartes marines (ZC) et le Niveau moyen des mers (NMM) pour Port-Cartier, le ZC se situant sous le NMM à Port-Cartier.

4.2 Données du SHC

Le Service hydrographique du Canada (SHC) ne fournit pas de données pour la marée à Port-Cartier. Il faut se référer à Sept-îles pour cette information.

Le Service hydrographique du Canada donne les renseignements suivants pour la station de Sept-Îles.

[3] http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/index-fra.html

[4] http://www.lau.chs-shc.gc.ca/cgi-bin/tide-shc.cgi?queryType=showFrameset&zone=3&language=french&region=4&stnnum=2840

Tableau 4.1 Données du SHC pour Sept-Îles (m ZC)

Localité			Sept-Îles
Port de référence			Sept-Îles
Carte marine no			1220
Type de marées			Mixte semi-diurne
Marnage	Marée moyenne		2,3 m
	Grande marée		3,7 m
Hauteur	Pleine mer supérieure	Marée moyenne	2,7 m
		Grande marée	3,4 m
	Basse mer inférieure	Marée moyenne	0,4 m
		Grande marée	-0,2 m
Extrêmes enregistrés	Extrême de pleine mer		4,0 m
	Extrême de basse mer		-0,6 m
Niveau moyen de l'eau			1,5 m

4.3 Base de données de la station de Port-Cartier

L'évaluation des fréquences de dépassement des niveaux d'eau enregistrés à la station de Port-Cartier a été faite pour les années 1961 et 1966 (2755 données analysées). La figure 4.1 illustre cette analyse pour les « extrêmes hauts » observés pendant cette période.

D'après la base de données disponibles, les niveaux d'eau ont été calculés pour les récurrences suivantes :

- Une heure par année : +3,77 m ZC (extrapolation)
- Douze heures par année : +3,37 m ZC
- Une journée par année : +3,27 m ZC

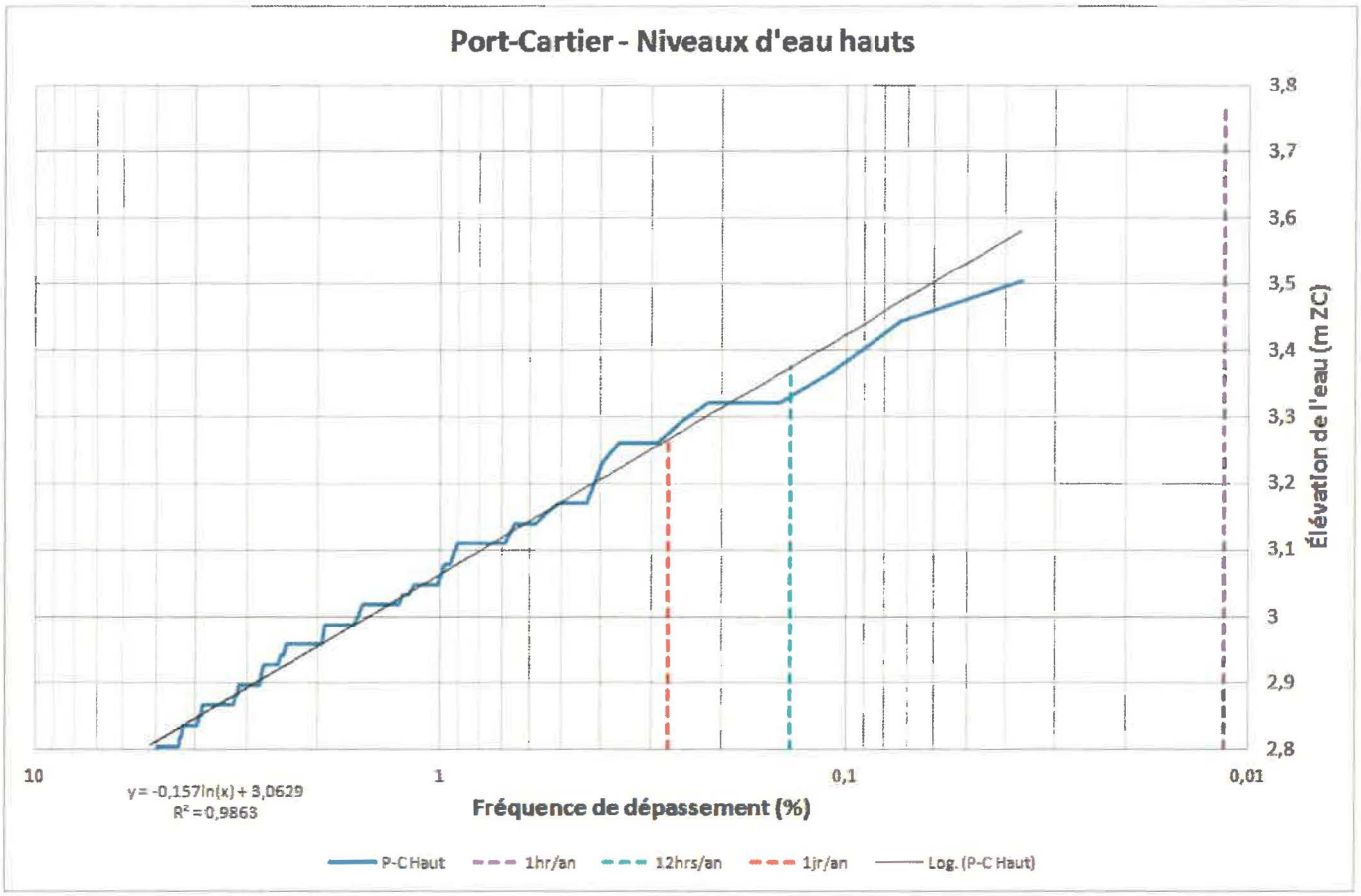


Figure 4.1 Fréquences de dépassement des niveaux d'eau hauts à Port-Cartier (1961 et 1966)

4.4 Base de données de la station de Sept-Îles

L'analyse des niveaux d'eau enregistrés à la station de Sept-Îles a été faite entre les années 1972 et 2012 (données disponibles jusqu'au 30 novembre 2012). Il y a donc eu 41 années de données analysées.

La figure 4.2 présente les niveaux d'eau moyens observés à Sept-Îles entre 1972 et 2012. Le niveau d'eau était en hausse moyenne de 1,4 mm par année sur cette période.

La figure 4.3 illustre l'analyse des « extrêmes hauts » observés pendant cette période et 1972 à 2012. On constate sur ce graphique que l'extrême de niveau d'eau haut observé entre 1972 et 2012 a été de +4,13 m.

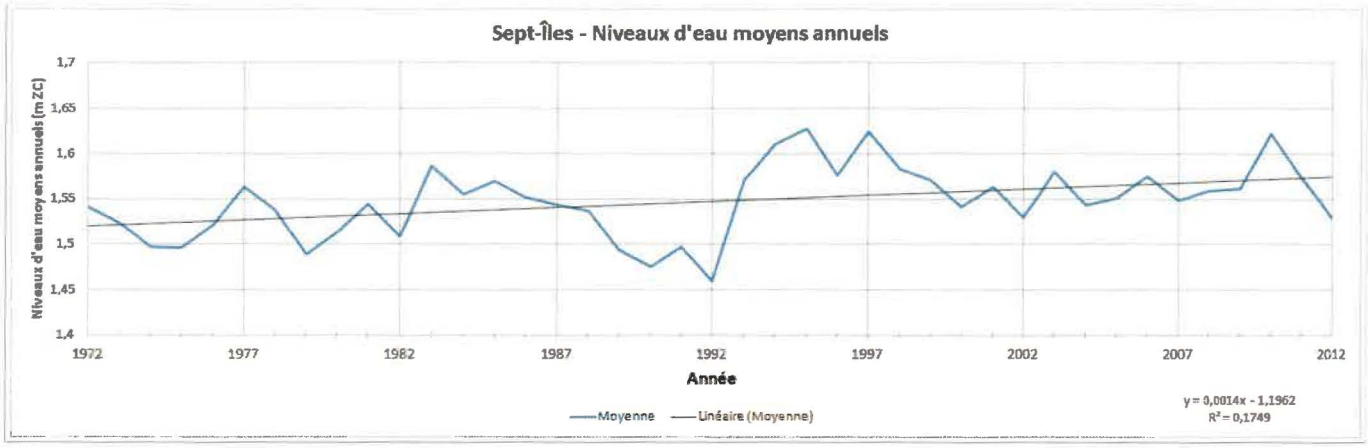


Figure 4.2 Niveau moyen de l'eau à Sept-Îles (1972 à 2012)

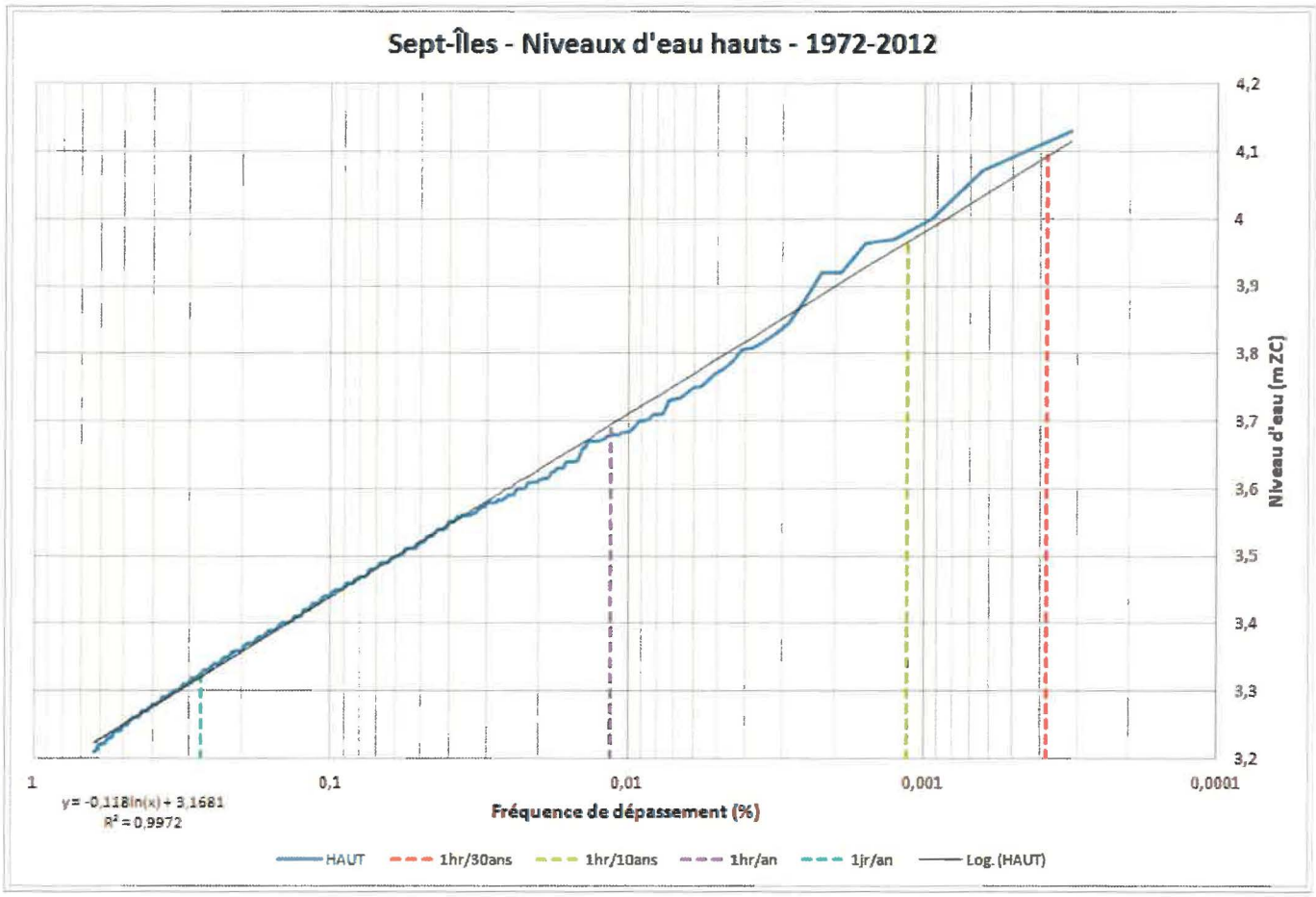


Figure 4.3 Fréquence de dépassement des niveaux d'eau hauts à Sept-Îles (1972-2012)

Le calcul des valeurs extrêmes de niveau d'eau a été fait sur la base de la régression logarithmique obtenue à partir des données de la GDSI à la station de Sept-Îles. Ce calcul a permis de produire les récurrences de niveaux d'eau suivantes à la station de Sept-Îles :

- Une heure tous les 35 ans : +4,11 m ZC
- Une heure tous les 10 ans : +3,97 m ZC
- Une heure tous les 5 ans : +3,88 m ZC
- Une heure tous les 2 ans : +3,78 m ZC
- Une heure par année : +3,69 m ZC
- Une journée par année : +3,32 m ZC

4.5 Prévision de niveau d'eau extrême haut à Port-Cartier

Le Service hydrographique du Canada (SHC) fournit des données pour la conversion des niveaux d'eau de Sept-Îles vers Port-Cartier (Table des marées et courants du MPO). Une correction de +0,061 m est recommandée par le SHC pour les niveaux d'eau très hauts (Pleine Mer Supérieure de Grande Marée ou PMSGM) de Port-Cartier par rapport à ceux de Sept-Îles. En utilisant cette information, les niveaux extrêmes hauts de l'eau observés à Sept-Îles ont été traduits en niveaux extrêmes à Port-Cartier sur la figure 4.4 (ligne pointillée rouge). Les données de Port-Cartier sont en bleu.

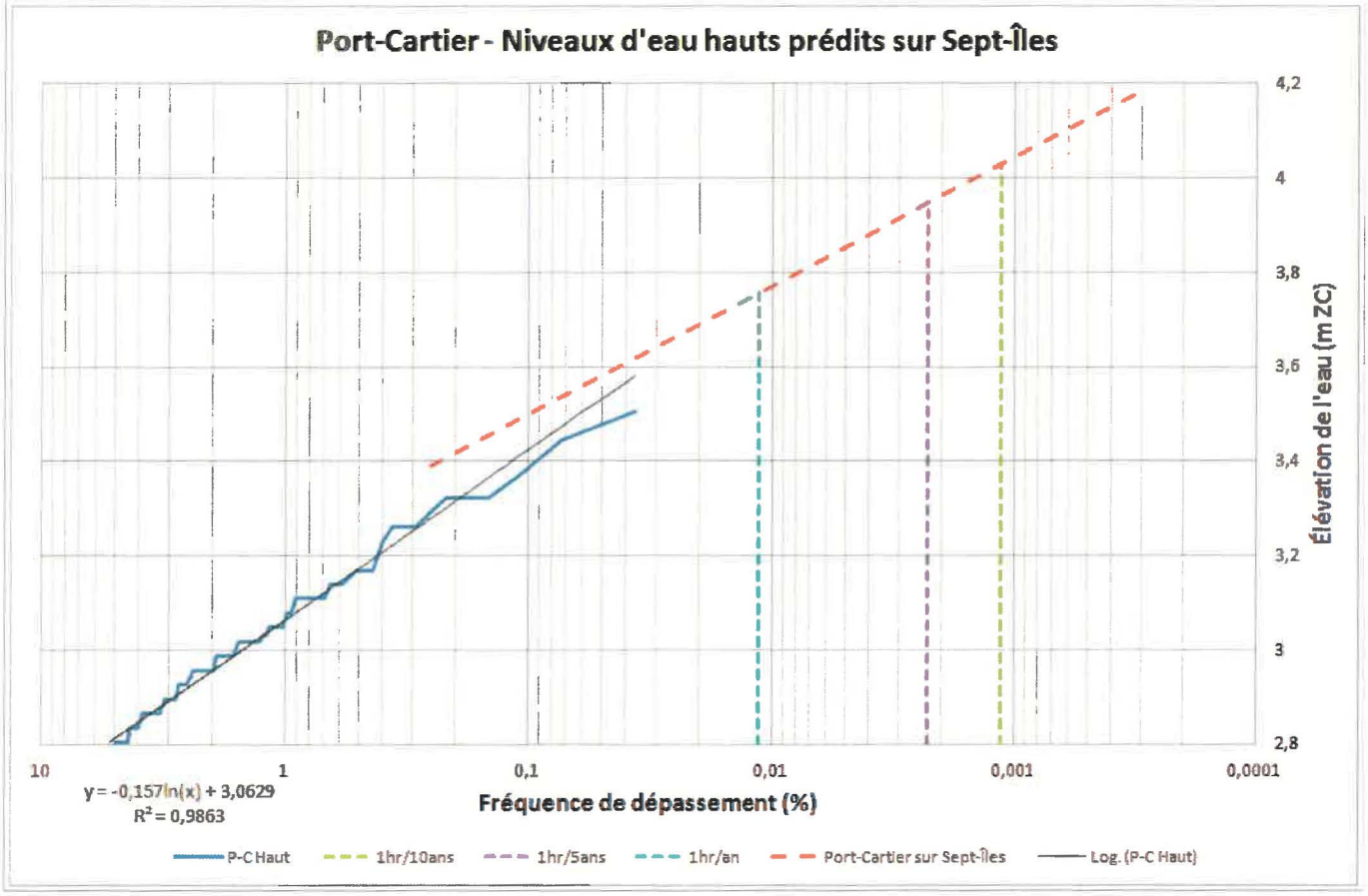


Figure 4.4 Prédiction de niveaux d'eau hauts à Port-Cartier sur les données de Sept-Îles (1972-2012)

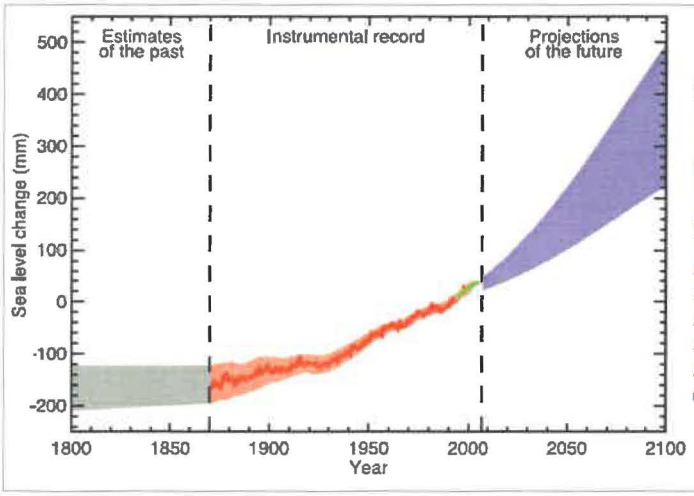
Les deux séries de données sont relativement cohérentes et il semble réaliste d'utiliser la conversion des données de hauts niveaux d'eau à Sept-Îles pour en déduire les niveaux d'eau hauts à Port-Cartier. Cette opération permet de déduire les niveaux hauts en conditions actuelles à Port-Cartier pour les récurrences suivantes :

- Une heure tous les 35 ans : +4,18 m ZC ou +2,70 m NMM
- Une heure tous les 10 ans : +4,03 m ZC ou +2,55 m NMM
- Une heure tous les 5 ans : +3,95 m ZC ou +2,47 m NMM
- Une heure tous les 2 ans : +3,84 m ZC ou +2,36 m NMM
- Une heure par année : +3,76 m ZC ou +2,28 m NMM
- Douze heures par année : +3,46 m ZC ou +1,98 m NMM
- Une journée par année : +3,38 m ZC ou +1,90 m NMM

4.6 Influence des changements climatiques sur les niveaux d'eau hauts

Les dernières analyses du GIEC en matière de changements climatiques indiquent un relèvement moyen du niveau des océans de l'ordre de 0,2 à 0,5 m au cours du prochain siècle[5] si on ne tient pas compte de la fonte accélérée des calottes glaciaires (voir figure 4.5).

Selon ces analyses[6], au cours des prochaines 50 années, il faudrait s'attendre à un relèvement de 0,13 à 0,28 m dans la région du Golfe du Saint-Laurent.



FAQ 5.1, Figure 1. *Time series of global mean sea level (deviation from the 1980-1999 mean) in the past and as projected for the future. For the period before 1870, global measurements of sea level are not available. The grey shading shows the uncertainty in the estimated long-term rate of sea level change (Section 6.4.3). The red line is a reconstruction of global mean sea level from tide gauges (Section 5.5.2.1), and the red shading denotes the range of variations from a smooth curve. The green line shows global mean sea level observed from satellite altimetry. The blue shading represents the range of model projections for the SRES A1B scenario for the 21st century, relative to the 1980 to 1999 mean, and has been calculated independently from the observations. Beyond 2100, the projections are increasingly dependent on the emissions scenario (see Chapter 10 for a discussion of sea level rise projections for other scenarios considered in this report). Over many centuries or millennia, sea level could rise by several metres (Section 10.7.4).*

Figure 4.5 Prévision de hausse du niveau moyen des océans d'après le rapport du GIEC-2007[7]

5 Rapport du Groupe de travail I du GIEC "Résumé à l'intention des décideurs", Chapitre 2 Tableau RID.3 page 13 "http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm-fr.pdf"

6 Rapport du GIEC "Climate changes 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability", Chapitre 2 Encadré 2.5 page 153 "http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-chapter2.pdf"

7http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch5.html

Toutefois, l'incertitude entourant plusieurs paramètres (rythme de hausse de la température et surtout fonte des glaciers) pourrait faire varier cette prévision. Les chiffres qui circulent actuellement à propos de la remontée du niveau d'eau moyen des océans sont plutôt de 0,8 m à 2 m d'ici la fin de ce siècle[8] en tenant compte de la fonte accélérée des glaciers, si bien qu'il faudrait peut-être plutôt parler d'un relèvement d'au moins 0,3 m à 0,5 m dans les prochaines 50 années et d'au moins 0,8 m d'ici 2100.

La figure 4.6 illustre la progression de la hausse des niveaux moyens proposée dans ce contexte. La ligne pointillée rouge correspond à une hausse des niveaux d'eau au taux actuel (environ 2.5 mm/an) et la courbe bleue correspond à une progression de type exponentielle attendue dans le cadre du réchauffement climatique.

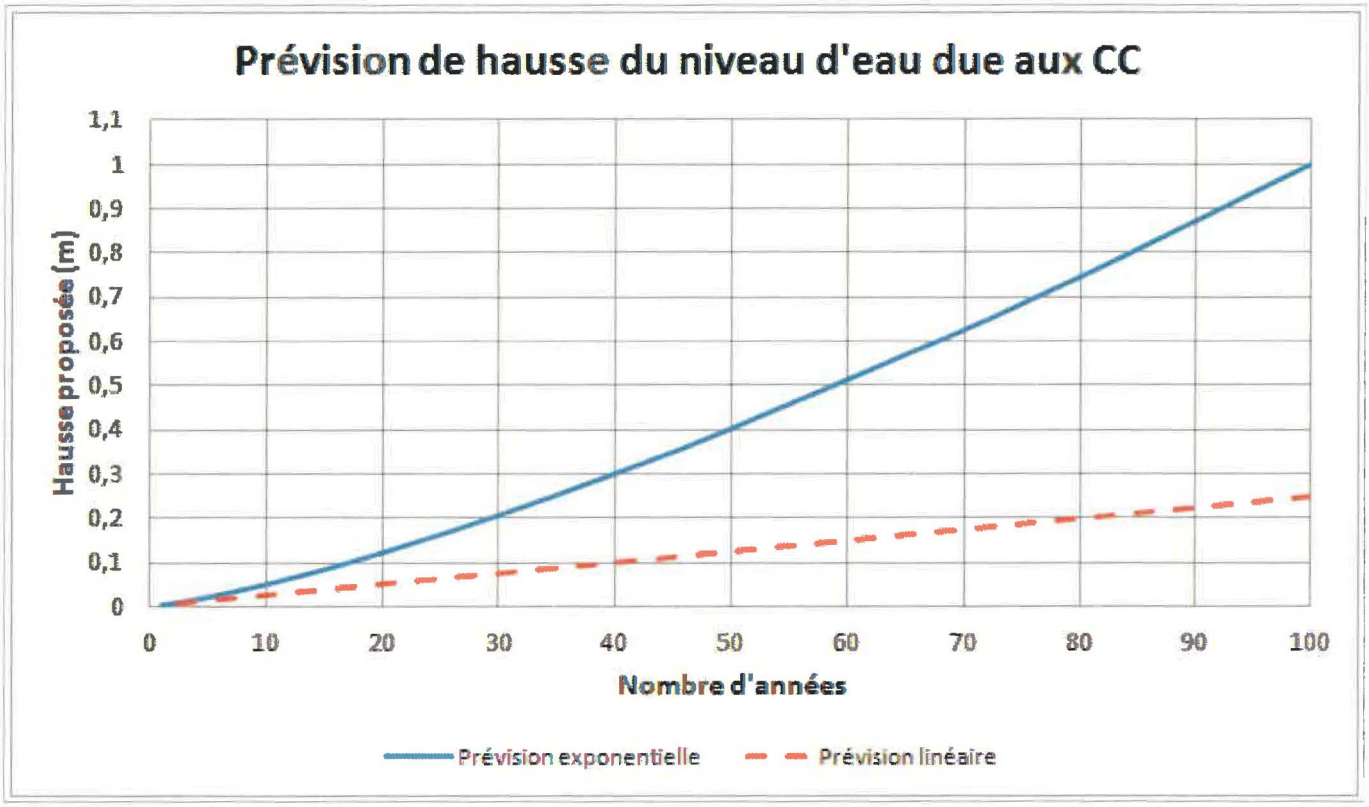


Figure 4.6 Hausse proposée du niveau moyen de l'eau en fonction des changements climatiques

Dans le cadre de la conception des ouvrages de protection de berge de Port-Cartier, il serait recommandé de considérer une **période de vie utile de 35 ans** et un **rehaussement du niveau moyen de l'eau de 0,25 m** à cette échéance.

8 Pfeffer, W.T. & al, "Kinematic Constraints on Glacier Contribution to 21st-Century Sea-Level Rise", SCIENCE, Vol 321, 5 September 2008, www.sciencemag.org

4.7 Nive au hauts recommandés à Port-Cartier

La prise en de l'influence des changements climatiques fait en sorte qu'à Port-Cartier, les niveaux d'eau **en co futures** calculés à partir des niveaux d'eau à Sept-Îles s'établissent comme suit pour les récurrences mentionnées :

- Une heure tous les 35 ans : +4,43 m ZC ou +2,95 m NMM
- Une heure tous les 10 ans : +4,08 m ZC ou +2,60 m NMM
- Une heure tous les 5 ans : +3,96 m ZC ou +2,48 m NMM
- Une heure tous les 2 ans : +3,84 m ZC ou +2,36 m NMM
- Une heure par année : +3,76 m ZC ou +2,28 m NMM
- Douze heures par année : +3,46 m ZC ou +1,98 m NMM
- Une journée par année : +3,38 m ZC ou +1,90 m NMM

4.8 Profil du rivage – Secteur Rochelois

Dans la partie ouest du secteur Rochelois (profil P06, figure 4.7), les niveaux d'eau hauts atteignent la partie supérieure de la plage très près des infrastructures en place (promenade). La remontée des niveaux d'eau anticipée va accentuer la pression des vagues sur le haut de plage, ce qui se traduira par une accélération de l'érosion et la vulnérabilité accrue des infrastructures.

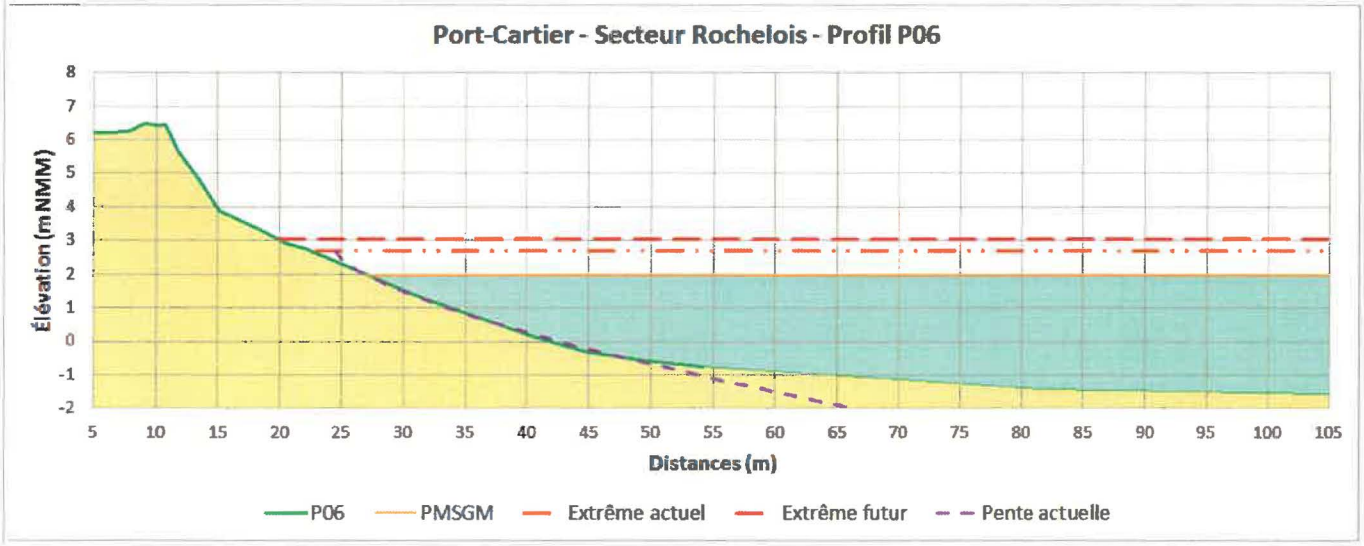


Figure 4.7 Coupe du rivage – Secteur Est de Rochelois – Profil P06

Dans la partie est du secteur Rochelois (profil P13, figure 4.8), les niveaux d'eau hauts (et les vagues) atteignent directement la zone en érosion (section quasi-verticale du rivage). Le phénomène d'érosion va s'accélérer avec la remontée des niveaux d'eau.

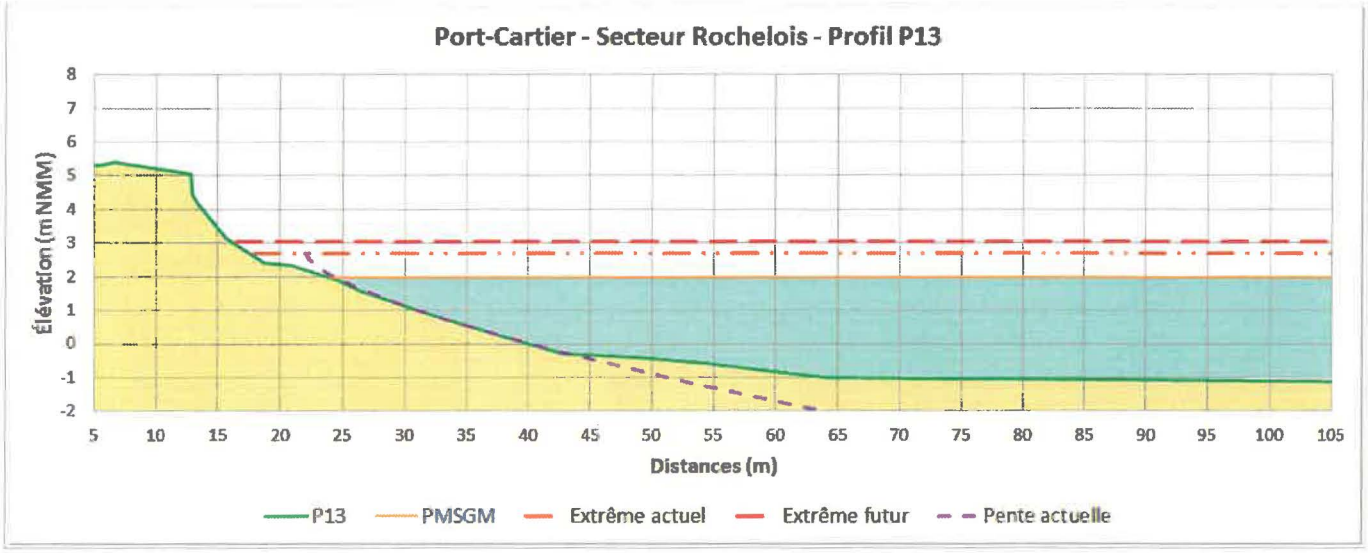


Figure 4.8 Coupe du rivage – Secteur Ouest de Rochelois – Profil P13

4.9 Profil du rivage – Secteur McCormick

Dans le secteur McCormick (profil P11, figure 4.9), les niveaux d'eau hauts ordinaires (pleine mer supérieure de grande marée / PMSGM) et a fortiori les niveaux exceptionnels atteignent déjà directement la zone en érosion (section quasi-verticale du rivage). Le phénomène d'érosion va s'accélérer avec la remontée des niveaux d'eau.

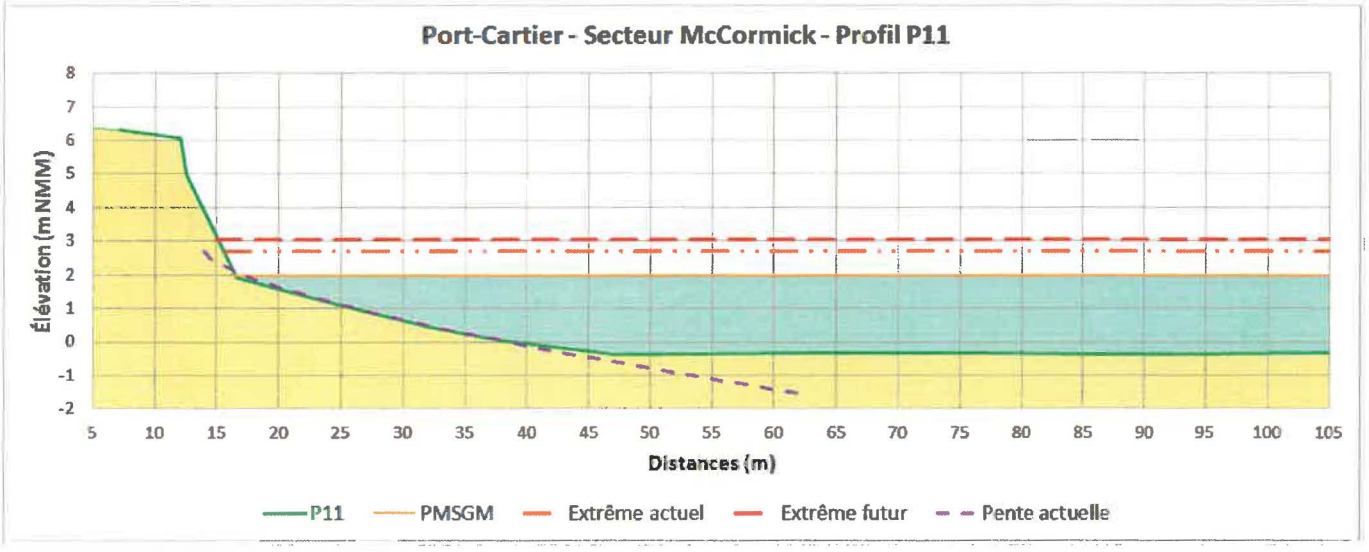


Figure 4.9 Coupe du rivage – Secteur McCormick – Profil P11

4.10 Profil du rivage – Secteur Portage

Dans le secteur du Portage, les niveaux d'eau arrivent en haut de plage.

Dans la partie nord du secteur Portage (profil P47, figure 4.10), au droit de la langue de terre qui sépare la rivière Pentecôte du fleuve Saint-Laurent, le haut de plage est large et la remontée prévue des niveaux d'eau mettra du temps à affecter la partie terrestre.

Par contre, dans la partie où le rivage est proche de la route 138 (profil P32, figure 4.11), la distance entre le haut de plage et la berge en pente raide est faible. Il se produit déjà une érosion de la berge lors des événements de très hauts niveaux d'eau accompagnés de tempête et la situation ne fera qu'empirer avec le temps et la remontée des niveaux d'eau.

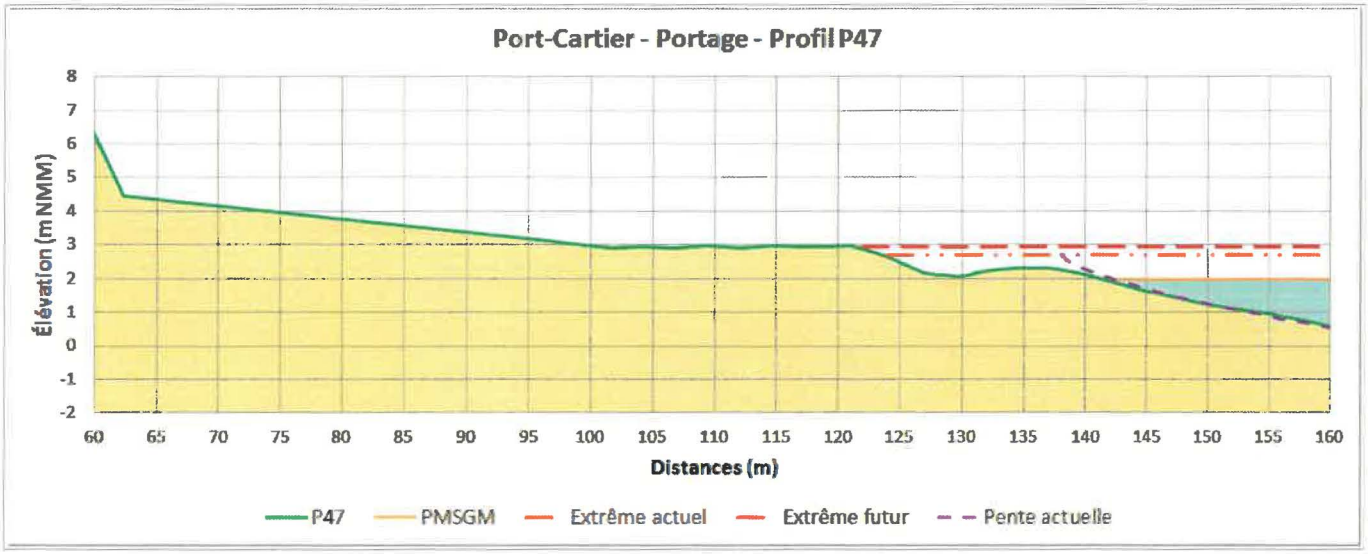


Figure 4.10 Coupe du rivage – Secteur Nord de Portage – Profil P47

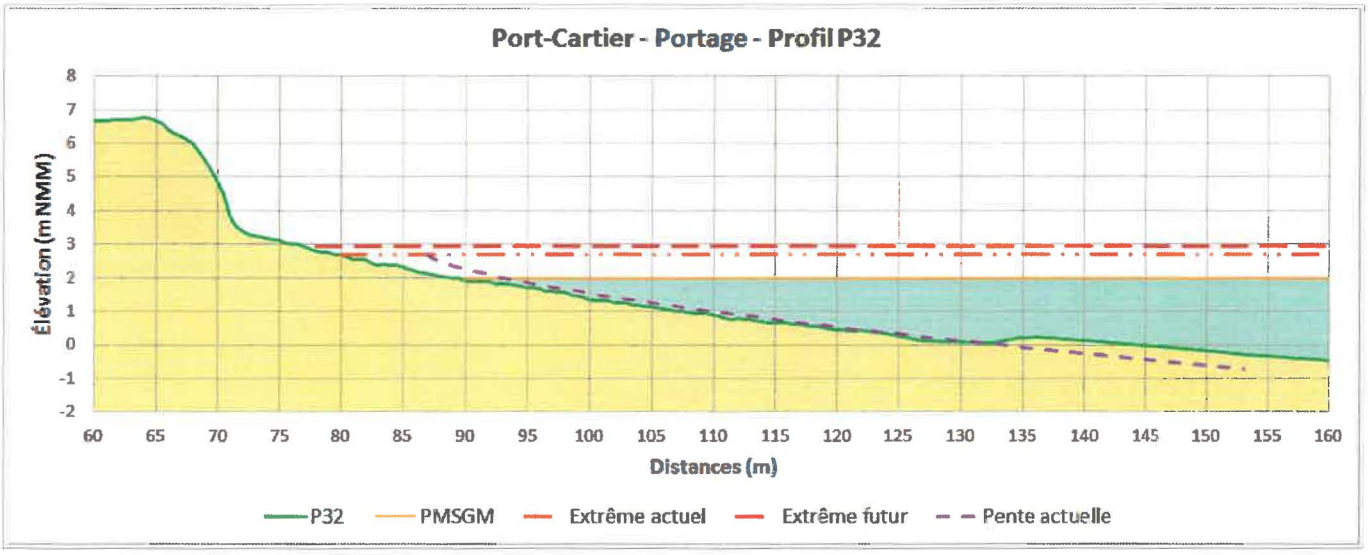


Figure 4.11 Coupe du rivage – Secteur centre de Portage – Profil P32

Aux endroits où se trouvent des sorties de ruisseaux transformées en sorties de ponceaux (profil P08, figure 4.12), les très hauts niveaux d'eau atteignent déjà directement la pente au pied de la route.

Transports Québec a d'ailleurs systématiquement enroché ces zones très exposées. Ce genre d'événements déstabilisateurs se produira plus souvent et avec plus de conséquences négatives avec la remontée des niveaux d'eau anticipée.

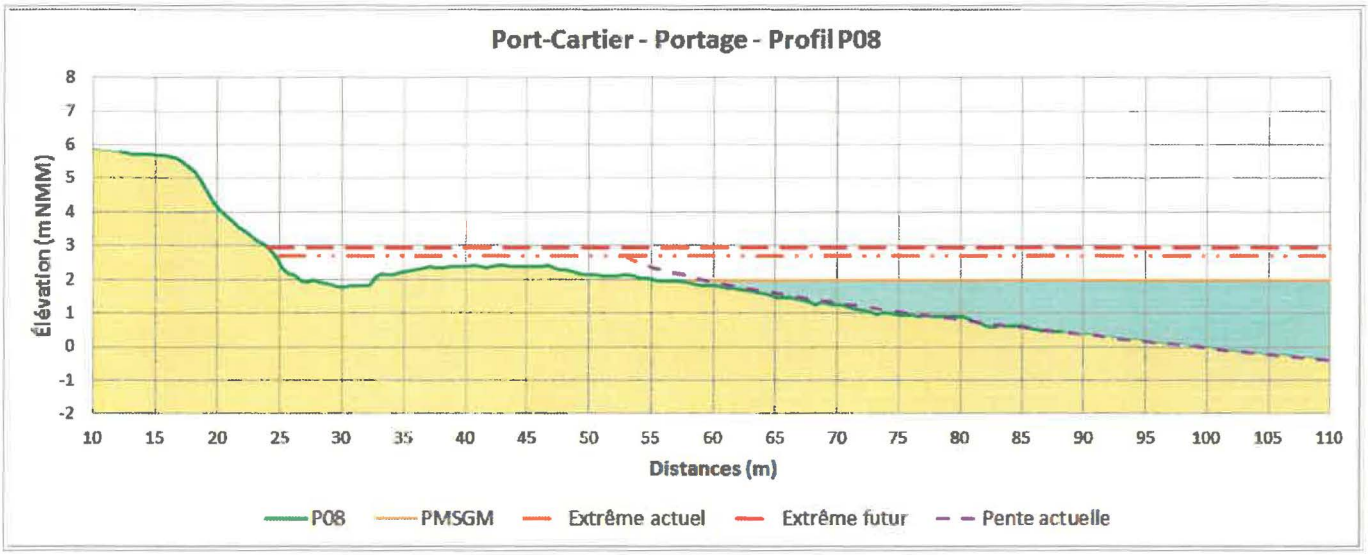


Figure 4.12 Coupe du rivage – Secteur Sud de Portage – Profil P08

4.11 Profil du rivage – Secteur Pointe-aux-Anglais

Dans la partie nord du secteur de Pointe-aux-Anglais (profil P28, figure 4.13), la zone où se trouve un ruisseau sera affectée par la montée des eaux. Actuellement, les niveaux d'eau extrêmes atteignent le haut de plage, alors que les niveaux extrêmes futurs (environ 35 ans) devraient permettre à l'eau et aux vagues d'atteindre directement le rivage de l'autre côté du ruisseau.

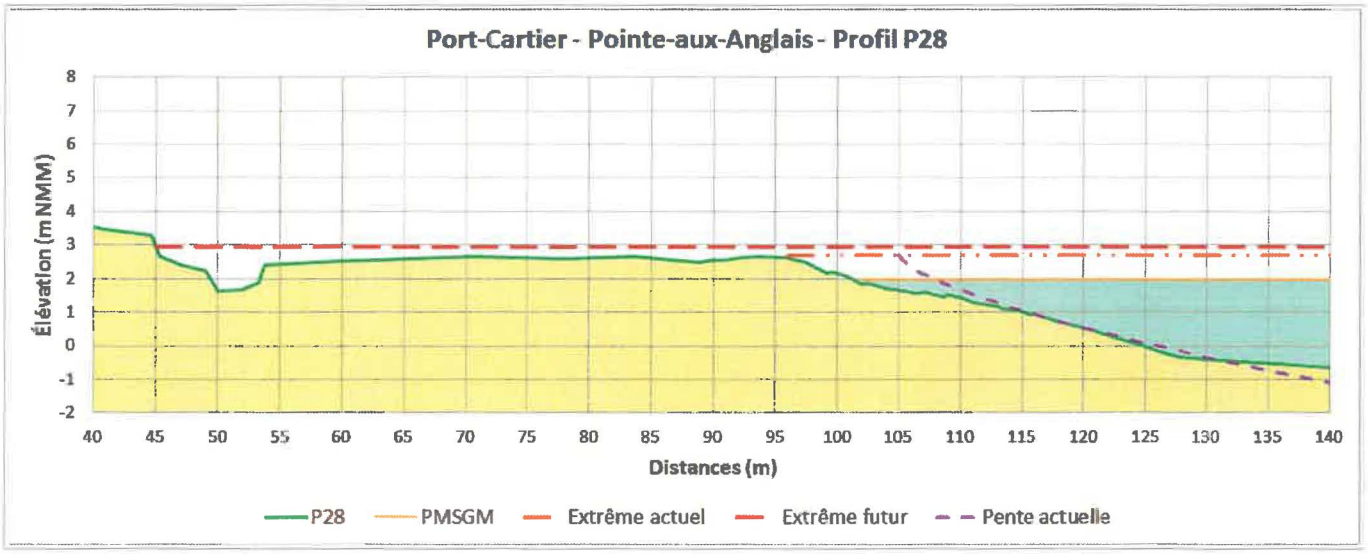


Figure 4.13 Coupe du rivage – Secteur Nord de Pointe-aux-Anglais – Profil P28

Dans le secteur centre de Pointe-aux Anglais (profil P20, figure 4.14), la remontée prévue des niveaux d'eau (prévision dans 35 ans) pourrait faire reculer le rivage d'une trentaine de mètres vers l'intérieur des terres. Ce recul prévisible est d'une vingtaine de mètres dans la partie sud de Pointe-aux-Anglais (profil P13, figure 4.15). Les résidences se trouvant actuellement relativement loin de la rive, les problématiques de submersion des infrastructures publiques et privées ne devraient pas apparaître rapidement, mais la vulnérabilité aux événements extrêmes sera de plus en plus préoccupante avec le temps.

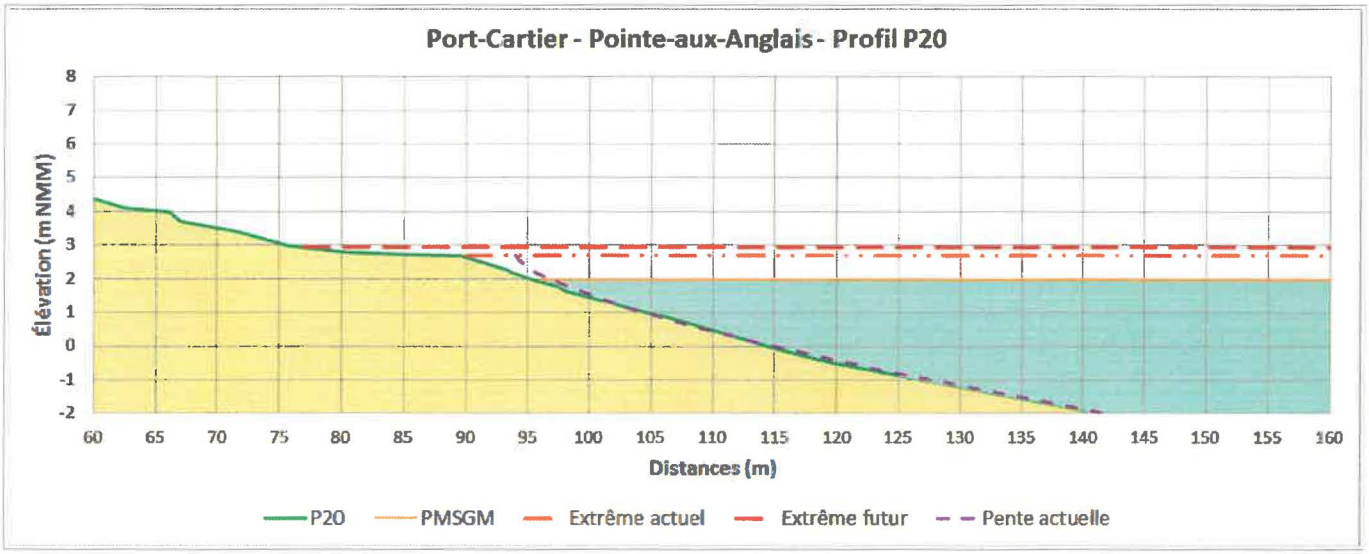


Figure 4.14 Coupe du rivage – Secteur centre de Pointe-aux-Anglais – Profil P20

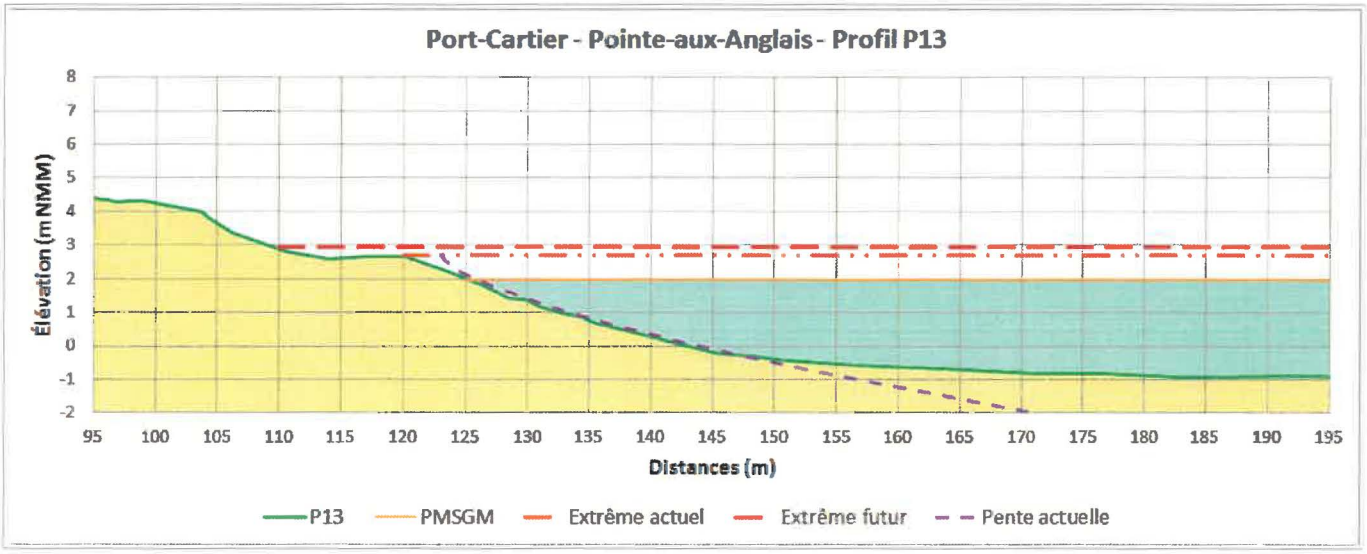


Figure 4.15 Coupe du rivage – Secteur Sud de Pointe-aux-Anglais – Profil P13

5 Vagues au large de Port-Cartier

5.1 Contexte de l'étude de vagues

Une étude de prédiction des vagues a été effectuée dans le cadre de l'étude de la vulnérabilité à l'érosion des berges de Port-Cartier. En l'absence de données de vagues appropriées, celles-ci sont établies à l'aide d'un modèle mathématique sur ordinateur, à partir des enregistrements de vent à une station météorologique avoisinante. Des données des stations météorologiques de Sept-Îles et Port-Menier ont été utilisées, de même que celles de la station météorologique virtuelle Fleuve-I située au large de Sept-Îles (figure 5.1).

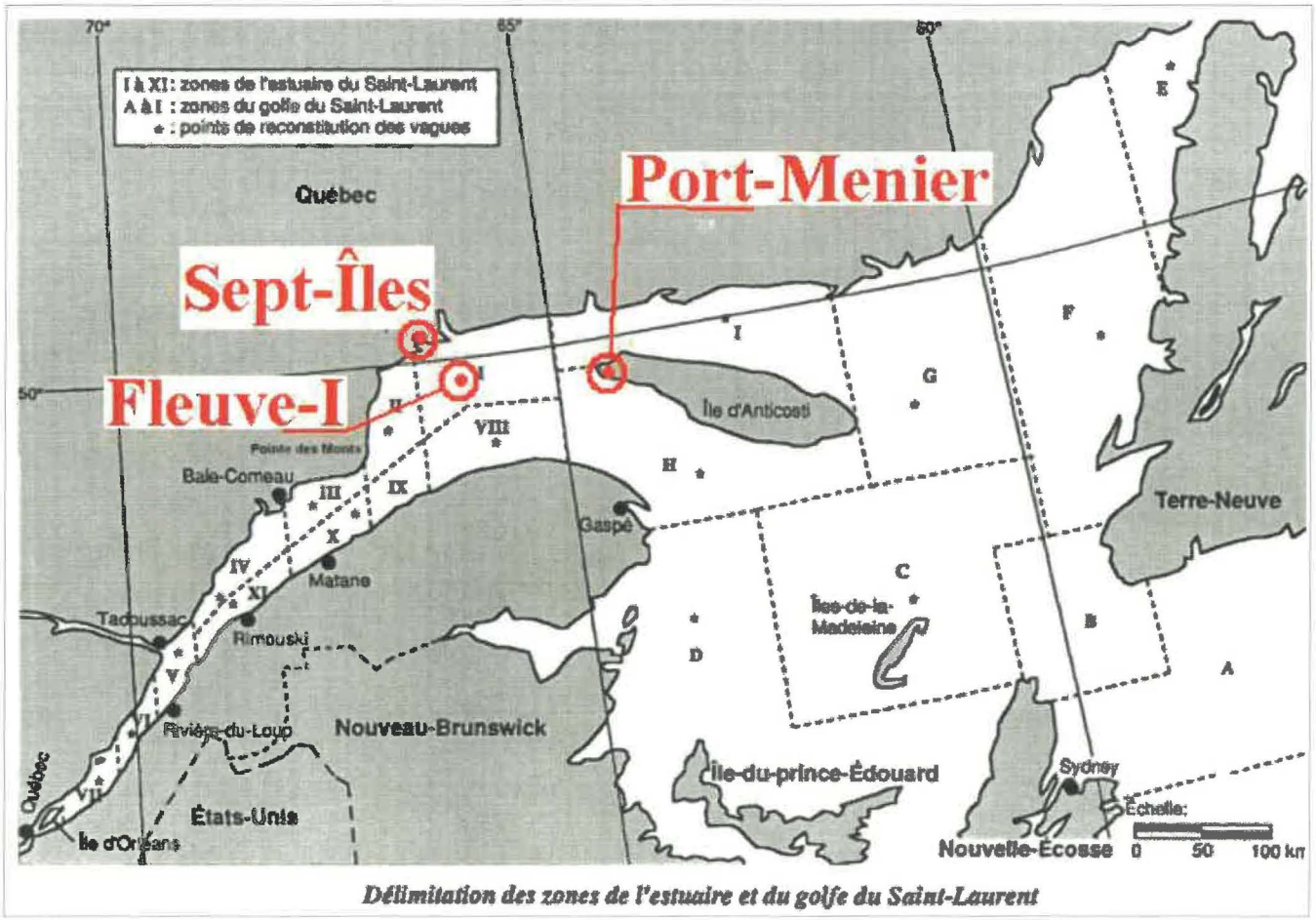


Figure 5.1 Localisation des données météorologiques

Il existe des données de vagues récemment mesurées près de Sept-Îles qui auraient pu être utilisées pour calibrer les paramètres du modèle de vagues utilisé pour Port-Cartier. Malheureusement, ces données ne sont pas encore disponibles aux ingénieurs travaillant dans le domaine. Seul un graphique récupéré d'une présentation a pu être utilisé pour tenter de calibrer le modèle de vagues.

En utilisant le logiciel « Gener », les vagues ont été reconstituées au large des rives de Port-Cartier à partir des données de vent des stations météorologiques. Une sélection de la station de vent à retenir pour la suite des calcul a été faite et les vagues calculées au large avec ces données de vent ont ensuite été sommairement réfractées pour obtenir le climat des vagues près des rives de Port-Cartier, afin d'être en mesure d'évaluer les situations de vulnérabilité à l'érosion et de dimensionner les ouvrages de protection.

Les calculs pour générer les vagues dans la région de Port-Cartier ont été faits sur l'année complète pour tenir compte de l'impact de la disparition progressive des glaces (avec les changements climatiques) sur la stabilité des ouvrages de protection.

5.2 Données de vent de la station de Sept-Îles

Les données de vents de la station météorologique d'Environnement Canada de Sept-Îles (située à l'aéroport – Identification 7047910, Position 50° 13' N / 66° 16' O, Altitude 54,9 m) ont été récupérées entre 1971 et 2011, du 1er janvier au 31 décembre.

Cette station météorologique est plus ou moins bien située par rapport aux vagues qui frappent les rives de Port-Cartier. Il s'agit d'une station terrestre influencée par le relief de la côte et des îles environnantes. Par contre, c'est la station la plus proche des sites à l'étude et la qualité des données est très bonne.

Les statistiques globales des vents pour la série de données retenue (1971 à 2011) ont été utilisées pour calculer la rose des vents qui est montrée sur la figure 5.2. On peut y lire, selon les seize directions principales, les fréquences des vents dont la vitesse est supérieure à 0, 20, 40, 50 et 60 km/h. Sur cette figure, les fréquences croissent de l'extérieur vers l'intérieur, passant de 0,01 % à 30 % selon une échelle logarithmique afin de mettre en évidence les vents les plus forts. On y indique aussi le nombre maximal et le nombre disponible de valeurs horaires, le pourcentage de couverture (100 %) et la fréquence des périodes de temps calme (8,4 %).

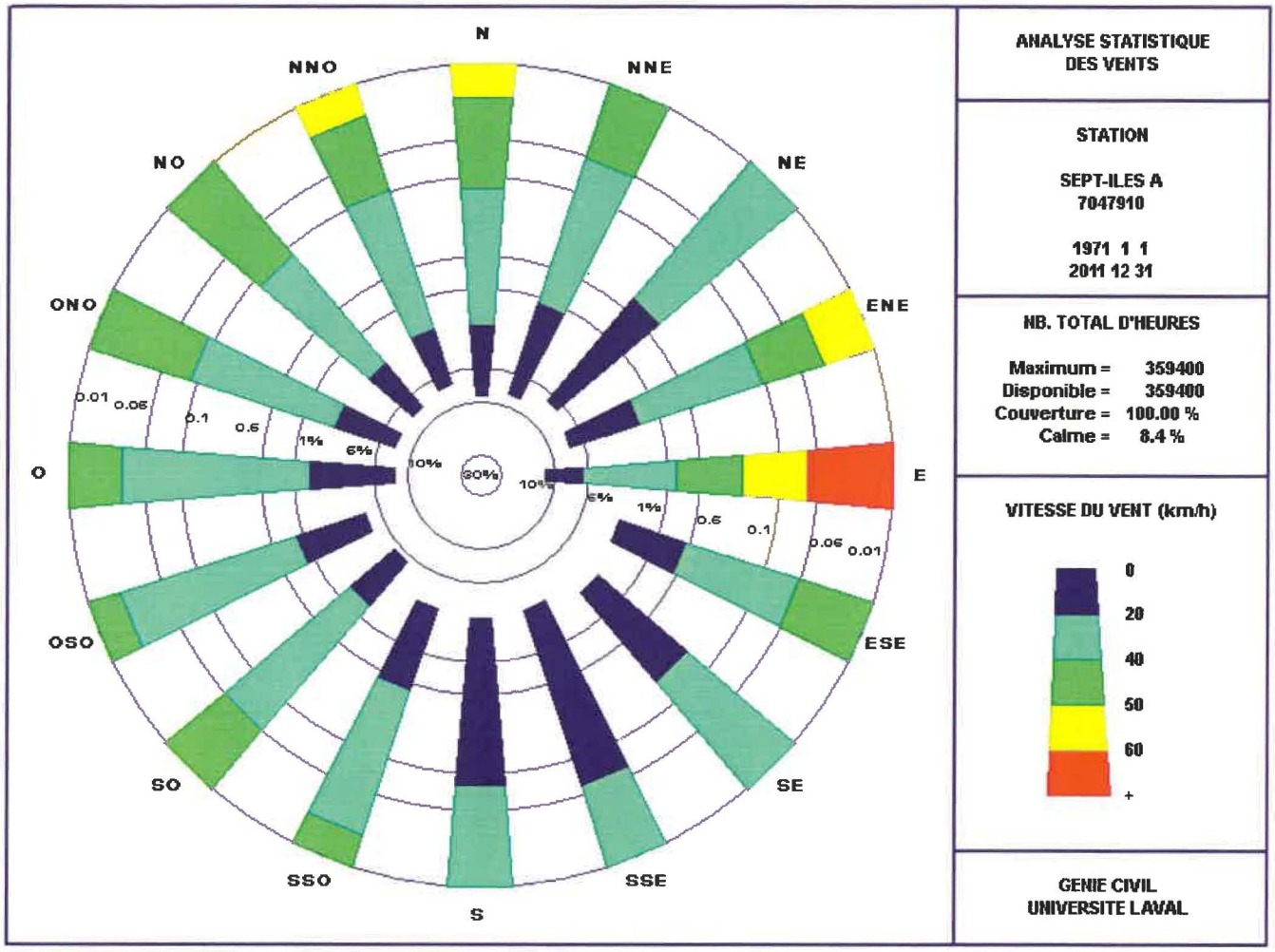


Figure 5.2 Rose des vents de la station météorologique de Sept-Îles entre 1971 et 2011

5.3 Données de vent de Port-Menier

Les données de vents de la station d'Environnement Canada de Port-Menier (située à l'aéroport – Identification 7056202, Position 49° 50' 19" N / 64° 17' 36" O, Altitude 55,2 m) ont été récupérées entre 1981 et 2005, du 1er janvier au 31 décembre. La station de l'aéroport de Port-Menier présente une qualité relativement moyenne des données (couverture de 87,3 %). Il s'agit d'une station terrestre relativement mal positionnée pour ce qui est des vents du secteur Est (qui proviennent de l'intérieur de l'île dans ce cas).

Les statistiques globales des vents pour la série de données retenue (1981 à 2005) ont été utilisées pour calculer la rose des vents qui est montrée sur la figure 5.3. On peut y lire, selon les seize directions principales, les fréquences des vents dont la vitesse est supérieure à 0, 20, 40, 50 et 60 km/h. Sur cette figure, les fréquences croissent de l'extérieur vers l'intérieur, passant de 0,01 % à 30 % selon une échelle logarithmique afin de mettre en évidence les vents les plus forts. On y indique aussi le nombre maximal et

le nombre disponible de valeurs horaires, le pourcentage de couverture des données (87,3 %) et la fréquence des périodes de temps calme (8,5 %).

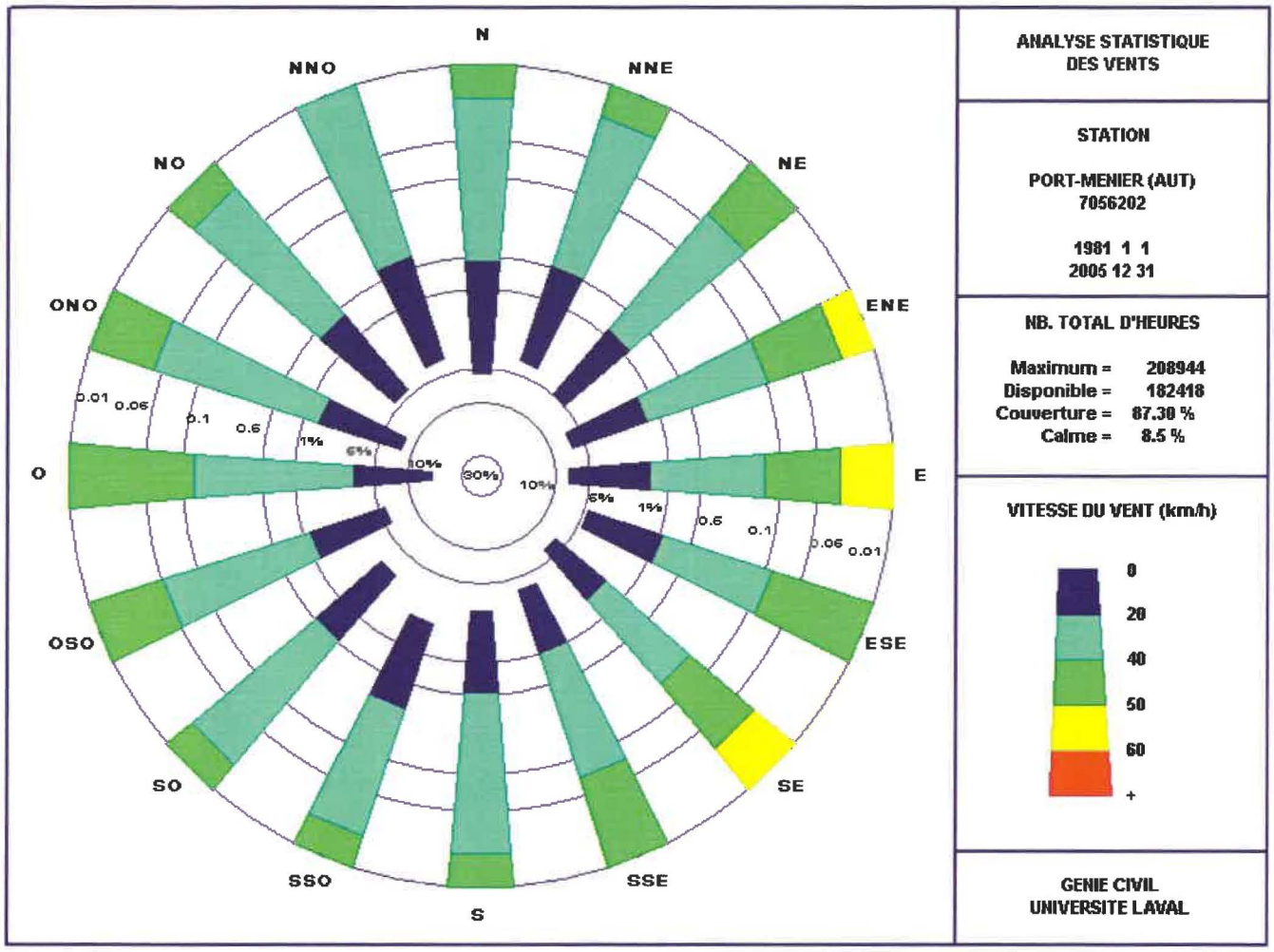


Figure 5.3 Rose des vents de la station de Port-Menier entre 1981 et 2005

En comparant les figures 5.2 et 5.3, on s'aperçoit de l'influence de la position de la station de Port-Menier sur la vitesse des vents du secteur Est. Cette station météorologique ne sera pas retenue pour les calculs des vagues au large de Port-Cartier.

5.4 Données de vent de la station virtuelle Fleuve-I

Les données de vents de la station virtuelle Fleuve-I ont été récupérées entre 1971 et 1998, du 1er janvier au 31 décembre. La qualité des données de vent de cette station est bonne.

Les statistiques globales des vents pour la série de données retenue (1971 à 1998) ont été utilisées pour calculer la rose des vents qui est montrée sur la figure 5.4. On peut y lire, selon les seize directions principales, les fréquences des vents dont la vitesse est supérieure à 0, 20, 40, 50 et 60 km/h. Sur cette

figure, les fréquences croissent de l'extérieur vers l'intérieur, passant de 0,01 % à 30 % selon une échelle logarithmique afin de mettre en évidence les vents les plus forts. On y indique aussi le nombre maximal et le nombre disponible de valeurs horaires, le pourcentage de couverture des données (99,78 %) et la fréquence des périodes de temps calme (6,9 %).

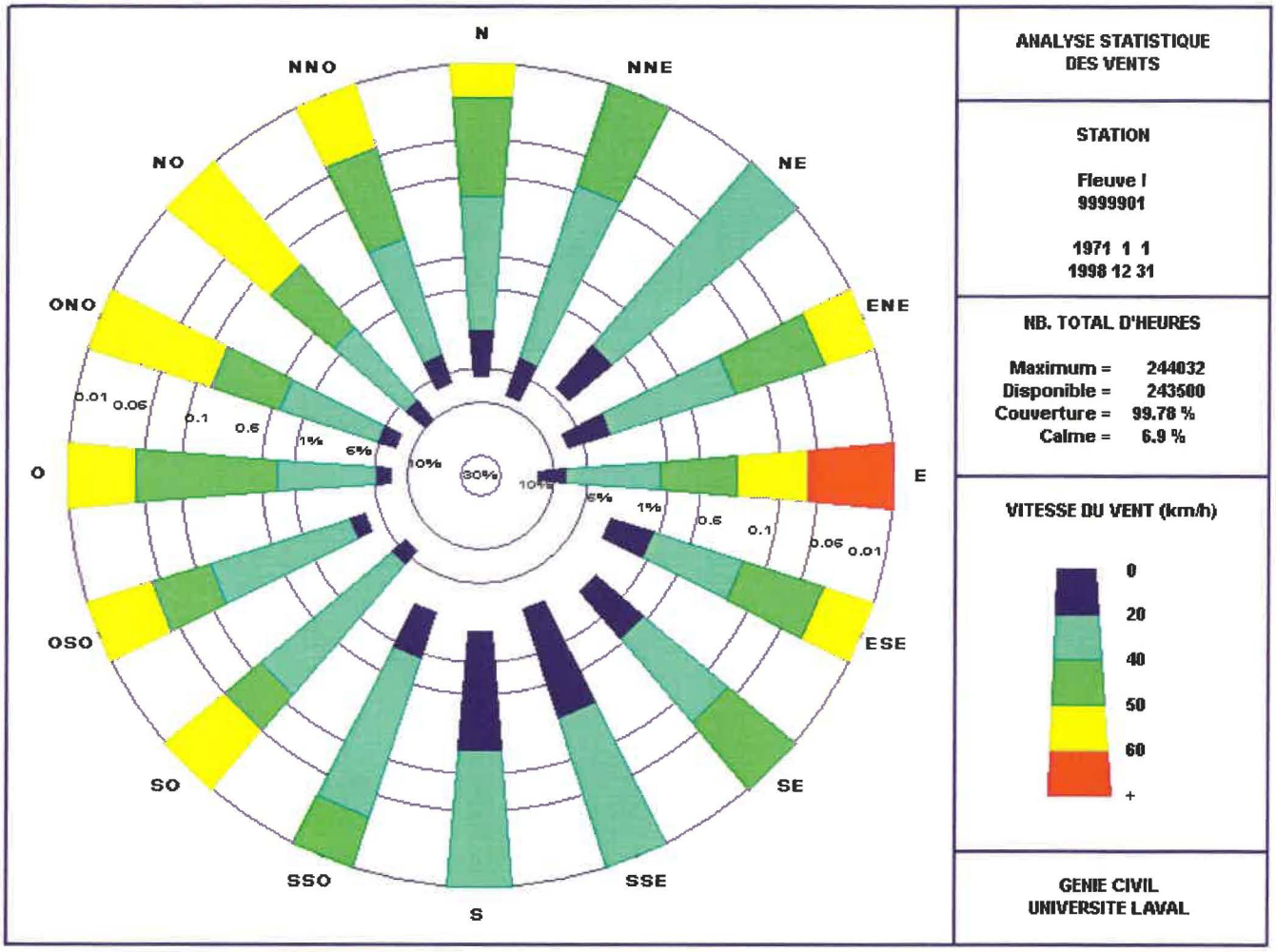


Figure 5.4 Rose des vents de la station virtuelle Fleuve-I entre 1971 et 1998

En comparant les figures 5.2 et 5.4, on peut observer une certaine analogie entre les deux séries de données de vent (Sept-Îles et Fleuve-I).

5.5 Fetchs

Les fetchs sont les distances d'eau libre sur lesquelles les vents peuvent soulever les vagues dans une direction donnée. Les fetchs permettant de calculer la hauteur des vagues au large ont été déterminés à partir des radiales mesurées tous les trois degrés (3°) sur la carte marine.

Deux points d'origine des radiales et des fetchs ont été utilisés dans le cas de l'étude de la vulnérabilité des rives de Port-Cartier à l'érosion.

- Le premier point (PC-Er-01) correspond aux secteurs Rochelois et Place McCormick. Il est situé par environ 30 m d'eau. Sa position est : 49° 58' 50" N / 66° 48' 05" O.
- Le deuxième point (PC-Er-02) correspond aux secteurs Portage et Pointe-aux-Anglais. Il est situé par environ 40 m d'eau. Sa position est : 49° 45' 14" N / 67° 06' 20" O.

La position de ces deux points est illustrée sur la figure 5.5.

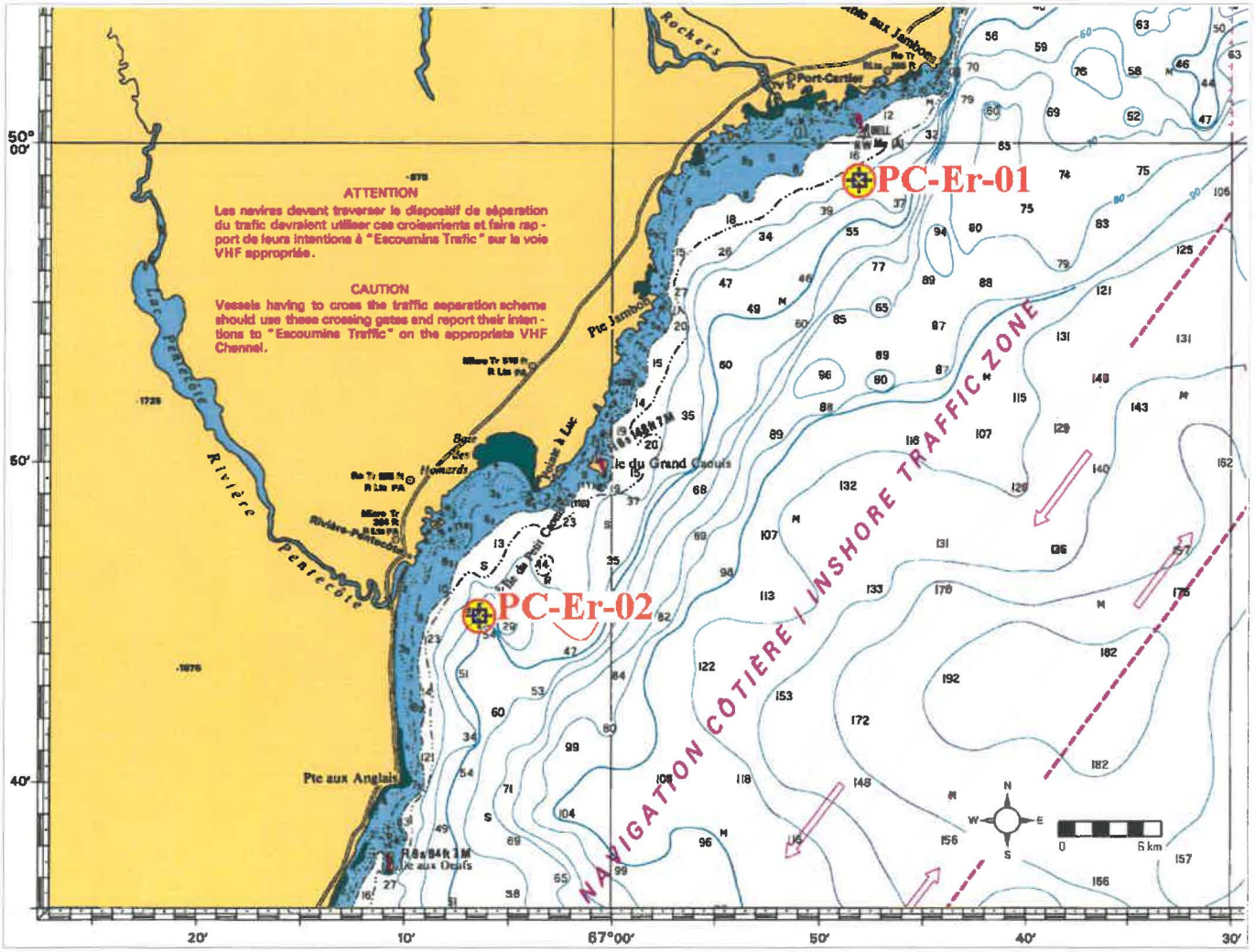


Figure 5.5 Position des points de calcul des radiales et fetchs au large de Port-Cartier

Les radiales et les fetchs utilisés dans les prévisions de vague suivant les directions d'intérêt ont été calculés à l'aide de la méthode des fetchs effectifs. À noter que le fetch utilisé correspond à la moyenne plus un demi écart-type. La figure 5.6 représente graphiquement les deux séries de radiales selon une rose avec une limitation des longueurs à 300 km. La figure 5.7 représente les séries de fetchs selon une rose.

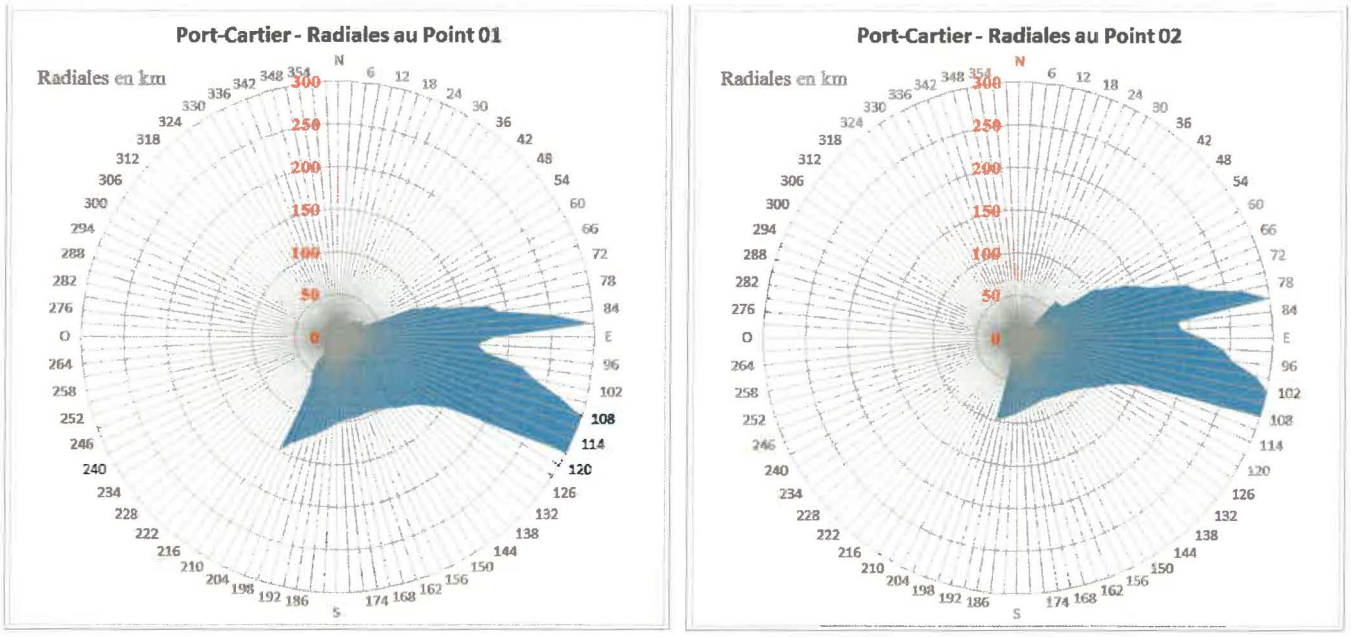


Figure 5.6 Radiales selon les directions au large de Port-Cartier (limitation à 300 km)

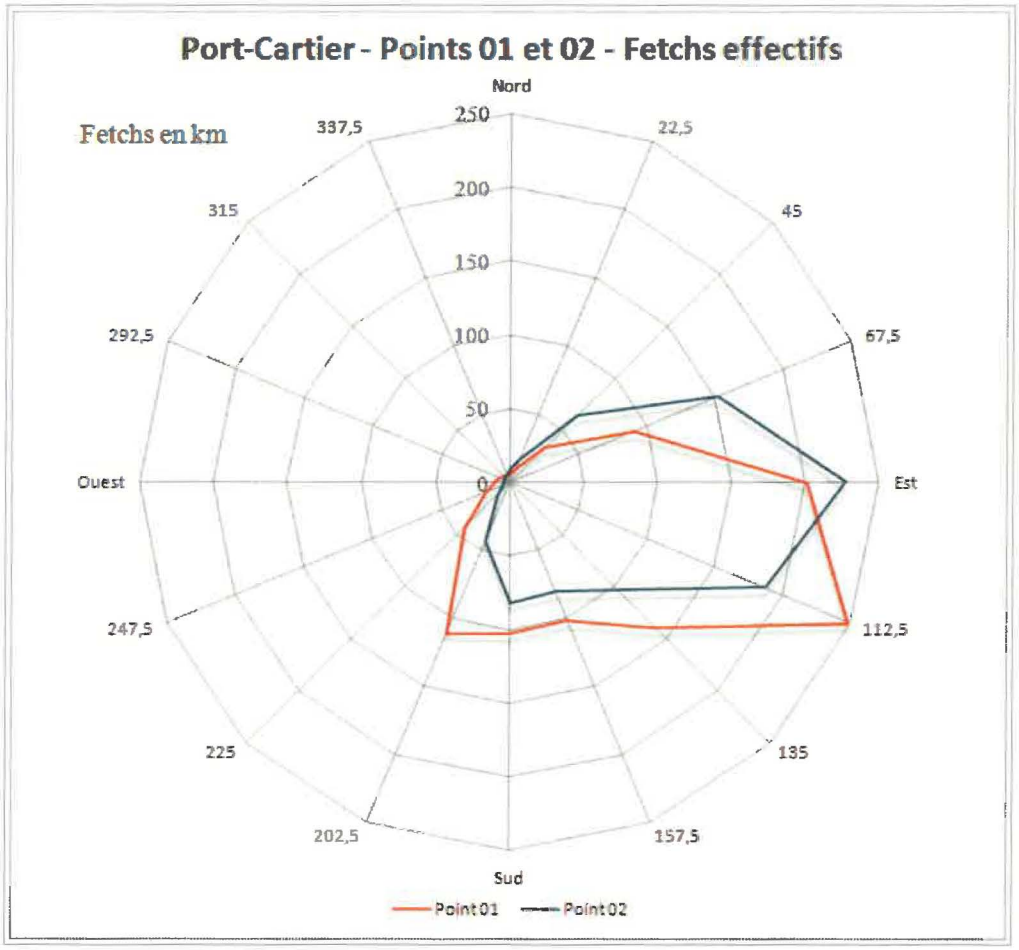


Figure 5.7 Fetchs effectifs selon les directions au large de Port-Cartier (limitation à 300 km)

Une étude de sensibilité a été faite sur la limitation de la longueur des radiales à 300 km, 250 km et 200 km afin de vérifier l'influence de ce paramètre sur les hauteurs de vague.

Les tableaux 5.1 et 5.2 donnent les séries de valeurs numériques des fetchs effectifs obtenus avec les différentes valeurs maximales des radiales (colonne de gauche des tableaux) et utilisées pour les calculs des hauteurs de vagues respectivement pour les points 01 et 02.

Tableau 5.1 Valeurs numériques des fetchs effectifs selon les directions au point 01

Point 1	**N**	**NNE**	**NE**	**ENE**	**E**	**ESE**	**SE**	**SSE**	**S**	**SSW**	**SW**	**WSW**	**W**	**WNW**	**NW**	**NNW**
300 km	5,5	9,9	33,6	91,1	201	248	140	102	103	110	43,3	17,2	10,6	8,1	6,2	5,1
250 km	5,5	9,9	33,4	89,2	192	219	134	101	103	110	43,3	17,2	10,6	8,1	6,2	5,1
200 km	5,5	9,9	32,8	84,8	175	185	126	100	103	110	43,3	17,2	10,6	8,1	6,2	5,1

Tableau 5.2 Valeurs numériques des fetchs effectifs selon les directions au point 02

Point 1	**N**	**NNE**	**NE**	**ENE**	**E**	**ESE**	**SE**	**SSE**	**S**	**SSW**	**SW**	**WSW**	**W**	**WNW**	**NW**	**NNW**
300 km	9,1	16,8	64,1	152	227	188	104	80,4	82	44	13	5,4	4,7	4,7	5,1	6,2
250 km	9,1	16,8	63,3	149	216	173	101	80,4	82	44	13	5,4	4,7	4,7	5,1	6,2
200 km	9,1	16,8	61,6	143	190	154	97,1	80,4	82	44	13	5,4	4,7	4,7	5,1	6,2

5.6 Génération des vagues au large

À l'aide d'un modèle paramétrique sur ordinateur (GENER, développé à l'université Laval), les données de vent de la station météorologique de Sept-Îles et de la station virtuelle Fleuve-I ont été utilisées pour la reconstitution des vagues au large de Port-Cartier de 1971 à 2011 (Sept-Îles) ou de 1971 à 1998 (Fleuve-I). Différents facteurs d'amplification ont été appliqués aux vitesses du vent :

- Pour la station de Sept-Îles, des facteurs de 1,0 et 1,1 ont été appliqués pour tenir compte du fait que la station est terrestre et ne pas sous-estimer les hauteurs de vagues produites à partir des données de cette station,
- Pour la station de Fleuve-I, des facteurs de 1,0 et 1,1 ont été appliqués même si cette station virtuelle est positionnée sur l'eau. En effet, les données de cette station sont déduites de stations terrestres environnantes.

Le modèle GENER applique la méthode S.M.B. (Shore Protection Manual, 1984) de façon séquentielle aux données horaires du vent pour obtenir les statistiques des vagues en un point au large de Port-Cartier. Les données du vent sont préalablement lissées pour éliminer le plus possible les irrégularités présentes dans les données de ce genre.

5.7 Sélection des paramètres de calcul

Les calculs de vagues au large ont tout d'abord été faits pour sélectionner la station de vent, le facteur multiplicatif sur les vitesses de vent et la limite de longueur des radiales qui donneraient les résultats les plus réalistes.

À partir de ces résultats, on a tracé sur les figures 5.8 et 5.9 les prédictions de vagues extrêmes correspondant aux deux stations de vent (Sept-Îles et Fleuve-I) avec un facteur multiplicatif de 1,0 et une limitation des longueurs de radiales de 300 km (version « 10 »), 250 km (version « 10a ») et 200 km (version « 10b »).

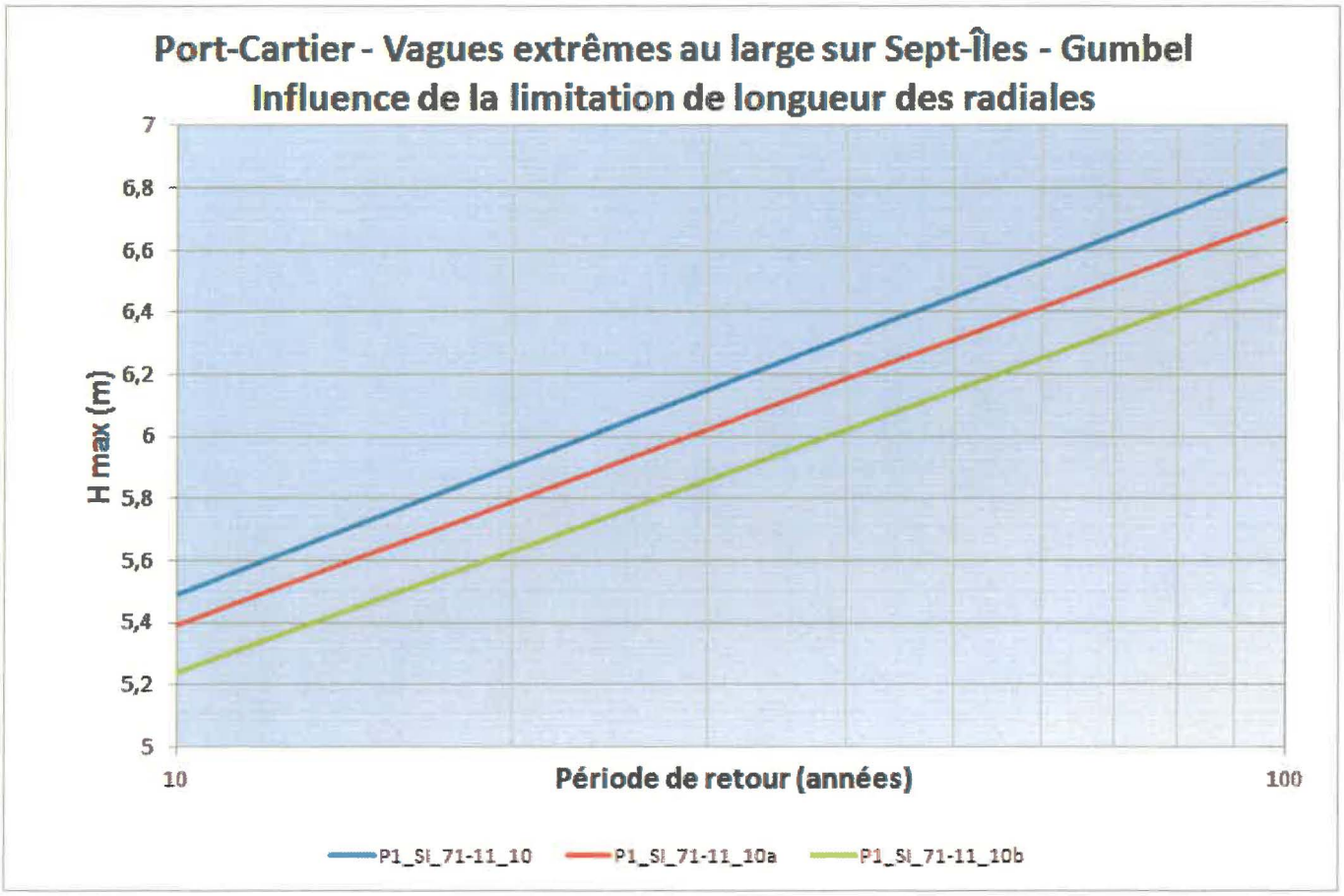


Figure 5.8 Vagues extrêmes prédites sur Sept-Îles pour différentes limitations de longueur de radiales

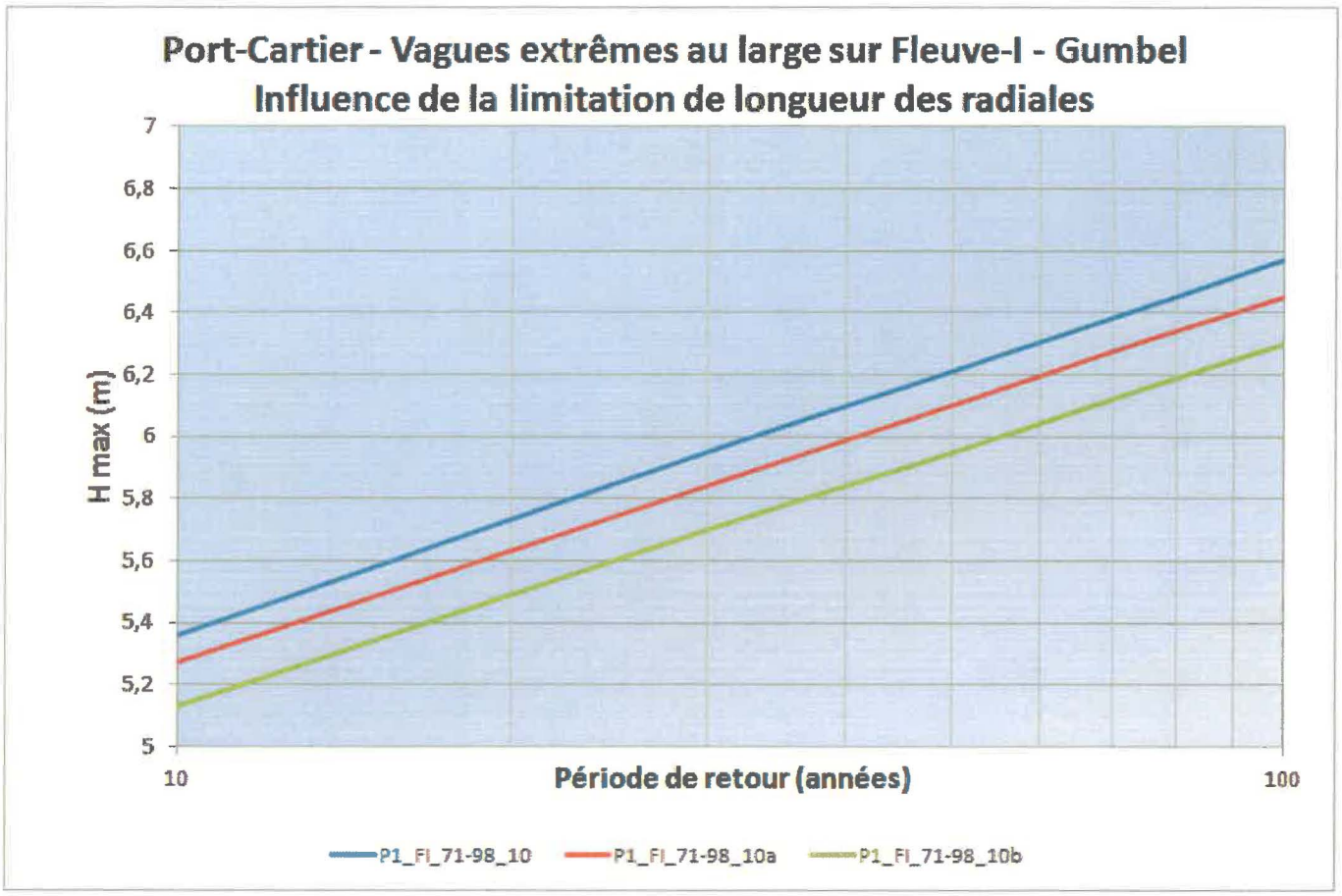


Figure 5.9 Vagues extrêmes prédites sur Fleuve-I pour différentes limitations de longueur de radiales

L'utilisation de la station virtuelle Fleuve-I provoque une diminution relativement significative des hauteurs de vagues extrêmes prédites au large de Port-Cartier.

Les patrons des vents correspondant aux deux stations de vent sont relativement similaires. Du point de vue des vagues calculées à partir de ces différentes bases de données de vent, on observe une forte prédominance des vagues du secteur Est au large de Port-Cartier. La figure 5.10 correspond aux vagues calculées au point 01 avec les vents de Sept-Îles (facteur multiplicatif de 1,0) alors que la figure 5.11 présente les mêmes résultats avec les vents de Fleuve-I.

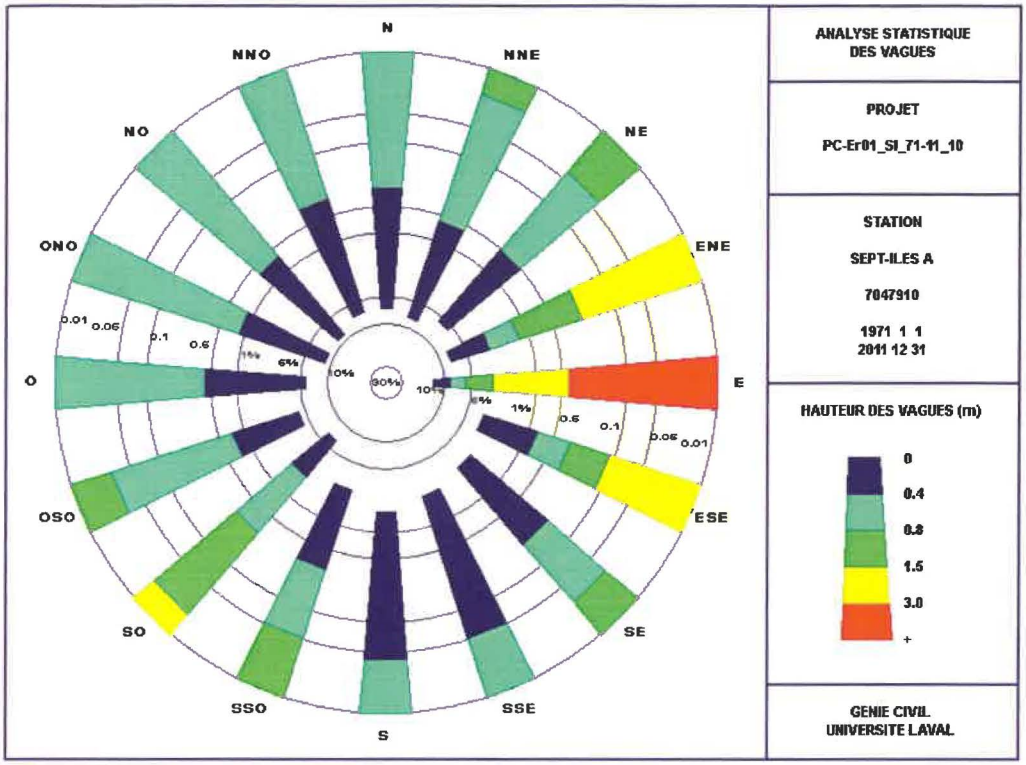


Figure 5.10 Rose des vagues au point 01 – Vents de Sept-Îles – F=1,0

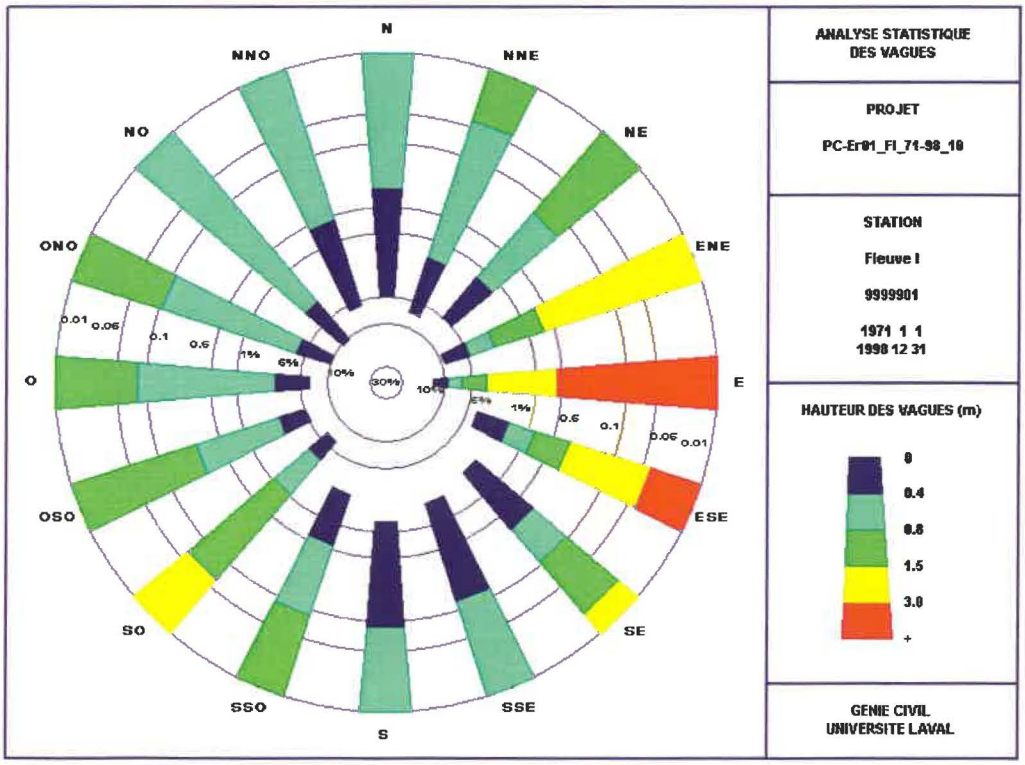


Figure 5.11 Rose des vagues au point 01 – Vents de Fleuve-I – F=1,0

Compte-tenu de la période de disponibilité plus grande des données à la station de Sept-Îles et de l'absence de données manquantes à cette station, c'est la station météorologique de Sept-Îles qui sera retenue pour les prochains calculs de vagues.

5.8 Tentative de calibration des paramètres du modèle de vagues

Une présentation a été faite par Urs Nemeier (professeur à l'UQAR – ISMER) à propos des travaux faits à partir des enregistrements de vagues recueillis entre autres au large de Sept-Îles. Un graphique a été produit à l'occasion de cette présentation (figure 5.12).

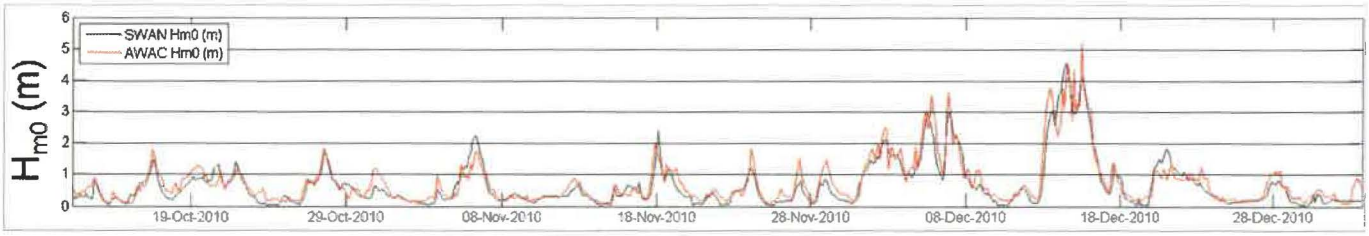


Figure 5.12 Évolution des hauteurs de vagues Hmo présentées par Urs Nemeier pour Sept-Îles en octobre, novembre et décembre 2010

Un calcul de hauteur des vagues a été fait sur la même période, sur la base des vents de Sept-Îles (facteur de 1,0 et 1,1) avec différentes limitations de longueurs de radiales (300, 250 et 200 km). La figure 5.13 présente ces résultats.

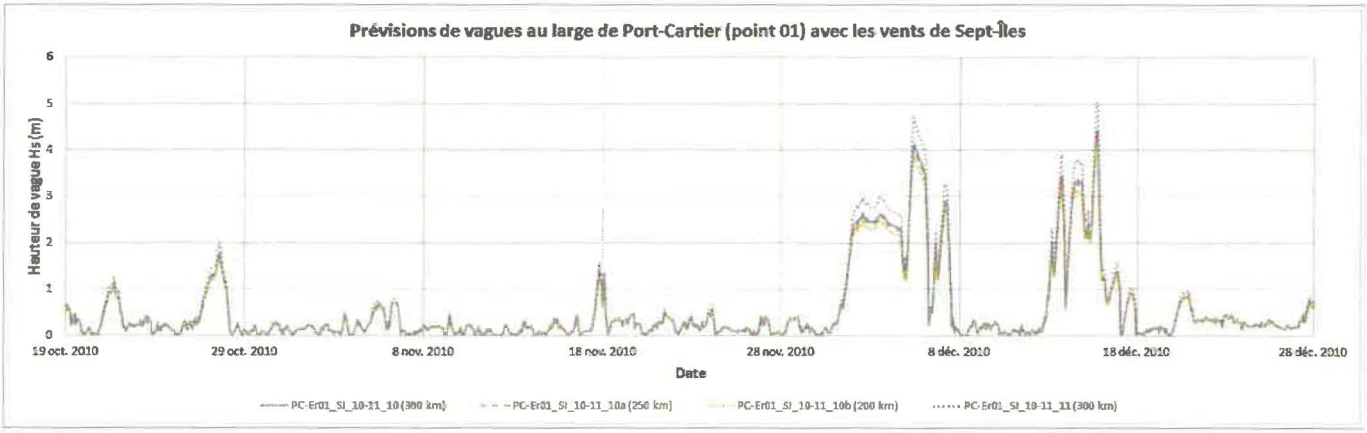


Figure 5.13 Évolution des hauteurs de vague Hs obtenues par GENER avec les données de Sept-Îles – F=1,0 (limitation de longueur de radiales de 300, 250 et 200 km) et F=1,1(limitation de longueur de radiales de 300 km)

La comparaison des deux graphiques doit tenir compte du fait que l'endroit où était la bouée de mesure des vagues au large de Sept-Îles est relativement protégé des vagues du secteur Est par rapport aux points sélectionnés au large de Port-Cartier.

En comparant de façon visuelle et globale les deux graphiques précédents, on constate qu'il faut au moins multiplier les vitesses de vent de la station de **Sept-Îles** par un **facteur de 1,1** et limiter les **radiales à 300 km** pour obtenir des résultats de hauteur de vagues qui se comparent entre les deux séries d'information lors des épisodes de tempête. Une calibration du modèle de vagues exigerait une démarche plus élaborée et surtout un accès aux données de vagues enregistrées au large de Sept-Îles.

Les paramètres suivants seront retenus pour la suite des calculs de vague.

- Vents de la station météorologique de Sept-Îles
- Vitesses de vent multipliées par 1,1
- Radiales limitées à 300 km.

5.9 Vagues prédites au large de Port-Cartier

Les figures 5,14 (point 01) et 5.15 (point 02) présentent les roses de vagues produites à partir des vents de Sept-Îles (facteur de 1,1) de 1971 à 2011.

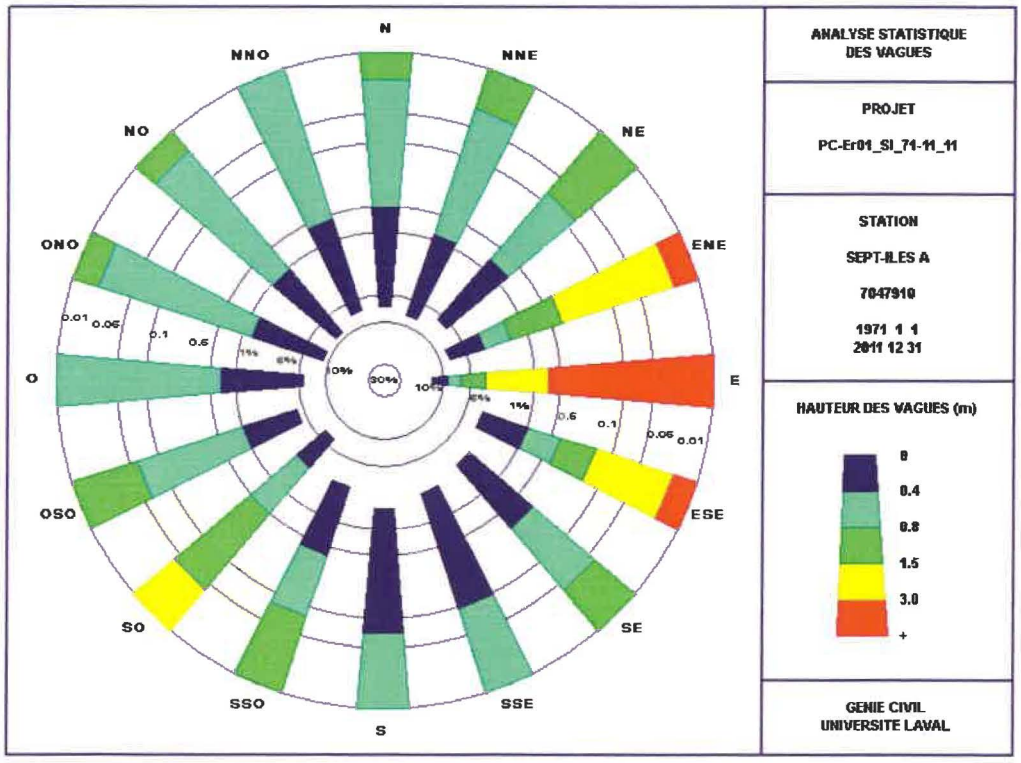


Figure 5.14 Rose des vagues au large au point 01 - Données de Sept-Îles - 1971 à 2011 – F=1,1

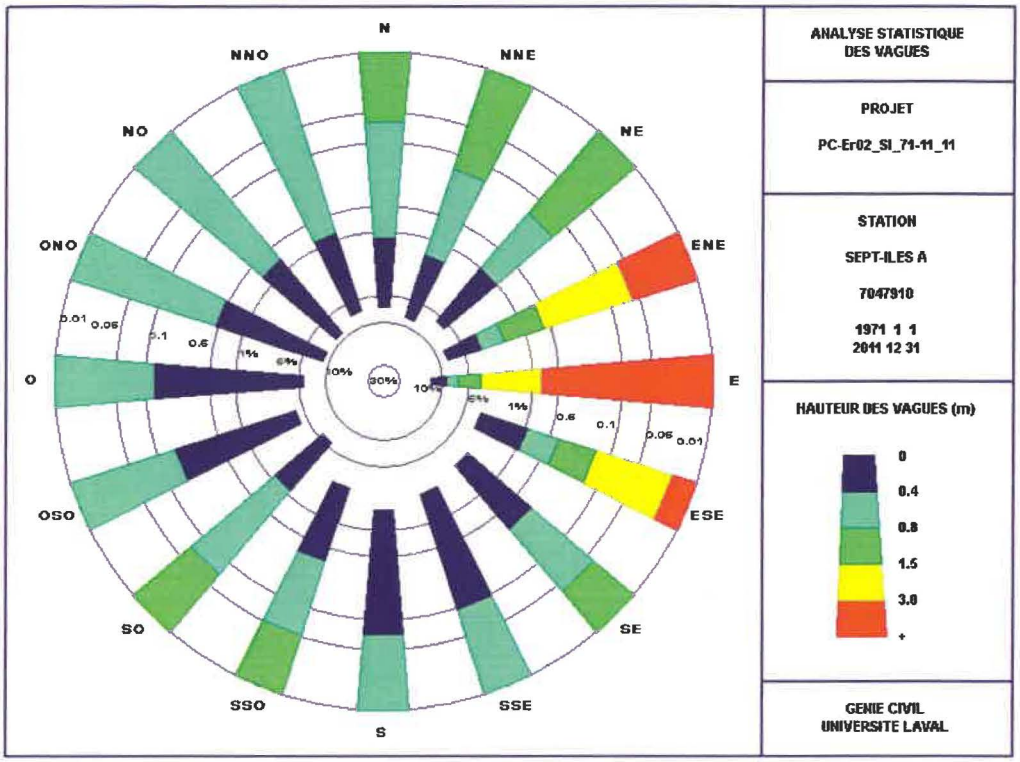


Figure 5.15 Rose des vagues au large au point 02 - Données de Sept-Îles - 1971 à 2011 – F=1,1

Pratiquement la seule différence entre les deux figures est l'importance légèrement plus marquée des vagues de l'est-nord-est pour le point 02 par rapport au point 01. Les vagues du secteur Est dominent largement les deux roses.

Les fréquences de dépassement des hauteurs de vagues, toutes directions confondues, ont été calculées pour les deux points de calculs 01 et 02 à partir des séries temporelles de données de vagues produites avec les vents de Sept-Îles (F = 1,1). La figure 5.16 reproduit les deux courbes de fréquence de dépassement sur une échelle logarithmique des fréquences pour mettre en évidence les fortes vagues. Les hauteurs maximales de vagues pour une même récurrence sont systématiquement plus grandes au point 2 (plus exposé au large de Pointe-aux-Anglais) qu'au point 1 (au large de la ville de Port-Cartier).

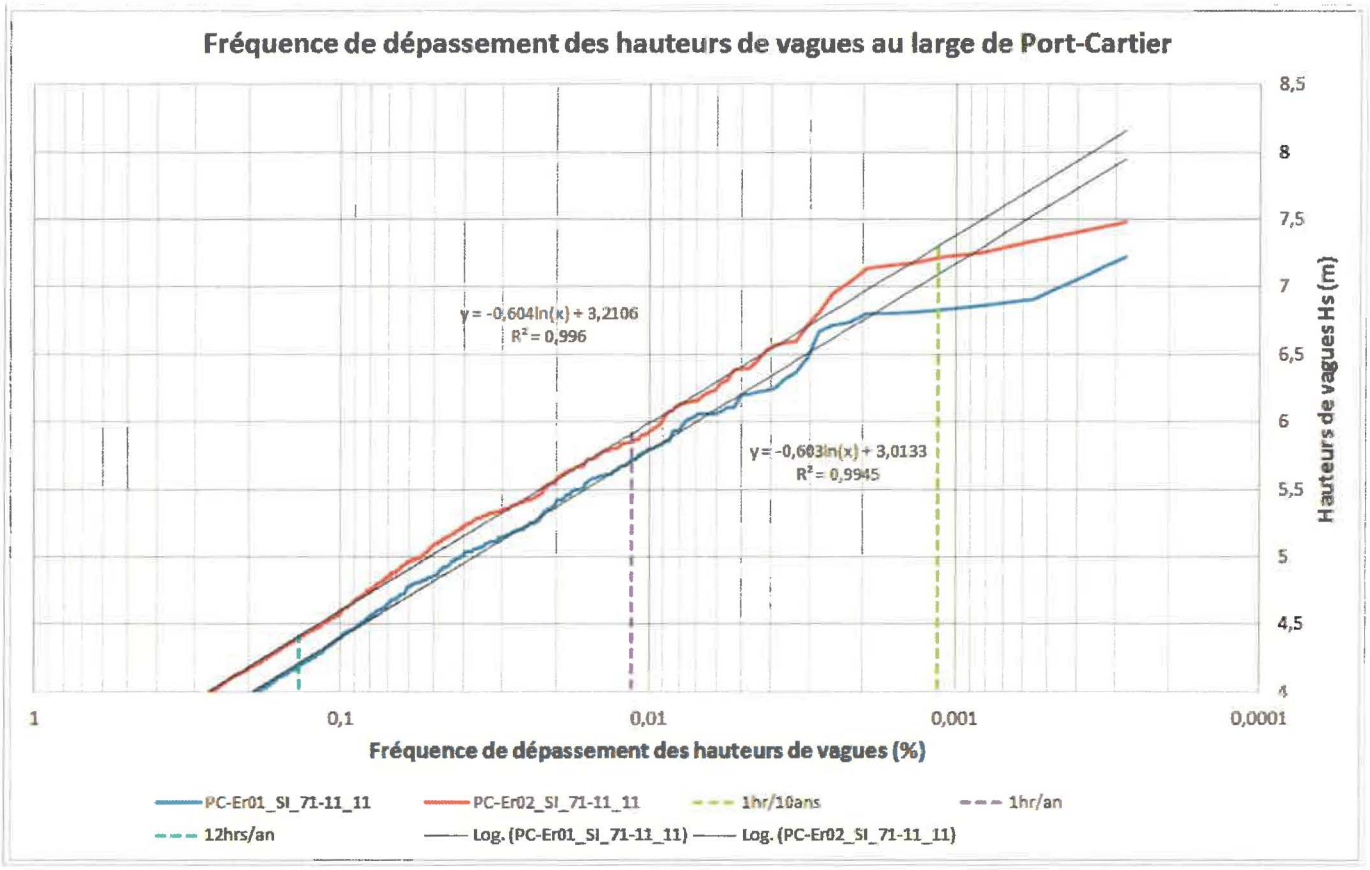


Figure 5.16 Fréquences de dépassement des hauteurs de vagues Hs au large (points PC-Er01 et PC-Er02) produites avec les données de Sept-Îles – 1971-1998 – F=1,1

5.10 Vagues extrêmes prédites au large

L'évaluation de la hauteur des vagues ayant une période de retour de 10 à 100 ans a été faite à partir des résultats des calculs précédents selon les méthodes statistiques de Gumbel et de Weibull pour l'année entière. La figure 5.17 présente les résultats comparés de prédiction de hauteur de vagues pour les deux points de calcul des vagues selon la méthode de Gumbel (celle dont le degré d'incertitude sur les résultats est le plus faible).

Avec cette méthode, la hauteur significative des vagues prédites au large de Port-Cartier pour une période de retour de 35 ans est de l'ordre de 7,1 à 7,3 m alors que celle prédite pour une période de retour de 10 ans est plutôt de l'ordre de 6,2 à 6,4 m. On remarque que cette méthode de calcul statistique sous-estime de façon significative les hauteurs de vagues extrêmes par rapport aux données brutes illustrées sur la figure 5.16.

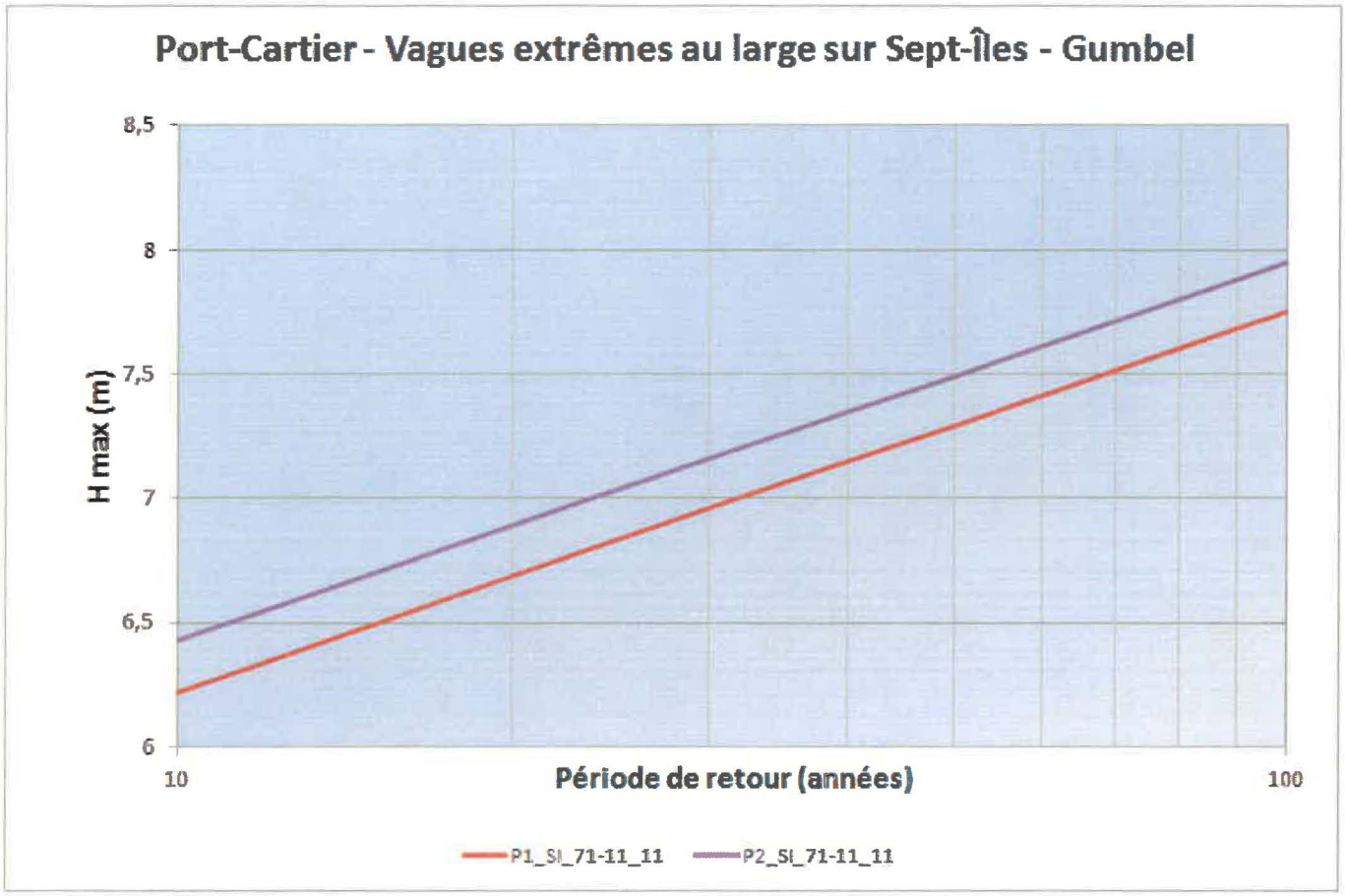


Figure 5.17 Prédiction de Hs au large de Port-Cartier (Points 1 et 2 - Gumbel - année)

6 Vagues près des infrastructures projetées

6.1 Réfraction

Les vagues se produisant au large de Port-Cartier ont été transformées, suite aux phénomènes de réfraction et de shoaling jusqu'aux sites à l'étude. Les équations paramétriques du Coastal Engineering Manual ont été utilisées à cet effet. Un modèle numérique performant (par exemple MIKE 21 ou SWAN) serait requis pour obtenir avec une certaine précision les coefficients de réfraction des vagues en provenance du large. Les coefficients obtenus par la méthode paramétrique ne sont qu'une approximation grossière de la réalité.

Si les fonds marins à l'approche des secteurs Portage et Pointe-aux-Anglais sont relativement réguliers, ce n'est pas du tout le cas des secteurs Rochelois et McCormick. De nombreux îlots et hauts-fonds protègent partiellement cette partie des rives de Port-Cartier (figure 6.1).

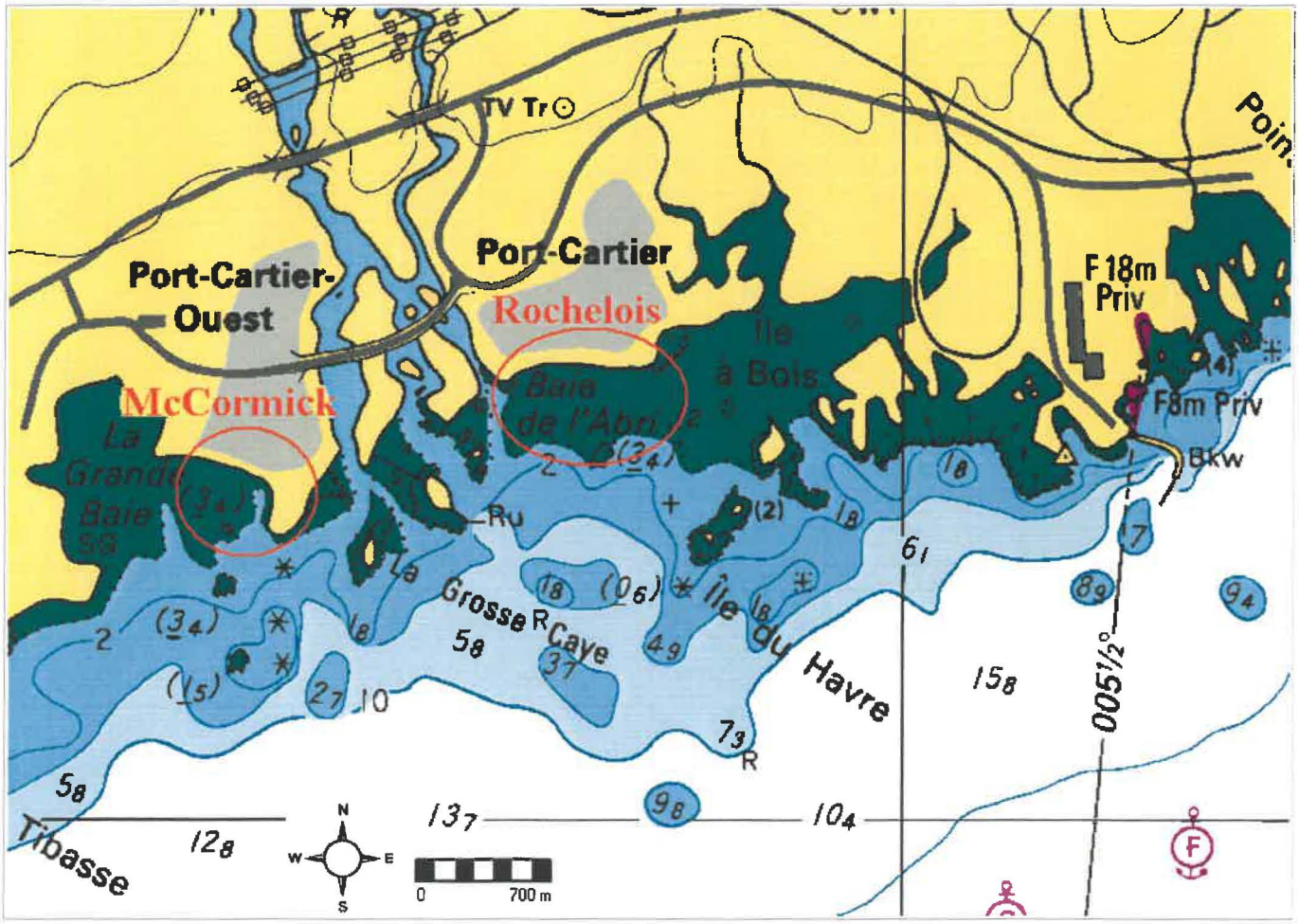


Figure 6.1 Extrait de la carte marine 1221 montrant la cote et les hauts-fonds devant Port-Cartier

6.2 Réfraction

Les vagues de tempêtes se produisant au large de la péninsule de Manicouagan subissent de la réfraction et du déferlement avant d'atteindre les côtes.

Des cas de vagues caractéristiques ont été sélectionnés pour effectuer le calcul de la réfraction en fonction de leur fréquence d'occurrence, de leur hauteur de vague et de leur importance en termes d'effet sur le littoral. Le tableau suivant liste les cinquante-cinq cas de calcul qui ont été traités pour définir le climat des vagues à proximité de la côte de Port-Cartier.

Les résultats de ces cas de calcul ont permis de définir la transformation des vagues du large vers la côte (changement de hauteur et de direction) pour les profils de dimensionnement des ouvrages de protection.

Tableau 6.1 Cas de calcul utilisés pour le calcul de la réfraction des vagues

Dir	T	Hs	Dir	T	Hs	Dir	T	Hs
N	2	0,18	ESE	2	0,15	SSW	6	0,93
N	4	0,54	ESE	4	0,47	SSW	8	1,61
NNE	2	0,16	ESE	6	1,05	SSW	10	3,5
NNE	4	0,46	ESE	8	1,81	SW	2	0,17
NE	2	0,13	ESE	10	2,56	SW	4	0,48
NE	4	0,4	ESE	12	3,69	SW	6	0,97
NE	6	1,02	SE	2	0,14	SW	8	2,45
NE	8	2,25	SE	4	0,4	WSW	2	0,16
ENE	2	0,14	SE	6	0,89	WSW	4	0,46
ENE	4	0,49	SE	8	1,74	WSW	6	1,13
ENE	6	1	SSE	2	0,13	W	2	0,17
ENE	8	1,82	SSE	4	0,34	W	4	0,43
ENE	10	3,15	SSE	6	0,72	WNW	2	0,19
E	2	0,18	S	2	0,12	WNW	4	0,47
E	4	0,55	S	4	0,35	NW	2	0,19
E	6	1,06	S	6	0,86	NW	4	0,51
E	8	1,67	SSW	2	0,15	NNW	2	0,2
E	10	2,64	SSW	4	0,42	NNW	4	0,54
E	12	4,04						

6.3 Résultats des calculs de réfraction

Les calculs effectués en termes de réfraction ont été traduits en séries de matrices de coefficients de réfraction et de changement de direction pour chacun des sites. Ces matrices (coefficient de hauteur et changement de direction) sont illustrées ci-dessous pour le secteur Rochelois (tableaux 6.2 et 6.3).

Tableau 6.2 Matrice des coefficients de hauteur de vagues pour le site Rochelois

T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
N	1,00	0,90	0,78	0,55	0,25	0,14	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
NNE	1,00	0,94	0,82	0,60	0,30	0,18	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04
NE	1,00	0,96	0,86	0,65	0,38	0,27	0,22	0,18	0,15	0,12	0,09	0,06	0,04
ENE	1,00	0,98	0,89	0,77	0,65	0,53	0,41	0,31	0,23	0,16	0,12	0,09	0,07
E	1,00	0,98	0,91	0,80	0,70	0,60	0,50	0,42	0,35	0,29	0,24	0,20	0,17
ESE	1,00	0,98	0,95	0,91	0,87	0,83	0,78	0,74	0,70	0,64	0,54	0,42	0,28
SE	1,00	0,98	0,96	0,92	0,86	0,80	0,73	0,66	0,60	0,54	0,48	0,40	0,29
SSE	1,00	0,98	0,96	0,92	0,86	0,80	0,73	0,66	0,60	0,54	0,48	0,40	0,29
S	1,00	0,98	0,96	0,92	0,86	0,80	0,73	0,66	0,60	0,54	0,48	0,40	0,29
SSW	1,00	0,98	0,96	0,92	0,86	0,78	0,69	0,58	0,48	0,40	0,34	0,29	0,25
SW	1,00	0,98	0,95	0,91	0,85	0,77	0,67	0,56	0,45	0,37	0,31	0,27	0,22
WSW	1,00	0,98	0,94	0,90	0,83	0,74	0,64	0,53	0,42	0,34	0,27	0,22	0,18
W	1,00	0,98	0,90	0,70	0,40	0,29	0,24	0,20	0,17	0,14	0,11	0,08	0,05
WNW	1,00	0,96	0,86	0,65	0,38	0,27	0,22	0,18	0,15	0,12	0,09	0,06	0,04
NW	1,00	0,94	0,82	0,60	0,30	0,18	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04
NNW	1,00	0,90	0,78	0,55	0,25	0,14	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03

Tableau 6.3 Matrice des changements de direction des vagues pour le site Rochelois

T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
N	0	20	42	62	78	90	100	108	115	121	126	131	136
NNE	25	39	61	80	95	106	114	120	125	130	135	139	141
NE	45	58	79	96	108	117	123	130	135	138	141	143	145
ENE	70	80	95	108	116	122	128	134	139	143	148	152	155
E	90	96	104	115	122	128	133	138	143	147	152	156	159
ESE	110	116	121	126	131	136	140	145	149	153	157	160	162
SE	135	137	139	141	144	148	151	153	156	159	161	163	164
SSE	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	165	165
S	180	179	178	177	175	173	172	171	170	169	168	167	166
SSW	200	199	197	195	192	189	186	183	180	177	174	171	169
SW	225	222	215	208	202	196	191	187	184	181	179	177	175
WSW	245	241	235	230	225	221	217	212	206	200	194	189	185
W	270	260	251	244	238	232	227	222	216	210	204	199	195
WNW	300	288	275	265	256	249	243	237	231	225	219	214	210
NW	315	300	288	278	270	262	256	249	242	235	229	224	220
NNW	340	320	308	297	288	279	272	264	256	248	241	235	230

Les matrices (coefficient de hauteur et changement de direction) concernant le secteur McCormick sont illustrées ci dessous (tableaux 6.4 et 6.5).

Tableau 6.4 Matrice des coefficients de hauteur de vagues pour le site McCormick

T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
N	1,00	0,88	0,75	0,54	0,24	0,13	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
NNE	1,00	0,93	0,81	0,59	0,29	0,17	0,11	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04
NE	1,00	0,95	0,85	0,64	0,37	0,26	0,21	0,17	0,14	0,11	0,08	0,05	0,04
ENE	1,00	0,96	0,87	0,66	0,41	0,29	0,23	0,19	0,16	0,13	0,10	0,08	0,07
E	1,00	0,97	0,88	0,68	0,45	0,32	0,25	0,21	0,18	0,15	0,12	0,10	0,09
ESE	1,00	0,97	0,92	0,84	0,76	0,66	0,58	0,50	0,43	0,37	0,32	0,27	0,22
SE	1,00	0,98	0,94	0,87	0,80	0,71	0,63	0,55	0,47	0,41	0,36	0,31	0,27
SSE	1,00	0,98	0,95	0,89	0,82	0,74	0,67	0,59	0,51	0,45	0,39	0,34	0,29
S	1,00	0,98	0,96	0,91	0,85	0,78	0,71	0,63	0,55	0,49	0,43	0,38	0,32
SSW	1,00	0,98	0,96	0,92	0,86	0,78	0,69	0,58	0,48	0,40	0,34	0,29	0,25
SW	1,00	0,98	0,95	0,91	0,85	0,77	0,67	0,56	0,45	0,37	0,31	0,27	0,22
WSW	1,00	0,98	0,94	0,90	0,83	0,74	0,64	0,53	0,42	0,34	0,27	0,22	0,18
W	1,00	0,98	0,90	0,70	0,40	0,29	0,24	0,20	0,17	0,14	0,11	0,08	0,05
WNW	1,00	0,96	0,86	0,65	0,38	0,27	0,22	0,18	0,15	0,12	0,09	0,06	0,04
NW	1,00	0,94	0,82	0,60	0,30	0,18	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04
NNW	1,00	0,90	0,78	0,55	0,25	0,14	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03

Tableau 6.5 Matrice des changements de direction des vagues pour le site McCormick

T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
N	0	20	42	62	78	92	104	115	125	133	141	147	155
NNE	25	41	61	80	95	106	116	125	133	140	146	152	160
NE	45	60	79	96	108	118	127	136	144	151	157	161	165
ENE	70	84	97	108	117	125	132	139	146	153	159	164	170
E	90	96	106	116	125	132	138	145	152	159	165	171	175
ESE	110	114	117	121	127	133	140	147	154	162	170	176	180
SE	135	137	139	141	145	149	154	160	166	172	177	181	184
SSE	155	156	157	159	161	165	169	173	177	181	185	188	190
S	180	180	181	181	182	183	184	185	187	189	191	193	195
SSW	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
SW	225	224	223	221	219	217	215	213	212	210	209	207	205
WSW	245	243	240	238	236	233	230	227	224	221	219	217	215
W	270	266	261	258	255	252	248	244	240	236	233	230	228
WNW	300	288	281	274	268	263	260	257	254	251	248	246	244
NW	315	311	306	302	298	294	289	284	279	274	269	265	262
NNW	340	337	333	329	324	318	312	306	300	294	289	285	282

Ces informations ont été utilisées pour recalculer le climat des vagues en chacun des secteurs à l'étude.

6.4 Vagues extrêmes près de la plage

Les matrices de coefficients de réfraction et de changement de direction ont été appliquées aux séries temporelles de vagues au large pour définir le climat de vagues près de la plage. Les figures suivantes illustrent la rose des vagues pour Rochelois (figure 6.2) et McCormick (figure 6.3) et la fréquence de dépassement des hauteurs de vagues toutes directions confondues pour ces deux secteurs (figure 6.4).

À noter que les valeurs de la figure 6.4 ne tiennent pas compte du déferlement des vagues à l'approche de la plage qui sera pris en compte dans le calcul de la remontée des vagues sur les infrastructures et de la hauteur maximale des vagues pouvant affecter les infrastructures.

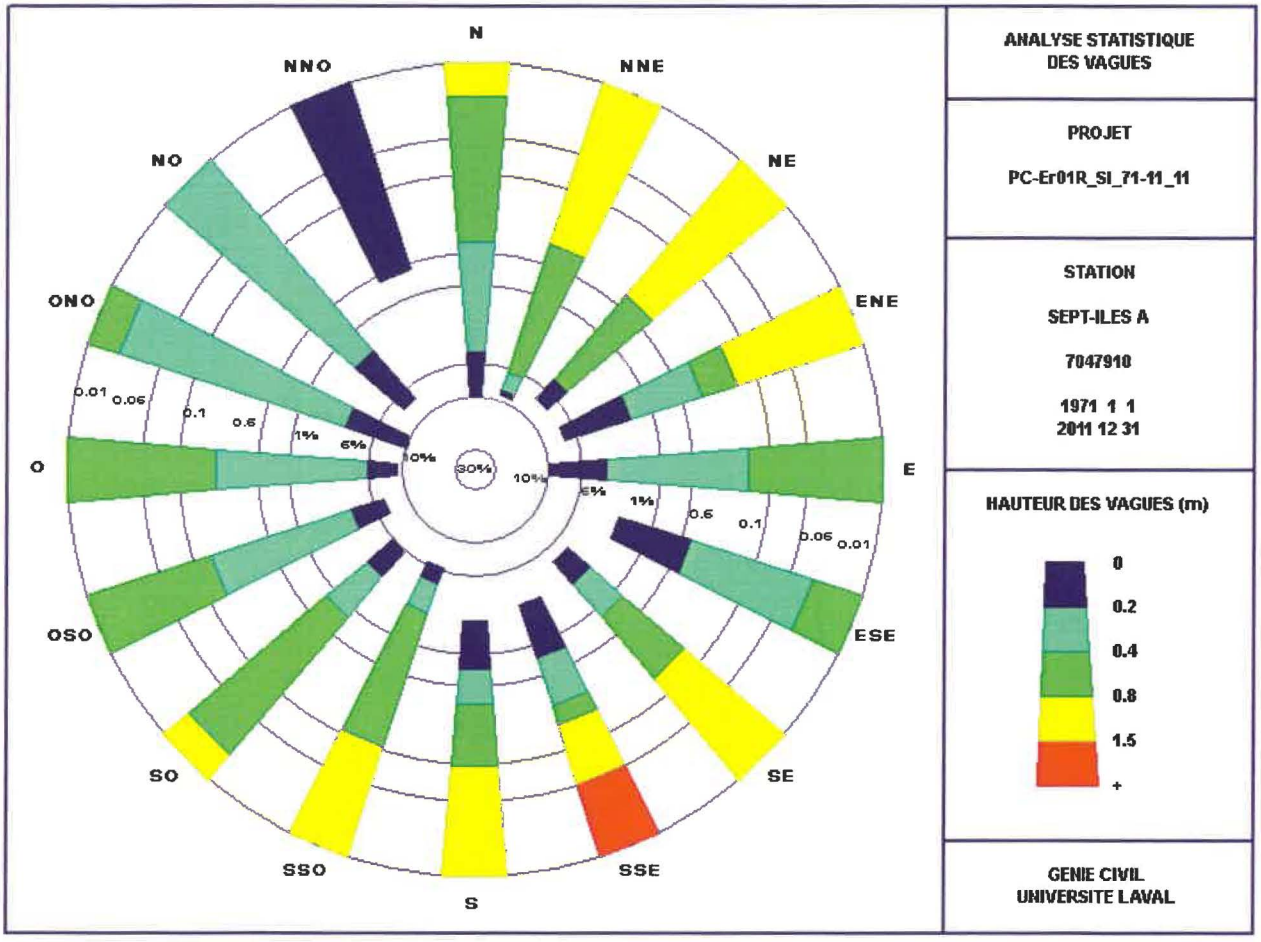


Figure 6.2 Roses des vagues près de la plage - Rochelois

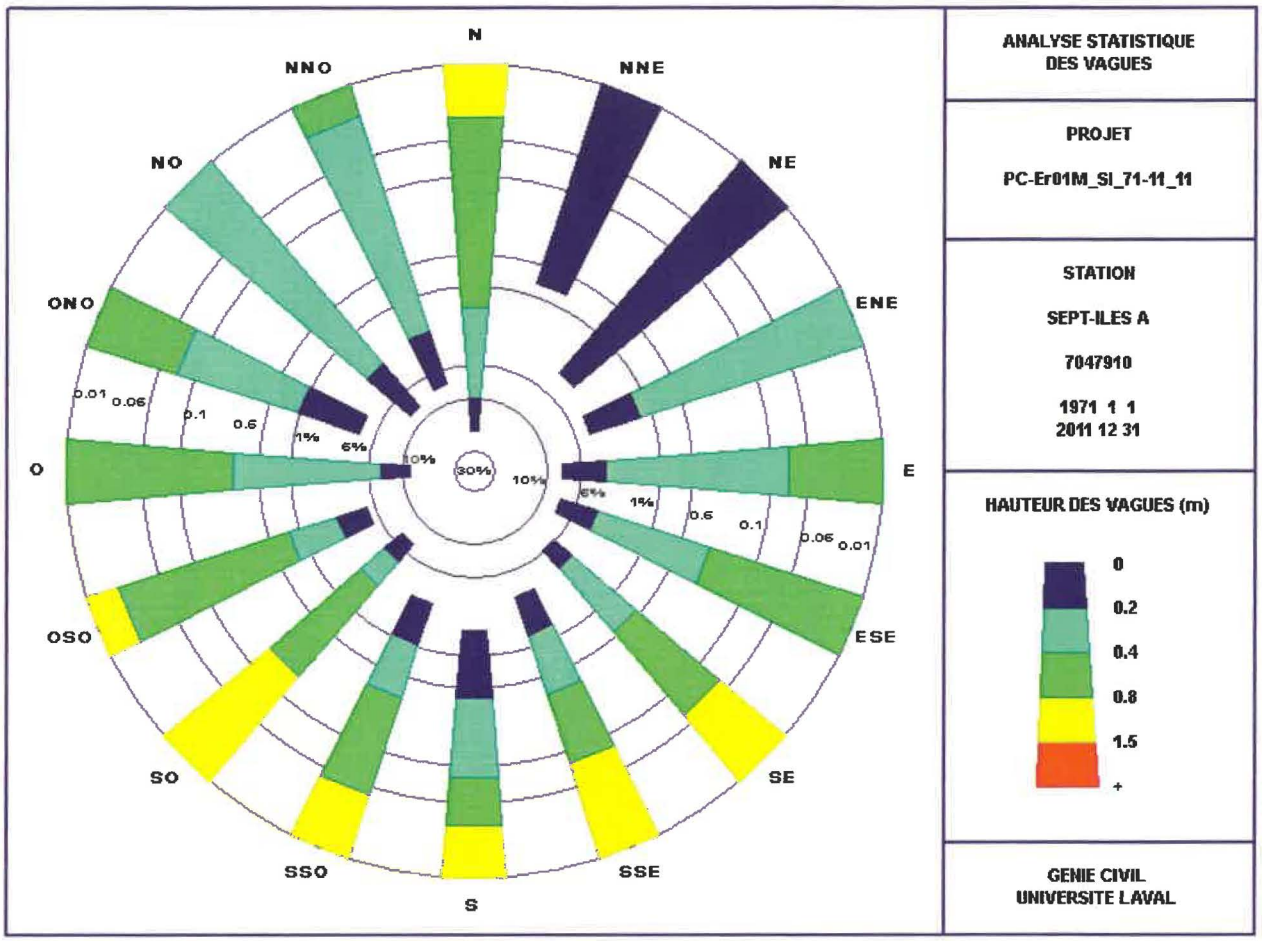


Figure 6.3 Roses des vagues près de la plage – McCormick

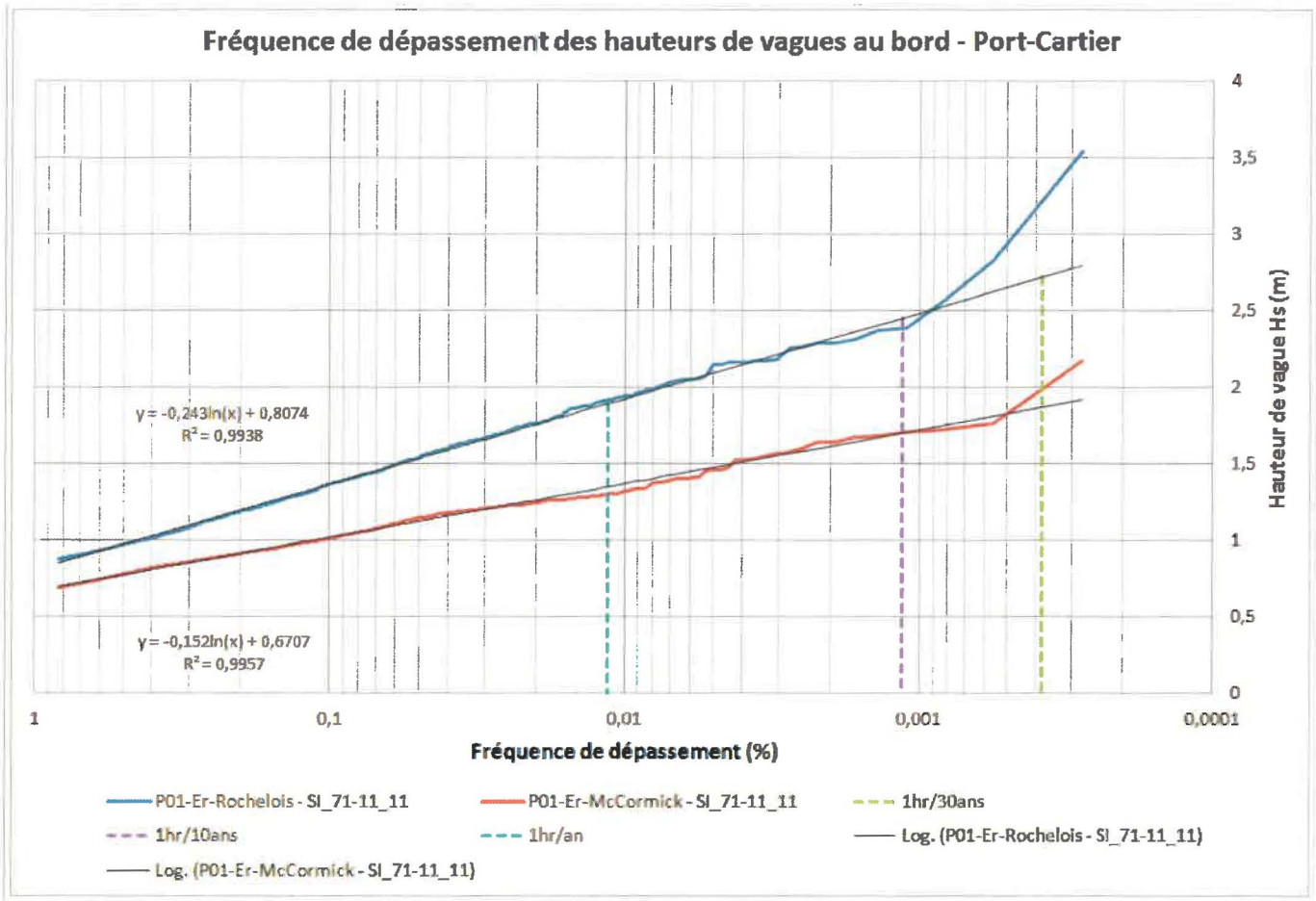


Figure 6.4 Hauteurs de vagues extrêmes calculées près de la plage (Rochelois et McCormick)

6.5 Hauteur de vagues recommandée près de la plage

Pour qu'un événement catastrophique de sollicitation de la plage et des épis se produise à Port-Cartier, il est nécessaire de réunir deux conditions, soit :

- Une violente tempête du secteur est ou ouest et
- Un très haut niveau d'eau au moment du plus fort de la tempête.

Si les récurrences de chacun des deux événements (tempête / niveau d'eau) sont relativement bien connues, la récurrence combinée des deux événements extrêmes l'est moins. On sait par contre que les fortes tempêtes du secteur est s'accompagnent parfois d'une hausse des niveaux d'eau par rapport aux niveaux prédits par les tables de marée alors que ce phénomène est peu fréquent avec des tempêtes du secteur ouest.

Compte tenu de la vie utile des structures de protection de la berge projetées (35 ans), de l'incertitude concernant la récurrence combinée des événements exceptionnels (tempête / niveau d'eau) et de

l'incertitude entourant la détermination des hauteurs de vagues extrêmes (modélisation non calibrée), une hypothèse d'indépendance statistique des paramètres a été posée.

Le tableau suivant illustre les cas de calcul (niveaux d'eau / hauteur de vagues) qui ont été utilisés à Port-Cartier pour le dimensionnement des infrastructures. Plus le niveau d'eau est élevé (événement rare), plus la hauteur des vagues est faible (événement fréquent) et inversement.

Tableau 6.6 Combinaisons de niveaux d'eau et de hauteur retenue pour une récurrence combinée des événements de l'ordre de 35 ans

	McCormick	Rochelois
Eau	**Hs**	**Hs**
2,55	0,18	0,10
2,47	0,27	0,23
2,36	0,41	0,44
2,28	0,51	0,56
1,89	0,88	1,16
1,78	0,99	1,34
1,48	1,29	1,81
1,37	1,40	1,97
1,25	1,52	2,15

7 Dimensionnement d'une protection en enrochement

7.1 Remontée des vagues sur un enrochement

Le dimensionnement d'un enrochement de protection dans les **secteurs Rochelois** et **MCCormick** à Port-Cartier a été fait à partir des résultats de l'étude de vagues. Le premier calcul consiste à déterminer l'élévation recommandée pour la crête du brise-lames en fonction de la remontée des vagues sur cette structure.

Ce type d'infrastructure n'est pas recommandé dans les **secteurs Portage** et **Pointe-aux-Anglais** à cause des importants effets de bout qui se développeraient à l'extrémité sud de chaque section d'enrochement qui serait mise en place pour protéger un secteur en particulier.

Les calculs de la remontée sont faits selon les équations du Coastal Engineering Manual du US Army Corps of Engineers 2003 (Partie II, chapitre II-4-4). Trois valeurs de remontée de l'eau sur la pente ont été calculées selon la fréquence (2, 10 ou 33 %) à laquelle la crête se fait franchir par les vagues les plus grandes d'un train de vagues donné.

Étant donné l'orientation relativement perpendiculaire à la direction d'approche des vagues de tempêtes des enrochements et de la présence d'infrastructures urbaine derrière ces enrochements, il est raisonnable de retenir l'élévation de crête correspondant au franchissement du dixième supérieur des vagues de tempête (runup à 10 %). Avec ce critère, les enrochements se feront parfois franchir lors des tempêtes importantes, mais ces franchissements ne devraient pas affecter de façon importante leur stabilité ni celle des infrastructures protégées par ces enrochements.

Selon les résultats illustrés sur la figure 7.1 pour le secteur Rochelois, la recommandation serait donc de placer l'élévation de la crête de l'enrochement principal à +4,7 m NMM et de prévoir comme carapace des enrochements en mesure de résister à des événements conjuguant très hauts niveaux d'eau et forte tempête.

Selon les résultats illustrés sur la figure 7.2 pour le secteur McCormick, la recommandation serait de placer l'élévation de la crête de l'enrochement principal à +4,1 m NMM.

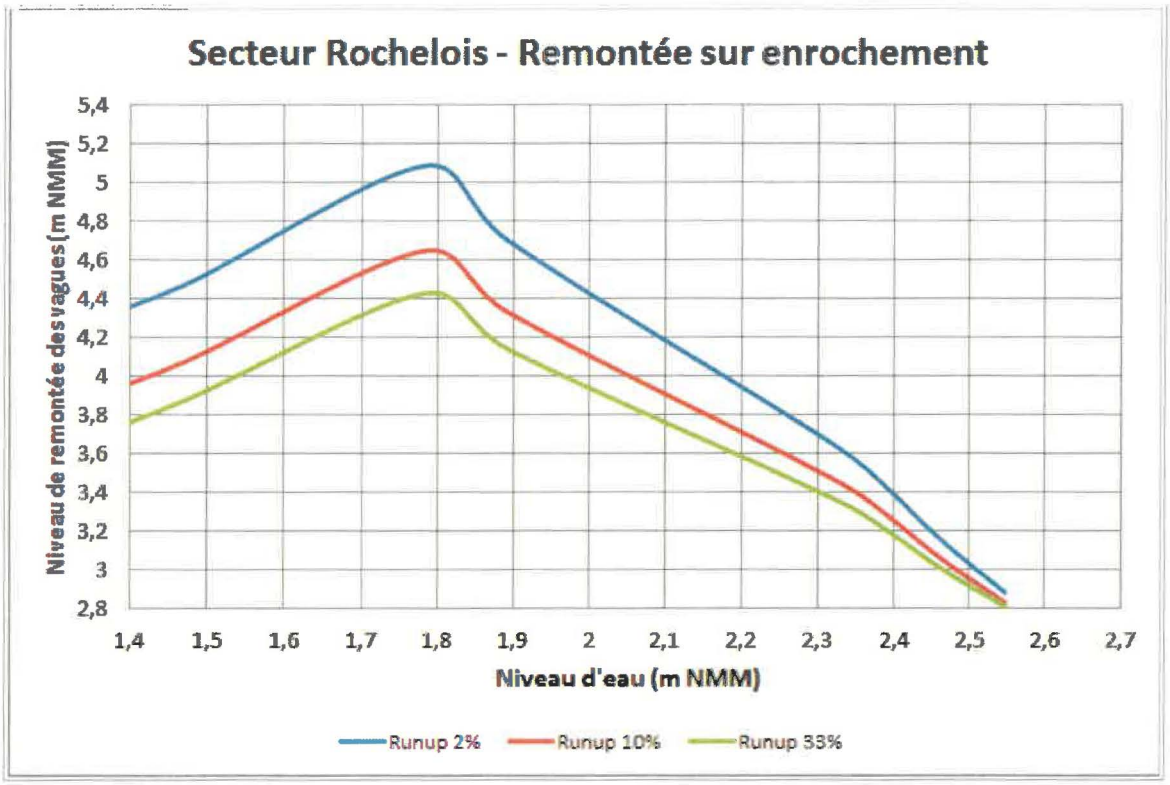


Figure 7.1 Calcul de la remontée des vagues sur un enrochement – Secteur Rochelois

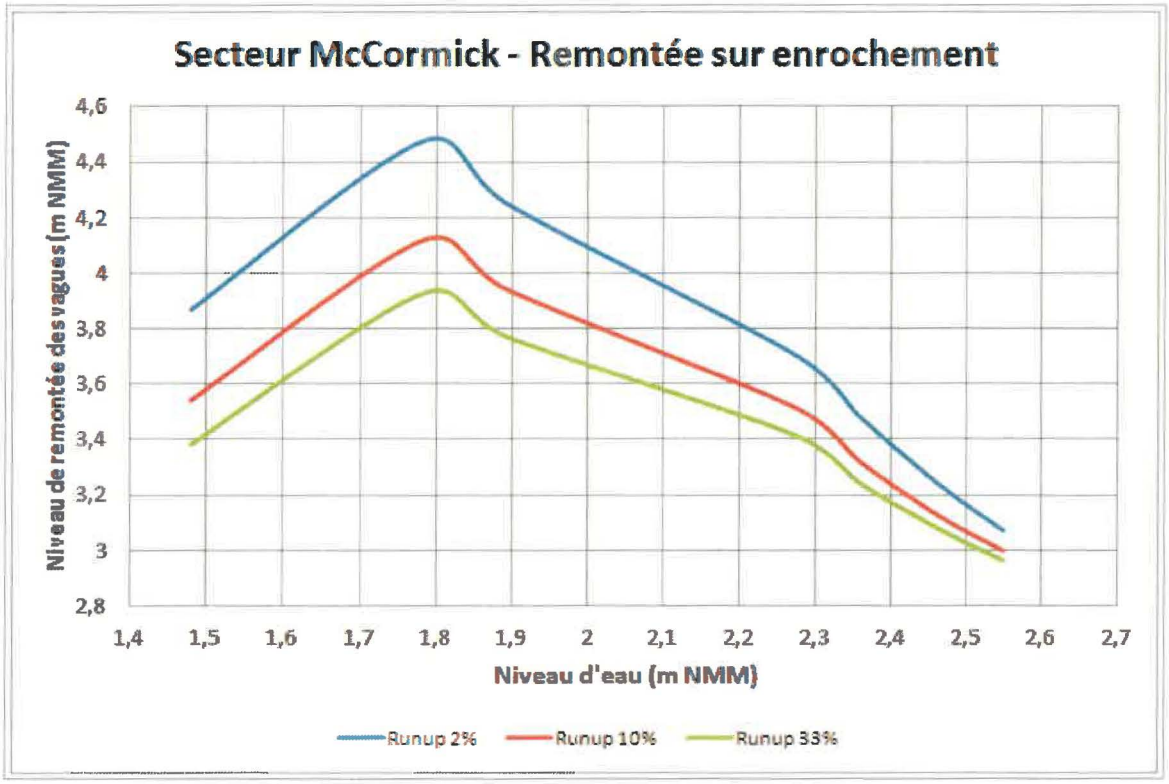


Figure 7.2 Calcul de la remontée des vagues sur un enrochement – Secteur McCormick

7.2 Dimensionnement des pierres de carapace de l'enrochement des berges

Le dimensionnement des pierres de carapace des enrochements de protection des berges des secteurs Rochelois et McCormick à Port-Cartier a été fait en fonction des résultats de l'étude de vagues ayant une période de retour de l'ordre de 100 ans étant donné les risques d'augmentation des hauteurs de vagues frappant ces infrastructures avec la hausse du niveau moyen des océans attendue avec les changements climatiques en cours. À cause de la limitation de profondeur d'eau, cette augmentation de la période de retour de dimensionnement pour ce paramètre n'a pas trop d'influence sur la grosseur des enrochements. Les valeurs qui ont été retenues (équation de Hudson – Shore Protection Manual du US Army Corps of Engineers 1984) sont :

- Hauteur significative des vagues Hs de 1,5 m (récurrence supérieure à 100 ans en tenant compte des niveaux d'eau)
- Pente extérieure de 1,5 / 1
- Densité de la pierre de 2,64 t/m^3
- Densité de l'eau de 1,02 t/m^3
- Coefficient K_D de stabilité de 2 (vagues déferlantes)

L'utilisation des paramètres K_D du SPM 1984 contiennent un facteur de sécurité compte tenu de la restriction de profondeur près des enrochements et du laminage des plus fortes vagues qui résulte de cette restriction dans le cas de la protection de berge de Port-Cartier.

Ces valeurs aboutissent à la recommandation de placer de la **pierre de carapace de 0,6 à 0,9 tonnes** (0,7 à 0,8 m de diamètre équivalent) sur deux couches. L'épaisseur de cette protection serait de 1,35 m et la largeur minimale de la crête serait de 2,0 m.

La pierre-filtre à placer sous cette pierre de carapace serait de la pierre de 50 à 100 kg (0,3 à 0,4 m) sur une épaisseur de 0,65 m. Cette pierre-filtre pourrait être installée soit sur une couche de pierre 0 à 100 kg (0 à 400 mm) dans laquelle la granulométrie serait contrôlée, soit sur un géotextile empêchant les matériaux fins (sable, silt et argile) du talus et de la plage de migrer à travers la pierre-filtre et la pierre de carapace.

Les figures 7.3 (profil P06, au niveau de la promenade en bois), 7.4 (profil P09 au droit de la plage) et 7.5 (profil P13, au niveau du parc urbain) illustrent en coupe-type un enrochement linéaire de protection de la berge dans le secteur Rochelois. Un important remplissage serait requis en arrière de l'enrochement au centre du secteur Rochelois (profil P09), ce qui pourrait paraître assez bizarre.

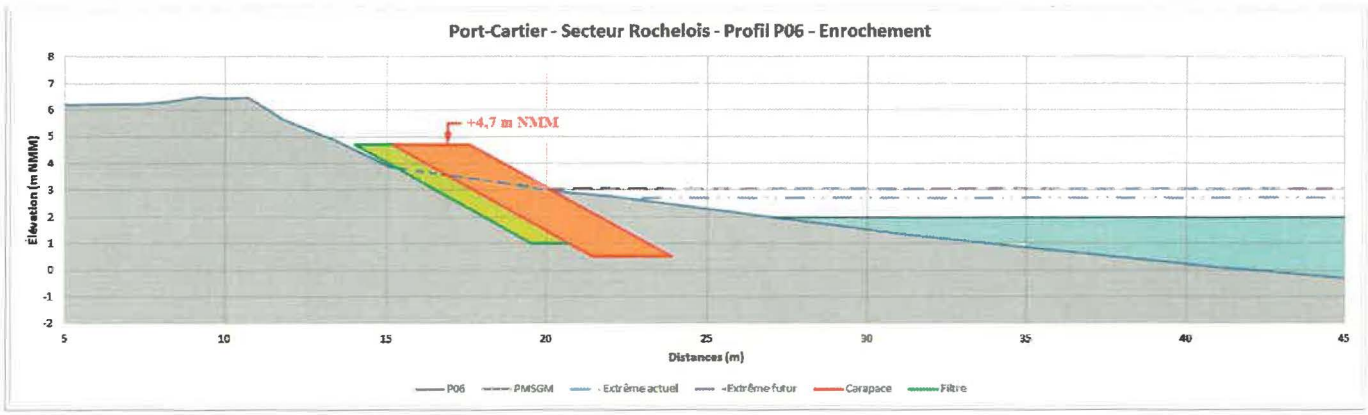


Figure 7.3 Coupe-type d'un enrochement au profil P06 – Rochelois

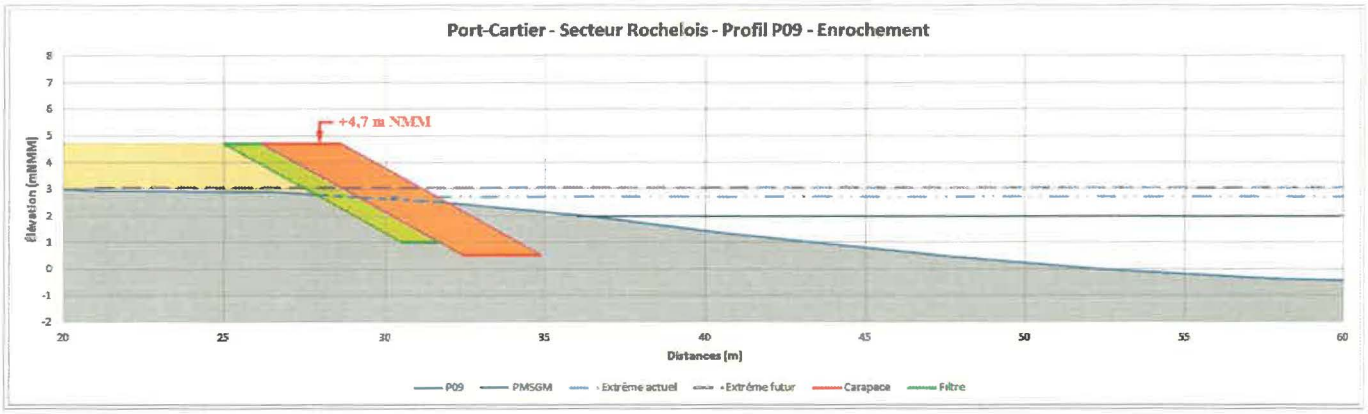


Figure 7.4 Coupe-type d'un enrochement au profil P09 – Rochelois

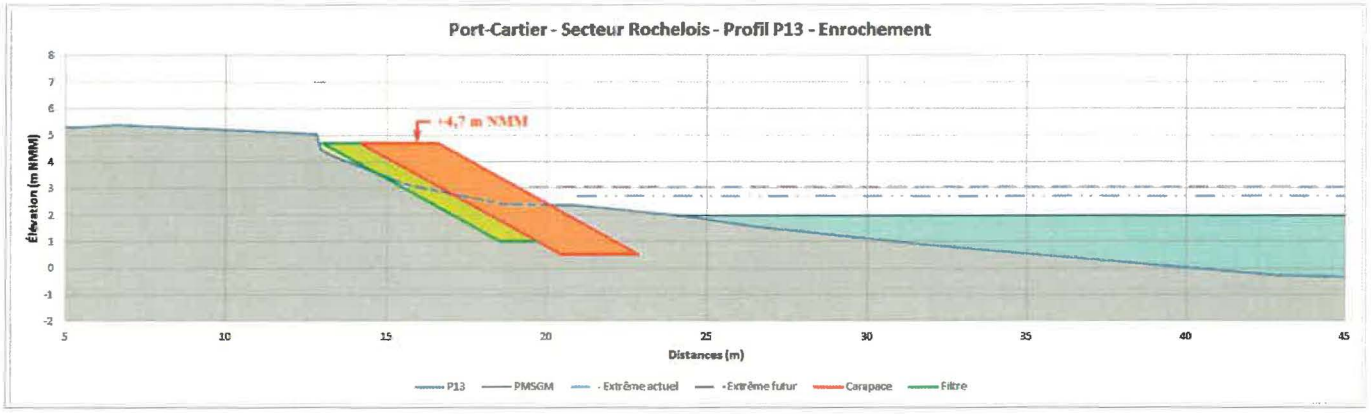


Figure 7.5 Coupe-type d'un enrochement au profil P13 – Rochelois

La figure 7.6 (profil P11) illustre en coupe-type un enrochement linéaire de protection de la berge dans le secteur Place McCormick.

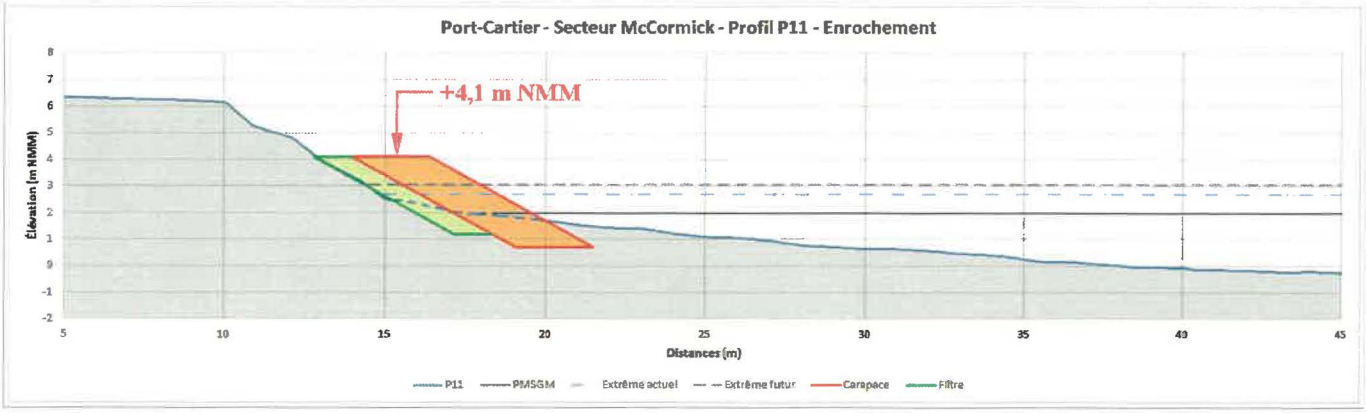


Figure 7.6 Coupe-type d'un enrochement au profil P11 - McCormick

7.3 Dimensionnement des pierres de carapace des épis de Rochelois (recharge)

De part et d'autre de la recharge de plage du secteur Rochelois, il sera requis de placer des épis en enrochement. Le dimensionnement des pierres de carapace des enrochements à mettre en place au niveau du musoir de ces épis a été fait en fonction des résultats de l'étude de vagues. Une période de retour de l'ordre de 100 ans a été considérée étant donné les risques d'augmentation des hauteurs de vagues frappant ces infrastructures avec la hausse du niveau moyen des océans attendue avec les changements climatiques en cours. Les valeurs qui ont été retenues dans ce cas (équation de Hudson – Shore Protection Manual du US Army Corps of Engineers 1984) sont :

- Hauteur significative des vagues Hs de 1,7 m (récurrence supérieure à 100 ans en tenant compte des niveaux d'eau)
- Pente extérieure de 1,5 / 1
- Densité de la pierre de 2,64 t/m^3
- Densité de l'eau de 1,02 t/m^3
- Coefficient K_D de stabilité de 1,9 (vagues déferlantes)

L'utilisation des paramètres K_D du SPM 1984 contiennent un facteur de sécurité compte tenu de la restriction de profondeur près des enrochements et du laminage des plus fortes vagues qui résulte de cette restriction dans le cas de la protection de berge de Port-Cartier.

Ces valeurs aboutissent à la recommandation de placer de la **pierre de carapace de 0,9 à 1,4 tonnes** (0,8 à 0,95 m de diamètre équivalent) sur deux couches. L'épaisseur de cette protection serait de 1,55 m et la largeur minimale de la crête serait de 2,3 m.

La pierre-filtre à placer sous cette pierre de carapace serait de la pierre de 100 à 200 kg (0,4 à 0,5 m) sur une épaisseur de 0,8 m. Cette pierre-filtre serait installée sur un tout-venant de 0 à 100 kg (0 à 400 mm) dans laquelle la granulométrie serait contrôlée.

La figure 7.7 illustre la coupe-type du musoir d'un épi de rétention de la recharge de plage dans le secteur Rochelois. La présence de roc en surface à l'extrémité Est de la plage devra être prise en compte lors de la conception finale de l'épi.

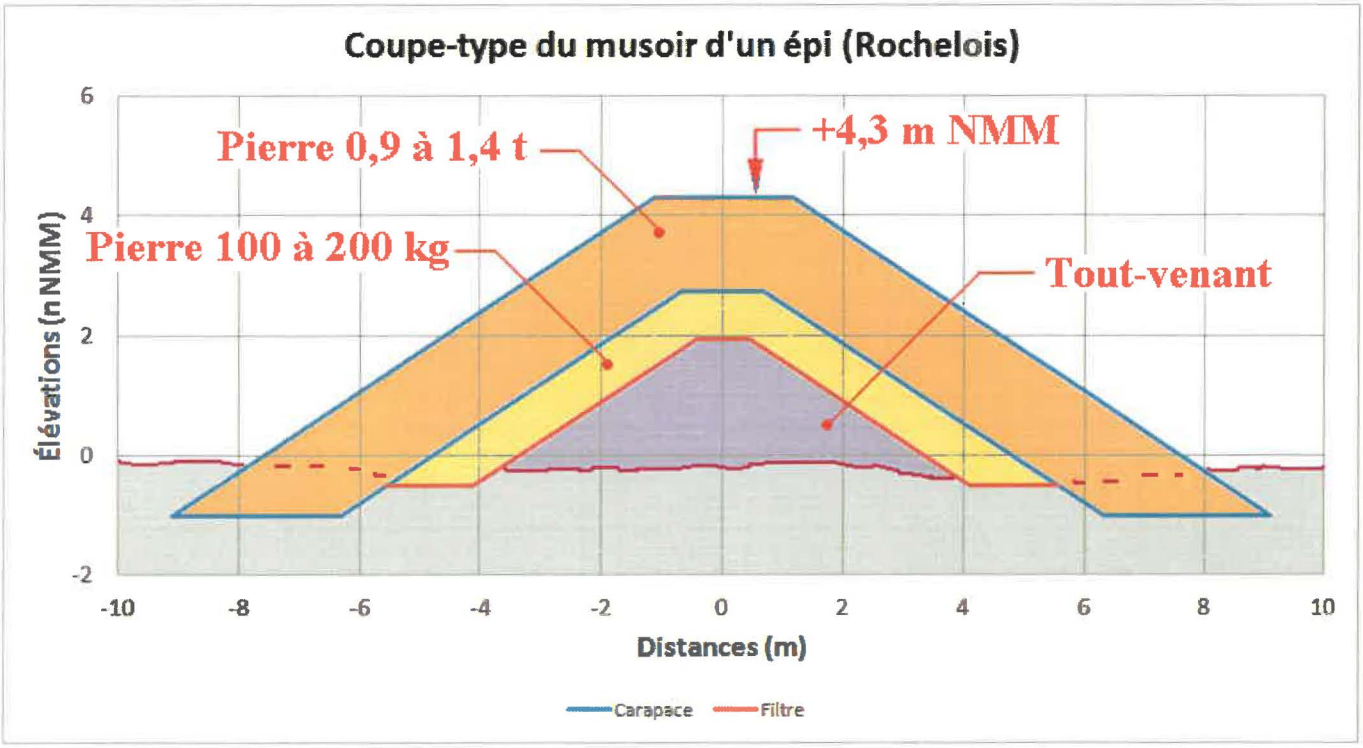


Figure 7.7 Coupe-type d'un épi de rétention de la recharge de plage dans le secteur Rochelois

7.4 Ancrage des pierres en place dans le fond marin

Une hypothèse importante de ce concept est que les pierres en place sur la plage sont bien ancrées dans la plage, d'autant qu'on s'attend à ce que la présence de l'enrochement linéaire en haut de plage provoque l'érosion de la plage. D'après la visite sur place, la plage est constituée de sable moyen. Par contre, il est possible de rencontrer du silt et de l'argile par endroits dans l'excavation qui sera faite pour la tranchée de stabilisation du pied de pente. D'autre part, certaines zones risquent de révéler la présence de roc en surface dont il faudra tenir compte dans le concept final des enrochements.

7.5 Plan des projets d'enrochement des berges

Les figures 7.8 et 7.9 présentent les vues en plan des projets d'enrochements de protection des berges des secteurs Rochelois et McCormick à Port-Cartier.

Pour le secteur Rochelois, les enrochements s'étendent entre deux zones de roc affleurant. Il sera nécessaire de prendre des mesures particulières à ces endroits pour assurer la stabilité des pierres.

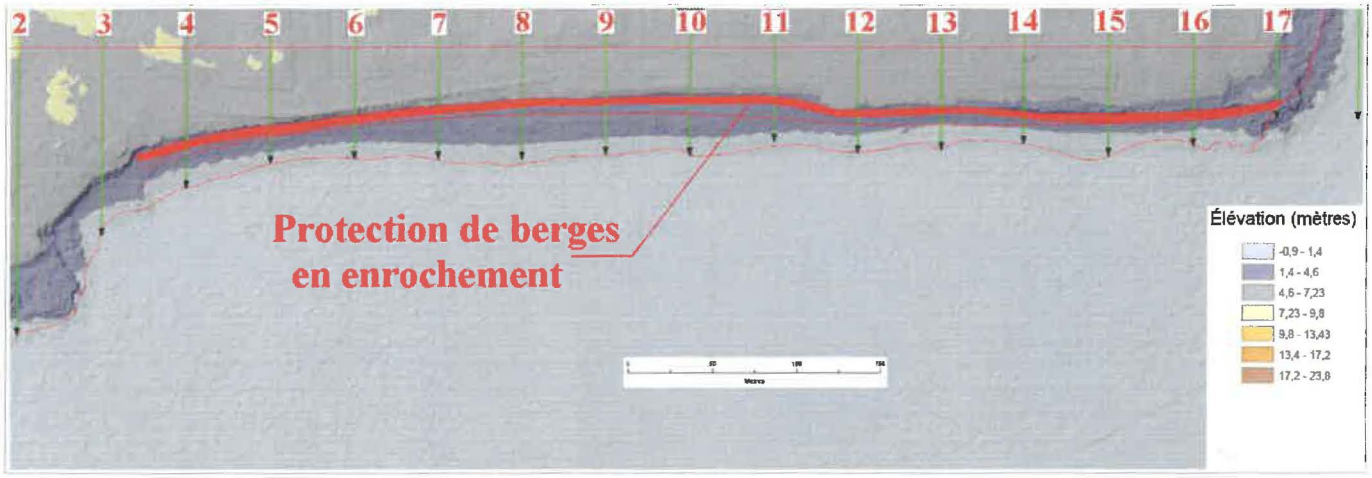


Figure 7.8 Vue en plan du projet d'enrochement des berges du secteur Rochelois

Pour le secteur McCormick, les enrochements partent d'un secteur de roc affleurant au sud et s'étendent au nord-ouest jusqu'au profil 9 de façon à conforter des enrochements en place présentant des problématiques diverses (grosseur des pierres de carapace, absence de pierre-filtre et ancrage défaillant des pierres de carapace dans la plage).

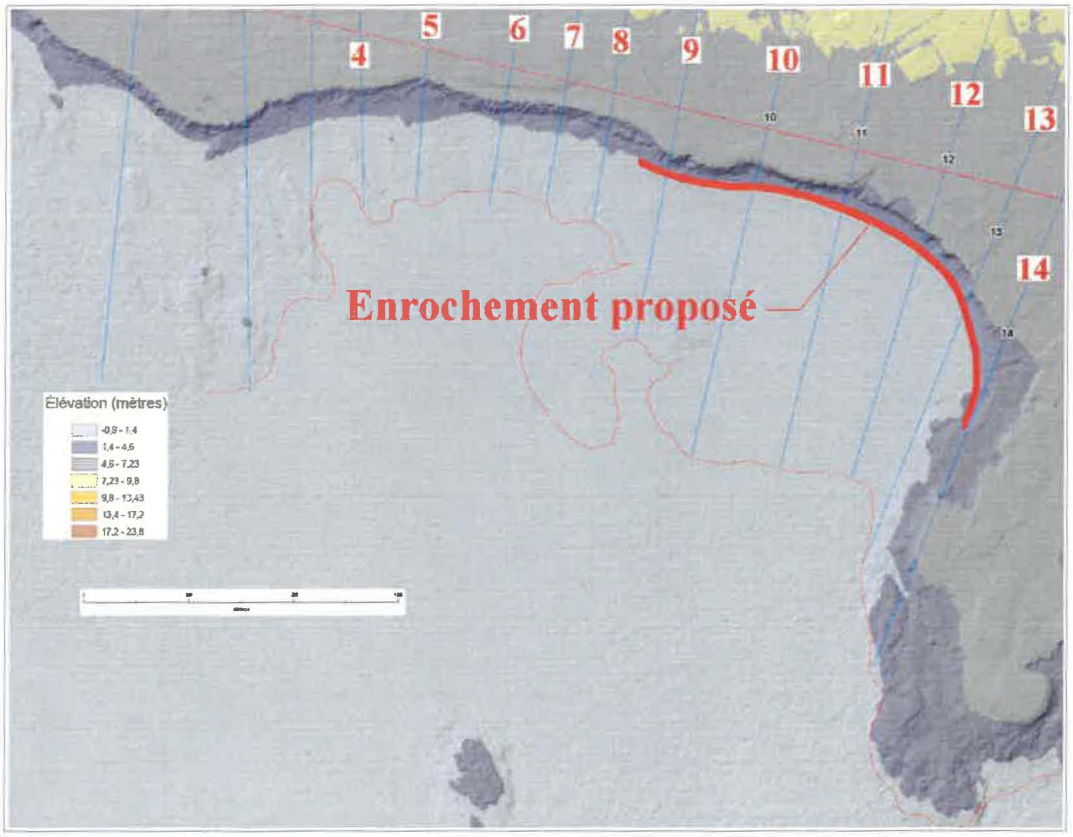


Figure 7.9 Vue en plan du projet d'enrochement des berges du secteur McCormick

7.6 Évaluation des quantités de pierres - Secteur Rochelois

Une évaluation sommaire a été faite des quantités de matériaux qu'impliquerait un projet d'enrochement de la berge du secteur Rochelois à Port-Cartier. La zone concernée par cet enrochement touche les profils P04 à P16, soit environ 650 m de longueur de berge (figure 7.8).

Les quantités estimatives se détaillent comme suit :

- Pierre de carapace : 6 700 m^3
- Pierre-filtre : 2 900 m^3
- Géotextile : 4 900 m^2

7.7 Coûts estimatifs du projet d'enrochement du secteur Rochelois

Avec un coût probable des matériaux de l'ordre de 80 \$/m^3 pour les pierres de carapace, de 70 \$/m^3 pour les pierres-filtre et de 15 \$/m^2 pour le géotextile, une organisation de chantier de 12 %, des études diverses (ingénierie, contrôle-qualité des matériaux et travaux) de 15 % et des contingences de 20 %, on parlerait d'un projet de l'ordre de **1 300 000 \$** pour un enrochement de 650 m de long de la plage du secteur Rochelois.

Ces coûts sont donnés hors taxes et excluent les frais annexes spéciaux (étude environnementale approfondie en particulier).

7.8 Évaluation des quantités de pierres - Secteur McCormick

Une évaluation sommaire a été faite des quantités de matériaux qu'impliquerait un projet d'enrochement de la berge du secteur McCormick à Port-Cartier. La zone concernée par cet enrochement touche les profils P09 à P14, soit environ 190 m de longueur de berge (figure 7.9).

Les quantités estimatives se détaillent comme suit :

- Pierre de carapace : 1 900 m^3
- Pierre-filtre : 800 m^3
- Géotextile : 1 500 m^2

7.9 Coûts estimatifs du projet d'enrochement du secteur McCormick

Avec un coût probable des matériaux de l'ordre de 80 \$/m^3 pour les pierres de carapace, de 70 \$/m^3 pour les pierres-filtre et de 15 \$/m^2 pour le géotextile, une organisation de chantier de 12 %, des études diverses (ingénierie, contrôle-qualité des matériaux et travaux) de 15 % et des contingences de 20 %, on parlerait d'un projet de l'ordre de **370 000 \$** pour un enrochement de 190 m de long de la berge du secteur McCormick.

Ces coûts sont donnés hors taxes et excluent les frais annexes spéciaux (étude environnementale approfondie en particulier).

8 Recharge de la plage

8.1 Granulométrie du matériel de recharge

Le Coastal Engineering Manual (CEM) du U.S. Army Corps of Engineers propose une équation permettant de calculer la géométrie d'une plage à partir des caractéristiques du matériel la constituant. Il s'agit d'une relation très simplifiée ne faisant intervenir que le diamètre médian des matériaux de la plage et l'équation ne peut que donner une idée du profil d'équilibre probable de la plage. Une plage réelle est nettement plus complexe que cette idéalisation (voir figure 8.2). Cette équation est la suivante :

$$h = A\, y^{2/3} \qquad \text{[Équation III-3-14]}$$

où h est l'élévation et y la distance en mètres calculée à partir de l'intersection du niveau moyen de l'eau et de la plage. « A » est un paramètre dépendant des caractéristiques géométriques (diamètre médian D_{50}) du sédiment utilisé pour la recharge de plage et parfois des vagues.

La figure 8.1 présente l'une des deux relations proposées dans le CEM entre le coefficient « A » et le diamètre D_{50} du matériel de la plage. Il s'agit d'une méthode simple d'évaluer la pente d'équilibre d'une plage qui a par contre l'inconvénient de ne pas faire intervenir les caractéristiques des vagues.

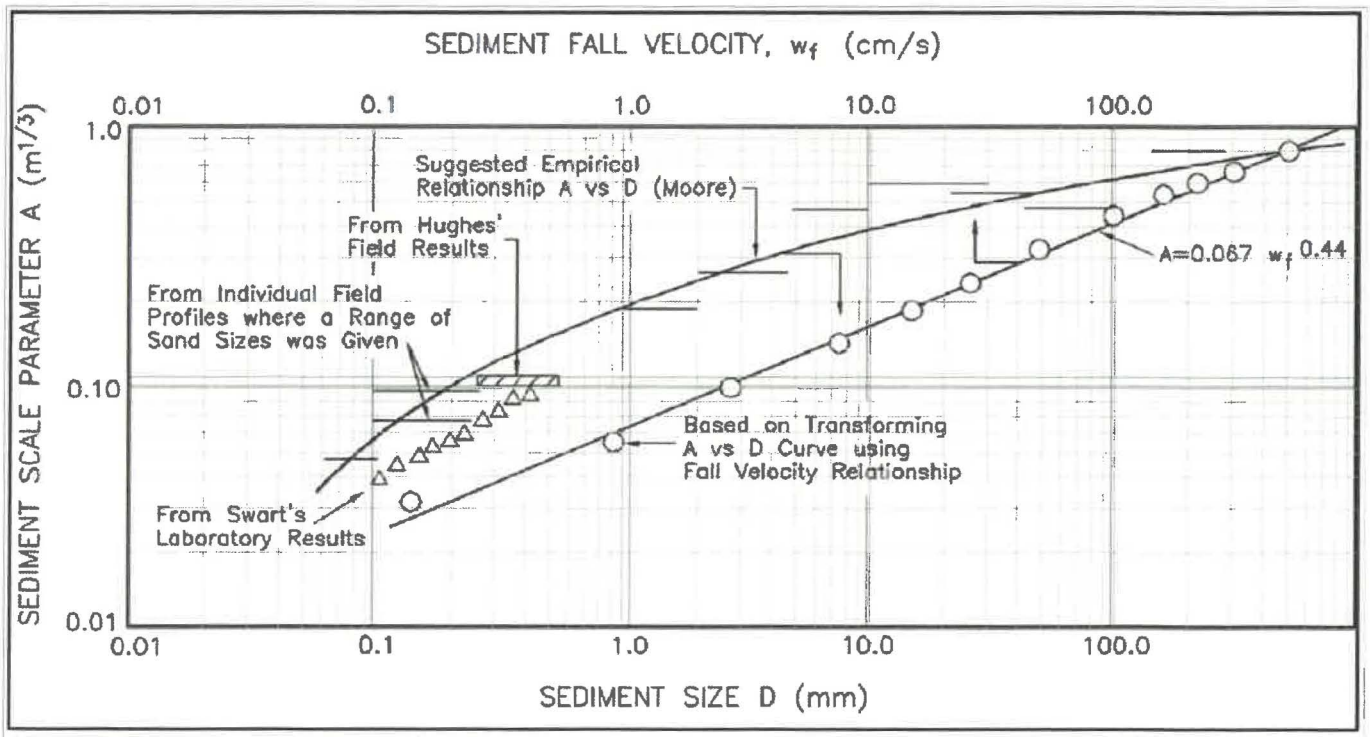


Figure III-3-17. Variation of sediment scale parameter *A* with sediment size *D* and fall velocity w_f (Dean 1987b)

Figure 8.1 Relation entre le paramètre « A » et le diamètre médian du matériel de recharge

Le CIRIA[9] propose une autre façon d'évaluer le paramètre « A », nettement plus compliquée à mettre en œuvre, mais qui fait intervenir la hauteur des vagues et la vitesse de chute des sédiments dans l'eau en fonction de leur taille. Compte tenu de la relative exposition des plages de Port-Cartier aux vagues de tempête et des imprécisions quant à la hauteur de ces vagues, la méthode simplifiée du CEM sera retenue pour cette évaluation préliminaire du projet de recharge de plage.

Delft Hydraulics a développé un modèle numérique d'après les travaux de Van der Meer, 1998. Ce modèle permet de prédire la déformation du profil de plage en fonction des vagues qui le frappent. Le profil initial de la plage de la figure 8.2 était de 1:5. Ce modèle a cependant l'inconvénient de ne pas tenir compte de la marée qui tend à régulariser le profil de la plage.

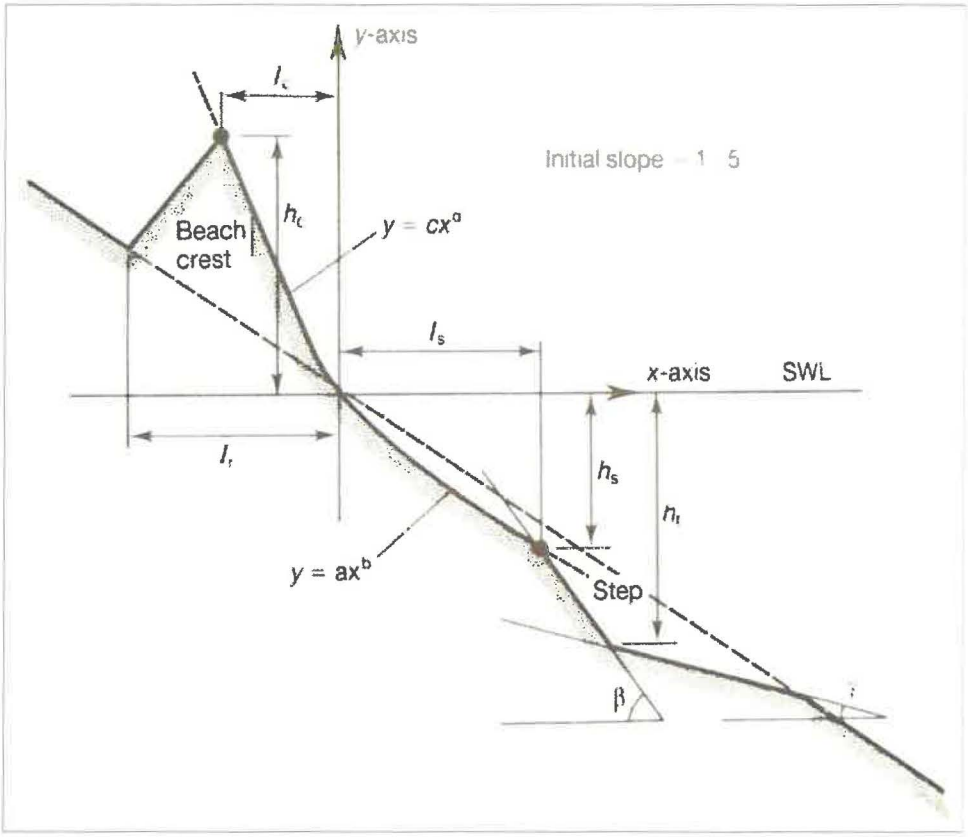


Figure 8.2 Évolution d'un profil de plage de galet (CIRIA – figure 145 page 245)

9Construction Industry Research and Information Association – Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, 1991

8.2 Granulométrie des matériaux disponibles dans la région

Une recherche de matériaux granulaires susceptibles de convenir pour un projet de recharge de plage à Port-Cartier a été faite dans la région. Un banc de sable et gravier a été trouvé, soit le banc des Équipements Lalancette à Sept-Îles.

Les granulométries de matériaux en provenance d'autres bancs (Forestville, Baie-Comeau, Sainte-Luce et Bic) ont également été analysés dans le cadre d'autres projets de recharge de plage.

Les courbes granulométriques de huit échantillons sont reproduites sur la figure 8.3 (les tamis sont présentés en abscisse selon une échelle logarithmique et le pourcentage passant en ordonnées). Les matériaux du banc des Équipements Lalancette à Sept-Îles (courbe rouge sur la figure 8.3) sont du gravier avec un D_{50} de 6 mm.

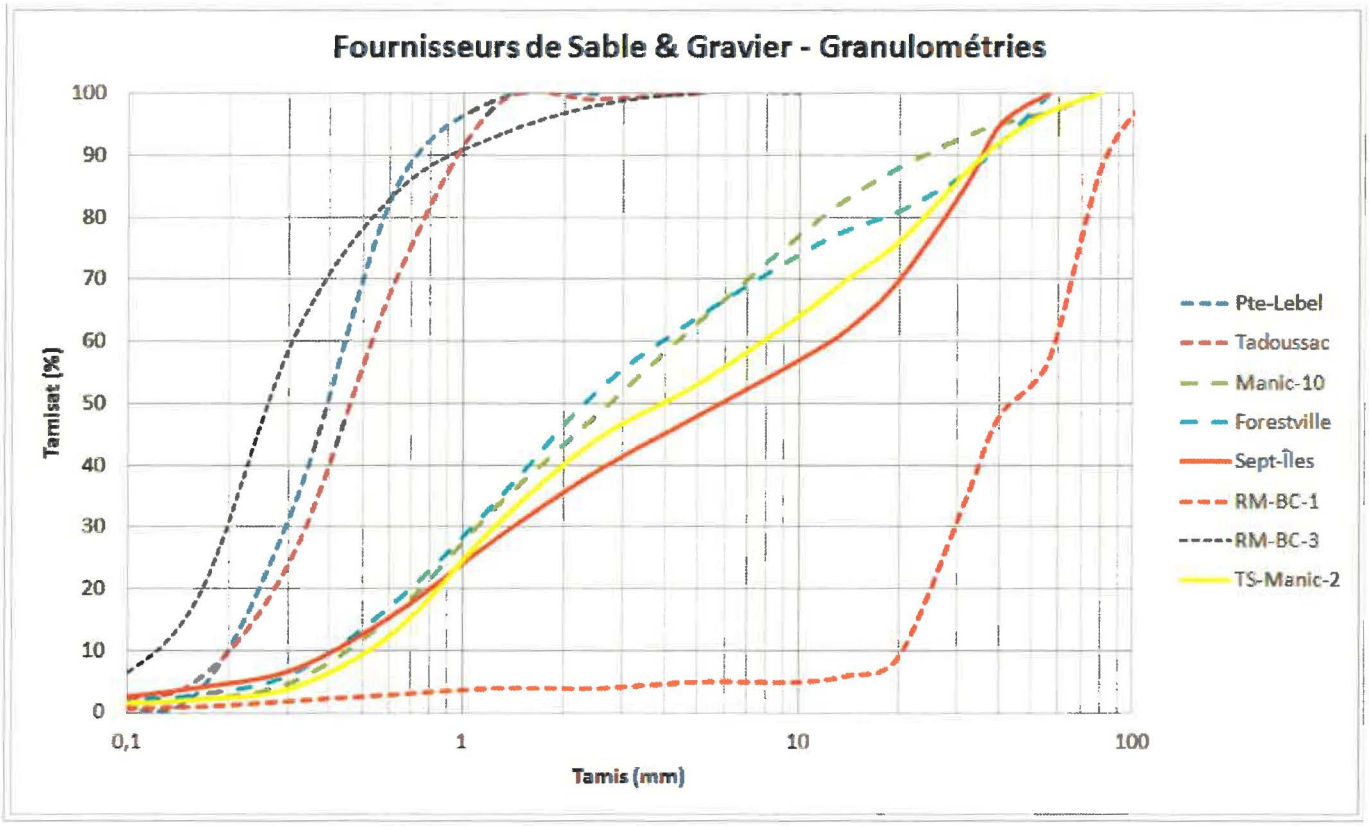


Figure 8.3 Granulométrie des matériaux de différents bancs de sable et gravier

8.3 Profil d'équilibre de la plage actuelle

La première chose qui a été faite avec l'équation du CEM a été de déterminer par analogie de pente le D_{50} des sédiments constituant les plages actuelles de Port-Cartier.

Le niveau moyen de l'eau considéré dans ces calculs a été le niveau extrême actuel (+2,7 m NMM).

La figure 8.4 montre qu'il faut faire l'hypothèse d'un matériel ayant un D_{50} de l'ordre de 5 mm à 15 mm pour que les profils de plage du secteur Rochelois se comparent au profil d'une plage en équilibre selon les informations du CEM. La localisation des profils se trouve sur la figure 2.2. Le diamètre D_{50} équivalent moyen est de 10 mm. Ce diamètre a tendance à diminuer de l'ouest vers l'est.

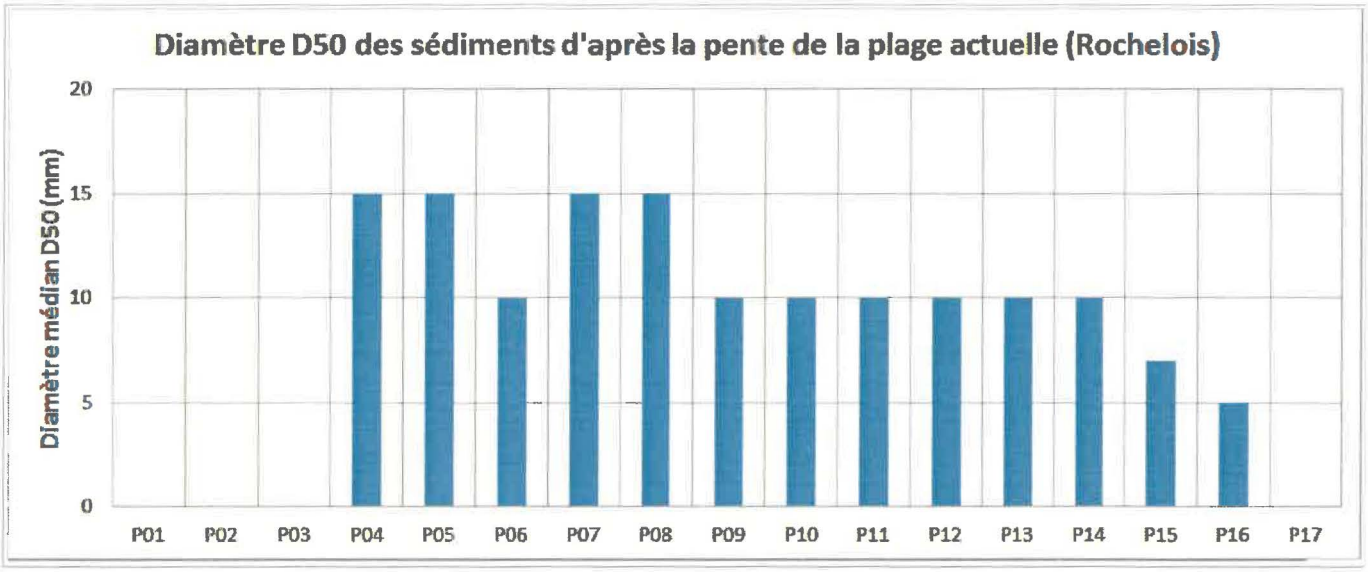


Figure 8.4 Diamètre médian D_{50} obtenu par comparaison des profils de plage du secteur Rochelois

La figure 8.5 montre qu'il faut faire l'hypothèse d'un matériel ayant un D_{50} de l'ordre de 3 mm à 7 mm pour que les profils de plage du secteur McCormick se comparent au profil d'une plage en équilibre selon les informations du CEM. La localisation des profils se trouve sur la figure 2.3. Le diamètre D_{50} équivalent moyen est de 5 mm. Ce diamètre a tendance à être relativement constant sur la zone étudiée.

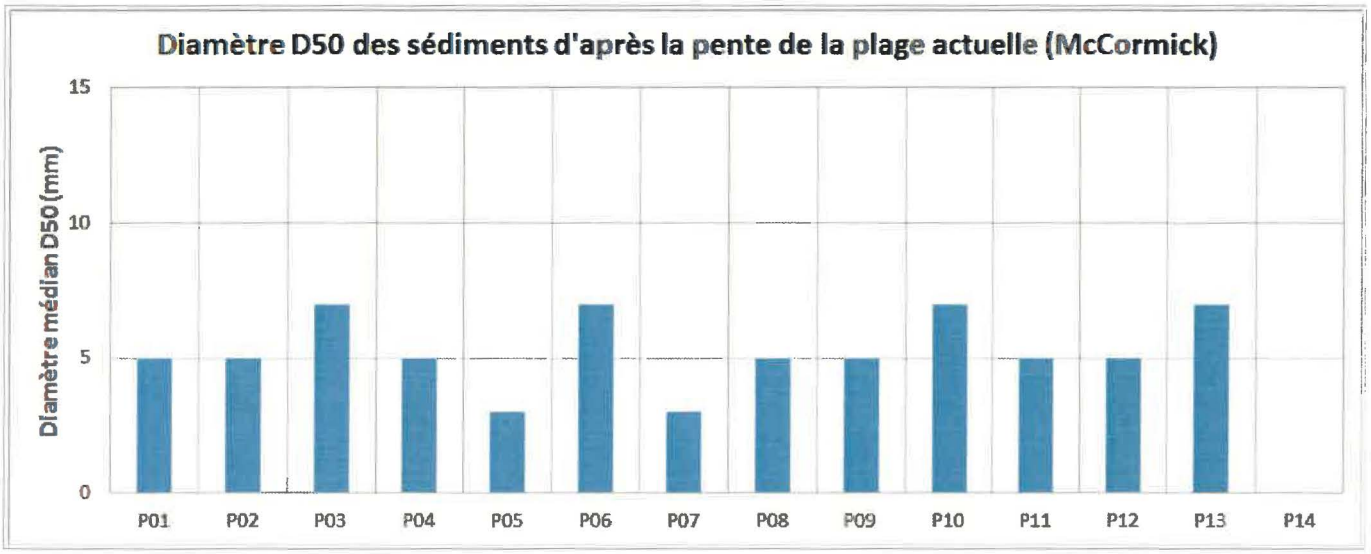


Figure 8.5 Diamètre médian D_{50} obtenu par comparaison des profils de plage du secteur McCormick

Les figures 8.4 (Rochelois) et 8.5 (McCormick) sont une illustration de la différence d'exposition aux vagues des deux plages, les pentes étant plus raides dans le cas de Rochelois que de McCormick.

La figure 8.6 montre qu'il faut faire l'hypothèse d'un matériel ayant un D_{50} de l'ordre de 0,5 mm à 7 mm pour que les profils de plage du secteur Portage se comparent au profil d'une plage en équilibre selon les informations du CEM. La localisation des profils se trouve sur la figure 2.4 (les numéros des profils croissent du sud vers le nord). Le diamètre D_{50} équivalent moyen est de 2,3 mm. Ce diamètre n'est pas constant sur la zone étudiée, une des raisons étant la présence des ruisseaux qui traversent la berge.

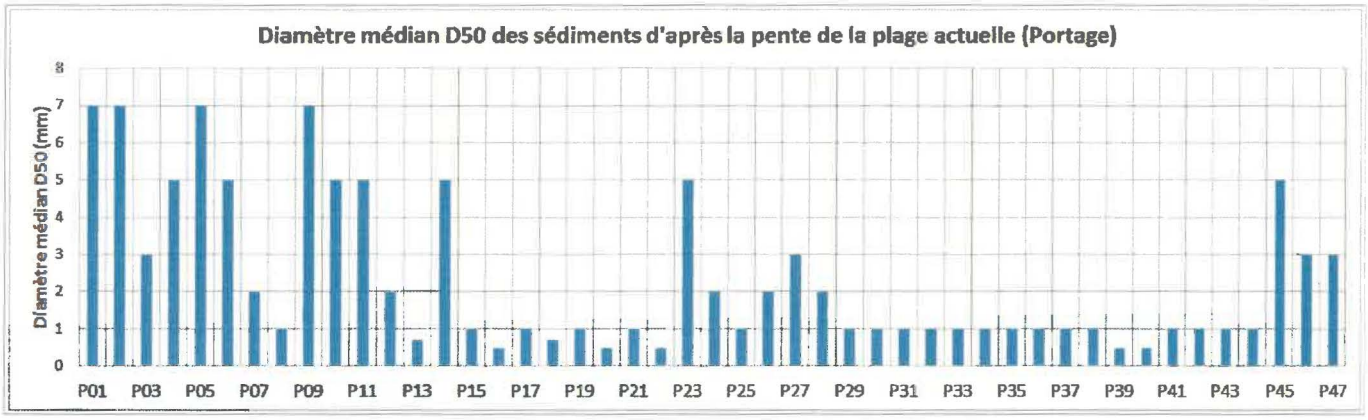


Figure 8.6 Diamètre médian D_{50} obtenu par comparaison des profils de plage du secteur Portage

La figure 8.7 montre qu'il faut faire l'hypothèse d'un matériel ayant un D_{50} de l'ordre de 1 mm à 10 mm pour que les profils de plage du secteur Pointe-aux-Anglais se comparent au profil d'une plage en équilibre selon les informations du CEM. La localisation des profils se trouve sur la figure 2.5 (les numéros des profils croissent du sud vers le nord – les profils de 01 à 08 concernent la pointe). Le diamètre D_{50} équivalent moyen est de 6,6 mm. Ce diamètre a tendance à être relativement constant sur la zone étudiée, sauf par endroit dans la partie nord du secteur où le D_{50} est parfois plus fin.

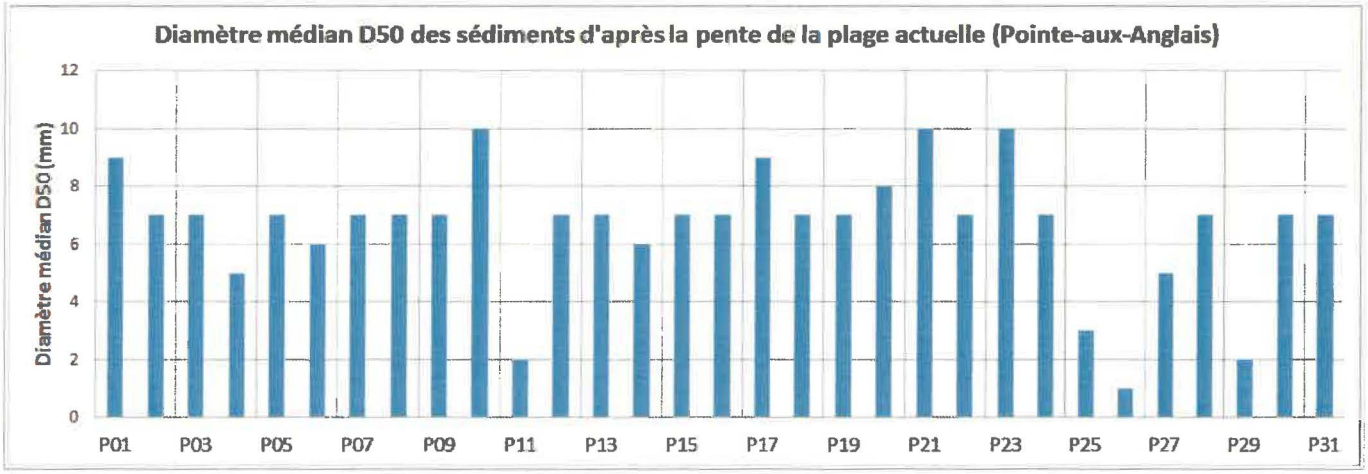


Figure 8.7 Diamètre médian D_{50} obtenu par comparaison des profils de plage du secteur de Pointe-aux-Anglais

Les pentes de plage du secteur de Pointe-aux-Anglais s'apparentent à celles de sédiments plus grossiers que les pentes du secteur Portage. La source principale de sédiments dans tout ce secteur étant la rivière Pentecôte, il se pourrait que la granulométrie des sédiments augmente légèrement du nord vers le sud (en s'éloignant de la source).

Les plages des différents secteurs (Rochelois, McCormick, Portage et Pointe-aux-Anglais) n'étant pas forcément en équilibre, cette analogie entre des pentes de plage réelles et théoriques présente quelques limitations. Les figures 8.8 à 8.16 illustrent quelques unes des comparaisons de profils de plage réelle et de plage théorique qui ont permis d'arriver aux chiffres des figures 8.4 à 8.7.

Note : les figures suivantes présentent une distorsion, les échelles verticales et horizontales étant différentes.

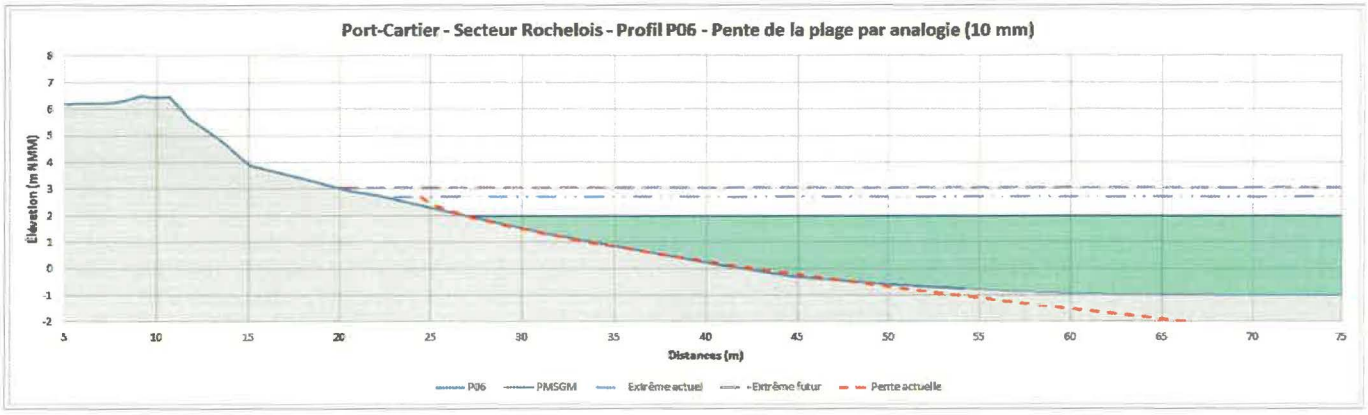


Figure 8.8 Profil P06 Rochelois - Profil d'équilibre de plage - D_{50} = 10 mm

On note sur la figure 8.8 (profil P06 - Rochelois) que le profil d'équilibre théorique et le profil réel de la plage se correspondent presque parfaitement sauf en haut de plage, malgré le fait que les sables actuellement en place sur la plage sont beaucoup plus fins que ce que donne le calcul. Cette divergence indiquerait une instabilité de cette partie de plage du secteur Rochelois à Port-Cartier qui se traduit actuellement par l'érosion du rivage.

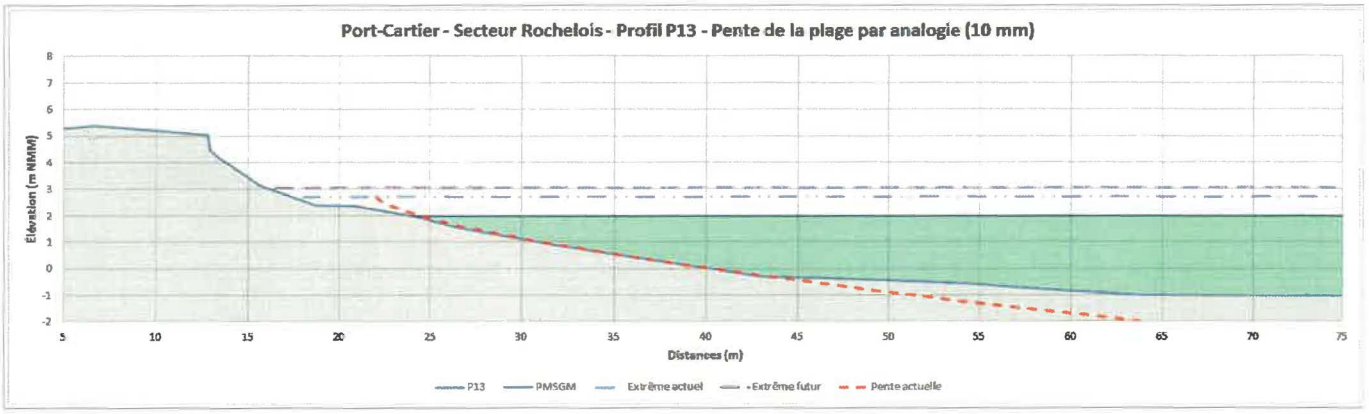


Figure 8.9 Profil P13 Rochelois - Profil d'équilibre de plage - D_{50} = 10 mm

Le profil en P13 (figure 8.9 - Rochelois)) correspond bien au profil théorique illustré, mais la taille des sédiments sur place est très différente de la taille de sédiments calculée par analogie avec la pente d'équilibre. Cette partie de plage du secteur Rochelois est également instable et la rive en érosion active.

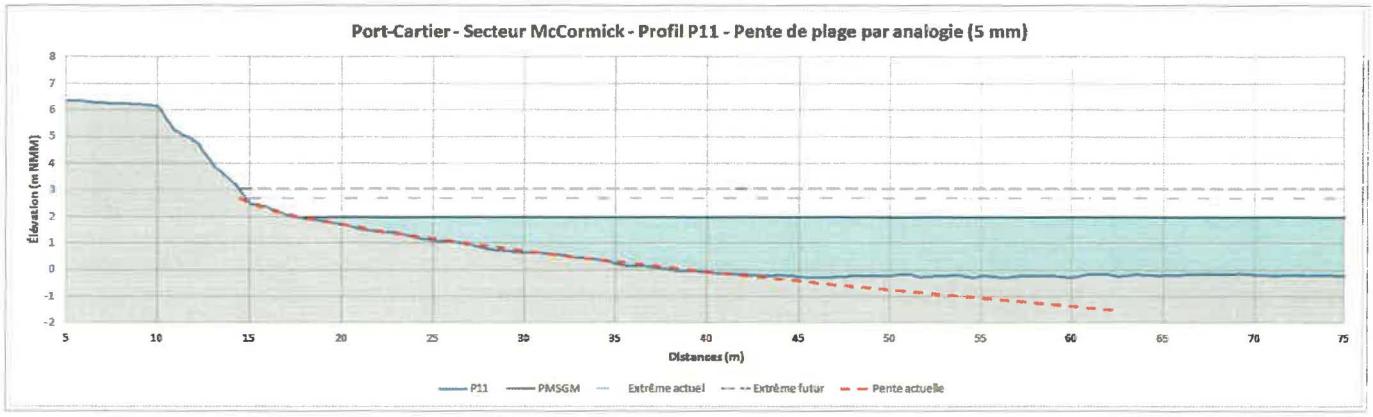


Figure 8.10 Profil P11 McCormick - Profil d'équilibre de plage - D_{50} = 5 mm

Au niveau du profil P11 du secteur McCormick (figure 8.10), les profils théoriques et réels se superposent très bien, mais les tailles des sédiments théoriques (données par le calcul) et réelles (mesurées sur place) sont différentes, signe d'une instabilité de la plage. La pente raide du talus au-delà de la plage correspond à l'érosion de berge observée sur place.

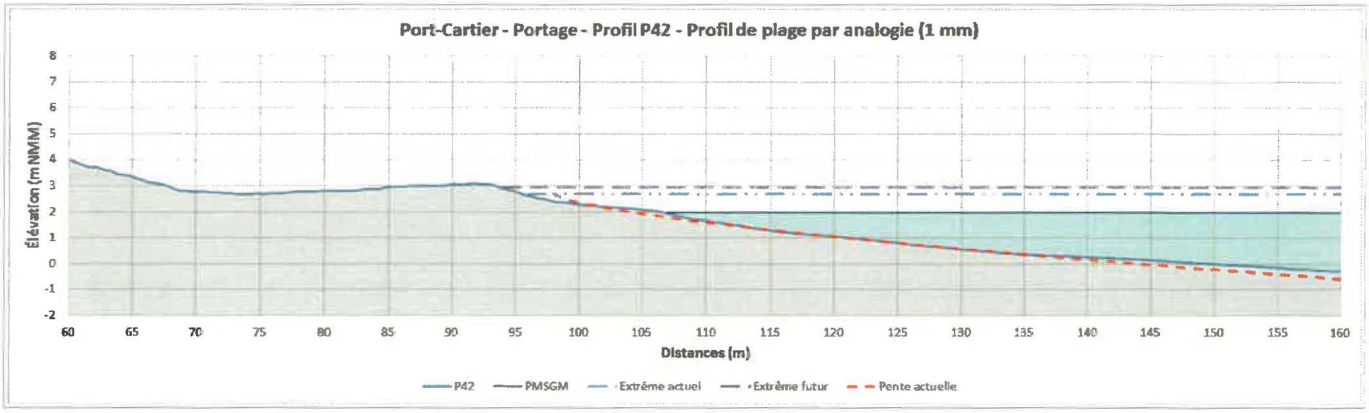


Figure 8.11 Profil P42 Portage - Profil d'équilibre de plage - D_{50} = 1 mm

Dans le secteur Portage, les profils théoriques et relevés se superposent en général très bien (profil P42 sur figure 8.11 et profil P22 sur figure 8.12). Par contre, certains profils de plage relevés présentent une double courbure assez prononcée (bas de plage et haut de plage (profil P06 sur figure 8.13).

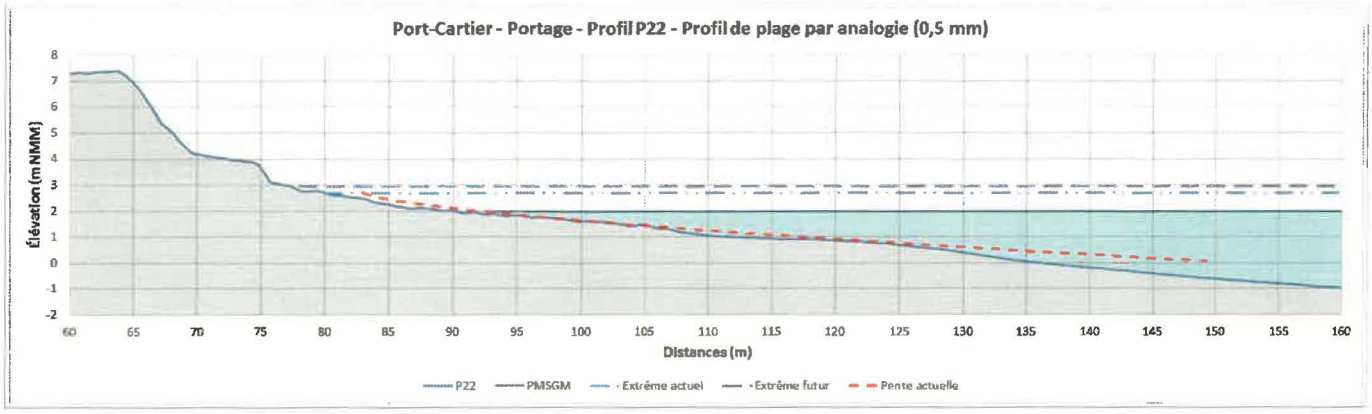


Figure 8.12 Profil P22 Portage - Profil d'équilibre de plage - D_{50} = 0,5 mm

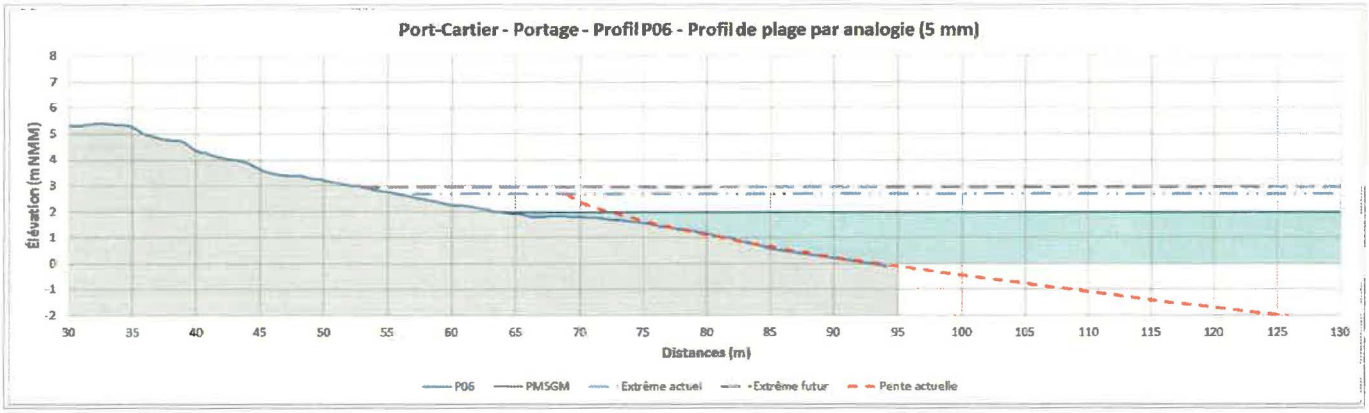


Figure 8.13 Profil P06 Portage - Profil d'équilibre de plage - D_{50} = 5 mm

Dans le secteur de Pointe-aux-Anglais, les profils de plage relevés présentent assez systématiquement la double courbure notée dans le secteur Portage (profil P25 sur figure 8.14, profil P15 sur figure 8.15 et profil P10 sur figure 8.16).

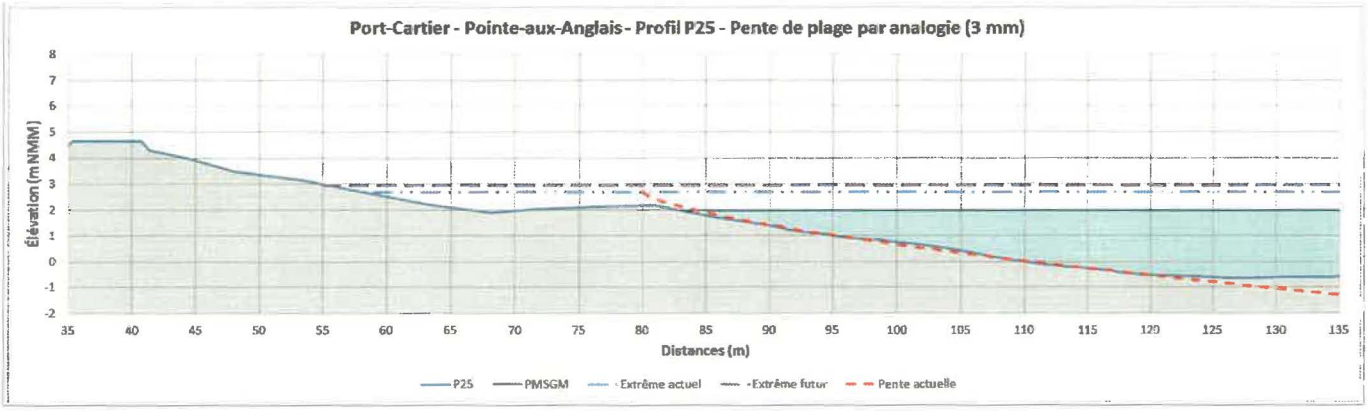


Figure 8.14 Profil P25 Pointe-aux-Anglais - Profil d'équilibre de plage - D_{50} = 3 mm

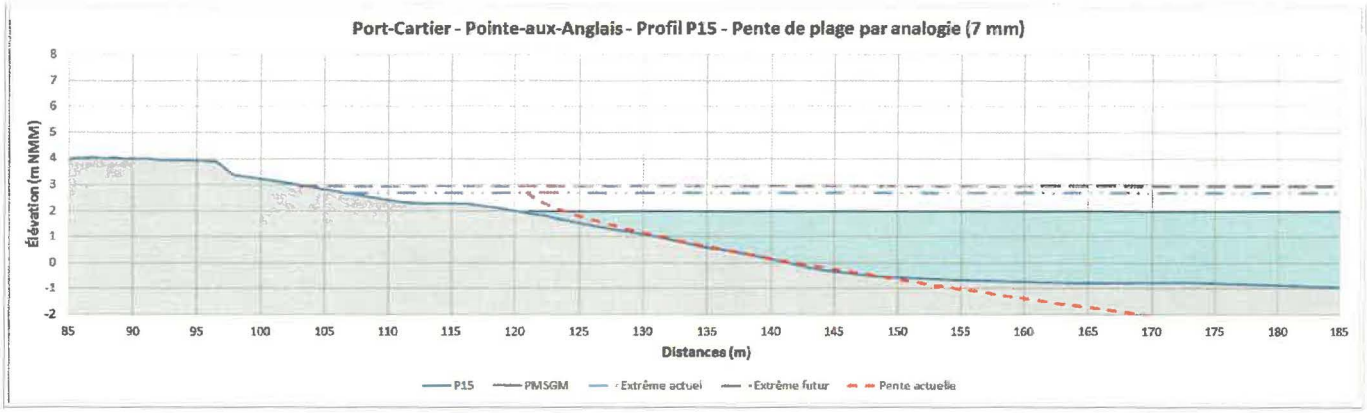


Figure 8.15 Profil P15 Pointe-aux-Anglais - Profil d'équilibre de plage - D_{50} = 7 mm

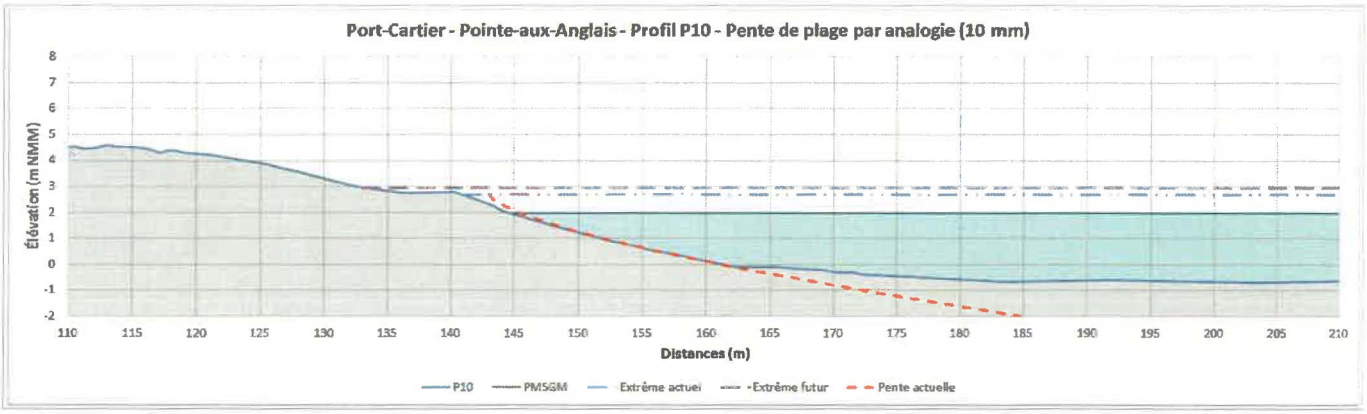


Figure 8.16 Profil P10 Pointe-aux-Anglais - Profil d'équilibre de plage - D_{50} = 10 mm

Compte tenu de la valeur de D_{50} trouvée par la méthode paramétrique décrite ci-dessus, un projet de recharge de plage à Port-Cartier visant une certaine stabilité de la plage devrait s'orienter vers des sédiments ayant un diamètre médian supérieur à 10 mm sur la plage du secteur Rochelois et supérieur à 5 mm sur la plage du secteur McCormick, soit un « gravier avec un peu de sable et de galets ».

Un projet de recharge de plage dans les secteur de Rochelois et de Pointe-aux-Anglais visant une certaine stabilité de la plage devrait s'orienter vers des sédiments ayant un diamètre médian supérieur à 10 mm.

8.4 Remontée des vagues sur une plage

La remontée des vagues sur une plage des secteurs Rochelois et McCormick a été calculée à l'aide des équations paramétriques du Coastal Engineering Manual.

La figure 8.17 illustre la remontée des vagues sur une plage du secteur Rochelois, alors que la figure 8.18 illustre cette remontée des vagues sur une plage du secteur McCormick.

Les deux calculs arrivent à la même recommandation d'élévation de crête de plage, soit +2,6 m NMM.

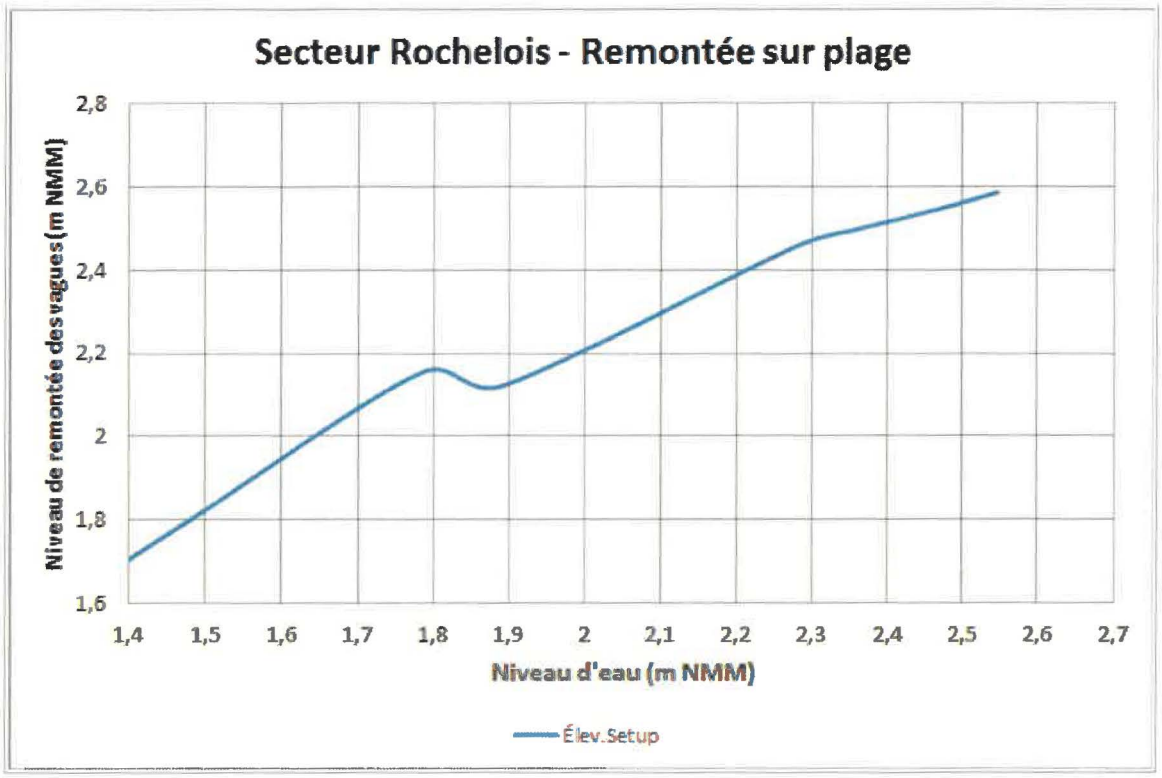


Figure 8.17 Remontée des vagues sur une plage – Secteur Rochelois

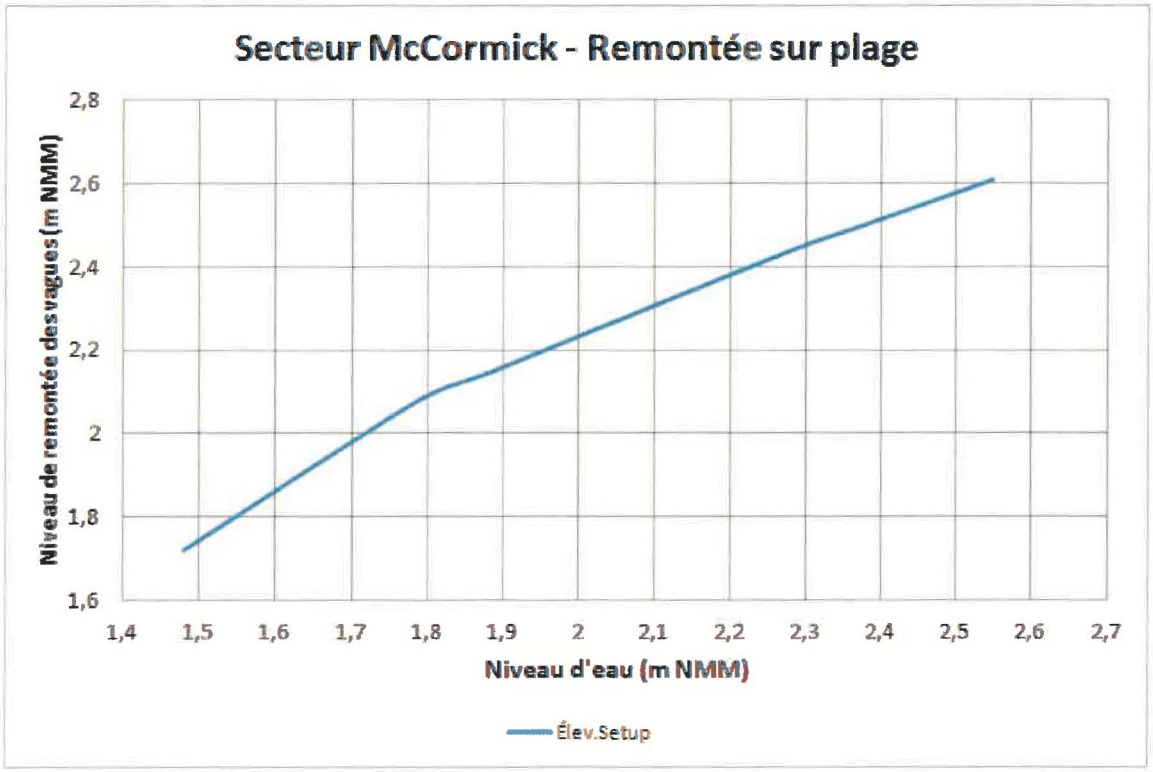


Figure 8.18 Remontée des vagues sur une plage – Secteur McCormick

Compte tenu de la plus grande exposition aux vagues des plages des secteurs Portage et Pointe-aux-Anglais, la recommandation préliminaire est de placer l'élévation de crête de plage à +2,8 m NMM.

8.5 Profils d'équilibre d'une plage rechargée

La coupe-type de plage rechargée a été développée selon une option dont la crête (partie horizontale supérieure de la plage) fait au moins 6 m de largeur à l'élévation +2,6 m NMM, distance calculée à partir de la position de la rive actuelle à cette élévation.

Ce choix permet d'éliminer l'influence sur la rive de la plupart des cas de vagues se produisant en même temps qu'un niveau d'eau très haut. Si le niveau d'eau s'approche ou dépasse le niveau de la crête de la plage sélectionné (environ une fois tous les 15 ans en moyenne), la largeur de la crête de plage permet d'atténuer les dommages que pourraient provoquer les vagues qui se produisent en même temps que ces hauts niveaux d'eau.

Dans le secteur Rochelois, il a fallu élargir par endroits la crête de la plage rechargée pour éviter de créer une « pointe » dans le centre de la plage.

Dans le secteur de la Place McCormick, le projet de recharge de plage devrait être complété par une protection du pied de la falaise en enrochement de petit calibre jusqu'à l'élévation +3,3 m NMM destinée à éviter qu'un événement exceptionnel (très haut niveau d'eau avec vagues) ne vienne perturber l'équilibre précaire du pied de la falaise en érosion.

Cette solution de protection de berge ne traite pas des instabilités de pente de la falaise du secteur Place McCormick dues au ruissellement, à la gélifraction ou à d'autres phénomènes sans rapport avec les vagues. Il est important de prévoir un ensemencement de la falaise (plantation de végétaux variés, incluant des arbustes et arbres) afin de compléter la stabilisation de cette falaise. Un avis d'un ingénieur géologue sur la pente d'équilibre de cette falaise serait recommandé avant de positionner la protection du pied de cette falaise.

8.6 Dimensionnement de la protection de pied de falaise du secteur McCormick

Le dimensionnement de la protection du pied de la falaise du secteur McCormick a été fait en fonction de la présence de la recharge de plage. De façon sécuritaire, la hauteur significative des vagues en mesure d'atteindre cette protection en enrochement a été fixée à 0,4 m. Avec une telle hauteur de vague, il est intéressant de considérer l'option d'un enrochement de type « rip-rap » (granulométrie nettement plus étalée que les enrochements de protection traditionnels sur deux couches) posé sur un géotextile. La mise en place d'enrochements traditionnels exigerait l'ajout d'une couche de pierre-filtre en plus du géotextile à cause de la finesse des sédiments de la falaise.

C'est l'équation VI-5-86 du chapitre VI-5-3-7 page VI-5-84 du C.E.M. qui a été retenue pour calculer la dimension du rip-rap.

$$M_{50} = \frac{\rho_r H_{10\%}^3}{K_{RR}\left(\frac{\rho_r}{\rho_w} - 1\right)^3 \cot\alpha}$$

Les paramètres de calcul utilisés ont été :

- Densité de la pierre : 2,63 t/m^3
- Densité de l'eau : 1,02 t/m^3
- $H_{1/10}$ = Hs * 1,27 (Équation II-1-132, page II-1-74 du chapitre II-1-3-b-7-a du C.E.M.)
- Coefficient $K_{RR\text{-}b}$ (vagues déferlantes) = 2,2
- Pente = 2/1

La dimension de pierre obtenue avec ces paramètres est de **2 à 80 kg** (100 à 360 mm de diamètre équivalent) avec un poids moyen des pierres de 20 kg (230 mm de diamètre équivalent). Cette protection devrait avoir une épaisseur de 0,6 m et être placée sur un géotextile pour empêcher les particules fines de migrer à travers cet enrochement.

La crête des enrochements de type rip-rap a été placée à +3,3 m NMM pour tenir compte des vagues de conception se produisant alors que le niveau de l'eau est celui de l'extrême actuel (+2,7 m NMM) ainsi qu'en fonction d'une remontée future du niveau moyen des océans. Ces conditions sont sévères et devraient permettre à cet enrochement de protéger le pied de la falaise pendant une période plus longue que la durée de vie utile normale de ce genre d'enrochement (qui est plutôt de 25 à 30 ans dans les conditions considérées pour le dimensionnement), à condition que la recharge de plage soit entretenue.

Le pied des enrochements a été placé un mètre sous l'élévation de la crête de la plage, soit +1,6 m NMM pour éviter les risques d'affouillement.

8.7 Coupes-types de recharge de plage du secteur Rochelois

Les figures 8.19 et 8.20 illustrent les profils d'équilibre de plage qui serait rechargée avec sédiments ayant des valeurs caractéristiques du diamètre médian D_{50} de 3 à 15 mm. La pente de la plage en équilibre décroit assez rapidement avec la valeur du D_{50}.

Ces figures illustrent le fait que du matériel de recharge de plage qui s'apparente à du sable et gravier (D_{50} de 3 mm – trait rouge) poserait un problème de quantité de matériaux à mettre en place, mais également de pérennité d'un tel projet de recharge de plage, la partie sableuse étant plus mobile et susceptible d'être rapidement déplacée par les vagues de tempête.

Il serait recommandé dans le cas de la plage du secteur Rochelois à Port-Cartier d'aller vers des matériaux plus grossiers, soit un projet de recharge utilisant des matériaux ayant un D_{50} d'au moins 10 mm – trait beige.

Note : les figures suivantes présentent une distorsion, les échelles verticales et horizontales étant différentes..

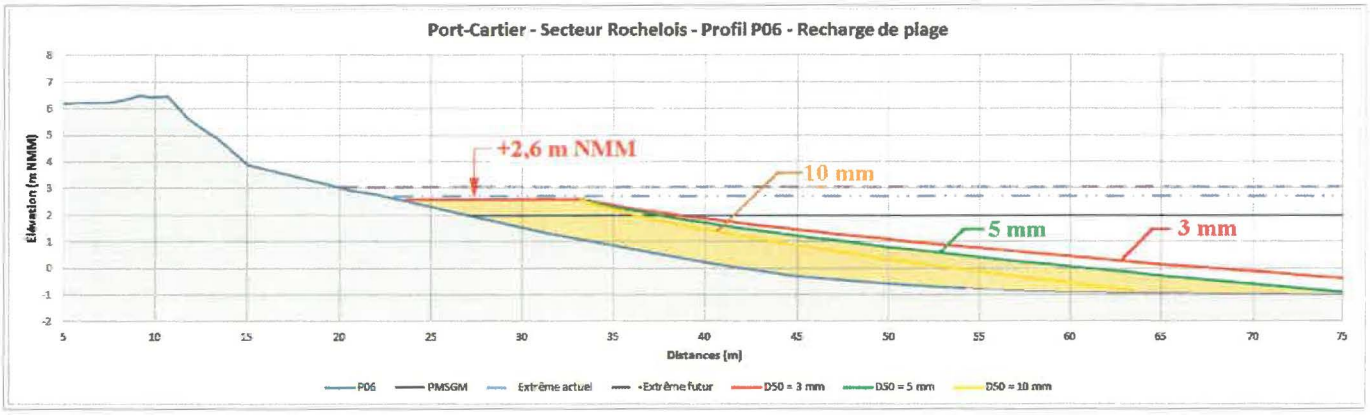


Figure 8.19 Profil P06 Rochelois - Profil de recharge de plage – D_{50} = 3, 5 et 10 mm

La différence entre les profils P06 (figure 8.19) et P13 (figure 8.20) est la distance entre la berge en érosion et la recharge de plage. Un adoucissement de la pente au-dessus de la crête de la recharge est attendu au profil P13 alors que cette pente devrait rester relativement stable au profil P06.

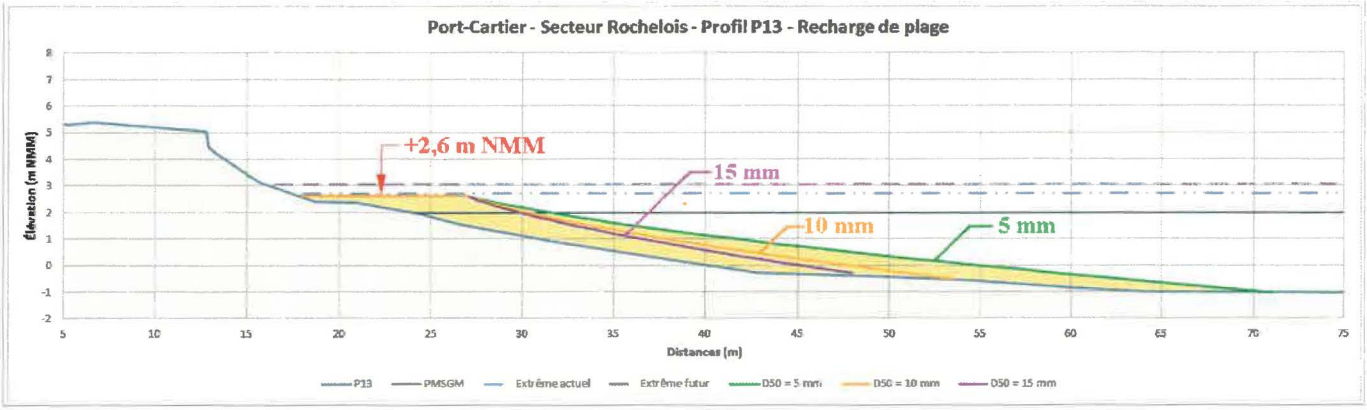


Figure 8.20 Profil P13 Rochelois - Profil de recharge de plage – D_{50} = 5, 10 et 15 mm

8.8 Coupes-types de recharge de plage du secteur McCormick

La figure 8.21 illustre le profil d'équilibre de plage qui serait rechargée avec sédiments ayant des valeurs caractéristiques du diamètre médian D_{50} de 5 mm, 10 mm et 15 mm au droit du profil P11 du secteur McCormick. La pente de la plage en équilibre décroit assez rapidement avec la valeur du D_{50}.

La protection du pied de la falaise en enrochement de type rip-rap est également illustrée sur la figure 8.21.

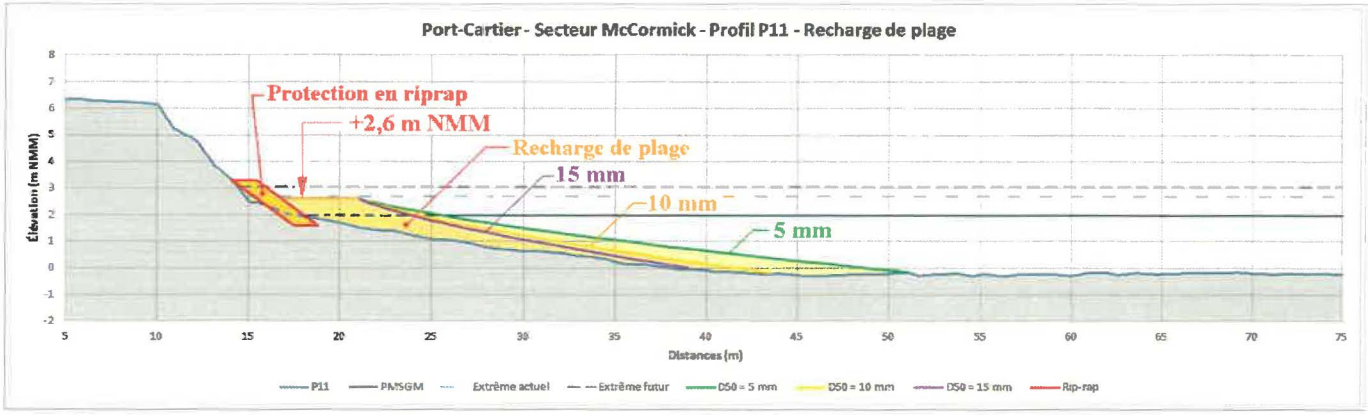


Figure 8.21 Profil P11 McCormick - Profil de recharge de plage – D_{50} = 5, 10 et 15 mm

8.9 Coupes-types de recharge de plage du secteur Portage

Les figures 8.22 à 8.24 illustrent les profils d'équilibre de plage qui seraient rechargées avec sédiments ayant des valeurs caractéristiques du diamètre médian D_{50} de 7 mm, 10 mm et 15 mm au droit des profils P46, P29 et P09 du secteur Portage.

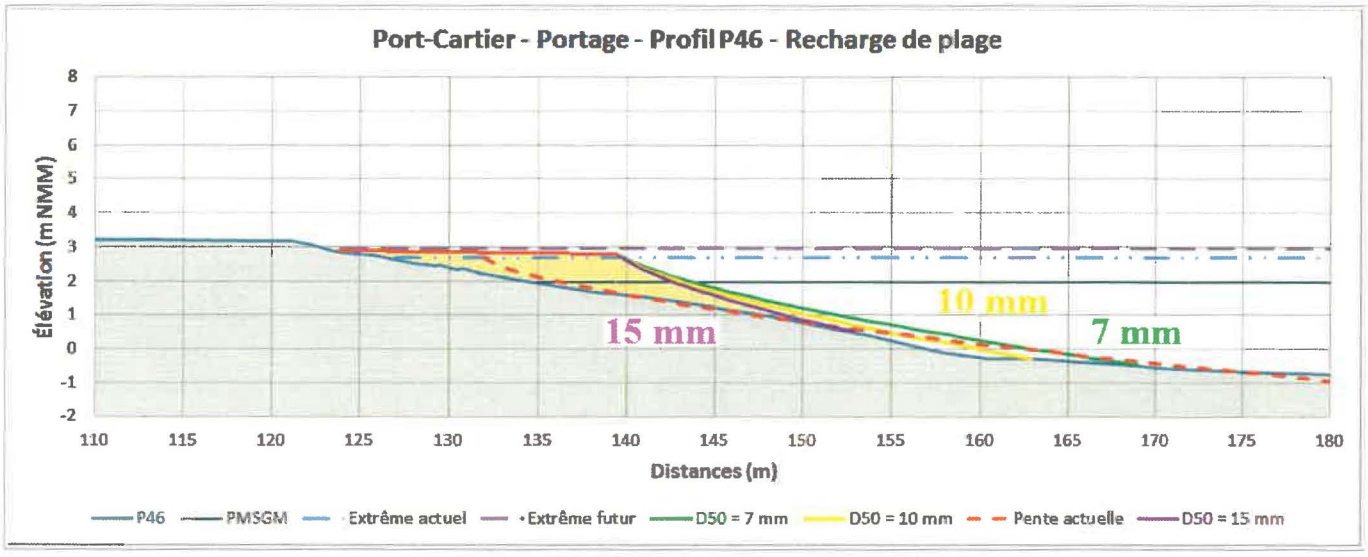


Figure 8.22 Profil P46 Portage - Profil de recharge de plage – D_{50} = 7, 10 et 15 mm

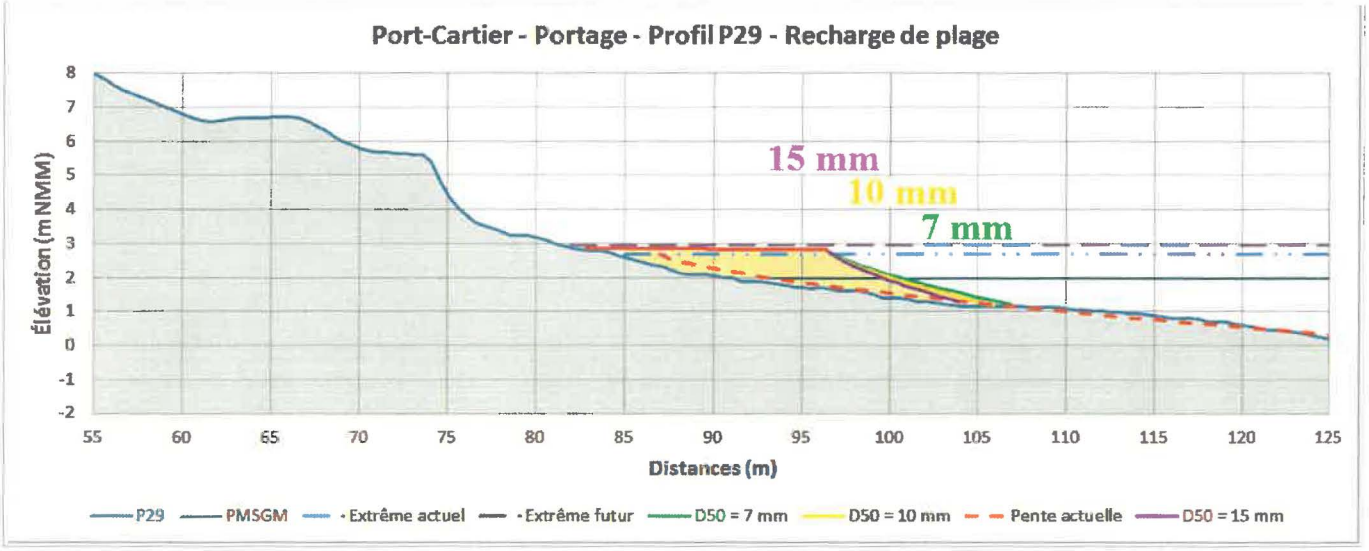


Figure 8.23 Profil P29 Portage - Profil de recharge de plage – D_{50} = 7, 10 et 15 mm

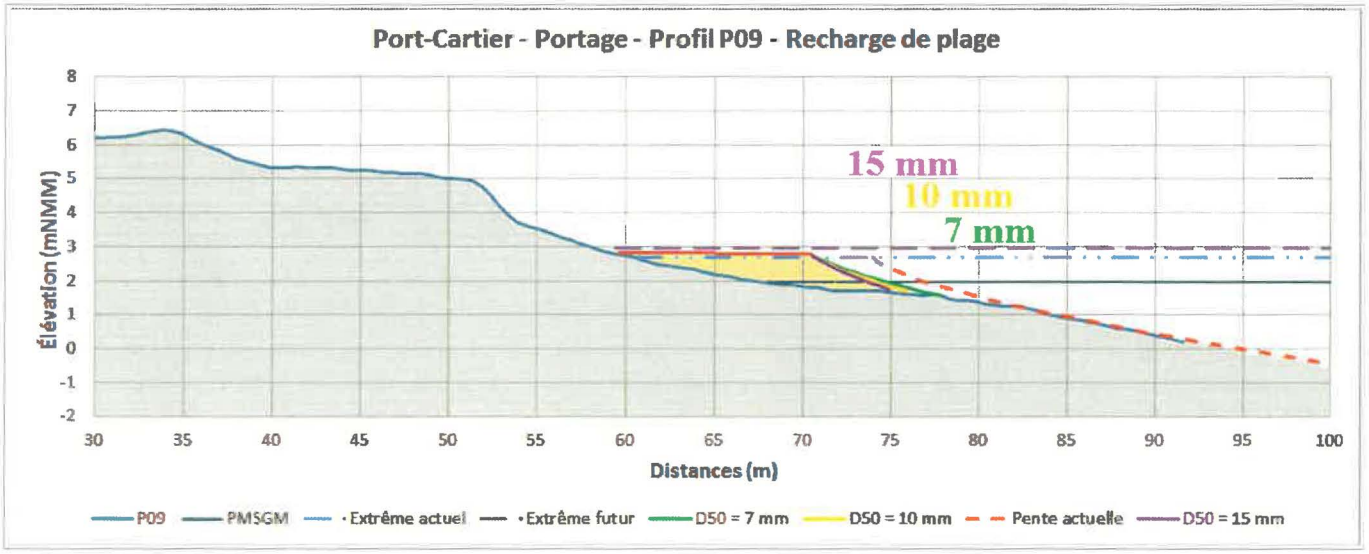


Figure 8.24 Profil P09 Portage - Profil de recharge de plage – D_{50} = 7, 10 et 15 mm

8.10 Coupes-types de recharge de plage du secteur Pointe-aux-Anglais

Les figures 8.25 à 8.27 illustrent les profils d'équilibre de plage qui seraient rechargées avec sédiments ayant des valeurs caractéristiques du diamètre médian D_{50} de 7 mm, 10 mm et 15 mm au droit des profils P29, P19 et P13 du secteur Pointe-aux-Anglais.

Le profil P19 illustre la problématique d'un tel projet de recharge de plage dans un secteur où passe un ruisseau sur la plage. Comme il ne faut pas obstruer l'écoulement du ruisseau, la mise en place de la recharge doit s'arrêter au droit du ruisseau, ce qui fragilise beaucoup la recharge de plage envisagée. Il est en fait difficile de penser qu'un projet de recharge de plage dans les secteurs Portage et Pointe-aux-Anglais puisse être viable sans adresser la problématique des ruisseaux qui traversent la plage. Une possibilité

d'intervention comprendrait la recharge de plage et la mise en place d'un épi en galets et cailloux du côté sud de chaque ruisseau traversant la plage. Même ce concept qui augmenterait significativement le coût des travaux de recharge de plage doit être validé au niveau des détails de construction de ces épis (composition, coupe-type, longueur, etc.).

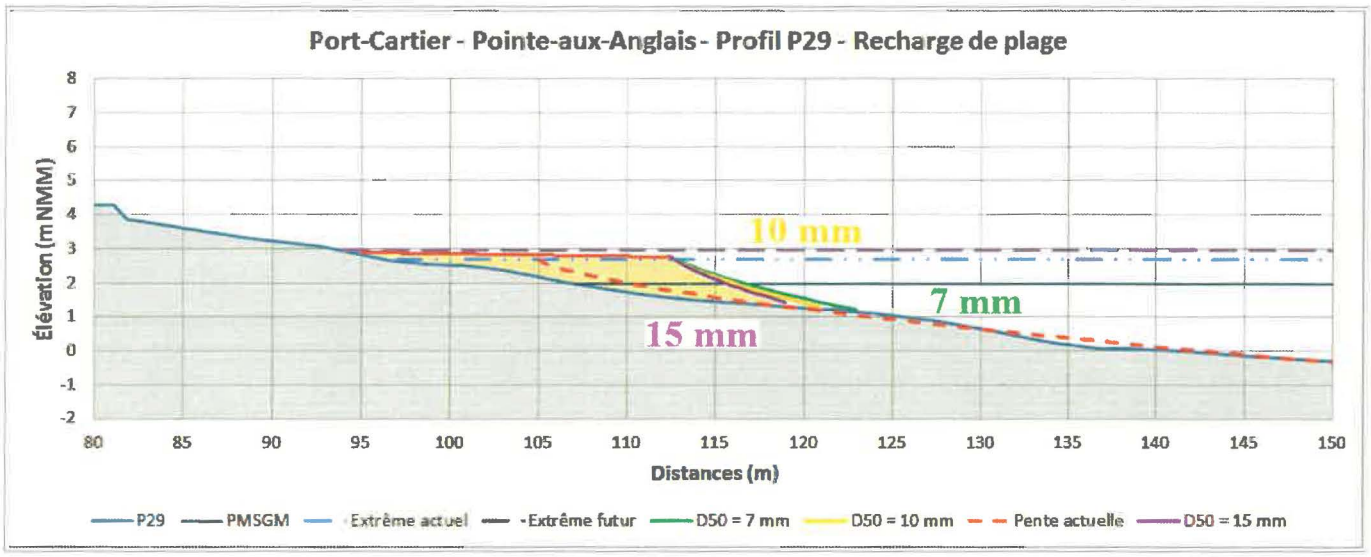


Figure 8.25 Profil P29 Pointe-aux-Anglais - Profil de recharge de plage – D_{50} = 7, 10 et 15 mm

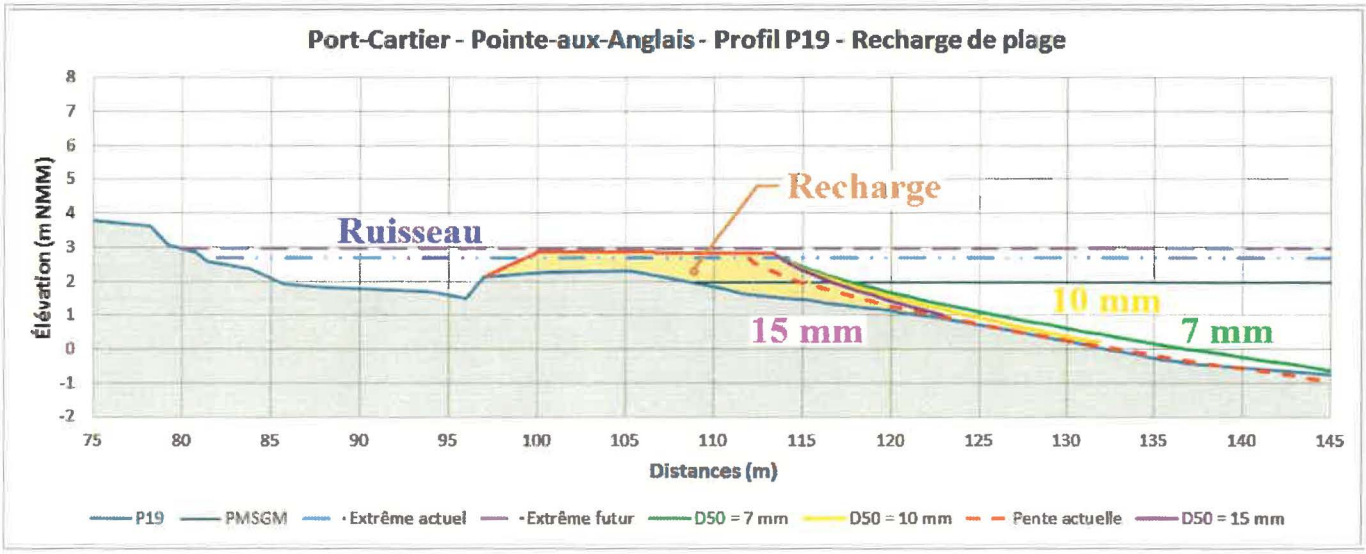


Figure 8.26 Profil P19 Pointe-aux-Anglais - Profil de recharge de plage – D_{50} = 7, 10 et 15 mm

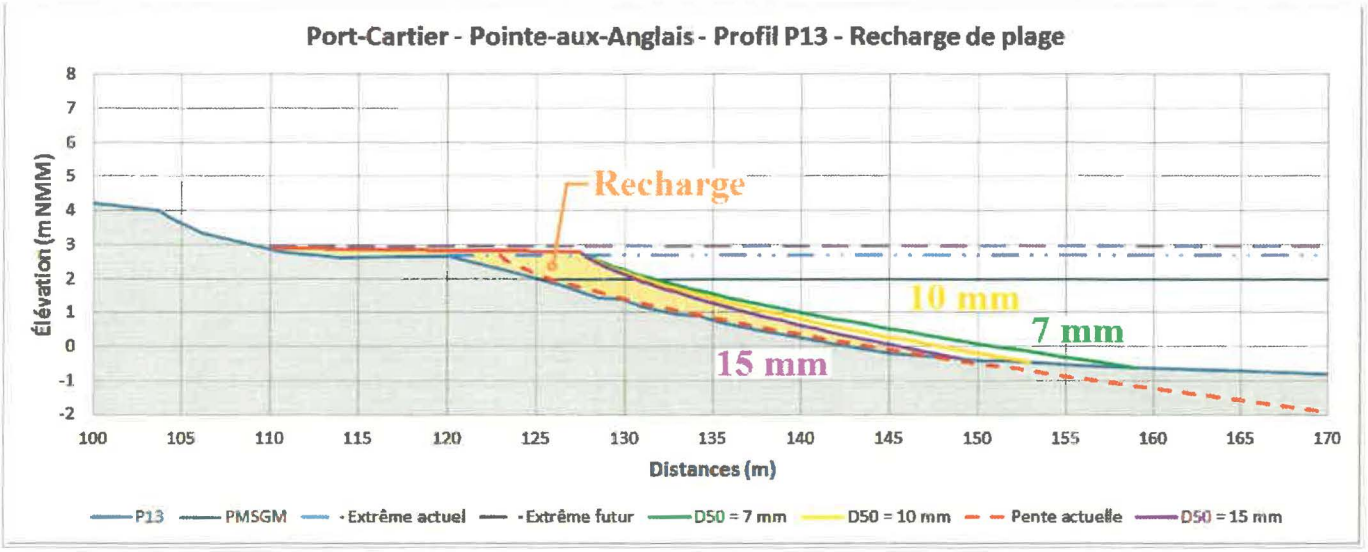


Figure 8.27 Profil P13 Pointe-aux-Anglais - Profil de recharge de plage – D_{50} = 7, 10 et 15 mm

8.11 Évaluation des quantités de matériel de recharge - Secteur Rochelois

Une évaluation sommaire a été faite des quantités de matériaux qu'impliquerait un projet de recharge de la plage du secteur Rochelois à Port-Cartier. La zone concernée par cette recharge de plage touche les profils P04 à P16, soit environ 650 m de longueur de plage (figure 8.28).

Afin de s'assurer de la stabilité du matériel de recharge de plage dans ce secteur, la mise en place d'épis aux extrémités de la zone rechargée s'avère indispensable. Du côté ouest, la présence d'un émissaire pluvial requiert la mise en place d'une protection empêchant les matériaux de recharge de venir bloquer la sortie de l'émissaire. Du côté est, si l'épi n'est pas mis en place, il est à craindre un déplacement régulier et important des sédiments vers la baie située à l'est de ce secteur. Il est probable que cette "fuite" des sédiments vers la baie située à l'est explique au moins en partie le recul de berge observé dans ce secteur.

Les estimations préliminaires de volumes de recharge de plage requis pour ce projet sont :

- **20 700 m³** pour un **D_{50} de 5 mm** entre les profils P04 et P16,
- **12 300 m³** pour un **D_{50} de 10 mm** entre les profils P04 et P16.

Une option intermédiaire consisterait à utiliser des sédiments plus grossiers (D_{50} de 10 mm) dans la moitié Est de la plage (profils P11 à P16) alors que des sédiments plus fins (D_{50} de 5 mm) seraient mis en place dans la moitié Ouest de la plage (profils P04 à P11).

Les volumes de pierre requises pour les épis seraient de l'ordre de **1 900 m³** pour un matériel de recharge présentant un D_{50} de 5 mm et de **1 800 m³** pour un matériel de recharge présentant un D_{50} de 10 mm.

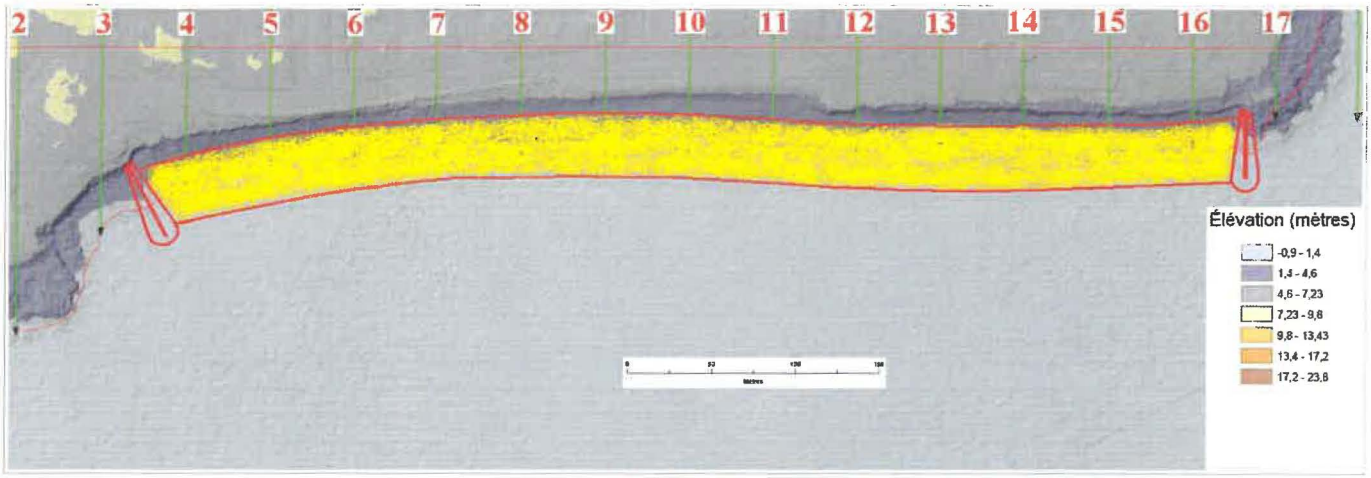


Figure 8.28 Vue en plan du projet de recharge de plage proposé

8.12 Coûts estimatifs du projet de recharge de plage du secteur Rochelois

Avec un coût probable des matériaux de l'ordre de 45 $/m^3$ pour le sédiments de 5 mm de D_{50} et de 50 $/m^3$ pour le sédiments de 10 mm de D_{50}, un coût probable de la pierre de l'ordre de 90 $/m^3$, une organisation de chantier de 12 %, des études diverses (ingénierie, contrôle-qualité des matériaux et travaux) de 15 % et des contingences de 20 %, on parlerait de projets de l'ordre de :

- **1 704 000 $** pour un matériel ayant un D_{50} de 5 mm,
- **1 203 000 $** pour un matériel ayant un D_{50} de 10 mm.

Ces coûts incluent les épis et sont donnés hors taxes et excluent les frais annexes spéciaux (étude environnementale approfondie en particulier).

À cette recharge initiale de la plage, il faudrait ajouter des recharges récurrentes, probablement aux 10 à 15 ans selon le type de matériaux retenu pour la recharge. Plus le matériau est grossier, moins les recharges seraient fréquentes et moins les quantités requises seraient importantes, ce qui accroît encore l'intérêt de rechercher des « graviers avec un peu de sable et de galets » avec un D_{50} de 10 mm au lieu de rechercher du « sable et gravier » avec un D_{50} de 5 mm dans le cas de la plage du secteur Rochelois.

Si un gravier adéquat est disponible, il faudrait prévoir recharger environ les deux tiers des quantités initiales pendant la **vie utile de 35 ans** du rechargement de plage (en au moins deux opérations de recharge de plage). Ceci correspondrait à un coût additionnel de **960 000 $** pour un matériel ayant un D_{50} de 5 mm et de **636 000 $** pour un matériel ayant un D_{50} de 10 mm. Ces montants excluent les taxes.

8.13 Évaluation des quantités de matériel de recharge - Secteur McCormick

Une évaluation sommaire a été faite des quantités de matériaux qu'impliquerait un projet de recharge de la plage du secteur McCormick à Port-Cartier. La zone concernée par cette recharge de plage touche les profils P09 à P13, soit environ 190 m de longueur de plage (figure 8.29).

Les estimations préliminaires de volumes de recharge de plage requis pour ce projet sont :

- **6 700 m³** pour un **D_{50} de 5 mm** entre les profils P09 et P13,
- **4 500 m³** pour un **D_{50} de 10 mm** entre les profils P09 et P13.

Les volumes requis de pierre de protection de type rip-rap en pied de falaise seraient de **440 m³**.

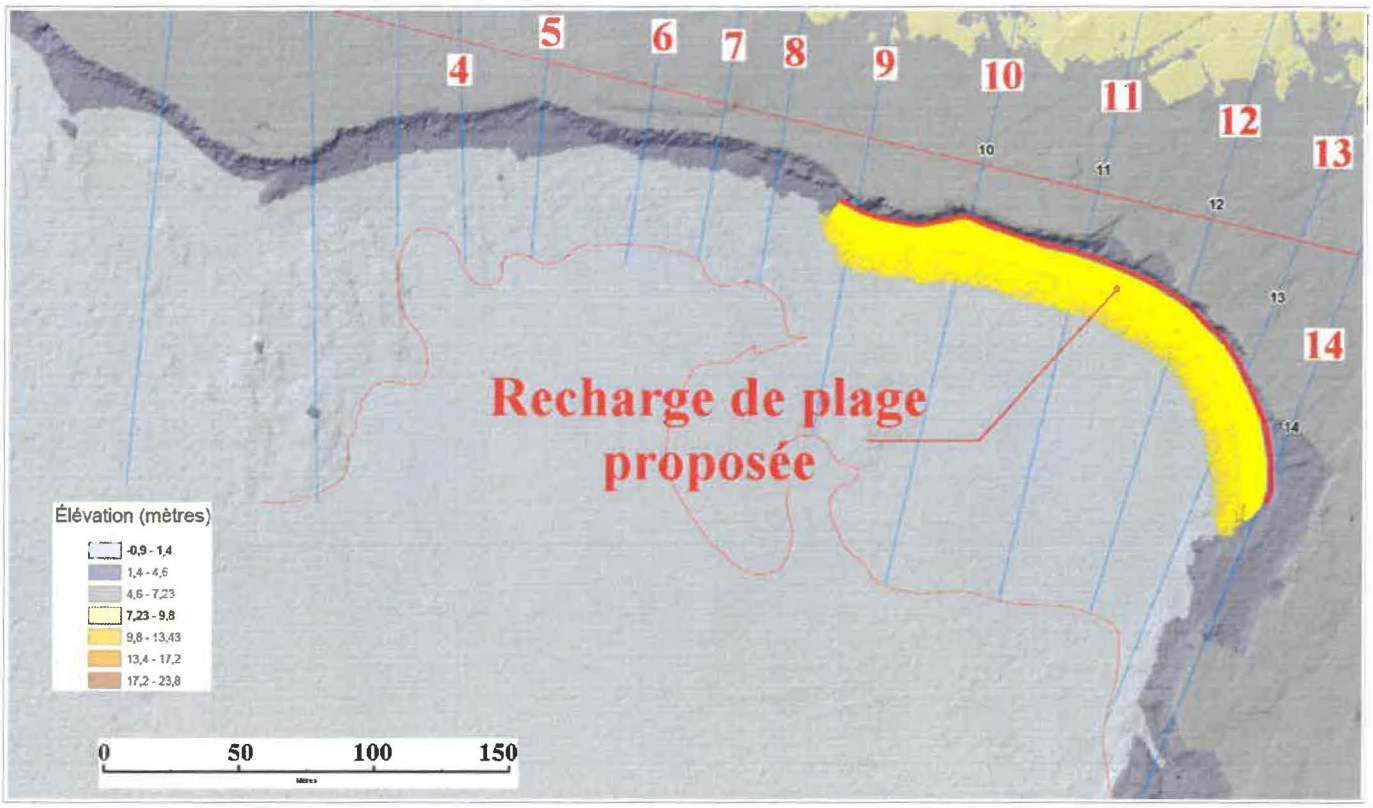


Figure 8.29 Vue en plan d'un projet de recharge du secteur McCormick

8.14 Coûts estimatifs du projet de recharge de plage du secteur McCormick

Avec un coût probable des matériaux de l'ordre de 45 \$/m³ pour le sédiments de 5 mm de D_{50} et de 50 \$/m³ pour le sédiments de 10 mm de D_{50}, un coût probable de la pierre de l'ordre de 80 \$/m³, une organisation de chantier de 12 %, des études diverses (ingénierie, contrôle-qualité des matériaux et travaux) de 15 % et des contingences de 20 %, on parlerait de projets de l'ordre de :

- **530 000 $** pour un matériel ayant un D_{50} de 5 mm,
- **400 000 $** pour un matériel ayant un D_{50} de 10 mm.

Ces coûts incluent le rip-rap et sont donnés hors taxes et excluent les frais annexes spéciaux (étude environnementale approfondie en particulier).

À cette recharge initiale de la plage, il faudrait ajouter des recharges récurrentes, probablement aux 10 à 15 ans selon le type de matériaux retenu pour la recharge. Plus le matériau est grossier, moins les recharges seraient fréquentes et moins les quantités requises seraient importantes, ce qui accroît encore l'intérêt de rechercher des « graviers avec un peu de sable et de galets » avec un D_{50} de 10 mm au lieu de rechercher du « sable et gravier » avec un D_{50} de 5 mm dans le cas de la plage du secteur McCormick.

Si un gravier adéquat est disponible, il faudrait prévoir recharger environ les deux tiers des quantités initiales pendant la **vie utile de 35 ans** du rechargement de plage (en au moins deux opérations de recharge de plage). Ceci correspondrait à un coût additionnel de **313 000 $** pour un matériel ayant un D_{50} de 5 mm et de **231 000 $** pour un matériel ayant un D_{50} de 10 mm. Ces montants excluent les taxes.

8.15 Évaluation des quantités de matériel de recharge - Secteur Portage

Une évaluation très sommaire a été faite des quantités de matériaux qu'impliquerait un projet de recharge de la plage du secteur Portage à Port-Cartier. La zone concernée par cette recharge de plage toucherait les profils P01 à P40, soit environ 3 900 m de longueur de plage.

En moyenne, on parlerait d'environ 16 m^3/m de matériaux de recharge, soit 16 000 m^3 de gravier et sable pour un kilomètre de plage rechargée.

Dans cette zone, il y a quatre ruisseaux qui traversent la plage pour lesquels il serait nécessaire de prévoir la stabilisation pour éviter que la recharge de plage soit détruite par endroits. Pour fins budgétaires, une quantités de 1 500 m^3 de galets et cailloux a été prévue par km de recharge de plage pour stabiliser les ruisseaux. Aucun concept n'appuie ce chiffre qui pourrait significativement varier selon la solution retenue.

8.16 Coûts estimatifs du projet de recharge de plage du secteur Portage

Avec un coût probable des matériaux de l'ordre de 50 $/m^3$ pour les sédiments de 10 mm de D_{50}, un coût probable des galets et cailloux de l'ordre de 80 $/m^3$, une organisation de chantier de 12 %, des études diverses (ingénierie, contrôle-qualité des matériaux et travaux) de 15 % et des contingences de 20 %, on parlerait de projets de l'ordre de **1 450 000 $ par km de plage** rechargée pour un matériel ayant un D_{50} de 10 mm.

Ces coûts sont donnés hors taxes et excluent les frais annexes spéciaux (étude environnementale approfondie en particulier).

À cette recharge initiale de la plage, il faudrait ajouter des recharges récurrentes, probablement aux 7 à 15 ans selon le type de matériaux retenu pour la recharge. Plus le matériau est grossier, moins les recharges seraient fréquentes et moins les quantités requises seraient importantes, ce qui accroît encore l'intérêt de rechercher des « graviers avec un peu de sable et de galets » avec un D_{50} de 10 mm.

Si un gravier adéquat est disponible, il faudrait prévoir recharger environ la quantité initiale pendant la **vie utile de 35 ans** du rechargement de plage (en au moins trois opérations de recharge de plage). Ceci correspondrait à un coût additionnel de **1 250 000 $ par km de plage** rechargée pour un matériel ayant un D_{50} de 10 mm. Ces montants excluent les taxes.

8.17 Évaluation des quantités de matériel de recharge - Secteur Pointe-aux-Anglais

Une évaluation très sommaire a été faite des quantités de matériaux qu'impliquerait un projet de recharge de la plage du secteur Pointe-aux-Anglais à Port-Cartier. La zone concernée par cette recharge de plage toucherait les profils P09 à P30, soit environ 2 500 m de longueur de plage.

En moyenne, on parlerait d'environ 18 m^3/m de matériaux de recharge, soit 18 000 m^3 de gravier et sable pour un kilomètre de plage rechargée.

Dans cette zone, il y a trois ruisseaux qui traversent la plage pour lesquels il serait nécessaire de prévoir la stabilisation pour éviter que la recharge de plage soit détruite par endroits. Pour fins budgétaires, une quantités de 1 500 m^3 de galets et cailloux a été prévue par km de recharge de plage pour stabiliser les ruisseaux. Aucun concept n'appuie ce chiffre qui pourrait significativement varier selon la solution retenue.

8.18 Coûts estimatifs du projet de recharge de plage du secteur Pointe-aux-Anglais

Avec un coût probable des matériaux de l'ordre de 50 $\$/m^3$ pour les sédiments de 10 mm de D_{50}, un coût probable des galets et cailloux de l'ordre de 80 $\$/m^3$, une organisation de chantier de 12 %, des études diverses (ingénierie, contrôle-qualité des matériaux et travaux) de 15 % et des contingences de 20 %, on parlerait de projets de l'ordre de **1 600 000 $ par km de plage** rechargée pour un matériel ayant un D_{50} de 10 mm.

Ces coûts sont donnés hors taxes et excluent les frais annexes spéciaux (étude environnementale approfondie en particulier).

À cette recharge initiale de la plage, il faudrait ajouter des recharges récurrentes, probablement aux 7 à 15 ans selon le type de matériaux retenu pour la recharge. Plus le matériau est grossier, moins les recharges seraient fréquentes et moins les quantités requises seraient importantes, ce qui accroît encore l'intérêt de rechercher des « graviers avec un peu de sable et de galets » avec un D_{50} de 10 mm.

Si un gravier adéquat est disponible, il faudrait prévoir recharger environ la quantité initiale pendant la **vie utile de 35 ans** du rechargement de plage (en au moins trois opérations de recharge de plage). Ceci correspondrait à un coût additionnel de **1 400 000 $ par km de plage** rechargée pour un matériel ayant un D_{50} de 10 mm. Ces montants excluent les taxes.

9 Échéancier et étapes de réalisation

9.1 Étapes de réalisation

Les travaux de protection des berges des quatre (4) sites à l'étude, étant situés dans un cours d'eau, sont assujettis à la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE). En vertu de cette loi, diverses autorisations sont requises de la part du ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) pour la réalisation de ces travaux selon l'envergure de ceux-ci.

Ainsi, tout projet de remblayage dans un cours d'eau sur une distance de 300 m ou plus est assujetti à la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement en vertu de l'article 31 de la LQE.

Par la suite, le MDDEFP peut transférer le dossier au Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE), ce qui peut mener à un processus d'audiences publiques pour le projet.

Dans le cas qui nous concerne, trois (3) des quatre (4) sites à l'étude (Rochelois, Portage et Pointe-aux-Anglais) sont assujettis à la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement en raison de leur longueur. Seul le site McCormick n'y est pas assujetti.

Dans le cadre du processus d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement et du processus d'audiences publiques, les délais pour l'obtention des autorisations de réalisation des travaux peuvent atteindre jusqu'à deux (2) ans. Pendant ce processus, toutes les étapes de recherche de financement, d'étude géotechnique et de préparation de plans et devis pourraient être effectuées en parallèle.

Pour ce qui est du site McCormick, ces travaux sont assujettis à l'article 22 de la LQE, puisqu'il s'agit de travaux en milieu aquatique. Le processus d'obtention du certificat d'autorisation est habituellement d'une période de 90 jours. Lors du dépôt de cette demande, des plans préliminaires doivent être joints. Le processus de préparation des plans et devis est d'une durée approximative de 60 jours et doit débuter environ 30 jours avant le dépôt de la demande de certificat d'autorisation auprès du MDDEFP.

Avant de débuter le processus de plans et devis pour le site McCormick, la méthode de financement ainsi que les subventions disponibles auprès du ministère de la Sécurité publique (MSP) devront être déterminées par la Ville.

Dans tous les cas, le Ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) pourrait être impliqué dans l'analyse des projets à cause de leur empiétement sur l'habitat du poisson. De plus, des compensations pourraient être demandées dans le cas où il y aurait perte d'habitat du poisson.

9.2 Échéancier de réalisation

Les tableaux suivants présentent sommairement l'échéancier préliminaire des différentes étapes de réalisation des travaux selon chacun des sites.

Tableau 9.1 Échéancier site McCormick

Étapes	Échéancier
Détermination de la méthode de financement et des subventions disponibles	Septembre à octobre 2013
Étude géotechnique	Novembre 2013
Plans et devis	Novembre 2013 à février 2014
Demande de certificat d'autorisation en vertu de l'article 22	Janvier à mars 2014
Réalisation des travaux	Juin à août 2014

Tableau 9.2 Échéancier sites Rochelois, Portage et Pointe-aux-Anglais

Étapes	Échéancier
Processus d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement	Octobre 2013 à octobre 2015
Détermination de la méthode de financement et des subventions disponibles	Mars à avril 2015
Étude géotechnique	Mai 2015
Plans et devis	Mai à octobre 2015
Réalisation des travaux secteur Rochelois	Mai à août 2016
Réalisation des travaux secteur Pointe-aux-Anglais	Mai à novembre 2017
Réalisation des travaux secteur Portage	Mai à novembre 2018

Il est à noter que les dates avancées dans les tableaux précédents sont sujettes à changement en fonction des délais d'analyse et de prise de décision des différents intervenants.

10 Méthode de construction

10.1 Origine des matériaux

Les pierres de carapace et la pierre rip-rap devront répondre à certains critères de qualité afin d'assurer la pérennité des ouvrages de protection. Une vérification de la qualité de la pierre, des tailles, de la résistance au gel-dégel, etc. devra être faite au cours des travaux.

Les matériaux de recharge de plage devront aussi répondre à certains critères de qualité, mais le principal contrôle se fera au niveau de la granulométrie des matériaux fournis sur le site qui devra respecter un fuseau granulométrique défini dans le devis. Plusieurs sources de matériaux pourraient être mises à contribution pour obtenir la granulométrie requise. Dans ce cas, le mélange est prévu se faire sur la plage.

10.2 Ancrage du pied de l'enrochement

Les enrochements de protection de berge devront être ancrés dans la plage afin d'éviter les problèmes d'affouillement.

Aux endroits où du roc sera rencontré en surface, des dispositions particulière devront être mises en place pour assurer la stabilité des ouvrages (vagues et glace).

10.3 Mise en place des pierres de protection

La mise en place des pierres de protection se fera probablement à l'aide de pelles hydrauliques (excavation de la tranchée, mise en place des pierres et déplacement de pierres mal placées). Il sera requis de s'assurer que la circulation de la machinerie sur la plage se limitera au strict minimum. De plus, cette circulation sur la plage ne pourra pas se faire en tout temps à cause de la marée. Il faudra donc que l'entrepreneur évalue sa méthode de travail en tenant compte des restrictions rattachées à la marée.

Les pierres de protection doivent être déposées par la pelle et non déversées dans la pente. Le déversement occasionnerait trop de bris des pierres et trop de pierres mal placées ou non stabilisées dans les pentes.

La présence de la ou des pelles hydrauliques et des camions occasionnera un empiètement sur la chaussée des rues de la municipalité et nécessitera la mise en place de signalisation routière adéquate.

Il serait recommandé de limiter la longueur de travaux de stabilisation de berge pouvant être effectués dans une période de temps donnée pour limiter les inconvénients de ces travaux sur la circulation routière. La période des vacances estivales ne sera sans doute pas une période adéquate pour la réalisation de ces travaux à cause de l'interférence avec les activités récréatives pendant cette période.

10.4 Mise en place de la recharge de plage

Les coupes-types de recharge de plage illustrées précédemment ne montrent que la pente d'équilibre visée pour ce projet de recharge de plage. Cette information sert essentiellement à calculer des quantités de matériaux requises. Les coupes-types de construction qui seront fournies à l'entrepreneur en charge des travaux seront différentes. Pour des questions de coût des travaux et de difficulté de réalisation des pentes d'équilibre, il sera requis de l'entrepreneur de placer les sédiments selon une configuration plus simple pour lui. Ses obligations contractuelles seront de respecter l'élévation de la crête de la plage et les quantités de matériaux par unité de longueur. Les vagues se chargeront de replacer les matériaux selon la pente d'équilibre.

Il sera important de prévenir les résidents que le remaniement important des matériaux qui se passera au cours des premiers mois après les travaux est un processus normal, pris en compte dans le concept de recharge de plage dans le but de réduire les coûts, non une catastrophe et un échec lamentable de ce type de protection de berge.

En fonction des tempêtes qui frapperont les plages de Port-Cartier après les travaux, il pourrait être requis de légèrement régaler les plages.

11 Expertise hydraulique

11.1 Travaux de protection de berge

Les travaux de protection de berge envisagés le long des secteurs Rochelois et McCormick à Port-Cartier sont situés en milieu urbain (voir figure 3.2).

La plage le long du secteur Rochelois est composée de sable en partie supérieure de la plage et d'un mélange de sable, gravier et cailloux dans le bas de la plage.

La plage et la falaise en érosion le long du secteur McCormick sont composées surtout de sable et gravier.

Du roc en surface est présent par endroits dans les deux secteurs.

Des tentatives de protection de la berge du secteur McCormick ont été faites dans le passé par le biais d'enrochements de grosseurs variables placés au pied de la falaise en érosion. Ces enrochements semblent en général avoir été relativement efficaces pour protéger la berge, mais ont probablement provoqué la disparition de la plage, ce qui posera des problèmes à long terme.

11.2 Limites des travaux

Les limites des zones concernées par les travaux de protection de berges des secteurs Rochelois et McCormick sont indiquées sur les figures 7.8 et 7.9 pour l'enrochement linéaire et les figures 8.28 et 8.29 pour les recharges de plage.

Pour le secteur Rochelois, deux zones où le roc est affleurant limitent la zone d'intervention. Pour la recharge de plage, la limite ouest de la zone d'intervention correspond à l'émissaire d'eau pluviale.

Pour le secteur McCormick, la zone d'intervention est limitée au nord par des enrochements en place et au sud par du roc affleurant.

11.3 Effets des travaux sur la cellule hydrosédimentaire

Le **secteur Rochelois** est une cellule sédimentaire semi-ouverte, surtout à son extrémité Est. Il est probable que les problèmes d'érosion de berge qu'a connu ce secteur proviennent en partie du fait que le sable de la plage a pu migrer sans trop de restriction vers l'est et le fond de la baie avoisinante. Il est également possible que les bancs de sable que l'on aperçoit sur la photo disponible sur Google™ Earth (figure 3.2) ont été formés en partie avec le sable retiré de la plage. La comparaison des relevés de 2008 et 2012 montre des mouvements relativement important des sédiments à l'intérieur même de la baie.

L'enrochement de la berge du secteur Rochelois va accentuer le déplacement du sable encore présent dans cette baie vers l'est ou le large. De plus l'enrochement va tarir la source de sédiments que constitue

l'érosion de berge en cours. Le déficit sédimentaire déjà observé va s'accentuer avec la mise en place d'un enrochement le long de la berge.

La mise en place d'une recharge de plage dans le secteur Rochelois va fournir les matériaux permettant à la plage de se reconstruire, va protéger ce secteur de façon plus efficace et plus durable qu'un enrochement linéaire et va préserver le potentiel récréotouritique de ce secteur. La mise en place des épis de part et d'autre de la recharge de plage va limiter la migration latérale de ces sédiments vers l'est. La granulométrie de sédiments recommandée (D_{50} = 10 mm) devrait également diminuer la propension des sédiments à migrer vers le large. Des opérations de recharge récurrente seront nécessaires pour pérenniser la plage à long terme.

Le **secteur McCormick** est une cellule sédimentaire relativement fermée. Les travaux de protection en enrochement qui ont été faits au nord et à l'ouest de la zone à l'étude ont probablement accentué l'instabilité des sédiments de la plage causée par les tempêtes devenues plus fréquentes avec la disparition des glaces dans le golfe du Saint-Laurent.

L'enrochement de la berge du secteur McCormick devrait couper tout apport sédimentaire en provenance de la berge. Il est donc probable que l'abaissement de la plage va s'accentuer suite à ce genre de travaux et que les sédiments vont être entraînés vers le large ou le nord.

La mise en place d'une recharge de plage complétée par une protection mineure en enrochement (rip-rap) du pied de la falaise en érosion dans le secteur McCormick va permettre à une plage de se reconstruire dans ce secteur, limiter l'érosion de la falaise et protéger la berge de façon plus efficace et plus durable que les enrochements linéaires. Idéalement, ce type de protection de berge devrait être étendu plus au nord. Une partie des sédiments de la recharge envisagée va migrer dans cette direction, mais la présence des enrochements linéaires actuellement en place risque de nuire à leur rétention près de la berge et d'augmenter les besoins en recharges récurrentes. Une façon de réduire cette vulnérabilité de la partie nord de la recharge serait d'utiliser des matériaux de recharge plus grossiers (plus de graviers et galets) à l'extrémité nord de la zone de recharge de plage.

Les secteurs de **Portage** et **Pointe-aux-Anglais** forment une cellule hydrosédimentaires ouverte aux deux extrémités. Les sédiments entrent par l'embouchure de la rivière Pentecôte et sortent à l'extrémité sud du secteur Pointe-aux-Anglais.

La technique de l'enrochement linéaire de la berge est à prohiber dans ces secteurs. Chaque intervention sera accompagnée d'un important effet de bout à son extrémité sud.

La mise en place d'une recharge de plage complétée par une relative stabilisation du lit des ruisseaux qui traversent la plage permettrait de renforcer la stabilité de la plage à moyen et long terme si les recharges récurrentes sont effectuées.

11.4 Durée de vie des travaux

La durée de vie des travaux de protection de berges est normalement de 35 ans sans interventions autres que de l'entretien. Pour une recharge de plage, cette durée de vie utile n'est atteinte qu'en fonction de recharges récurrentes.

Il est probable qu'après ces 35 années, certains travaux de réfection seront requis, surtout si le rehaussement du niveau moyen de l'eau se produit selon les scénarios pessimistes.

11.5 Méthodes de travail

Les méthodes de travail recommandées sont décrites au chapitre 9 du présent rapport.

11.6 Inspection et entretien

Des inspections annuelles (de préférence au printemps) sont recommandées sur ces types d'ouvrage pour détecter à l'avance les problèmes potentiels. L'entretien nécessaire pour maintenir le bon état et la pérennité des travaux de protection de berges est normalement minime si le contrôle de qualité requis a été fait lors de la construction.

Un suivi de rehaussement du niveau des océans serait recommandé pour évaluer à l'avance les conséquences des modifications importantes qui pourraient se produire à une échelle régionale suite à ces changements du niveau moyen de l'eau.

12 Empiétement sur le milieu marin

12.1 Limite du milieu marin

Le niveau du terrain à partir duquel commence le milieu marin à Port-Cartier est approximativement situé d'après les données de niveaux d'eau du SDMM à l'élévation :

- +2,4 m NMM pour le MDDEFP (récurrence 2 ans) et
- +2,5 m NMM pour le MPO (récurrence 5 ans).

12.2 Superficies d'empiétement sur le milieu marin

L'empiétement sur le milieu marin provoqué par les travaux de protection de la berge le long des quatre secteurs (Rochelois, McCormick, Portage et Pointe-aux-Anglais) va dépendre du type de solution retenue. Un calcul de cet empiétement devra être fait à partir des coupes-types de l'enrochement ou de la recharge de plage proposés et des relevés d'arpentage disponibles.

13 Conclusion et recommandations

13.1 Conclusion

Suite à une évaluation des variations de niveau d'eau et de hauteur de vagues de tempêtes devant Port-Cartier, la présente étude de concepts de protection de berge des secteurs Rochelois et McCormick a permis de définir les paramètres géométriques selon lesquels il serait possible de mettre en place ces protections de berge durables sans empiéter de façon trop importante sur le domaine marin. Les concepts évalués ont été ceux :

- d'un enrochement linéaire le long de la plage (Rochelois) ou au pied de la falaise en érosion (McCormick),
- d'une recharge de plage avec deux types de matériaux (D_{50} de 5 et 10 mm) complétée pour le secteur McCormick par un rip-rap en pied de falaise.

Les projets de recharge de plage (D_{50} de 10 mm) se sont révélés du même ordre de grandeur de coût que les projets d'enrochements et devraient être nettement plus efficaces à long terme pour protéger la berge contre des événements exceptionnels (tempêtes accompagnées de très hauts niveaux d'eau).

Pour les secteurs de Portage et Pointe-aux-Anglais, si une intervention devait être faite, il faudrait que ce soit par recharge de plage en gravier et sable (D_{50} de 10 mm ou plus).

Le tableau suivant résume les différents coûts des projets évalués. **Pour les secteurs de Portage et Pointe-aux-Anglais, les coûts approximatifs sont indiqués par km de rive rechargée.**

Tableau 12.1 Résumé des coûts des différents projets évalués

Secteur	Enrochement linéaire	Recharge de plage					
		D_{50} = 5 mm			D_{50} = 10 mm		
		1e recharge	Recharges récurrentes	Total	1e recharge	Recharges récurrentes	Total
Rochelois	**1 300 000**	1 704 000	960 000	**2 664 000**	1 203 000	636 000	**1 839 000**
McCormick	**370 000**	530 000	313 000	**843 000**	400 000	231 000	**631 000**
Portage	-	-	-	-	1 450 000	1 250 000	**2 700 000**
Pointe-aux-Anglais	-	-	-	-	1 600 000	1 400 000	**3 000 000**

13.2 Recommandations

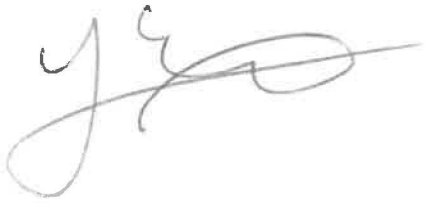
Suite à cette évaluation, les travaux recommandés seraient la mise en place d'une protection de berge sous forme d'une recharge de plage avec des matériaux présentant un diamètre médian D_{50} de l'ordre de 10 mm sur les deux secteurs urbains en érosion (Rochelois et McCormick) afin d'arrêter le processus d'érosion de la berge qui met en péril les infrastructures urbaines et les résidences, sans risquer de subir les inconvénients d'une protection en enrochements linéaire (disparition de la plage, plus grande susceptibilité du rivage aux événements extrêmes). D'autre part, la recharge de plage constituerait une revalorisation du secteur qui bénéficierait aussi bien aux résidents qu'aux autres usagers du secteur.

Pour les secteurs de Portage et Pointe-aux-Anglais, l'exposition de la plage aux tempêtes rend assez onéreux le coût de la seule intervention envisageable, soit la recharge de plage à l'aide de matériaux présentant un diamètre médian D_{50} de l'ordre de 10 mm. De plus, il resterait à résoudre la problématique des ruisseaux qui traversent la plage. Ces ruisseaux constituent le principal risque pour les infrastructures de ces secteurs en cas de très hauts niveaux d'eau accompagnés de vagues.

La recherche de matériaux adéquats pour la recharge de plage envisagée, disponibles à proximité de Port-Cartier, reste à faire. Il est probable qu'un mélange de matériaux de différentes sources sera requis pour respecter le fuseau granulométrique qui sera recommandé dans le devis.

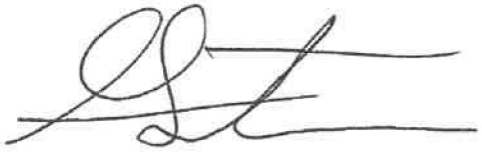
Certaines précautions ont été prises lors de l'élaboration des concepts par rapport au rehaussement du niveau moyen des océans dans le cadre des changements climatiques. Par contre, les prévisions de rehaussement du niveau d'eau varient beaucoup selon les sources. Il serait prudent de suivre l'évolution de ces provisions du rehaussement des niveaux d'eau pour prévenir des problèmes de stabilité à long terme de la protection de berge envisagée.

Préparé par :



Yann Ropars, ing., M. Sc.

Approuvé par :



François Landry-Latour, ing.