

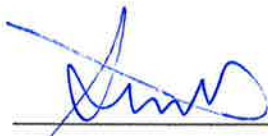
Municipalité des Îles-de-la-Madeleine

Demande de décret de soustraction en vertu de l'article 31.7.1, Chapitre Q-2

Projet de recharge de plage, secteur de La Grave

7 février 2020

Préparé par :



Anne-Gabrielle Nolet, ing. jr
(#5075825)

Révisé par :



Dominic Lachance, ing.
(#5005915)

 2020-02-07



Table des matières

TABLE DES MATIÈRES	2
DEMANDE DE DÉCRET DE SOUSTRACTION	4
1 MISE EN CONTEXTE	1
2 SINISTRES RÉELS	2
3 SINISTRES APPRÉHENDÉS	3
3.1 CONSÉQUENCES ASSOCIÉES AUX CHANGEMENT CLIMATIQUES	3
3.2 CONSÉQUENCES ASSOCIÉES AUX ALÉAS CÔTIERS	4
3.3 CONSÉQUENCES ASSOCIÉES À LA SÉCURITÉ PUBLIQUE	4
3.4 CONSÉQUENCES DE NATURE ÉCONOMIQUE	4
3.5 CONSÉQUENCES DE NATURE SOCIALE	5
4 ANALYSE DES SOLUTIONS ALTERNATIVES	6
4.1 PROTECTION EN ENROCHEMENT	6
4.2 RECHARGE DE PLAGE AU MOYEN DE SABLE	7
4.3 RECHARGE DE PLAGE AVEC ÉPIS	7
4.4 RECHARGE DE PLAGE AVEC BUTÉE DE PIED	7
4.5 RECHARGE DE PLAGE AVEC MATÉRIAUX GROSSIERS	8
4.6 BRISE-LAMES SUBMERSIBLE AU LARGE	8
4.7 RELOCALISATION STRATÉGIQUE	9
4.8 RIP-RAP	9
4.9 VOIE DE CONTOURNEMENT	9
4.10 NON-INTERVENTION	10
5 DESCRIPTION SOMMAIRE DES TRAVAUX	10
6 CONSULTATION DE LA POPULATION	11
7 ÉCHÉANCIER DES TRAVAUX	12

**ANNEXES**

ANNEXE 1 : PROJET DE RECHARGE COMPLÈTE (EXTRAIT DE ROPARS, 2018)

ANNEXE 2 : ÉVOLUTION CÔTIÈRE

ANNEXE 3 : ÉPAISSEUR D'EAU AU-DESSUS DU SOL ATTENDUE

ANNEXE 4 : RAPPORT PHOTOGRAPHIQUE

ANNEXE 5 : REVUE MÉDIATIQUE

ANNEXE 6 : ENTENTE DE FINANCEMENT ENTRE LE MINISTÈRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE ET LA MUNICIPALITÉ DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE VISANT LA RÉALISATION DE TRAVAUX DE PROTECTION DES BERGES CONTRE L'ÉROSION CÔTIÈRE DANS LE SECTEUR DE LA GRAVE

ANNEXE 7 : MANDAT D'ACCOMPAGNEMENT DE LA FQM – PROJET DE PROTECTION DU LITTORAL DES SECTEURS DE LA GRAVE ET DE CAP-AUX-MEULES

ANNEXE 8 : AVIS DE PROJET ET DIRECTIVE CONCERNANT LE PROJET DE RECHARGE DE PLAGE – SECTEUR DE LA GRAVE, MUNICIPALITÉ DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE

ANNEXE 9 : ANALYSE DES SOLUTIONS EN ÉROSION CÔTIÈRE DANS LA BAIE DE PLAISANCE, ÎLES-DE-LA-MADELEINE

ANNEXE 10 : ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION EN ZONE CÔTIÈRE AUX ÎLES-DE-LA-MADELEINE

ANNEXE 11 : LA GRAVE – RECHARGE DE PLAGE, ÎLES-DE-LA-MADELEINE, QUÉBEC

ANNEXE 12 : RENCONTRE D'INFORMATION PUBLIQUE – PROJET DE RECHARGE DE PLAGE, SECTEUR LA GRAVE, ÎLES-DE-LA-MADELEINE



FQM

INGÉNIERIE ET
INFRASTRUCTURES



Les Îles-de-la-Madeleine
Municipalité

Demande de décret de soustraction

Article 31.7.1, chapitre Q-2



1 Mise en contexte

Cette demande de décret de soustraction en vertu de l'article 31.7.1 de la Loi sur la qualité de l'environnement (chapitre Q-2) vise le projet de recharge de plage du secteur de La Grave aux Îles-de-la-Madeleine.

En vertu du *Règlement relatif à l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement de certains projets* (chapitre Q-2, r.23.1), annexe 1, partie II, article 2, paragraphe 1^o: « des travaux de dragage, de déblai, de remblai ou de redressement, à quelque fin que ce soit, à l'intérieur de la limite des inondations de récurrence de 2 ans d'une rivière ou d'un lac, sur une distance cumulative égale ou supérieure à 500 m ou sur une superficie cumulative égale ou supérieure à 5 000 m², pour une même rivière ou un même lac », ce projet est assujéti à la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement de certains projets (PÉEIE).

Cependant, les processus d'érosion et de submersion côtière lors des épisodes d'ondes de tempête se produisant dans le secteur causent de graves préjudices aux habitants ainsi que d'importants dommages aux bâtiments et aux infrastructures. Dans le contexte actuel de climat changeant, la fréquence et l'intensité de ces tempêtes sont appelées à augmenter dans le futur, tout comme le risque de « sinistre majeur », tel que défini par la Loi sur la sécurité civile (chapitre S-2.3, article 2, paragraphe 1^o).

L'« ANNEXE 6 : Entente de financement entre le ministère de la Sécurité publique et la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine visant la réalisation de travaux de protection des berges contre l'érosion côtière dans le secteur de La Grave » présente l'entente entre le MSP et la Municipalité en lien avec la planification de travaux financés par le Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2022 du Ministère de la Sécurité publique (MSP), qui soutient la mise en œuvre de travaux de prévention et d'atténuation pour les risques liés à l'érosion et à la submersion côtière.

Le 7 septembre 2019, la tempête tropicale Dorian a touché les Îles-de-la-Madeleine, affectant sévèrement le secteur de La Grave. Les conséquences de cette tempête rendent urgente la mise en œuvre des travaux de protection afin d'assurer la sécurité des personnes et des biens. C'est dans ce contexte que la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine a demandé l'aide de la Direction ingénierie et infrastructures de la Fédération québécoise des municipalités (FQM), en collaboration avec le Ministère de la Sécurité publique (MSP), de préparer la présente demande de soustraction.

Le secteur de La Grave, à Havre-Aubert, est situé sur un cordon littoral d'environ 35 m de largeur. Du côté sud, une marina se trouve dans une lagune à l'abris des vagues. Du côté nord, la plage de la baie de Plaisance est exposée aux vagues du Golfe du Saint-Laurent. Le site est très vulnérable aux épisodes de tempête et à risque de submersion côtière en raison de la faible altitude des terrains et de la forte concentration de bâtiments. Cette géographie particulière confère au site une valeur paysagère non négligeable. Les interventions sur le littoral doivent donc répondre à des impératifs de protection et être conçues de façon à minimiser les impacts négatifs appréhendés, tant au niveau du littoral que des bâtiments et des infrastructures.



Le site regroupe 35 bâtiments (25 commerces et 10 résidences) et est traversé par la route 199 (chemin de La Grave), route nationale qui constitue le lien unique pour les résidents et les commerces du secteur. La plage est constituée d'un mélange de sable et de gravier. Elle se rétrécit vers l'ouest pour devenir négligeable devant le mur érigé par le Ministère des transports (MTQ) afin de protéger la route 199. Cet ouvrage vertical ne favorise pas la rétention des particules fines, ce qui augmente le risque de submersion lors des épisodes de tempête.

La grève est formée de sable et de gravier alluvionnaire et a une pente relativement abrupte à l'est, puis diminue au centre pour s'effacer à l'est. La plage est entourée de falaises en érosion aux deux extrémités. Près de la moitié des côtes sont artificialisées par des enrochements et des blocs de béton, ce qui accélère le phénomène de dégradation du fond marin, qui a une pente faible (entre 0,8 % et 1,1 %) et qui devient rocheux à 300 m au large de la côte.

Tous les terrains concernés par le projet de recharge de plage sont des propriétés privées. L'ensemble des bâtiments du secteur sont desservis par les services publics d'aqueduc et d'égout, dont les infrastructures souterraines sont situées dans l'emprise de la route nationale 199. Les bâtiments sont majoritairement commerciaux et certains sont résidentiels. La valeur totale des bâtiments et infrastructures à protéger est de plus de 5,2 M \$.

2 Sinistres réels

Le secteur de La Grave est très vulnérable à la submersion côtière, particulièrement lors des épisodes d'ondes de tempête. En effet, plusieurs bâtiments se retrouvent inondés, ce qui cause d'importants préjudices aux habitants du secteur. De plus, tous les bâtiments situés au nord de la route 199 sont fortement exposés au déferlement des vagues et à la projection de débris lors des tempêtes, ce qui augmente le risque pour la sécurité des personnes et des biens. Des pannes d'électricité ainsi que la coupure des télécommunications sont également constatées.

Lors de la tempête tropicale Dorian, le 7 septembre 2019, le secteur de La Grave a dû être évacué d'urgence.

Dans une moindre mesure, le secteur de La Grave est également vulnérable à l'érosion côtière, même si le cordon littoral est relativement stable dans le temps, tel que montré à l'« Annexe 2 : Évolution côtière ». Comme la ligne de rivage actuelle se retrouve au même niveau que les bâtiments, les vagues de tempête atteignent facilement ces derniers et peuvent causer d'importants dommages. Le taux de recul de la ligne de rivage est estimé à - 0,23 m/an (donnée tirée de l'« Annexe 10 : Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine », rapport publié par Ouranos en 2016).

Cette situation peut être attribuée à l'artificialisation de la côte, qui entraîne une diminution progressive des dépôts de sédiments. S'ensuit une réduction de la largeur et de l'épaisseur de la plage ainsi qu'une augmentation de la vulnérabilité de tout le segment. L'augmentation des épisodes de tempête accélère également la dégradation de la côte.



L' « Annexe 4 : Rapport photographique » présente un rapport photographique mettant en évidence l'évolution de la situation depuis les 10 dernières années.

L' « ANNEXE 5 : Revue médiatique » présente des articles produits lors des tempêtes de novembre 2018 et septembre 2019. Les extraits traitant du secteur de la Grave sont surlignés afin de faciliter la lecture.

3 Sinistres appréhendés

Comme démontré à la section précédente, le secteur de La Grave est déjà fortement touché par les impacts liés à l'érosion et à la submersion côtière.

Plusieurs facteurs sont à considérer pour déterminer les sinistres appréhendés, tel que les changements dans le régime des tempêtes, la hausse du niveau marin ainsi que la fréquence et l'intensité des épisodes de tempête. Il faut également tenir compte de la disparition des glaces hivernales, qui favorise l'atteinte du cordon littoral par les vagues. Si aucune mesure n'est prise, ces facteurs vont assurément causer des dommages aux bâtiments et infrastructures dans le secteur, ainsi qu'un risque réel pour la population.

Les conséquences liées à cette situation sont nombreuses :

1. Associées aux changements climatiques
2. Associées aux aléas côtiers
3. Associées à la sécurité publique
4. De nature économique
5. De nature sociale

3.1 Conséquences associées aux changement climatiques

Le cordon littoral de La Grave est particulièrement vulnérable aux épisodes de submersion côtière, puisque les élévations du terrain sont d'environ 2 m au-dessus du niveau moyen de la mer (NMM) et que les hauts niveaux d'eau atteignent des élévations entre 1,46 m (période de retour de 1 an) et 2,79m (période de retour de 50 ans tenant compte des changements climatiques). Ces données sont tirées de l' « Annexe 11 : La Grave – Recharge de plage, Îles-de-la-Madeleine, Québec ».

À l' « Annexe 3 : Épaisseur d'eau au-dessus du sol attendue », ces niveaux d'eau (sans vagues) ont été transposés en épaisseur d'eau au-dessus du sol pour le secteur de La Grave. Ces images permettent de constater que le niveau d'eau sans vagues risque de recouvrir complètement le cordon littoral avec une épaisseur d'eau allant jusqu'à 0,5 m pour une période de retour de 50 ans. En considérant les changements climatiques, l'épaisseur d'eau peut aller jusqu'à 1 m. La situation est encore plus critique lorsque les hauts niveaux d'eau se produisent en présence de vagues, avec des élévations entre 2,6 m (période de retour de 1 an) et 3,4 m (période de retour de 50 ans). Le cordon littoral risque alors d'être recouvert d'une épaisseur d'eau jusqu'à 1 m pour une période de retour de 1 an.



3.2 Conséquences associées aux aléas côtiers

Tel que mentionné aux sections précédentes, la fréquence et l'intensité des événements de submersion côtière sont appelées à augmenter dans les prochaines années. Le risque de recouvrement par le cordon littoral d'une épaisseur d'eau allant jusqu'à 1 m est bien présent. En raison de la configuration du secteur, soit les bâtiments et la route 199 se retrouvant au même niveau que la ligne de rivage actuelle, ils sont fortement exposés au déferlement des vagues et à la projection de débris lors des épisodes de tempête, ce qui peut causer des dommages importants tant au niveau de la plage, des bâtiments, des infrastructures et des terrains.

La non-intervention risque de causer des pertes de terrain, la démolition de bâtiments patrimoniaux et commerciaux essentiels à la vitalité économique et touristique du secteur ainsi que des dommages critiques aux bâtiments et infrastructures publiques.

3.3 Conséquences associées à la sécurité publique

Une hauteur d'eau supérieure à 0,5 m, peu importe la vitesse du courant, est considérée comme dangereuse au niveau de la sécurité publique puisqu'elle correspond à la limite de déplacement d'un véhicule de secours ou d'un adulte à pied (Informations tirées de « Le risque inondation – Diagnostic et gestion » écrit par Freddy Vinet et publié chez Lavoisier en 2010). Dans le cas présent, une hauteur d'eau de 0,5 à 1 m peut se produire annuellement et, en plus, est accompagné de déferlement de vagues et de projection de débris, ce qui peut blesser un adulte à pied ou l'entraîner vers le large.

Considérant le régime des tempêtes changeant, les risques de préjudices aux personnes ainsi que les dommages aux bâtiments et aux infrastructures sont de plus en plus importants. De plus, des pannes d'électricité et des coupures au niveau des télécommunications compliquent grandement le travail des services d'urgence ainsi que la mise en place du plan d'intervention.

La submersion de la route 199, lien unique pour le secteur, entraîne son isolement et complique davantage les interventions des équipes des services d'urgence.

3.4 Conséquences de nature économique

Le secteur de La Grave regroupe 10 bâtiments résidentiels et 25 bâtiments commerciaux, qui ont une grande importance économique et touristique pour les Îles-de-la-Madeleine. Le secteur est aussi traversé par la route nationale 199 (chemin de La Grave) sur 600 m, qui constitue un lien unique pour le déplacement des résidents et des commerçants du secteur, ainsi qu'un accès pour le port de Havre-Aubert.

Tous les terrains concernés par le projet de recharge de plage sont des propriétés privées. L'ensemble des bâtiments du secteur sont desservis par les services publics d'aqueduc et d'égout, dont les infrastructures souterraines sont situées dans l'emprise de la route nationale 199. La valeur totale des bâtiments et des infrastructures à protéger est d'environ 5,2 M\$.

Le projet de protection des berges vise la conservation de la valeur des bâtiments, ainsi que le maintien et la consolidation des activités économiques et touristiques du secteur.



Il vise également la réduction des impacts économiques associés aux événements de submersion côtière, soit les dommages matériels ainsi que l'interruption des activités commerciales. En effet, les délais et les coûts associés à la remise en état des lieux suite aux épisodes de tempête seront grandement réduits par la réalisation du projet de protection de la présente demande.

3.5 Conséquences de nature sociale

Le site de La Grave est classé patrimonial depuis 1983, en raison des activités traditionnelles de la pêche y ayant pris place pendant les XIXe et XXe siècles. Un règlement municipal relatif aux plans d'implantation et d'intégration architecturale couvre le site depuis 1994. La construction de nouveaux bâtiments est limitée aux implantations historiques identifiées dans les années 1950, où le site de pêche a atteint son apogée. Cette situation particulière confère une valeur patrimoniale, paysagère, touristique et culturelle importante qui ont été prises en compte dans le processus de sélection de la solution de protection.

La dégradation du site historique de La Grave par les épisodes de tempête successifs entraîne une perte de la valeur d'usage accordée au site par les touristes et les résidents. La valeur d'usage correspond à la valeur accordée par chacun des visiteurs lorsqu'ils se rendent au site patrimonial de La Grave pour profiter de l'atmosphère, des commerces et du paysage.

La dégradation du secteur entraîne également des variations au niveau des comportements touristiques, surtout suite aux événements de submersion, durant la période où la remise en état des lieux n'a pas encore été effectuée.

Il faut également considérer l'insécurité et le stress associés au risque pour la sécurité des personnes et des biens lors des épisodes de tempête de plus en plus fréquents. Cette situation réduit la qualité de vie des propriétaires fonciers du secteur.



4 Analyse des solutions alternatives

L' « **Annexe 9** : Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine », réalisée par la firme d'ingénierie privée Roche en 2011, contient une étude hydraulique ainsi qu'une analyse des solutions pour différents secteurs de la Baie de Plaisance aux Îles-de-la-Madeleine vulnérables à l'érosion côtière a été effectuée, incluant le secteur de La Grave. Les solutions de protection considérées par l'étude sont les suivantes :

- Protection en enrochement
- Recharge de plage :
 - Avec sable
 - Avec épis
 - Avec butée de pied
 - Avec matériaux grossiers
- Construction d'un brise-lames submersible
- Relocalisation d'infrastructures

L'analyse des différentes variantes a permis de conclure qu'une recharge de plage avec des matériaux grossiers serait la meilleure solution au niveau de l'ingénierie.

L' « **Annexe 10** : Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine », rapport réalisé par Ouranos en 2016, contient un analyse économique de différentes options d'adaptation pour le secteur de La Grave, soit :

- Relocalisation stratégique
- Enrochement
- Rip-rap
- Recharge de plage

L'analyse des différentes variantes a permis de conclure qu'une recharge de plage serait la meilleure solution au niveau du rapport coûts-avantages.

Deux autres solutions habituellement considérées pour les secteurs vulnérables à l'érosion côtière sont également exposées dans la présente section :

- Voie de contournement
- Non-intervention

4.1 Protection en enrochement

L'enrochement consiste à mettre en place une couche protectrice de pierres sur la face exposée de la rive afin de limiter la dégradation par érosion.

Selon Roche (**Annexe 9** : Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine), cette solution n'est pas adaptée au caractère récréotouristique du secteur, soit une plage dans un secteur historique.

Selon Ouranos (**Annexe 10** : Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine), le ratio avantages-coûts de la protection en



enrochement est de 11,41, la deuxième plus faible valeur des options envisagées, car cette solution entraîne la dégradation de la plage touristique.

Pour ces raisons, l'enrochement n'est pas une solution envisageable pour le secteur de La Grave.

4.2 Recharge de plage au moyen de sable

La recharge de plage consiste à alimenter une plage avec des matériaux externes afin de compenser sa dégradation dans le but de retrouver un équilibre

Selon Roche (**Annexe 9** : Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine), une recharge de plage au moyen de sable demanderait une quantité très importante de matériel, soit environ 240 000 m³.

Le ratio avantages-coûts de cette option n'a pas été analysé par Ouranos (Annexe 10 : Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine).

Pour cette raison, la recharge de plage au moyen de sable n'est pas une solution envisageable pour le secteur de La Grave.

4.3 Recharge de plage avec épis

Les épis consistent en des murs de roches qui s'avancent dans la mer perpendiculairement à la côte.

Selon Roche (**Annexe 9** : Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine), cette option cause un risque de fuite du sable vers le large, en plus de demander des quantités de matériaux importantes ainsi que des coûts élevés.

Le ratio avantages-coûts de cette option n'a pas été analysé par Ouranos (Annexe 10 : Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine).

Pour ces raisons, la recharge de plage avec épis n'est pas une solution envisageable pour le secteur de La Grave.

4.4 Recharge de plage avec butée de pied

La butée de pied en enrochement, située au bas de la recharge de plage, permet de retenir les matériaux afin d'éviter leur disperserment précoce.

Selon Roche (**Annexe 9** : Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine), cette solution demande d'importantes quantités de sable pour effectuer la recharge, soit environ 145 000 m³ en plus de nécessiter la mise en place d'épis rocheux à tous les 100 m ainsi qu'une butée en enrochement à l'élévation 0 m.



Le ratio avantages-coûts de cette option n'a pas été analysé par Ouranos (Annexe 10 : Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine).

Pour ces raisons, la recharge de plage avec butée de pied n'est pas une solution envisageable pour le secteur de La Grave.

4.5 Recharge de plage avec matériaux grossiers

La recharge de plage avec matériaux grossiers est réalisée à l'aide de gravier.

Selon Roche (**Annexe 9** : Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine), cette option nécessite des volumes moins importants et procure une plus grande stabilité à long terme. Cependant, des études plus poussées en modélisation doivent être réalisées.

Selon Ouranos (Annexe 10 : Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine), le ratio avantages-coûts de cette option est de 25,78, soit la valeur la plus élevée des quatre options analysées.

Pour ces raisons, cette solution a été retenue pour la protection du secteur de La Grave. Le détail de cette solution se retrouve dans la section « 5 :

Description sommaire des travaux ». De plus, l'« Annexe 11 : La Grave – Recharge de plage, Îles-de-la-Madeleine, Québec » réalisée en 2018 par Consultants Ropars inc. a permis de détailler et de préciser le concept préliminaire. LaSalle NHC réalise présentement une modélisation numérique des conditions hydro-sédimentaires afin d'affiner le concept et d'évaluer la performance de l'ouvrage à long terme ainsi que ses impacts sur le secteur.

4.6 Brise-lames submersible au large

Le brise-lames submersible consiste en un enrochement à environ 200 m du rivage (dans le cas du secteur de La Grave) dont la crête se trouve au zéro des cartes marines.

Selon Roche (**Annexe 9** : Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine), le brise-lames se retrouverait à environ 2 m sous le niveau de la mer lors des épisodes de tempête, ce qui limite grandement son efficacité. De plus, il devrait être accompagné d'une recharge de plage pour être viable, ce qui augmente considérablement les coûts du projet.

Le ratio avantages-coûts de cette option n'a pas été analysé par Ouranos (Annexe 10 : Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine).

Pour ces raisons, le brise-lames submersible au large n'est pas une solution envisageable pour le secteur de La Grave.



4.7 Relocalisation stratégique

La relocalisation des bâtiments est également une solution possible dans le cas d'érosion côtière et de submersion. Par contre, le secteur de La Grave est un site classé patrimonial depuis 1983, en raison de l'utilisation des bâtiments durant les XIXe et XXe siècles pour les activités traditionnelles de la pêche. De plus, le site est couvert par un règlement municipal relatif aux plans d'implantation d'intégration architecturale (règlement numéro 2013-05) depuis 1994, qui limite les nouvelles constructions du secteur afin de préserver l'architecture historique et l'unité du site. La relocalisation des bâtiments ne permettrait pas de conserver la valeur patrimoniale, historique et culturelle du site.

Cette option n'a pas été analysée par Roche (**Annexe 9** : Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine).

Selon Ouranos (Annexe 10 : Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine), le ratio avantages-coûts de cette option est de 0,77, la plus faible valeur des options analysées.

Pour ces raisons, la relocalisation stratégique n'est pas une solution envisageable pour le secteur de La Grave.

4.8 Rip-rap

Le rip-rap consiste en une recharge de plage à partir de blocs.

Cette option n'a pas été analysée par Roche (**Annexe 9** : Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine).

Selon Ouranos (Annexe 10 : Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine), le ratio avantages-coûts de cette option est de 12,61, la deuxième valeur la plus élevée parmi les options étudiées. Cette option nécessite, tout comme l'enrochement, des rechargements réguliers. Dans le cas de La Grave, les matériaux grossiers entraîneraient une modification au niveau de l'esthétisme de la plage, portant ainsi atteinte à la valeur patrimoniale et historique du site.

Pour ces raisons, le rip-rap n'est pas une solution envisageable pour le secteur de La Grave.

4.9 Voie de contournement

La construction d'une voie de contournement est une solution souvent considérée pour éviter la dégradation des infrastructures par l'érosion côtière. Cependant, la situation géographique particulière du secteur de La Grave, qui est situé sur un cordon littoral de quelques dizaines de mètres de largeur, ne permet pas cette solution. En effet, il est impossible de déplacer la route nationale 199 puisqu'elle est entourée d'eau des deux côtés.

Pour ces raisons, la voie de contournement n'est pas une solution envisageable pour le secteur de La Grave.



4.10 Non-intervention

La non-intervention consiste à conserver le site dans l'état actuel et ne prévoit la mise en place d'aucune mesure corrective. Dans le cas du secteur de La Grave, les ondes de tempête causent des dégradations importantes au niveau de la plage, des infrastructures et des bâtiments, et ces dommages risquent de se reproduire à très court terme avec des impacts encore plus importants.

La non-intervention risque de causer des pertes de terrain, la démolition de bâtiments patrimoniaux et commerciaux essentiels à la vitalité économique et touristique du secteur ainsi que des dommages critiques aux infrastructures publiques.

L'« Annexe 2 : Évolution côtière » montre l'évolution de cette dernière depuis 1963. On y voit également que la ligne de débordement lors de la dernière tempête (7 et 8 septembre 2019) cause de la submersion pour de nombreux bâtiments et se rapproche de la route 199.

L'« Annexe 3 : Épaisseur d'eau au-dessus du sol attendue » montre que la remontée des vagues annuelle risque fortement de submerger de nombreux bâtiments, ainsi que la route 199.

Pour ces raisons, la non-intervention n'est pas une solution envisageable pour le secteur de La Grave.

5 Description sommaire des travaux

Les travaux de recharge de la plage de La Grave à Havre-Aubert se dérouleront en deux phases. Les informations contenues dans cette section sont tirées de l'« Annexe 11 : La Grave – Recharge de plage, Îles-de-la-Madeleine, Québec », rapport technique produit par Yann Ropars en 2018.

La Phase 1 comprend la recherche, la caractérisation et l'importation des matériaux granulaires qui seront utilisés pour la recharge. Le volume nécessaire est estimé à 53 000 m³, avec un diamètre médian des particules de 15 mm, dans le respect du fuseau granulométrique ciblé.

La Phase 2 comprend la réalisation des travaux sur le site, c'est-à-dire la mise en place des matériaux. Ces travaux s'étendent sur 690 m de longueur. La superficie d'empiètement est d'environ 17 500 m². Une attention particulière est portée à la grande vulnérabilité à la submersion des bâtiments et infrastructures du secteur, et les travaux proposés visent la protection optimale de l'ensemble de la zone, soit l'ensemble de la plage nord.

Il est important de préciser que certaines infrastructures en place sont trop avancées sur la plage, et devront être déplacées malgré la recharge de la plage à l'aide de matériaux grossiers. Roche (ANNEXE 9 : Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine) recommande d'effectuer une reconstruction sur pilotis.



L' « Annexe 1 : Projet de recharge complète » montre l'étendue de la recharge de plage (vue en plan), ainsi que le profil des transects 2, 3 et 5.

Une estimation sommaire préliminaire des coûts des travaux prévoit un montant de 100 \$ par mètre cube de matériaux granulaires, soit 5 300 000 \$ au total. L'organisation de chantier et les contingences, respectivement estimées à 12 % et 20 % des coûts des travaux, portent les coûts des travaux estimés à 7 120 000 \$. Il faut considérer que ce montant n'inclut pas les coûts liés aux études d'ingénierie et environnementales, à la gestion de projets, à la surveillance des travaux ainsi qu'aux relevés et essais de laboratoire requis.

La réalisation d'une recharge de plage avec des matériaux grossiers permet de limiter les impacts sur l'esthétisme du site, en plus de permettre la conservation des éléments culturels, historiques et patrimoniaux. De plus, ces travaux n'incluent aucune excavation, qui aurait pu entraîner des impacts au niveau archéologique. Il est également intéressant de noter que les usages actuels du site seront pleinement conservés suite aux travaux.

La recharge de plage avec matériaux grossiers permet donc de retrouver la stabilité naturelle du cordon littoral, de préserver la flore et la faune benthique ainsi que de restaurer un milieu dégradé.

6 Consultation de la population

Une première rencontre d'information a eu lieu le 4 juin 2018, afin d'informer la population sur le protocole d'entente entre le Ministère de la Sécurité publique (MSP) et la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, qui prévoit une recharge de plage au site de La Grave dont le coût des travaux est estimé à plus de 5,0 M \$. Des représentants du MSP, ainsi que le consultant Yann Ropars sont venus expliquer la solution retenue et répondre aux questions des citoyens. L' « Annexe 12 : Rencontre d'information publique – Projet de recharge de plage, secteur La Grave, Îles-de-la-Madeleine » contient la documentation présentée aux citoyens lors de cette rencontre.

Une deuxième rencontre d'information a eu lieu le 4 février 2020, afin de présenter aux citoyens les enjeux liés à l'érosion des berges, ainsi que les sites et travaux prioritaires. Différents intervenants de la Municipalité, du MTQ, d'Hydro-Québec, du MELCC ainsi que du MSP ont discuter de leur rôle respectif en matière de construction des ouvrages de protection, de financement ou encore d'évaluation des impacts environnementaux.

Une autre assemblée publique est prévue au printemps 2020, afin de présenter aux citoyens le concept de construction de la recharge de plage avec matériaux grossiers final validé à partir de la modélisation numérique des conditions hydro-sédimentaires.



7 Échéancier des travaux

Voici l'échéancier préliminaire des activités liées au projet de recharge de plage dans le secteur de La Grave :

Activité	déc-19	janv-20	févr-20	mars-20	avr-20	mai-20	juin-20	juil-20	août-20	sept-20	oct-20	nov-20	déc-20
Relevés LIDAR													
Bathymétrie													
Étude hydraulique													
Établissement du concept préliminaire													
Caractérisation des matériaux													
Appel d'offres et sélection													
Réalisation de la caractérisation													
Conception des plans et devis définitifs													
Appel d'offres et sélection													
Réalisation de la caractérisation													
Transport des matériaux													
Appel d'offres et sélection													
Réalisation de la caractérisation													
Travaux de recharge de plage													
Appel d'offres et sélection													
Réalisation de la caractérisation													

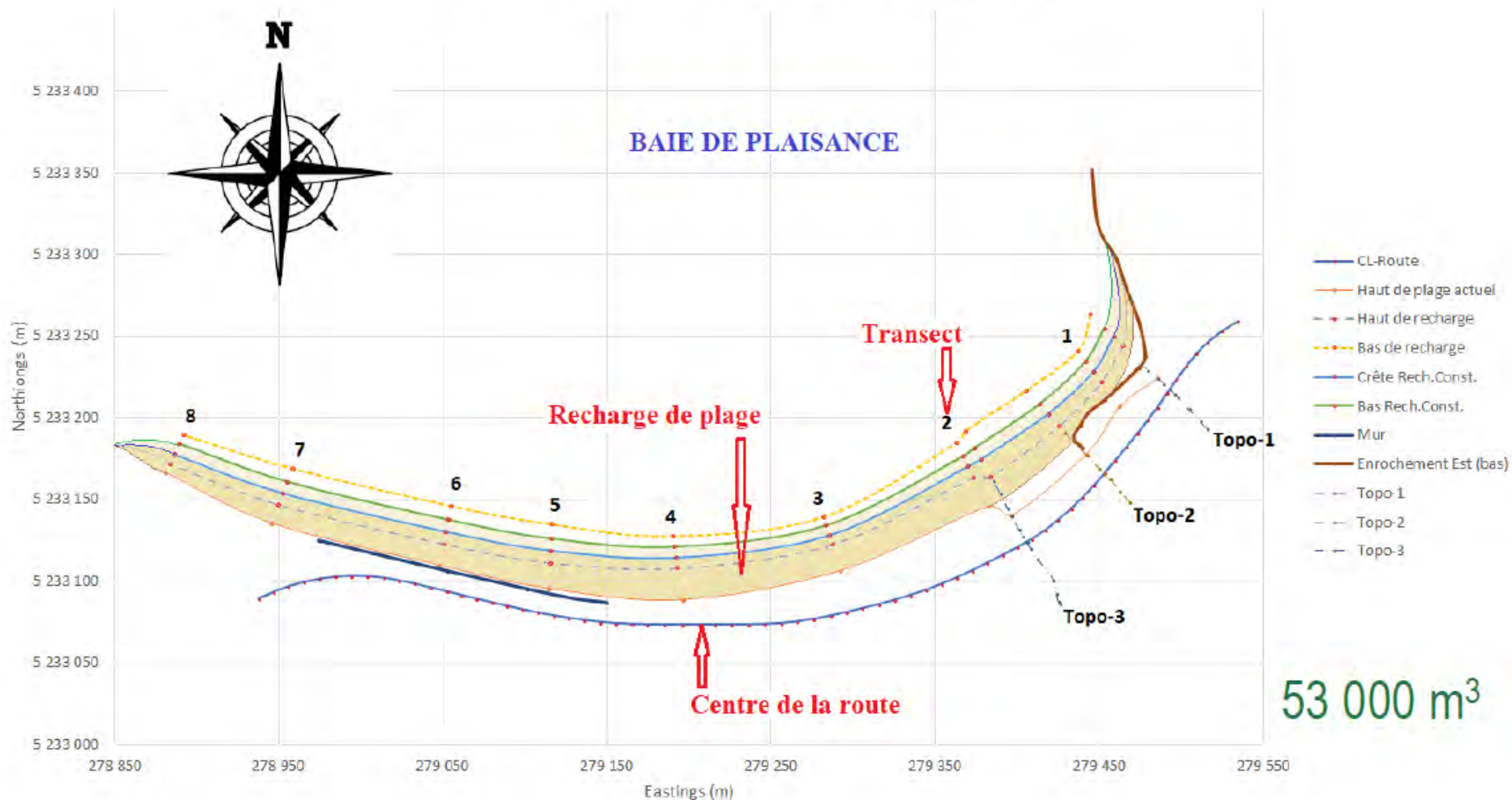


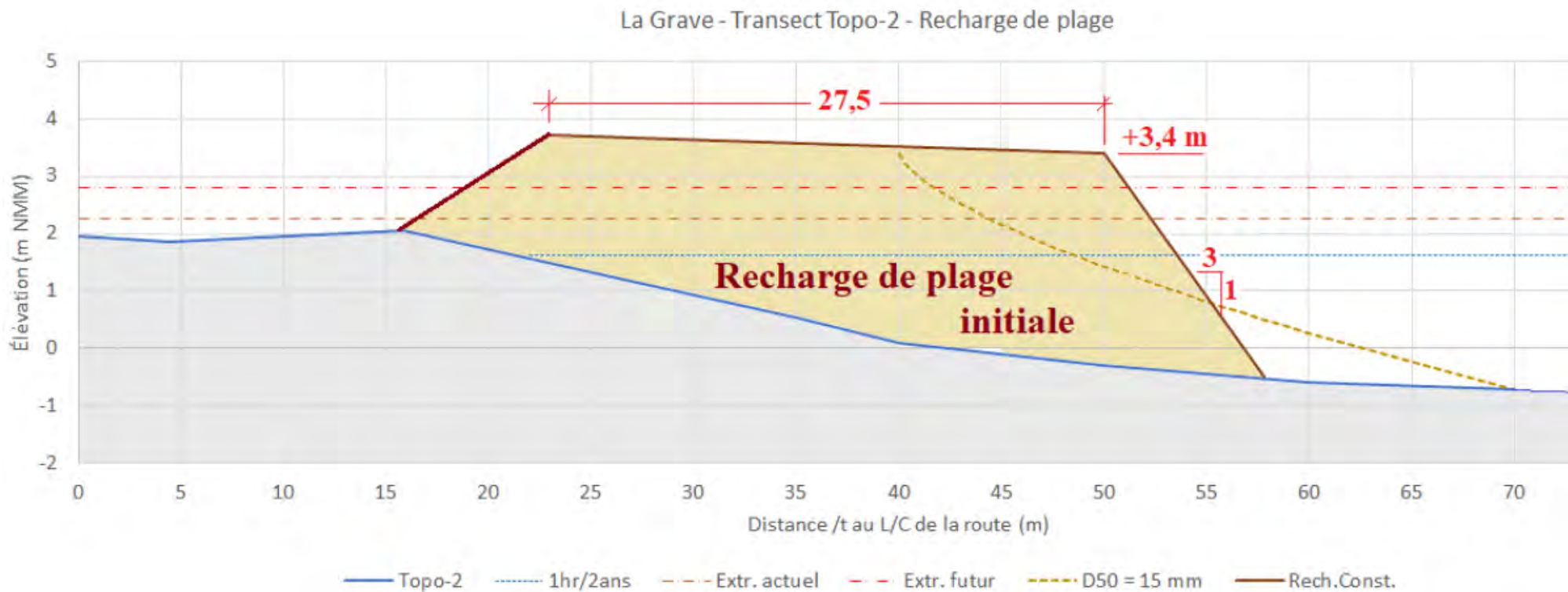
Annexes

- Annexe 1** Projet de recharge complète
- Annexe 2** Ligne de rivage
- Annexe 3** Niveau d'eau et remontée des vagues
- Annexe 4** Rapport photographique
- Annexe 5** Revue médiatique
- Annexe 6** Entente de financement entre le ministère de la Sécurité publique et la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine visant la réalisation de travaux de protection des berges contre l'érosion côtière dans le secteur de La Grave
- Annexe 7** Mandat d'accompagnement de la FQM – Projet de protection du littoral des secteurs de La Grave et de Cap-aux-Meules
- Annexe 8** Avis de projet et directive concernant le projet de recharge de plage – Secteur de La Grave, Municipalité des Îles-de-la-Madeleine
- Annexe 9** Analyse des solutions en érosion côtière dans la baie de plaisance, Îles-de-la-Madeleine
- Annexe 10** Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine
- Annexe 11** La Grave – recharge de plage, Îles-de-la-Madeleine, Québec
- Annexe 12** Rencontre d'information publique – projet de recharge de plage, secteur La Grave, Îles-de-la-Madeleine

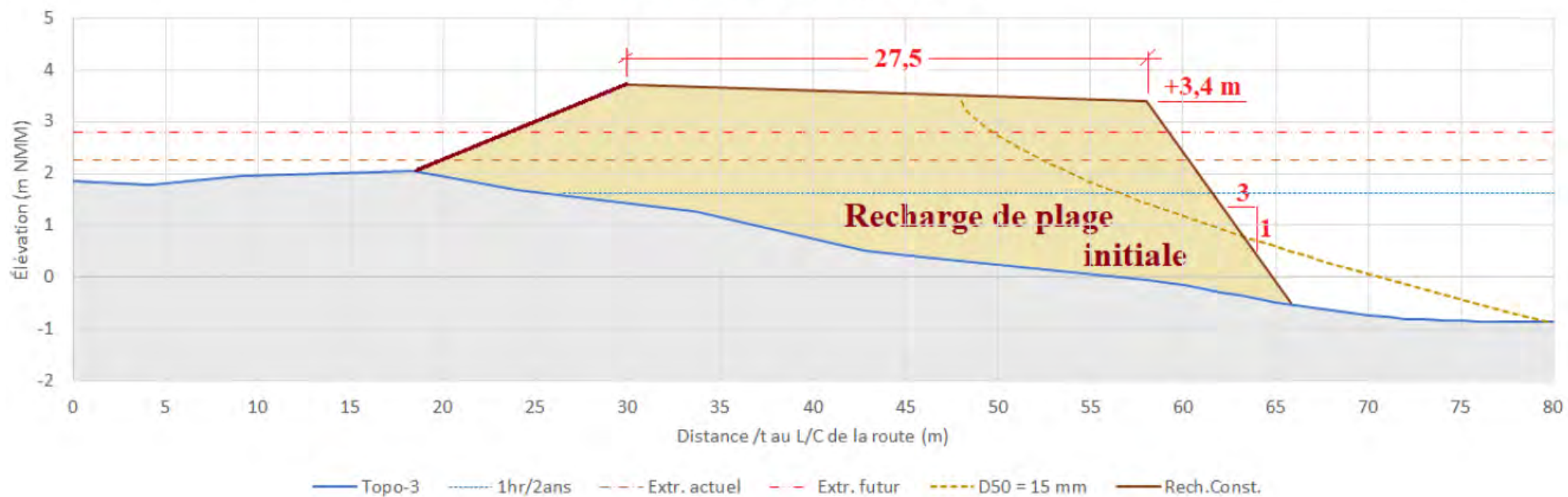
Annexe 1 : Projet de recharge complète (extrait de Ropars, 2018)

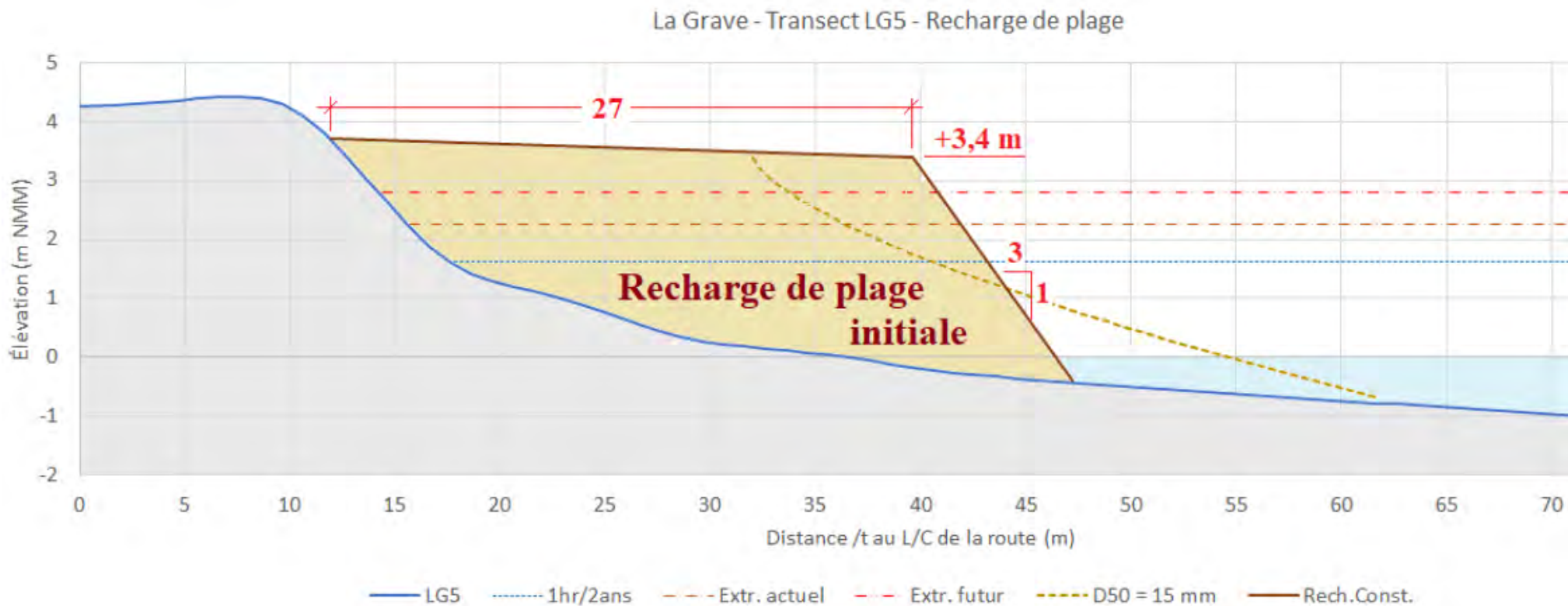
La Grave (IdM) - Protection complète de la berge par recharge de plage





La Grave - Transect Topo-3 - Recharge de plage







Annexe 2 : Évolution côtière



Évolution de la ligne de rivage de 1963 à 2008

Vue aérienne



Évolution de la ligne de rivage de 2008 à 2019

Vue aérienne



Annexe 3 : Épaisseur d'eau au-dessus du sol attendue



Sans vagues

Période de retour de 1 an



Sans vagues

Période de retour de 10 ans



Sans vagues

Période de retour de 50 ans (sans influence des changements climatiques)



Sans vagues

Période de retour de 50 ans (avec influence des changements climatiques)



Avec vagues

Période de retour de 1 an



Avec vagues

Période de retour de 10 ans



Annexe 4 : Rapport photographique



Photo prise le 16 novembre 2019

Dommmages aux bâtiments



Photo prise en 2019

Dommmages aux bâtiments



Photo prise en 2002 par temps calme

Plage nord, direction ouest



Photo prise en 2018 lors d'une tempête

Plage nord, direction ouest



Photo prise en 2019 par temps calme

Plage nord, direction ouest



Photo prise en 2011 après une tempête

Plage nord, direction est



Photo prise en 2015 après une tempête

Plage nord, direction est



Photo prise en 2019 par temps calme

Plage nord, direction est



Photo prise en 2018 lors d'une tempête

Route 199, direction est



Photo prise en 2018 lors d'une tempête

Route 199, direction est



Photo prise en 2018 lors d'une tempête

Route 199, direction ouest



FQM

INGÉNIERIE ET
INFRASTRUCTURES



Les Îles-de-la-Madeleine
Municipalité

Annexe 5 : Revue médiatique

30 novembre 2018

Les îles-de-la-Madeleine se relèvent de la tempête

Pierre Saint-Arnaud et Morgan Lowrie, La Presse Canadienne

3 décembre 2018

Tempête aux Îles-de-la-Madeleine : L'érosion fait des ravages

Geneviève Gélinas, Le Soleil

8 septembre 2019

Les Îles-de-la-Madeleine se remettent du passage de Dorian

Thomas Dufour, La Presse

8 septembre 2019

Dorian : La nuit a été longue pour les Madelinots

Dereck Doherty et Brigitte Dubé, Radio-Canada

Les Îles-de-la-Madeleine se relèvent de la tempête



Nigel Quinn / La Presse Canadienne

Photo: Nigel Quinn

«Ç’a « shaké » beaucoup; tout le dessous du chalet est parti, tout a arraché en dessous», raconte Jeanne Lebel, de Havre-Aubert, qui a été réveillée à 4h00 du matin, jeudi, par les vents violents qui secouaient les Îles-de-la-Madeleine.

Mme Lebel, qui vit «direct au bord de la mer», a affirmé en entrevue avec La Presse canadienne que les vents de plus de 130 kilomètres à l’heure ont poussé les vagues «à mi-hauteur de mes châssis de cuisine. L’eau n’est pas entrée; mes châssis sont très bons! Mais j’ai eu peur que mes châssis lâchent et que l’eau entre à l’intérieur.»

La sympathique sexagénaire précise qu’elle en a vu d’autres, «mais pas comme celle-là», au point d’avoir sérieusement songé à évacuer les lieux.

«J'ai mon arrière-grand-père qui s'est perdu à la chasse aux phoques. Il est sur le mur de la cuisine et c'est lui qui garde le fort. (...) Je l'ai regardé et j'ai dit: « si tu tombes de là, je sors d'ici ». Mais il est toujours là. Il ne tombe pas!» lance-t-elle sur le ton imperturbable de celle qui ne s'en laisse pas imposer.

Mais les vents violents, qui ont jeté de nombreux poteaux par terre et provoqué d'importantes pannes d'électricité, ont aussi mis au jour la vulnérabilité du réseau de télécommunications en causant une rupture complète des communications entre l'archipel et le reste du monde, à l'exception d'une poignée de liens téléphoniques satellitaires qui ont permis de lancer un appel de secours aux autorités sur le continent.

Aide militaire

L'appel à l'aide a mobilisé de nombreux efforts dès jeudi matin, mais le problème demeurait entier: le traversier était cloué sur place en raison de la mer démontée et l'aéroport était paralysé en l'absence de réseaux de communications.

Fort heureusement, l'un des deux câbles sous-marins qui relient les Îles au reste du monde a pu être remis en service à 22h15 jeudi soir, permettant l'arrivée d'un premier avion avec des équipes d'Hydro-Québec pour participer à l'effort de redressement.

Deux avions des Forces armées canadiennes, mobilisés à la demande du gouvernement du Québec, se sont ensuite rendus sur place en fin d'après-midi vendredi, l'un transportant du personnel d'Hydro-Québec, de Bell Canada, des ministères de la Santé et de la Sécurité publique

et une quinzaine de militaires, l'autre transportant du matériel pour les télécommunications, le réseau électrique, le Centre de santé et d'autres équipements d'urgence tels des génératrices et des téléphones satellites mobiles.

Un autre lien a été ouvert en après-midi avec le départ du traversier en direction de l'Île-du-Prince-Édouard pour y embarquer des camions d'Hydro-Québec requis sur le terrain.

Au pire de la tempête, jusqu'à 4500 des 7700 abonnés d'Hydro-Québec avaient perdu l'électricité dans l'archipel. Vendredi, près de 3000 abonnés étaient toujours privés de courant en fin d'après-midi, surtout dans la partie est des Îles, soit dans les secteurs de Havre-aux-Maisons, Pointe-aux-Loups, Grosse-Île et Grande-Entrée.

«Si la météo est de notre côté, dimanche peut être réaliste» pour un rétablissement de service, a confié le maire des Îles-de-la-Madeleine, Jonathan Lapierre, lorsque rejoint par La Presse canadienne.

Incendie majeur

Ces pannes sont indirectement à l'origine d'un incendie majeur qui a complètement détruit le HLM de Havre-aux-Maisons, jetant à la rue une vingtaine de personnes. L'incendie accidentel a été causé par une cuisinière d'appoint utilisée en raison de l'absence d'électricité. Heureusement, personne n'a été blessé.

«L'incendie semblait au départ être en mesure d'être maîtrisé. Malheureusement, avec la force des vents, il est devenu en perte de contrôle et aujourd'hui c'est une perte totale», a déploré le maire Lapierre.

Le secteur de Havre-aux-Maisons s'est du même coup retrouvé avec des difficultés d'alimentation en eau potable à la suite des dommages causés par l'incendie; la population est invitée à réduire sa consommation d'eau et à faire bouillir celle-ci avant de la consommer.

Communications: une question de vie ou de mort

Jonathan Lapierre s'est dit satisfait de la réponse des services d'urgence locaux, mais il a souligné à quel point cette situation a démontré la nécessité d'installer un lien de communication plus robuste et plus fiable.

«C'est comme si vous vous réveillez un matin et que tout à coup c'est impossible de sortir de la maison, de communiquer avec qui que ce soit à l'extérieur de votre maison et que, peu importe ce qui vous arrive, vous êtes laissé à vous-même», illustre le maire Lapierre. Car, dans une situation où il n'y a ni contact et, surtout, aucune possibilité d'entrer ou sortir de l'archipel, tout devient une question de vie ou de mort.

«C'est impossible d'évacuer des gens pour maladie, pour des traumatismes crâniens, par exemple, ou des accidentés de la route, des arrêts cardiaques. Il n'y a aucun spécialiste ou presque pas de spécialistes aux Îles-de-la-Madeleine, pas de radiologiste présent, pas de contact avec des hôpitaux dans les grands centres urbains pour de l'assistance», a-t-il fait valoir.

«Nous avons été chanceux cette fois-ci parce qu'il n'y a pas eu de grave accident, il n'y a pas eu d'évacuation médicale nécessaire, l'incendie n'a pas fait de blessés, mais ç'aurait pu être différent, d'où l'importance d'avoir des liens de communication qui soient à l'épreuve de pratiquement n'importe quelle avarie.»

À Québec, le député des Îles-de-la-Madeleine, Joël Arseneau, a fait part de son intention de relancer rapidement les discussions sur la mise en place d'un troisième câble sous-marin avec le Réseau intégré de communications électroniques des Îles-de-la-Madeleine (RICEIM), l'organisme sans but lucratif qui regroupe la plupart des grands acteurs de la communauté et qui est propriétaire des deux câbles sous-marins.

«On va faire des appels au ministère de l'Économie pour qu'on trouve les moyens d'agir d'ici l'été prochain. (...) Si on ne le fait pas l'été prochain, ce sera l'été suivant. Je veux être rassuré sur le fait que si on ne procède pas à des opérations dès l'été prochain, qu'on puisse avoir un service fiable jusqu'à l'été 2020», a dit le député péquiste, qui n'a pas manqué de rappeler que le RICEIM avait signalé dès 2016 que ces câbles arriveraient à leur fin de vie utile en 2018 et que rien n'avait été fait pour corriger la situation.

Érosion des berges... et des poteaux

Le maire Lapierre a aussi signalé la nécessité d'inspecter les poteaux qui ne se sont pas brisés, notant que ceux-ci souffrent d'érosion à la base.

«C'est un contexte particulier; lorsqu'un poteau est en bordure d'une route nationale qui elle-même est en bordure de la mer et que, depuis 12 heures, le vent frappe à des pointes de 130, 135, à un moment donné, tout ça vient qu'à céder.»

Léonard Chevrier, un Madelinot de 60 ans qui n'est pas branché au réseau d'Hydro-Québec et qui n'a donc pas subi de panne de courant, abondait dans le même sens lorsque rejoint par téléphone: «À chaque tempête, les poteaux qui ne sont pas brisés sont affaiblis. S'il y a une tempête dans une semaine, il y en a d'autres qui vont casser. C'est tout le système qui prend de l'usure.»

Mais selon ce dernier, c'est la rupture des communications qui représente les pires risques pour les insulaires.

«Beaucoup plus que le manque d'électricité ou de chauffage ou quoi que ce soit, parce que le bassin de population commence à être très âgé aux Îles, donc se déplace moins et sans communications, tu ne peux pas appeler les secours.»

Au lendemain de la tempête, M. Chevrier a pris sa voiture pour jeter un coup d'oeil aux alentours et ce qu'il a vu vient confirmer ses observations des dernières années.

«Sur la grève, c'est habituel depuis deux ou trois ans que la mer passe par-dessus le chemin, mais ça empire d'année en année.»

Il ajoute que la situation est particulièrement inquiétante en ce qui a trait aux magnifiques plages de sable de l'archipel.

«Les dunes de sable aux Îles, le cordon dunaire qui fait tout le tour des Îles, cet automne, il en a mangé une claque comme on dit ici. C'est épouvantable. Il y a des secteurs où ce sont trois, cinq, même dix mètres de perdus à la mer.»



Tempête aux Îles-de-la-Madeleine: l'érosion fait des ravages

GENEVIÈVE GÉLINAS

Le Soleil

GASPÉ — La tempête de la semaine dernière a englouti des dunes de sable et fait reculer des sections de côte de 10 mètres aux Îles-de-la-Madeleine. Le littoral se retrouve sans protection à plusieurs endroits en ce début d'hiver. Les Madelinots demandent un fonds d'urgence pour protéger leurs côtes contre l'érosion.

Les pannes de télécommunications et d'électricité ont éclipsé les dégâts causés au littoral par la tempête du 28 et 29 novembre, alors que des vents de 130 km/h, et des vagues en conséquence, ont balayé les Îles pendant 15 heures. Le calme revenu, certaines portions de côtes sont méconnaissables.

«Ça fait 29 ans que je suis assis ici et 15 ans que j'observe, que je prends des photos. Ces taux de recul en une seule tempête, je n'ai pas vu ça avant», dit le directeur de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme à la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, Serge Bourgeois.

La tempête a été plus forte et plus longue que d'habitude, et faisait suite à d'autres épisodes intenses. «J'ai 53 ans et je n'ai jamais vu autant de vent que cet automne», dit le directeur.

Des dunes de cinq mètres de haut ont été rayées de la carte. «À certains endroits, on ne voyait pas la mer et maintenant, on la voit», constate M. Bourgeois.

Des dunes fragiles

L'arrivée de l'hiver l'inquiète, puisque les dunes protègent les côtes. «D'habitude, les dunes s'engraissent pendant l'été et elles sont prêtes pour l'hiver. Là, on est juste début décembre et la dune a disparu.»

Le directeur croise les doigts pour que les glaces se forment tôt, puisqu'elles sont «le meilleur rempart» contre l'érosion. Mais le couvert de glace tend à disparaître lui aussi. «Si on passe l'hiver "tout nus", la côte va être beaucoup modifiée au printemps», prévoit M. Bourgeois.

«Le milieu naturel va se reformer, mais le problème, c'est quand il y a des infrastructures derrière», remarque M. Bourgeois. La route 199 entre Pointe-aux-Loups et Grande-Entrée, tout comme la section qui mène à Havre-Aubert, sont fragilisées.

«On récupère le sable qu'on a dragué dans les ports, on le dépose dans les dunes et au bord de l'eau. C'est ça que le ministère des Transports est en train de faire», décrit M. Bourgeois.

Quant à la municipalité des Îles, elle a donné priorité au secteur de La Grave, sur l'île du Havre-Aubert, où 690 mètres de côte seront rechargés en gravier, au coût de 5 millions \$.

Dans son budget 2017, le gouvernement Couillard a annoncé un total de 45 millions \$ sur cinq ans pour aider les municipalités à prévenir les risques liés à l'érosion. Une somme nettement insuffisante, estime M. Bourgeois. L'archipel à lui seul aurait besoin au moins de ce montant.

Le député péquiste des Îles-de-la-Madeleine, Joël Arseneau, et le maire de l'archipel, Jonathan Lapierre, ont demandé un fonds d'urgence pour contrer l'érosion.

M. Bourgeois observe ce que les spécialistes du réchauffement climatique annoncent depuis 15 ans : la hausse du niveau de la mer, l'augmentation de la violence des tempêtes et la disparition du couvert de glace.

«Il faudra revoir les fonds et l'approche. En ce moment, on réagit aux urgences. On ne se donne pas le temps de réfléchir», croit-il.

Les astres sont alignés pour que les choses changent, estime M. Bourgeois. La population est plus que jamais sensible aux changements climatiques. Les dégâts aux Îles, illustrés

avec des photos avant et après, font réagir. «On n'aurait pas souhaité la tempête, mais elle tombe pile», lance le directeur.

+

FRAGILE RETOUR À LA NORMALE

L'électricité et les communications ont beau avoir été rétablies, il reste du travail à faire pour solidifier ces services aux Îles-de-la-Madeleine. Un seul des deux câbles sous-marins de fibre optique dessert l'archipel; l'autre a été sectionné. Télébec, la filiale de Bell Canada qui dessert les Îles, a installé une station satellite sur l'archipel pour prendre la relève si jamais le second câble lâche.

Le maire des Îles, Jonathan Lapierre, demande à Télébec d'augmenter la capacité de ce système pour que les Madelinots puissent «fonctionner normalement» en cas de bris du câble : «On ne veut pas être pris pour choisir entre les besoins médicaux, les transactions financières ou la tour de contrôle de l'aéroport.»

M. Lapierre demande à Québec de réparer les câbles sous-marins le plus tôt possible, puis de vite financer leur remplacement. Il exige aussi un troisième câble, par sécurité, qui pourrait être installé quand Hydro-Québec déploiera son lien électrique, d'ici 2025.

Tous les Madelinots ont à nouveau du courant, la plupart depuis samedi. Une ligne de distribution est à risque à Pointe-aux-Loups, où l'érosion a fragilisé des poteaux. Toutefois, la société d'État a mis cette portion hors tension et alimente le secteur en électricité avec une autre ligne située en terrain sûr.

Les Îles-de-la-Madeleine se remettent du passage de *Dorian*



PHOTO MERRIELLE OUELLET, COLLABORATION SPÉCIALE

De forts vents et des rafales à 90 km/h balayaient encore les îles dimanche matin. Près de 4000 personnes étaient toujours privées d'électricité.

Bateaux endommagés, quais détruits, arbres déracinés, routes inondées et pannes d'électricité : les Îles-de-la-Madeleine se remettent aujourd'hui du passage de *Dorian*.

Publié le 08 septembre 2019 à 7h08 Mis à jour à 13h13



THOMAS DUFOUR
LA PRESSE

MERRIELLE OUELLET, COLLABORATION SPÉCIALE

De forts vents et des rafales à 90 km/h balayaient encore les îles dimanche matin. Près de 4000 personnes étaient toujours privées d'électricité.

Le maire Lapierre dit être en contact avec la ministre de la Sécurité publique, Geneviève Guilbeault, ainsi que la ministre du Tourisme et ministre responsable de la région, Caroline Proulx.

«En déclarant les mesures d'urgence, ça facilite l'obtention d'aides gouvernementales», a-t-il indiqué.

La Sûreté du Québec et le service incendie ne déplorent aucun blessé.



PHOTO MERRIELLE OUELLET, COLLABORATION SPÉCIALE

Un navire en provenance de Cheticamp, en Nouvelle-Écosse, a cependant passé la nuit au large du quai de Havre-Aubert, incapable d'y accoster hier soir en raison des vents violents. Ce n'est que dimanche matin que l'équipage a réussi à rentrer à bon port. Ses membres ont été conduits dans un hôtel de l'archipel.

Le nombre de clients victimes de pannes a beaucoup varié depuis hier. «C'est vraiment une situation qui évolue d'heure en heure. Au milieu de la nuit, on a monté à 3600 clients. On a même monté à 7000 clients en panne ce matin, donc presque la totalité des îles», explique Jonathan Côté, porte-parole d'Hydro-Québec.



PHOTO MERRIELLE OUELLET, COLLABORATION SPÉCIALE

Les 35 employés d'Hydro-Québec dépêchés sur place passeront la journée à rétablir l'électricité sur le réseau. «À certains endroits, on ne peut pas intervenir tout de suite à cause des vents», indique M. Côté. Il croit tout de même que le courant sera rétabli sur toutes les îles d'ici la fin de la journée.

D'importants dégâts

La marina de Havre Aubert, aux Îles-de-la-Madeleine, a été fortement touchée par la tempête. «Le quai central a lâché et il est parti avec 15 bateaux qui ont dérivé. Le quai est allé s'échouer sur les roches, expose Etienne David-Bellemare. Ça fait 6 ans que je suis aux Îles et je n'ai jamais vu ça».



PHOTO MERRIELLE OUELLET, COLLABORATION SPÉCIALE

La montée du niveau de l'eau est venue éroder les berges à Havre Aubert, selon le madelinot. Le site historique de La Grave a aussi été endommagé. Des bateaux de démonstration ont été renversés. « Il y a des roches partout sur la route, des débris de toutes sortes », indique M. David-Bellemare.

La tempête a aussi touché Havre aux Basques. « Il y a des arbres tombés sur le chemin, on a vu une petite cabane tombée dans un marais, des clôtures arrachées », dit Romane Lemay, infirmière à l'hôpital de Cap-aux-Meules.



PHOTO MERRIELLE OUELLET, COLLABORATION SPÉCIALE

Le chalet où elle vit à Havre Aubert n'est plus accessible en véhicule puisque la route est fermée. «Le chemin qui mène vers chez nous est inondé, il faut passer par la plage, affirme-t-elle. La plage a été mangée par la mer et des dunes se sont effondrées».

Dorian : la nuit a été longue pour les Madelinots

La piste cyclable à Cap-aux-Meules a été rongée par la tempête.

PHOTO : RADIO-CANADA / MARTIN TOULGOAT

Dereck Doherty

Brigitte Dubé

Publié le 8 septembre 2019

Dur lendemain de tempête aux Îles-de-la-Madeleine, alors que Dorian a causé plusieurs dommages, des milliers de pannes d'électricité et entraîné la fermeture de certaines routes.

En plein cœur de la tempête samedi soir, le niveau élevé de l'eau a fait craindre le pire au quai de Cap-aux-Meules. Il s'en est fallu de peu pour que les bateaux ne soient projetés sur le quai.

Des pointes de vents jusqu'à 120 km/h ont été enregistrées au cours de la nuit, selon Environnement Canada.



L'administration portuaire a poussé une barge durant la nuit pour coincer les bateaux de pêche après que les quais flottants sur lesquels ils étaient amarrés se soient détachés.

PHOTO : RADIO-CANADA / MARTIN TOULGOAT

Des pêcheurs ont même dû utiliser une barge, durant la nuit, pour coincer leurs bateaux dans le havre après que leurs quais flottants se soient détachés.

Toute la soirée, les bateaux au bout du quai ont été clutchés tous de l'avant... les fesses du bateau étaient vraiment au-dessus du quai. Les bateaux ont été clutchés toute la nuit pour rester dans l'eau et j'en ai même vu un qui s'est assis.

Kevin Aucoin, pêcheur de homard



Des bateaux ont été endommagés en raison des vents et des vagues.

PHOTO : RADIO-CANADA / MARTIN TOULGOAT

Marie-Josée Dubreuil, résidente de Cap-aux-Meules, raconte que samedi, le ton des conversations se faisait léger. Mais au fur et à mesure que la tempête s'approchait, les Madelinots prenaient conscience de l'ampleur de la tempête.

Elle-même a trouvé refuge dans l'auberge de l'un de ses amis.

Il y a des bouts de toits qui sont partis, donc ça coule. Ça pleut ici. Des bouts d'escaliers sont partis aussi, arrachés. Des bouts de murs extérieurs, des bateaux qui sont renversés. C'est catastrophique. C'est très peinant, c'est triste.

Marie-Josée Dubreuil, résidente de Cap-aux-Meules



Les Îles-de-la-Madeleine sont dans la ligne de mire de Dorian.

PHOTO : RADIO-CANADA / MARTIN TOULGOAT

Joseph Poirier, qui habite à Havre-aux-Maisons depuis deux ans, a passé plusieurs étés aux Îles-de-la-Madeleine, ayant marié une Madelinienne. Sa résidence est à une quarantaine de mètres de l'eau. Il soutient que c'est la tempête la plus forte qu'il a vue jusqu'à maintenant.

« On n'a pas beaucoup dormi, il a venté beaucoup. Il y avait un peu d'infiltrations d'eau par les fenêtres, donc il fallait surveiller. On s'en tire bien quand même, on n'a pas trop de dommages. Je suis allé voir sur le bord de l'eau puis les passerelles sont brisées. Y'a vraiment eu une grosse tempête », estime-t-il.



L'étendue des dommages aux Îles-de-la-Madeleine se précise dimanche matin.

PHOTO : RADIO-CANADA / BRUNO LELIÈVRE

Les autorités ont dû fermer certaines routes, le temps de ramasser les débris. Mais fort heureusement, on ne rapporte aucun blessé.

« Heureusement, de ce côté-là, on s'en sort quand même bien », a soutenu le maire Jonathan Lapierre, estimant avoir « évité le pire ».

« Ça a brassé », a toutefois admis le premier magistrat. « C'était une très bonne tempête. » Selon lui, la situation est exceptionnelle en raison des vents soutenus qui ont duré « plusieurs heures ».



Des chalets ont été poussés par la force du vent aux Îles-de-la-Madeleine.

PHOTO : RADIO-CANADA / FACEBOOK/ALFRED.ARSENEAU

Toutefois, selon l'élue, l'heure des décisions approche pour les Madelinots face aux phénomènes météorologiques qui ont des impacts importants sur les Îles.

« Il y a un questionnement à venir —et à court terme— avec la population des Îles. Il faudra faire des choix stratégiques en regard des changements climatiques et de l'érosion des berges. On ne peut pas toujours lutter contre les événements météorologiques tels qu'on vient de le connaître », a affirmé le maire.

Selon lui, il faudra intervenir à des endroits stratégiques « qui représentent les meilleures chances de protection ». Mais il admet que les Madelinots devront probablement « adopter une position de recul ou de retrait » dans certains secteurs.

Ampleur des dégâts

Les dégâts constatés jusqu'à maintenant prennent la forme de toitures de maisons arrachées et d'arbres déracinés, selon le maire. « Il y a beaucoup de dégâts à l'intérieur des ports de pêche, des marinas », où des bateaux se sont vraisemblablement frappés les uns contre les autres en raison des vagues et du vent.

À plusieurs endroits, des portions de falaises ont été arrachées par les eaux, a raconté M. Lapierre, qui ajoute que certaines infrastructures récréotouristiques ont « complètement disparu ». Plusieurs chalets ont d'ailleurs été lourdement endommagés par les vents et les vagues dans le secteur de la Martinique, au sud-ouest de Cap-aux-Meules.



Une résidence a été endommagée par le passage de Dorian aux Îles-de-la-Madeleine.

PHOTO : RADIO-CANADA / BRUNO LELIÈVRE

Jonathan Lapierre a indiqué que le secteur de la Grave, du côté de Havre-Aubert, a été en bonne partie inondé dès samedi. « Les installations du quai de la marina ont été endommagées. Même chose pour le secteur de Cap-aux-Meules. »

Selon M. Lapierre, les systèmes de communication ont cela dit tenu le coup. « Il n'y a aucun rapport d'incident avec les câbles optiques ni avec le système de télécommunications dans l'archipel », a-t-il dit.

Encore une fois, l'érosion menace l'intégrité du territoire

Par ailleurs, la Municipalité demande à Québec une aide rapide pour indemniser les sinistrés et sécuriser les endroits encore une fois menacés par l'érosion.



La Municipalité des Îles-de-la-Madeleine a avisé les citoyens qu'elle a déclenché son plan des mesures d'urgence, dimanche matin.
PHOTO : RADIO-CANADA / MARTIN TOULGOAT

Cette autre tempête vient encore une fois amplifier l'érosion des côtes de l'archipel, ce qui continue de menacer des infrastructures et plusieurs bâtiments en plein cœur de Cap-aux-Meules.

Nous faisons face à un archipel fortement érodé, qui s'est érodé en l'espace de 24, 36 heures à vitesse grand V, de là l'importance d'obtenir un décret ministériel.

Jonathan Lapierre, maire des Îles-de-la-Madeleine

Serge Bourgeois, directeur de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme aux Îles-de-la-Madeleine, soutient que, contrairement aux autres tempêtes, Dorian a soufflé des vents dans toutes les directions, ce qui a aggravé les dommages.

Il remarque qu'encore plusieurs dizaines de mètres de dunes sont disparus. Une partie de la falaise de Cap-aux-Meules s'est affaissée.

« Moi, ce qui m'inquiète le plus au niveau du littoral, c'est qu'une tempête de cette envergure-là au début septembre, c'est très très rare », dit-il. « Le milieu naturel, quand on lui donne une chance, il peut dans plusieurs cas se refaire. Ça vient se reconstituer dans les périodes les plus tranquilles. Mais là, avec la tempête de novembre passé, les tempêtes ont été tellement importantes que plusieurs secteurs n'ont pas eu le temps de se refaire une santé, si on peut dire. »

Le secteur de la Pointe-aux-Loups serait particulièrement vulnérable, selon M. Bourgeois.



La toiture de l'ancien aréna de Cap-aux-Meules a été endommagée.

PHOTO : RADIO-CANADA / MARTIN TOULGOAT

Mesures d'urgence

Le maire estime toutefois que la Municipalité était bien préparée face à l'arrivée de Dorian. « Le mode prévention qui a été adopté par les instances municipales depuis 48 heures était la bonne voie à suivre », selon lui. « Vaut mieux prévenir que guérir », a-t-il dit, mentionnant qu'il ne voulait pas banaliser la situation.

Avoir été proactif dès le tout début, dès les premières prévisions, nous a grandement aidés.

Jonathan Lapierre, maire de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine

La Municipalité des Îles-de-la-Madeleine a avisé les citoyens qu'elle a déclenché son plan de mesures d'urgence, dimanche matin.

Les autorités ont demandé aux résidents d'éviter de circuler sur les routes et de rester chez eux, puisque le réseau routier « n'est pas praticable » à certains endroits en raison, notamment, de débris. Plusieurs tronçons de la route 199 sont d'ailleurs fermés.



Les forts vents ont causé des dommages aux Îles-de-la-Madeleine.

PHOTO : RADIO-CANADA / BRUNO LELIÈVRE

« La Municipalité des Îles continue de suivre l'évolution des conditions de tempête. Tous les services municipaux sont mobilisés et répondent aux urgences », indique la Municipalité sur Facebook.

Avec les informations de Bruno Lelièvre et de Martin Toulgoat



FQM

INGÉNIERIE ET
INFRASTRUCTURES



Les Îles-de-la-Madeleine
Municipalité

Annexe 6 : Entente de financement entre le ministère de la Sécurité publique et la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine visant la réalisation de travaux de protection des berges contre l'érosion côtière dans le secteur de La Grave

Ministère de la Sécurité publique, 1^{er} mars 2018

CPS 17-18-11

NUMÉRO DE L'ENTENTE : CPS 17-18-11

ENTENTE
DE FINANCEMENT
VISANT LA RÉALISATION DE TRAVAUX
DE PROTECTION DES BERGES CONTRE
L'ÉROSION CÔTIÈRE DANS LE SECTEUR
DE LA GRAVE DE LA MUNICIPALITÉ
DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE

ENTRE

LA MUNICIPALITÉ DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE, personne morale de droit public légalement constituée, ayant son centre administratif au 460, chemin Principal, Cap-aux-Meules (Québec) G4T 1A1, représentée aux présentes par le maire, monsieur Jonathan Lapierre, et le directeur général, monsieur Serge Rochon, dûment autorisés par la résolution CM1802-1019 à signer la présente entente,

(ci-après appelée la « Municipalité »)

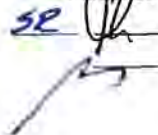
ET

LE MINISTRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE, pour et au nom du gouvernement du Québec, représenté par le sous-ministre associé, monsieur Jean Bissonnette, dûment autorisé en vertu de la Loi sur le ministère de la Sécurité publique (RLRQ, chapitre M-19.3)

(ci-après appelé le « ministre »)

(ci-après appelés collectivement les « parties »)

Paraphes

SR 

ATTENDU QUE le Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2020 (CPS 2013-2020), adopté en juin 2013 par le Conseil des ministres, vise à soutenir la mise en œuvre de mesures en appréciation (analyse et recherche sur les risques), en traitement (travaux de prévention et d'atténuation) et en communication notamment pour les risques liés à l'érosion et à la submersion côtières;

ATTENDU QUE le ministère de la Sécurité publique (MSP) est responsable de la gestion du CPS 2013-2020;

ATTENDU QU'une analyse de risques a mis en lumière les risques potentiels associés à l'érosion côtière dans le secteur de La Grave, dans la municipalité des Îles-de-la-Madeleine;

ATTENDU QU'une analyse des solutions réalisée par une firme d'ingénierie privée a permis d'identifier la solution la plus appropriée pour atténuer le danger que l'érosion côtière affecte les résidences et les infrastructures dans le secteur;

ATTENDU QU'il y a lieu de conclure une entente avec la Municipalité afin de préciser les modalités d'octroi et de versement de l'aide financière pour les travaux à effectuer en bordure du golfe du Saint-Laurent dans le secteur de La Grave.

EN CONSÉQUENCE, les parties conviennent de ce qui suit :

ARTICLE 1 Les annexes A et B font partie intégrante de l'entente. Les parties déclarent en avoir pris connaissance et les acceptent. En cas de conflit entre les annexes et l'entente, cette dernière prévaut.

ARTICLE 2 La Municipalité s'engage à effectuer les travaux d'atténuation de l'érosion côtière en utilisant l'aide financière versée par le ministre et à participer financièrement conformément à l'annexe A. Ces travaux consistent à protéger le secteur de La Grave par la mise en place d'une recharge de plage avec des matériaux grossiers.

Les travaux s'étendent sur une distance approximative de 690 mètres et doivent comprendre, notamment, les éléments suivants :

- la réalisation des travaux d'arpentage avant et après la réalisation de ceux de recharge de plage;
- l'obtention des autorisations requises, dont celles environnementales;
- la recherche des matériaux répondant au fuseau granulométrique recommandé et en quantité nécessaire, lesquels constitueront la recharge de plage incluant des essais en laboratoire ou *in situ* (granulométrie, poids

SR
Paraphes

spécifique, absorption d'eau, résistance aux cycles de gel/dégel);

- la réalisation de plans et devis;
- la réalisation des travaux de protection de la berge contre l'érosion;
- la surveillance du chantier;
- le contrôle des matériaux de recharge par des essais en laboratoire (granulométrie, etc.);
- la transmission au ministre des documents de conformité des travaux réalisés dans les trente (30) jours suivant la fin des travaux.

ARTICLE 3

La Municipalité s'engage à entretenir et à réparer, de manière diligente, à ses frais, les ouvrages conçus dans le cadre de cette entente.

ARTICLE 4

La Municipalité consent à maintenir dans sa réglementation, applicable dans le territoire menacé, les dispositions du règlement 2010-08, sans quoi l'entente deviendra caduque.

ARTICLE 5

La Municipalité s'engage à se conformer à toute exigence raisonnable que le ministre pourrait formuler, en conformité avec la présente entente, notamment lors de rencontres de suivi qu'il pourrait demander ou autrement.

ARTICLE 6

La Municipalité garantit que les travaux énumérés à l'article 2 seront exécutés selon les règles de l'art et les lois et règlements en vigueur. De plus, elle s'engage à exiger des entrepreneurs, avec qui elle contracte, les garanties usuelles, entre autres une garantie pour l'exécution des travaux ainsi qu'une police d'assurance responsabilité civile pour la durée des travaux. Elle s'engage également à exercer ces garanties, le cas échéant.

ARTICLE 7

La Municipalité s'engage à fournir au ministre toutes les pièces justificatives ainsi que tous les documents, toutes les copies de documents et tous les renseignements que ce dernier lui demande et dont il a besoin pour l'administration de l'octroi de l'aide financière ainsi que pour répondre aux exigences du processus administratif.

Paraphés

SR

ARTICLE 8 La Municipalité s'engage également à conserver tous les documents liés à l'aide financière pendant une période de cinq (5) ans suivant l'expiration de la présente entente, d'en permettre l'accès à un représentant du ministre et d'en prendre copie.

ARTICLE 9 La Municipalité s'engage à n'utiliser l'aide financière reçue qu'aux fins de l'utilisation prévue dans la présente entente.

ARTICLE 10 La Municipalité s'engage à rembourser au ministre l'aide financière qui lui a été versée si les dépenses pour lesquelles celle-ci est accordée ont fait ou peuvent faire l'objet d'une indemnisation ou d'un remboursement par un gouvernement ou l'un de ses ministères ou par un organisme ou par toute autre source, sauf s'il s'agit d'une aide reçue à titre de don de charité à la suite d'une collecte de fonds auprès du public.

ARTICLE 11 La réalisation, en chantier, de l'ensemble des travaux visés par la présente entente doit être terminée au plus tard le 31 mars 2020.

ARTICLE 12 L'investissement prévu dans la présente entente pour la réalisation de l'ensemble des travaux pourrait atteindre un montant de cinq millions quatre cent mille dollars (5 400 000 \$).

La Municipalité s'engage à assumer une partie du coût des travaux, le tout conformément au calcul et aux modalités prévus à l'annexe A de la présente entente.

Le ministre s'engage à verser à la Municipalité, selon les paramètres prévus à l'annexe A, un montant maximal d'aide financière de quatre millions cinq mille cinq cent treize dollars et soixante-quinze sous (4 005 513,75 \$).

Ce montant sera versé à la Municipalité de la manière suivante :

- un premier versement de deux millions cent soixante-quinze mille dollars (2 175 000 \$), dans les 30 jours après l'apposition de la dernière signature à la présente entente;
- le solde de l'aide financière sera versé dans un délai de soixante (60) jours suivant la fin des travaux à la

Paraphes
SR

satisfaction du ministre et à la réception des pièces justificatives.

Si le coût total des activités que la Municipalité s'engage à réaliser en vertu de la présente entente est inférieur à cinq millions quatre cent mille dollars (5 400 000 \$), le montant d'aide financière à verser sera révisé selon les paramètres prévus à l'annexe A et après approbation du ministre.

ARTICLE 13 Le ministre peut rendre admissibles des dépenses engagées avant la signature de la présente entente si celles-ci sont relatives aux travaux identifiés à l'article 2 et qu'elles ne font pas l'objet d'une indemnisation provenant d'une autre source.

ARTICLE 14 Si un différend survient dans le cours de l'exécution de l'entente ou sur son interprétation, les parties s'engagent, avant d'exercer tout recours, à rechercher une solution à ce différend et, si besoin est, à faire appel à un tiers, selon les modalités à convenir, pour les assister dans ce règlement.

ARTICLE 15 La Municipalité comprend et accepte que, à défaut par elle de respecter l'une des conditions prévues à la présente entente, le ministre peut, à son choix, lui réclamer la totalité ou une partie de l'aide financière versée.

ARTICLE 16 La Municipalité s'engage, d'une part, à assumer seule toute responsabilité légale à l'égard des tiers et à assumer seule la responsabilité de toute action, réclamation ou demande que peut occasionner l'exécution de l'objet de la présente entente et, d'autre part, à tenir indemne et prendre fait et cause pour le ministre, ses représentants et le gouvernement, advenant toute réclamation pouvant en découler et s'assurer qu'il en soit de même pour tout contrat octroyé aux fins de la réalisation de l'objet de la présente entente.

ARTICLE 17 La Municipalité s'engage à indiquer clairement dans toutes les activités de communication écrite ou autre, et cela sur tout ou partie des travaux exécutés conformément à l'aide versée, la mention, en évidence, de la contribution du Cadre

Paraphes

SR

pour la prévention de sinistres 2013-2020 du gouvernement du Québec.

ARTICLE 18

Le ministre se réserve le droit de procéder à toute vérification ultérieure des dépenses et de récupérer les sommes versées en trop, le cas échéant.

Le paiement découlant de l'exécution de la présente entente peut faire l'objet d'une vérification par le ministre ou par toute autre personne ou tout autre organisme dans le cadre des fonctions qu'ils exercent ou des mandats qui leur sont confiés.

ARTICLE 19

Les droits et obligations prévus à la présente entente ne peuvent être cédés, vendus ou transportés, en tout ou en partie, sans l'autorisation écrite préalable du ministre, qui peut alors prévoir des conditions à cette fin.

ARTICLE 20

La Municipalité accepte d'éviter toute situation qui mettrait en conflit son intérêt personnel et l'intérêt du ministre. Si une telle situation se présente, la Municipalité doit immédiatement en informer par écrit le ministre qui pourra, à sa discrétion, émettre une directive indiquant à la Municipalité comment remédier à ce conflit d'intérêts ou résilier l'entente.

ARTICLE 21

Toute modification au contenu de la présente entente devra faire l'objet d'une entente écrite entre les deux parties. Celle-ci ne peut changer l'objet de la présente entente et elle en fera partie intégrante.

ARTICLE 22

En cas de mésentente quant à la mise en œuvre de la présente entente, le ministre ou la Municipalité peuvent y mettre fin en faisant parvenir à l'autre un avis écrit à cet effet, transmis par poste recommandée. La résiliation prendra effet de plein droit trente jours (30) après la réception de cet avis. Les parties assument alors, en fonction de leur part respective, les coûts des travaux effectués comme établis à l'annexe A.

Le ministre se réserve le droit de résilier cette entente si la Municipalité fait défaut de remplir l'un ou l'autre des termes, conditions ou obligations prévus à la présente entente. Pour ce faire, un avis sera envoyé par poste recommandée par le ministre à la Municipalité et celle-ci aura trente (30) jours ouvrables pour remédier

Paraphes
SR

aux défauts énoncés dans l'avis et en aviser le ministre, à défaut de quoi l'entente sera automatiquement résiliée à compter de la date de réception de cet avis, sans compensation ni indemnité pour quelque cause ou raison que ce soit.

La Municipalité devra également, dans l'un ou l'autre de ces cas, rembourser au ministre les sommes reçues, mais non engagées, pour la réalisation d'éléments prévus dans la présente entente.

Sans limiter la généralité de ce qui précède, la participation financière de la Municipalité sera calculée à nouveau selon l'annexe A et la Municipalité devra rembourser les sommes reçues en trop.

ARTICLE 23

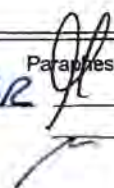
La présente entente entre en vigueur à la date de la dernière signature aux présentes.

ARTICLE 24

Les sommes nécessaires pour effectuer les versements prévus à l'article 12 sont prises à même les sommes prévues par le CPS 2013-2020, et ce, sous réserve de la disponibilité des sommes prévues à cet effet, conformément aux dispositions de l'article 21 de la Loi sur l'administration financière (RLRQ, chapitre A-6.001).

ARTICLE 25

Les parties reconnaissent la juridiction des tribunaux du Québec, district judiciaire de Québec, pour intervenir dans tous litiges pouvant découler de l'application ou l'interprétation de la présente entente.

Paraphes
SR 

ARTICLE 26

Les personnes suivantes sont désignées par les parties à la présente entente aux fins de l'administration de celle-ci :

Pour le ministre :

Monsieur Pascal Chouinard
Directeur de la prévention et de la planification
Ministère de la Sécurité publique
Tour des Laurentides, 6^e étage
2525, boulevard Laurier
Québec (Québec) G1V 2L2

Pour la Municipalité :

Monsieur Serge Bourgeois
Directeur de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme
Municipalité des Îles-de-la-Madeleine
460, chemin Principal
Cap-aux-Meules (Québec) G4T 1A1

Pour valoir, toute correspondance entre les parties à la présente entente doit être échangée entre ces représentants désignés, aux adresses mentionnées ci-dessus.

EN FOI DE QUOI, les parties ont signé la présente entente en deux (2) exemplaires originaux.

CAP-AUX-MEULES, le 20 MARS 2018



Jonathan Lapierre
Maire



Serge Rochon
Directeur général

Québec, le 23 mars 2018



Jean Bissonnette
Sous-ministre associé

SR 
Paraphe

ANNEXE A

Aide financière et participation financière

L'aide financière accordée à la Municipalité pour la réalisation des travaux prévus à l'article 2 de l'entente est égale à la totalité des dépenses admissibles prévues à l'annexe B, comme agréées par le ministre, moins la participation financière de la Municipalité.

La participation financière de la Municipalité équivaut à vingt-cinq virgule quatre-vingt-deux pour cent (25,82 %) des dépenses admissibles ou, si elle est moindre, à la participation financière établie en vertu de l'article 78 du Programme général d'aide financière lors de sinistres réels ou imminents, établi par le décret numéro 1271-2011 du 7 décembre 2011 et modifié par le décret numéro 1165-2014 du 17 décembre 2014, et toute modification subséquente qui pourrait y être apportée, le cas échéant.

Aux fins du calcul de la participation financière, le nombre d'habitants est fixé en fonction de l'évaluation démographique de la municipalité établie par le décret du gouvernement pris conformément à l'article 29 de la Loi sur l'organisation territoriale municipale (RLRQ, chapitre 0-9) en vigueur au moment où la Municipalité a produit une demande d'aide financière.

SR  Paraphes

ANNEXE B

DÉPENSES LIÉES AUX TRAVAUX EFFECTUÉS PAR LA MUNICIPALITÉ

Dépenses admissibles

Les dépenses qui sont additionnelles aux dépenses courantes de la Municipalité et qui sont effectivement déboursées, tels que :

- l'ensemble des honoraires professionnels liés aux travaux prévus à l'entente, incluant non limitativement les honoraires professionnels liés à la conception et à la préparation des plans et devis et des documents d'appel d'offres pour la réalisation des travaux;
- les coûts des contrats octroyés à des entreprises pour les travaux prévus à l'entente;
- l'achat de matériaux et de fournitures;
- les frais variables liés à l'utilisation de la machinerie, d'équipements et d'outillage municipaux;
- la location de machinerie, d'équipements et d'outillage ainsi que les frais liés à leur utilisation;
- l'achat d'un terrain nécessaire à la réalisation des travaux prévus à l'entente;
- les frais de gestion interne, à savoir les heures supplémentaires payées aux employés permanents affectés au projet faisant l'objet de l'entente;
- toute autre dépense jugée admissible par le ministre.

Dépenses non admissibles

- les frais d'intérêt;
- la perte de revenus découlant de l'entente;
- la perte de valeur marchande d'un bien;
- la perte de terrain;
- les pertes et les dommages dont la Municipalité est responsable;
- l'achat de nouveau matériel ou de nouveaux équipements réutilisables;
- toute dépense ou tout travail jugé non nécessaire par le ministre.

SR  Paraphes



FQM

INGÉNIERIE ET
INFRASTRUCTURES



Les Îles-de-la-Madeleine
Municipalité

Annexe 7 : Mandat d'accompagnement de la FQM – Projet de protection du littoral des secteurs de La Grave et de Cap-aux-Meules

Extrait du procès-verbal de la séance ordinaire du comité exécutif de la
Municipalité des Îles-de-la-Madeleine tenue le 22 octobre 2019, à la
mairie.

CE1910-485

Jean-Yves Lebreux, greffier



Québec, le 13 novembre 2019

Madame Caroline Richard
Directrice des services techniques
Municipalité des Îles-de-la-Madeleine
460 chemin Principal
Cap-aux-Meules (QC) G4T 1A1

OBJET : Avis de projet et directive concernant le projet de recharge de plage
– Secteur de La Grave – Municipalité des Îles-de-la-Madeleine

Madame,

Dans le cadre de l'application de l'Entente Canada – Québec en matière d'évaluation d'impact, nous avons reçu le 11 septembre dernier, de la part du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, l'avis du projet mentionné en objet.

Selon la *Loi sur l'évaluation d'impact* (LEI), une évaluation d'impact peut être requise pour les projets comprenant une ou plusieurs activités désignées inscrites au *Règlement sur les activités concrètes*. Tenant compte de l'information contenue dans l'avis de projet que nous avons reçu, nous comprenons que **votre projet ne correspond pas à une activité désignée.** Cependant, veuillez noter qu'en vertu de l'alinéa 9(1) de la LEI, la ministre de l'Environnement et du Changement climatique a le pouvoir de désigner un projet non-inscrit dans le *Règlement sur les activités concrètes* si elle est d'avis que ce projet peut entraîner des effets négatifs ou que les préoccupations du public concernant ces effets le justifient.

Aussi, dans l'éventualité où des changements sont apportés à votre projet, il est de votre responsabilité de vérifier si celui-ci correspond à une activité désignée inscrite dans le règlement et de déposer une description de projet auprès de l'Agence d'évaluation d'impact du Canada le cas échéant. Vous pouvez consulter ce règlement à l'adresse suivante : <http://www.gazette.gc.ca/rp-pr/p2/2019/2019-08-21/html/sor-dors285-fra.html>

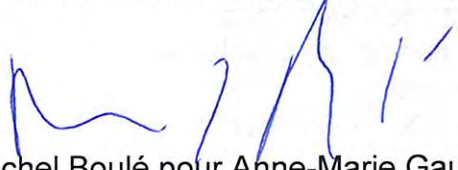
Si vous désirez discuter des modalités d'application de la LEI, vous pouvez nous joindre au 418-649-6444 ou par courriel à : ceaa.information.acee@canada.ca. Vous trouverez des renseignements supplémentaires sur le site internet de l'Agence à l'adresse suivante : <https://www.canada.ca/fr/agence-evaluation-impact.html>

.../2



Toutefois, il est de votre responsabilité de veiller à ce que le projet se conforme aux autres lois et règlements fédéraux et, par conséquent de contacter les autorités fédérales pertinentes afin de connaître leurs exigences s'il y a lieu.

Veillez agréer, Madame, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'M. Boulé', written in a cursive style.

Michel Boulé pour Anne-Marie Gaudet
Directrice régionale - Québec



FQM

INGÉNIERIE ET
INFRASTRUCTURES



Les Îles-de-la-Madeleine
Municipalité

**Annexe 8 : Avis de projet et directive concernant le
projet de recharge de plage – Secteur de La Grave,
Municipalité des Îles-de-la-Madeleine**

Agence d'évaluation d'impacts du Canada, 13 novembre 2019



Les Îles-de-la-Madeleine Municipalité

EXTRAIT du procès-verbal de la séance ordinaire du comité exécutif de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine tenue le 22 octobre 2019, à la mairie.

CE1910-485

Mandat d'accompagnement de la FQM – Projet de protection du littoral des secteurs de La Grave et de Cap-aux-Meules

CONSIDÉRANT QUE la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine est membre de la Fédération québécoise des municipalités (FQM);

CONSIDÉRANT QUE l'entente signée récemment avec la FQM relativement à la fourniture de services techniques d'ingénierie et de techniciens en génie civil selon les taux en vigueur;

CONSIDÉRANT QU' en vertu de cette entente, les directions des services techniques et des réseaux publics et de l'aménagement du territoire souhaitent faire appel à l'expertise technique de la FQM pour les assister dans le cadre du projet de protection du littoral dans les secteurs de La Grave et de Cap-aux-Meules;

CONSIDÉRANT QU' en cours de mandat, les taux horaires peuvent être révisés par le conseil d'administration de la FQM et que, si le mandat est réalisé en tout ou en partie, les nouveaux tarifs en vigueur seront alors applicables;

CONSIDÉRANT QU' en vertu des dispositions prévues à la Loi sur les cités et villes, la Municipalité peut octroyer un contrat de gré à gré à la FQM pour des services professionnels;

EN CONSÉQUENCE,

sur une proposition de Benoit Arseneau,
appuyée par Roger Chevarie,
il est résolu à l'unanimité

d'accorder un mandat à la Fédération québécoise des municipalités pour des services professionnels dans le cadre du projet relatif à la réalisation de travaux de protection du littoral dans les secteurs de La Grave et de Cap-aux-Meules.

VRAIE COPIE CERTIFIÉE
Aux Îles-de-la-Madeleine
Ce 31 octobre 2019


Jean-Yves Lebreux, greffier



FQM

INGÉNIERIE ET
INFRASTRUCTURES



Les Îles-de-la-Madeleine
Municipalité

Annexe 9 : Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine

Étude en hydraulique maritime

N/Réf. : 61933

Roche, novembre 2011



**Analyse des solutions en érosion cotière dans
la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine**
Étude en hydraulique maritime

N/Réf. : 61933

Rapport final

Extraits
Secteur La Grave

En collaboration avec :





**Analyse des solutions en érosion cotière dans
la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine**
Étude en hydraulique maritime

N/Réf. : 61933

Rapport final

Novembre 2011

En collaboration avec :



TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE EXÉCUTIF.....	1
Mandat.....	1
Secteurs d'étude.....	1
Modèle numérique de terrain.....	3
Niveaux d'eau.....	3
Granulométrie du sable.....	3
Régime des vagues.....	4
Climat de vagues près de la côte.....	4
Courants littoraux et dynamique sédimentaire.....	4
Protection de la berge – Secteur des étangs aérés.....	5
Protection de la berge – Secteur de Gros-Cap.....	10
Protection de la berge – Secteur de la plage du chemin des Chalets.....	15
Protection de la berge – Secteur de la Pointe de la Martinique.....	17
Protection de la berge – Secteur de la Grave.....	19
Coûts du projet et plan d'action.....	21
Recommandations.....	25
Secteur des étangs aérés.....	25
Chemin du Gros Cap, près de la garderie.....	26
Secteur de La Grave, partie est.....	26
Autres secteurs.....	26
Plan stratégique d'intervention.....	26
1.0 INTRODUCTION.....	1
2.0 SITUATION ACTUELLE.....	5
2.1 Caractéristiques des zones évaluées.....	5
2.2 Visite des sites.....	5
2.2.1 Secteur des étangs aérés.....	5
2.2.2 Secteur de Gros-Cap.....	10
2.2.3 Secteur du chemin des Chalets.....	14
2.2.4 Secteur de la Pointe de la Martinique.....	19

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

2.2.5 Secteur de La Grave (Havre-Aubert)	25
2.2.6 Autres secteurs.....	29
2.2.6.1 Secteur de l'hôpital de Cap-aux-Meules	29
2.2.6.2 Secteur de la route 199 au niveau de la Martinique	31
2.2.6.3 Secteur de Havre-aux-Maisons	31
2.2.6.4 Secteur de Pointe-aux-Loups.....	32
3.0 MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN.....	35
3.1 Données bathymétriques et topographiques.....	35
3.2 Zéro des cartes et niveau moyen des mers.....	36
3.3 Modèle d'ensemble	36
3.4 Précision des données bathymétriques et topographiques	37
3.5 Transects	44
3.5.1 Bathymétrie des différents secteurs	46
3.5.2 Secteur des étangs aérés.....	47
3.5.3 Secteur de Gros-Cap.....	48
3.5.4 Secteur de la plage du chemin des Chalets	49
3.5.5 Secteur de la Pointe de la Martinique.....	49
3.5.6 Secteur de La Grave.....	50
4. ANALYSE DES NIVEAUX D'EAU	52
4.1 Avertissement concernant les niveaux d'eau dans la baie de Plaisance.....	52
4.2 Niveaux d'eau à Cap-aux-Meules	52
4.3 Niveaux d'eau enregistrés à Cap-aux-Meules	53
4.4 Niveaux d'eau moyens à Cap-aux-Meules	54
4.5 Niveaux d'eau hauts à Cap-aux-Meules	54
4.6 Niveaux d'eau hauts historiques à Cap-aux-Meules	56
4.7 Niveaux d'eau à Charlottetown.....	63
4.8 Prédiction de niveaux d'eau hauts à Cap-aux-Meules	64
4.9 Prédiction de niveaux d'eau hauts à Havre-Aubert.....	65
5. ANALYSE DE LA GRANULOMÉTRIE	67
6. RÉGIME DES VAGUES	70
6.1 Stratégie d'analyse des vagues.....	70

6.2	Données de vent	71
6.3	Génération des vagues au large	74
6.4	Fetchs	75
6.5	Vagues au large (point 1)	75
6.6	Vagues extrêmes prédites au large	77
6.7	Conditions de vagues au large considérées pour la réfraction	78
7.	CLIMAT DE VAGUES PRÈS DE LA CÔTE	80
7.1	Modélisation de la transformation des vagues du large.....	80
7.1.1	Modèle numérique.....	80
7.1.2	Limites de la zone modélisée	80
7.1.3	Conditions aux limites	80
7.1.4	Niveau d'eau	80
7.1.5	Déferlement	81
7.1.6	Frottement sur le fond.....	81
7.2	Définition des points de calcul de la réfraction.....	81
7.3	Coefficients de réfraction.....	89
7.4	Calcul des climats de vagues réfractées.....	91
7.5	Calcul des fréquences conjuguées des vagues réfractées et des niveaux d'eau	96
8.	COURANTS LITTORAUX ET DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE	98
8.1	Modèle numérique.....	98
8.2	Résultats.....	98
9.	PROTECTION DE LA BERGE – SECTEUR DES ÉTANGS AÉRÉS	107
9.1	Mécanisme d'érosion probable.....	107
9.2	Protection en enrochement.....	108
9.3	Stabilité du pied des protections en enrochement.....	113
9.4	Crête des enrochements	115
9.5	Consolidation des falaises avec du béton	117
9.6	Rechargement de plage	119
9.7	Rechargement de plage avec butée de pied.....	121
9.8	Rechargement de plage en matériaux grossiers.....	124
9.9	Rechargement de plage avec épis.....	129

9.10	Brise-lames submersibles au large	129
9.11	Déplacement d'infrastructures	130
9.12	Solutions de protection contre l'érosion pour les étangs aérés	130
9.13	Intervention à court terme (solution d'urgence)	135
9.13.1	Plan d'action préconisé	135
9.13.2	Protection temporaire urgente de la berge	135
9.13.3	Évaluation environnementale	137
10.	PROTECTION DE LA BERGE – SECTEUR DE GROS-CAP	139
10.1	Mécanisme d'érosion probable	139
10.2	Protection en enrochement	139
10.3	Consolidation des falaises avec du béton	143
10.4	Rechargement de plage	145
10.5	Rechargement de plage avec butée de pied	147
10.6	Rechargement en bas de falaise avec des matériaux grossiers	152
10.7	Rechargement du haut de plage en matériaux grossiers	154
10.8	Rechargement de plage avec épis	156
10.9	Brise-lames submersibles au large	156
10.10	Déplacement d'infrastructures	157
10.11	Solutions en érosion pour le secteur de Gros-Cap	157
11.	PROTECTION DE LA BERGE – SECTEUR DE LA PLAGE DU CHEMIN DES CHALETS	165
11.1	Mécanisme d'érosion probable	165
11.2	Protection en enrochement	165
11.3	Rechargement de plage	166
11.4	Géotubes en haut de plage	167
11.5	Déplacement d'infrastructures et renaturation du secteur	168
11.6	Solutions en érosion pour la plage de la Martinique	169
12.	PROTECTION DE LA BERGE – SECTEUR DE LA POINTE DE LA MARTINIQUE	173
12.1	Mécanisme d'érosion probable	173
12.2	Protection en enrochement	173
12.3	Consolidation des falaises avec du béton	177
12.4	Rechargement de plage	179

12.5	Rechargement de plage avec butée de pied	181
12.6	Rechargement de bas de falaise en matériaux grossiers	184
12.7	Rechargement de plage avec épis	186
12.8	Brise-lames submersibles au large	187
12.9	Déplacement d'infrastructures	187
12.10	Solutions en érosion pour le secteur de la Pointe de la Martinique	188
13.	PROTECTION DE LA BERGE – SECTEUR DE LA GRAVE	192
13.1	Mécanisme d'érosion probable	192
13.2	Protection en enrochement	192
13.3	Rechargement de plage	196
13.4	Rechargement de plage avec butée de pied	198
13.5	Rechargement de bas de falaise en matériaux grossiers	202
13.6	Rechargement de plage mixte	204
13.7	Rechargement de plage avec épis	205
13.8	Brise-lames submersibles au large	205
13.9	Digue de protection au droit de l'ancien quai	206
13.10	Déplacement d'infrastructures	206
13.11	Solutions en érosion pour le secteur de La Grave	207
14.	COÛT GLOBAL DU PROJET ET PLAN D'ACTION	211
14.1	Coût global des interventions proposées	211
14.2	Recommandations	215
14.2.1	Secteur des étangs aérés	215
14.2.2	Chemin du Gros Cap, près de la garderie	215
14.2.3	Secteur de La Grave, partie est	216
14.2.4	Autres secteurs	216
14.3	Plan stratégique d'intervention	216
	RÉFÉRENCES	218
	ANNEXE	219

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Mandat

La municipalité des Îles de la Madeleine a demandé à Roche Ltée, Groupe-conseil (qui a retenu les services des Consultants Ropars inc. (CRI) et du Groupe-Conseil LaSalle (GCL) comme sous-traitants pour l'appuyer) d'étudier la problématique d'érosion des berges des secteurs de Gros-Cap, depuis les étangs aérés dans la baie de la Grande Échouerie, jusqu'à la Pointe de la Martinique, au début des enrochements de protection de la route 199, ainsi que le secteur de La Grave, situé à l'extrémité est de la baie de Plaisance, à Havre-Aubert. La zone d'étude a été subdivisée en cinq secteurs qui sont situés à l'extrémité nord et autour de la Baie de Plaisance : le secteur des étangs aérés, Gros-Cap, la Pointe de la Martinique et la plage de la Martinique, ainsi que La Grave (Havre-Aubert).

Ce rapport d'étape présente les activités effectuées de façon à définir, dans un premier temps, la problématique d'érosion des berges, et à proposer, dans un second temps, des interventions visant à corriger les problèmes en relation avec cette érosion.

Secteurs d'étude

Du point de vue morphologique, les secteurs de Gros-Cap (incluant les étangs aérés) et de la Pointe de la Martinique se présentent sous la forme d'alternances de falaises de grès ou sable induré en érosion et de petites plages. Le secteur de la plage de la Martinique était (avant que les chalets ne s'installent) une dune sablonneuse séparant la baie de Plaisance d'une zone marécageuse. Le secteur historique de La Grave est une plage entre deux secteurs de falaises en érosion.

De nombreuses interventions de protection de berge ont déjà eu lieu dans ces secteurs pour tenter de contrer l'érosion, avec des succès variables.

La construction domiciliaire qui a pris une ampleur remarquable depuis quelques décennies a amplifié l'impact des phénomènes d'érosion qui étaient déjà en cours sur cette portion de la côte des Îles de la Madeleine. Les changements climatiques, en particulier la disparition des glaces dans le Golfe et la hausse du niveau moyen des océans, devraient également contribuer à accélérer l'érosion de ces côtes.

Secteur des étangs aérés

Le secteur des étangs aérés est le secteur le plus au nord de la zone à l'étude. Ce secteur est caractérisé par des caps en érosion du côté nord, une plage relativement bien développée au niveau des étangs et enfin des caps en érosion du côté sud.

L'exutoire des étangs (conduite protégée par des enrochements) pourrait jouer le rôle d'un épi et retenir le transit sédimentaire en provenance du nord s'il avait la moindre efficacité. Les observations sur place montrent que cet enrochement ne retient pas vraiment de sédiments, ni d'un côté ni de l'autre de l'exutoire, les profils de plage se correspondent assez bien des deux côtés de l'exutoire et aucune inflexion des profils de plage n'est visible près de l'exutoire. Il est probable que les quantités

Secteur de La Grave

Le secteur de La Grave est essentiellement une plage entre deux secteurs de caps en érosion. Certains secteurs de la plage ont été érodés au point que, dans la partie orientale de la plage, des bâtiments se retrouvent dans l'eau lors des événements de très hauts niveaux d'eau. Certains propriétaires ont tenté de protéger leur propriété à l'aide d'enrochement et/ou de blocs de béton.

Modèle numérique de terrain

La première étape de la présente étude, après celle de la prise de connaissance de la problématique et de la collecte de données, a été de réaliser un modèle d'élévation de terrain, qui devait ensuite servir de plan de base pour les analyses. Ceci a été fait en utilisant des données provenant de :

- un levé LIDAR effectué par l'Université du Québec à Rimouski (UQAR),
- un levé bathymétrique au sonar interférométrique fait par le Centre Interdisciplinaire de Développement en Cartographie des Océans (CIDCO),
- des levés hydrographiques fournis par le Service hydrographique du Canada (SHC),
- un dessin en format AutoCAD obtenu de la municipalité des Îles de la Madeleine pour la ligne de rivage.

La bathymétrie des secteurs d'étude a aussi été représentée en faisant des transects au moyen des données décrites ci-haut. Ainsi, le secteur des étangs aérés a été décrit par six transects, le secteur de Gros Cap par huit transects, alors que cinq et sept transects ont été produits respectivement pour les secteurs de la plage et de la Pointe de la Martinique. Le secteur de La Grave a été décrit par huit transects.

Niveaux d'eau

Une analyse des niveaux d'eau a été faite sur les niveaux de Cap-aux-Meules, ainsi que ceux de Charlottetown pour fin de comparaison. Les niveaux d'eau enregistrés à Havre-Aubert ont également été utilisés. Pour Cap-aux-Meules, l'analyse des niveaux moyens, niveaux hauts et extrêmes) a permis, en tenant compte d'une évaluation éventuellement optimiste (faible) de la remontée du niveau d'eau moyen des océans (changements climatiques) et de l'affaissement isostatique des Îles (valeur globale retenue de 5 mm/an), d'établir des niveaux d'eau extrêmes pour la région de Cap-aux-Meules ou Gros-Cap, pour des périodes de retour d'un jour/an, 12h/an, ainsi que de 1, 2, 5, 10, 30 et 50 ans. Ces niveaux vont de +0,72 m NMM (c'est-à-dire par rapport au Niveau Moyen des Mers ou zéro géodésique) à +1,75 m NMM. Faute de données à long terme, les niveaux d'eau extrêmes du secteur de La Grave ont été établis par analogie avec ceux de Cap-aux-Meules en tenant compte de la variation du zéro des cartes marines (ZC) entre ces deux zones.

Granulométrie du sable

Des analyses granulométriques ont été faites par l'UQAR sur des prélèvements en mer, au large de Gros-Cap, et sur la plage le long de la route 199, au sud de la Pointe de la Martinique.

Érosion côtière baie de Plaisance

Les sédiments prélevés près de la côte devant les falaises de Cap-aux-Meules et Gros-Cap sont en général composé à 90 ou 95 % de sable fin et d'un peu de sable très fin. En s'éloignant de la côte, la proportion des sables fins et très fins s'inverse.

Les sédiments prélevés sur la plage au sud de la Pointe de la Martinique sont essentiellement un mélange de sable fin et de sable moyen où le sable fin prédomine en général.

Pour les besoins de modélisation hydro-sédimentaire, les sédiments ont été considérés comme des sables fins, soit ayant un diamètre de l'ordre de 0,25 mm.

Régime des vagues

Les vagues qui frappent le secteur de Gros-Cap peuvent provenir de deux zones distinctes, soit le large (surtout secteurs est à nord-est) et l'intérieur de la baie de Plaisance (secteurs sud à sud-est). Le climat des vagues devant Gros-Cap est une combinaison de ces deux ensembles de vagues, celles en provenance du large dominant en termes de hauteur et de période des vagues.

Les vagues ont été reconstituées au large de Gros-Cap à l'aide d'un modèle mathématique sur ordinateur, à partir des données de vent enregistrées à la station de l'aéroport des Îles de la Madeleine. Ces vagues ont ensuite été amenées près de la côte, encore à l'aide d'un modèle numérique, pour tenir compte de l'effet de la diminution de la profondeur d'eau et de la forme de la bathymétrie, pour ainsi établir le climat de vagues dans les secteurs d'étude.

Des mesures de vagues ont été faites par l'UQAR en 2010 devant Gros-Cap (données disponibles du 12 mai au 11 juillet 2010). Malgré leur très courte durée, ces mesures de vagues ont été utilisées pour tenter de valider le modèle de génération de vagues utilisé dans le cadre de cette étude.

Pour les vagues générées au large de Gros-Cap, la hauteur significative des vagues prédite pour une période de retour de 100 ans est de l'ordre de 8,3 m. Pour une période de retour de 50 ans, la hauteur significative des vagues prédite est de l'ordre de 7,9 m.

Climat de vagues près de la côte

L'effet de la réfraction a ensuite été calculé à 13 points caractérisant la zone des étangs aérés, à 20 points dans la zone de Gros-Cap et à 27 points dans la zone de La Martinique. Douze points de calcul de la réfraction des vagues ont été utilisés pour le secteur de La Grave.

Les calculs de hauteur de vagues prédites pour des périodes de retour jusqu'à 100 ans ont ensuite été faits, puis ils ont été combinés aux prévisions de niveaux d'eau pour ainsi déterminer des probabilités de hauteur de vagues et de niveaux d'eau combinés aux différents points d'intérêt.

La récurrence de 35 ans a été retenue comme correspondant à la vie utile normalement admise pour les ouvrages côtiers, surtout dans un contexte de changements climatiques.

Courants littoraux et dynamique sédimentaire

Afin d'étudier les courants induits par les vagues le long de la côte des cinq secteurs d'intérêt, des simulations ont été effectuées avec le module hydrodynamique de MIKE 21 FM et les mêmes

Érosion côtière baie de Plaisance

paramètres généraux que ceux utilisés dans la modélisation de la transformation des vagues du large, soit un niveau d'eau de +1,25 m NMM et une rugosité des fonds équivalente à celle des sables fins.

Le transport sédimentaire n'a pas fait l'objet d'une modélisation numérique en soi. Les résultats de modélisation, obtenus pour des cas de simulation bien précis, sont difficiles à synthétiser pour dresser un portrait clair et général du transport littoral. Les résultats de modélisation des courants littoraux ont plutôt été interprétés pour chaque secteur afin de dégager les tendances générales de la dynamique sédimentaire et émettre certaines recommandations quant aux solutions de protection envisagées.

Protection de la berge – Secteur des étangs aérés

Les causes probables de l'érosion dans le secteur des étangs aérés sont :

- l'empiètement des étangs aérés sur la plage lors de la construction originale,
- la décroissance de l'érosion des falaises de Cap-aux-Meules, suite à la construction du havre de Cap-aux-Meules et aux tentatives de protection de ces falaises (d'où un apport réduit en sédiments dans le secteur des étangs aérés),
- l'accroissement du nombre d'épisodes de très hauts niveaux d'eau, surtout lorsqu'ils sont accompagnés de vagues.

Les mécanismes du déséquilibre sédimentaire et du recul de la côte ont diverses origines allant toutes dans le même sens :

- moins d'apports de sédiments des falaises de Cap-aux-Meules, suite aux efforts de protection de ces falaises (qui ne vont probablement pas diminuer),
- niveaux d'eau en hausse généralisée (hausse du niveau moyen des océans et affaissement isostatique des îles),
- énergie des vagues en hausse au niveau du littoral (plus de tempêtes avec la disparition des glaces dans le contexte des changements climatiques).

De plus, la combinaison de certains facteurs comme les niveaux d'eau extrêmes et les vagues de tempête décuple l'effet de ces facteurs individuels sur l'érosion côtière.

Les moyens de protection de la berge qui ont été considérés sont :

- Protection en enrochements ;
- Rechargement de plage au moyen de sable ;
- Rechargement de plage avec butée de pied ;
- Rechargement de plage avec matériaux grossiers ;
- Rechargement de plage avec épis ;
- Construction d'un brise-lames submersible au large ;
- Déplacement d'infrastructures.

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

Construction d'un brise-lames submersible au large

Mêmes commentaires que pour les autres secteurs. Cette solution doit être accompagnée d'un rechargement artificiel de la plage pour être viable.

Déplacement d'infrastructures

Même commentaire que pour la plage de la Martinique. Si aucune protection n'est mise en place au pied des falaises dans ce secteur, toutes les infrastructures en place (maisons, routes, services) sont menacées à moyen ou long terme.

Solution recommandée pour le secteur de Pointe de la Martinique

Les solutions les plus évidentes en matière de protection contre l'érosion des falaises dans le secteur de la Pointe de la Martinique sont la protection à l'aide d'un **enrochement linéaire** ou la solution de **rechargement avec des matériaux grossiers** (rip-rap local ou galets importés). Ces solutions devraient éventuellement être modulées en fonction de l'importance des infrastructures à protéger, le retrait ou l'absence d'intervention pouvant être des solutions nettement plus économiques que la protection. La solution en galets importés aurait le potentiel d'être nettement moins chère que les deux autres solutions, mais requerrait des essais en modèle réduit pour en déterminer la configuration optimale.

La solution en enrochement serait du type « permanent » (35 ans de vie utile sans interventions majeures, à condition de stabiliser le pied de l'enrochement) alors que la solution en rip-rap extrait des carrières des îles de la Madeleine serait une solution nécessitant des rechargements périodiques.

Protection de la berge – Secteur de la Grave

Les mécanismes d'érosion liés à la hausse des niveaux d'eau et à l'augmentation de l'énergie des vagues sur la plage et au pied de falaises mentionnés pour les secteurs précédents sont également impliqués dans les problèmes relevés dans le secteur de La Grave. La largeur de la plage a diminué au point que l'eau entoure certaines maisons trop avancées sur la plage lors des événements de très hauts niveaux d'eau.

Les moyens de protection de la berge qui ont été considérés sont les mêmes que pour les secteurs précédents, soit :

- Protection en enrochements ;
- Rechargement de plage au moyen de sable ;
- Rechargement de plage avec butée de pied ;
- Rechargement de plage avec matériaux grossiers ;
- Rechargement de plage avec épis ;
- Construction d'un brise-lames submersible au large ;
- Déplacement d'infrastructures.

Les analyses pour ce secteur résultent en des commentaires semblables à ceux des autres secteurs :

Protection en enrochements

La protection de la berge à l'aide d'enrochements n'est pas du tout un type de protection adapté au caractère récréotouristique du secteur (plage dans un secteur historique).

Rechargement de plage au moyen de sable

Il faudrait envisager plus de 600 m³/m de sable pour recharger la plage dans la partie touristique de La Grave (à condition d'être en mesure de retenir ce sable devant la plage). Même avec ce volume et un sable d'un diamètre de 0,3 mm, la relation concernant le volume critique de sédiments n'est pas respectée, ce qui laisse entrevoir des problèmes de stabilité de ce rechargement.

Du rechargement de plage en sable sans autre intervention n'est donc pas recommandable dans le secteur, les quantités requises pour un minimum de durabilité de ce rechargement étant importantes et les critères de stabilité et durabilité de ce rechargement de plage n'étant pas respectés. Pour un volume de 600 m³/m de sable de rechargement sur une largeur minimale de 400 m de la plage, on parle de 240 000 m³ de sable à installer devant la plage de La Grave.

Rechargement de plage avec butée de pied

Le choix d'une butée en rip-rap ou géotubes placée au 0 NMM implique de placer environ 200 m³/m de sable de rechargement sur une largeur minimale de 400 m de plage. En plus des protections en pied de plage et des épis aux 100 m C/C et sur les côtés de la recharge, on parle donc de 80 000 m³ de sable requis pour recharger une première fois cette plage suspendue. Si on veut que la butée de pied de plage ne soit pas apparente (crête à -1,5 m NMM), il faudrait compter placer environ 360 m³/m de sable de rechargement sur une largeur minimale de 400 m de plage, soit 145 000 m³ de sable. Des épis régulièrement espacés (environ 100 m C/C) devront être installés le long du rivage pour contrer le transit littoral relativement important dans ce secteur qui viderait à moyen terme la zone de son sable si cette précaution n'était pas prise.

L'utilisation de géotubes comme butée de pied de plage serait également possible, avec les risques déjà évoqués pour les autres secteurs.

Rechargement avec des matériaux grossiers

Un rechargement de plage en matériaux tout-venant de carrière des Îles, en galets, en gravier ou en sable et gravier pourrait être plus intéressant que du rechargement en sable, mais le caractère récréotouristique de la zone impliquerait probablement, chaque début d'été, le recouvrement des matériaux grossiers (placés comme noyau dur) par du sable sur une épaisseur suffisante pour conserver le caractère récréatif de plage; ce genre de solution est attrayante par rapport au rechargement en sable, mais nécessite des études plus poussées et en particulier des essais en modèle réduit (idéalement 3D) afin d'optimiser la géométrie du rechargement.

Rechargement de plage avec épis

Mêmes commentaires que pour les autres secteurs. Cette solution n'est pas recommandable (risques de fuite du sable vers le large, quantités de matériaux et coûts).

Construction d'un brise-lames submersible au large

Mêmes commentaires que pour les autres secteurs. Cette solution doit être accompagnée d'un rechargement artificiel de la plage pour être viable.

Déplacement d'infrastructures

Même si un programme de protection ou de restauration de la plage est mis en œuvre dans ce secteur, certaines infrastructures en place (maisons à l'extrémité est de la plage) sont trop avancées sur la plage et leur solage est une aberration dans ce genre de contexte. Leur déménagement et probablement leur reconstruction sur pilotis (comme à l'origine) devraient être envisagés.

Solution recommandée pour le secteur de La Grave

Les solutions les plus évidentes en matière de protection contre l'érosion du secteur de La Grave sont la protection à l'aide d'un **rechargement avec des matériaux grossiers** (rip-rap) dans la partie ouest du secteur (mur le long de la route 199 et falaises) et un **rechargement mixte** (noyau de matériaux grossiers recouvert de sable et gravier) pour la partie orientale plus touristique du secteur. Cette solution n'a toutefois pas pu être dimensionnée dans le cadre de la présente étude; elle nécessiterait une étude en modèle réduit pour bien étudier la stabilité des matériaux de rechargement, et éventuellement la nécessité d'inclure une butée de pied et des épis dans la solution.

La solution de protection du secteur ouest en rip-rap extrait des carrières des îles de la Madeleine est une solution nécessitant des rechargements réguliers. L'inconvénient principal de la solution en enrochement est la dégradation du peu de plage qui resterait en avant de l'enrochement, ce qui entraînerait la dégradation de la plage du secteur oriental de La Grave, le plus touristique, alors que la solution en rip-rap entretiendrait et améliorerait les plages adjacentes (dont celle du secteur historique) à travers le processus de dégradation des pierres constituant le rip-rap. Il est à noter que le secteur ouest ne requiert pas une intervention de protection immédiatement, mais qu'il pourrait devenir problématique dans le futur.

La solution de rechargement de plage du secteur historique (avec ou sans noyau en galets ou rip-rap) est une solution nécessitant des rechargements réguliers. La mise en place de la butée de pied de plage et des épis transversaux limiterait les besoins en rechargement, mais ne les éliminerait pas. Il s'agit de la seule solution qui permet de conserver le cachet de ce secteur névralgique du tourisme au îles de la Madeleine. Outre les études d'optimisation du concept en modèle hydraulique, la recherche d'une source de sédiments de recharge est aussi à étudier.

Coûts du projet et plan d'action

L'ensemble des coûts des interventions proposées dans cette étude est résumé dans le tableau qui suit. Même en choisissant la solution de moindre coût pour chaque secteur (qui n'est pas nécessairement la meilleure solution sur le plan environnemental ou sur le plan de l'utilisation du territoire), on obtient un coût total qui dépassera \$ 33 millions, sans compter le coût du déménagement éventuel des chalets du chemin des Chalets (plage de la Martinique).

Les remarques suivantes sont importantes pour bien comprendre les estimations de coûts produites dans cette étude :

- 1) La précision des estimations pourrait être affectée par les conditions géotechniques réelles des sites. À ce stade-ci, nous avons posé des hypothèses qui sont basées sur certaines observations visuelles et sur certaines données générales, concernant la profondeur du roc et les épaisseurs de matériaux meubles (sable) en surface. Des études géotechniques plus détaillées seront requises dans les prochaines étapes d'analyse du projet (conception détaillée et préparation des plans et devis pour construction) pour préciser les interventions à faire.
- 2) Les coûts unitaires proposés dans les estimations de coûts sont valides pour les solutions globales proposées. Certains coûts unitaires pourraient donc varier (probablement à la hausse) si les projets sont subdivisés en diverses phases de réalisation.
- 3) Compte tenu de l'envergure des solutions proposées, et du fait que ces projets doivent être considérés globalement sur le plan environnemental, il est certain qu'une étude d'impact environnemental devra être réalisée, avec la possibilité d'audiences publiques (BAPE). Il faut donc compter au moins 2 années avant d'en arriver à l'étape de réalisation.
L'intervention à court terme aux étangs aérés pourra probablement faire l'objet d'une exemption puisqu'il s'agit d'une mesure d'urgence, mais il faudra quand même obtenir un certificat d'autorisation du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). Il y a lieu de noter que l'ajout de pierre de carapace réalisé en août 2011 par la Ville dans le but de faire face à l'ouragan Irène (26 août 2011) a renforcé, du moins à court terme, la protection des étangs aérés.
- 4) Les coûts des diverses solutions sont présentés en dollars constants de 2011, même si certaines comportent des rechargements périodiques qui devront être réalisés dans 7-8 ans (sable) ou dans 15 ans (matériaux grossiers). Ceci permet de comparer les valeurs actuelles des solutions.
- 5) Les solutions en enrochement comportent des risques élevés de dépassement de coûts lors des travaux, à cause des conditions des sites qui sont plus ou moins bien définies au présent stade des études, par exemple : connaissance approximative de la profondeur du roc (influe sur les coûts d'excavation), difficulté de prendre en compte les conditions particulières d'accès à diverses parties des ouvrages à construire, topographie et bathymétrie plus ou moins bien définies. Les solutions en galets importés ou rip-rap local sont nettement moins susceptibles de connaître des problèmes de contrôle des coûts de construction.
- 6) Pour les solutions comportant des butées de pied, deux solutions techniques ont été décrites pour ces butées, soit les enrochements et les géotubes. Pour les estimations de coûts, seulement des enrochements ont été considérés, parce que les géotubes comportent, selon nous, un risque plus grand que les enrochements sur le plan de la durabilité (impacts d'objets flottants, glaces, rayons UV, vandalisme). Ceci ne signifie pas

que les géotubes devraient être rejetés, mais simplement qu'il faudra les aborder avec une certaine prudence, s'ils apparaissent comme une alternative intéressante dans les étapes ultérieures d'analyse du projet.

Résumé des coûts des solutions proposées pour les 5 secteurs de l'étude

SECTEUR DES ÉTANGS AÉRÉS

<i>Solution 1 – Enrochement</i>		914 000 \$	
Solution 2 – Rechargement de la plage avec butées	Coût initial :	4 124 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 7-8 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans)
	Rechargements périodiques :	<u>2 103 000 \$</u>	
	Coût total :	6 227 000 \$	
Solution 3 – Rechargement de la plage avec matériaux grossiers	Coût initial :	908 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 15 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans). À valider par des études complémentaires, y inclus modélisation physique.
	Rechargements périodiques :	<u>454 000 \$</u>	
	Coût total :	1 362 000 \$	
Intervention à court terme (solution d'urgence) - Rechargement de la plage avec matériaux grossiers (quantité réduite vs Solution 3)		304 000 \$	

SECTEUR DE LA POINTE DE LA MARTINIQUE

Solution 1 – Enrochement (700 m.l.)		4 901 000 \$	
Solution 2 – Rechargement de la plage avec matériaux grossiers (700 m)	Coût initial :	4 404 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 15 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans). À valider par des études complémentaires, y inclus modélisation physique.
	Rechargements périodiques :	<u>2 202 000 \$</u>	
	Coût total :	6 606 000 \$	

SECTEUR DE LA GRAVE

Solution 1 – Partie ouest - Rechargement de la plage avec matériaux grossiers (350 m)	Coût initial :	1 949 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 15 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans).
	Rechargements périodiques :	<u>1 021 000 \$</u>	
	Coût total :	2 970 000 \$	
Solution 1 – Partie est - Rechargement de la plage (350 m) avec épis transversaux et butées de pied	Coût initial :	6 323 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 15 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans). À valider par des études complémentaires, y inclus modélisation physique.
	Rechargements périodiques :	<u>3 266 000 \$</u>	
	Coût total :	9 589 000 \$	

Recommandations

Il est certain que la Ville devra prioriser certaines interventions et en reporter d'autres, compte tenu du coût global très important du programme d'intervention.

Secteur des étangs aérés

La première priorité sera certainement le secteur des étangs aérés, pour lequel un budget de 1,2 à 1,4 million de dollars devra être prévu, selon qu'on décidera de mettre en place la solution de l'enrochement ou bien celle du rechargement avec matériaux grossiers.

À très court terme, une intervention d'urgence est proposée (voir section 9.11) pour assurer une protection minimum aux étangs, le temps de compléter les études techniques et environnementales, et d'obtenir les autorisations requises pour les solutions à plus long terme.

Chemin du Gros Cap, près de la garderie

Un second endroit où une intervention apparaît nécessaire rapidement est celui où la route se rapproche de la mer, dans le secteur de Gros Cap, à environ 400 m au sud de la garderie. La distance du bord de la route jusqu'au haut de la falaise est à peine 8 m à cet endroit. La protection de la route impliquerait le rechargement de la plage avec des matériaux grossiers, de façon à remplir l'échancrure dans la falaise pour créer une plage qui servira ensuite d'amortisseur de houle. NOTE : de la pierre (en faible quantité) a déjà été déversée à cet endroit, dans une tentative pour ralentir l'érosion.

Cette plage de matériaux grossiers pourrait être construite en forme d'arc de cercle et s'étendre sur une trentaine de mètres de longueur de littoral. Le travail pourra se faire à partir du sommet de la falaise, en y positionnant une grue qui pourra déposer la pierre sur la plage existante, au bas de la falaise. La grue serait alimentée par des camions qui transporteraient la pierre à partir d'une carrière locale. Une particularité du site est qu'une ligne électrique le traverse, ce qui constituera un obstacle pour le travail.

Cette intervention constitue en fait la mise en place partielle de la solution 2 proposée pour ce secteur. Le volume de matériaux requis pourra être déterminé de façon exacte suite à un relevé topobathymétrique (à réaliser). Le coût devrait se situer entre 100 \$ et 200 000 \$. (taxes en sus).

Secteur de La Grave, partie est

Le troisième secteur à protéger est celui de la partie est de La Grave, à cause de son caractère historique, patrimonial et touristique. Tel que décrit au chapitre 13, la seule intervention qu'il a été possible de dimensionner dans le cadre restreint de cette étude a été celle du rechargement de plage en sable. Par contre, il y a de sérieuses présomptions sur le fait que cette solution pourrait se révéler instable à cause des matériaux fins considérés. Une solution de rechargement utilisant un mélange de galets, graviers et sable serait nettement préférable, plus durable et probablement moins onéreuse que le rechargement en sable (les quantités de matériaux requis devant être moindres). Par contre, ce genre de rechargement ne se conçoit qu'au moyen d'essais en modèle réduit, suite à une étude des sources potentielles de ce genre de matériaux. Le coût de l'intervention de recharge en sable a été estimé à 9,6 M\$ (voir section 13.11) sur 35 ans.

Autres secteurs

Pour les autres secteurs, des choix devront être faits, selon les priorités de la Municipalité et les budgets qui seront disponibles.

Plan stratégique d'intervention

Un plan stratégique d'intervention devra donc être mis en place, le coût de l'ensemble des projets étant significatif.

Des solutions de protection de berge ou de rechargement de plage non traditionnelles ont été présentées dans ce rapport. Ces solutions ont le potentiel de réduire significativement le coût des protections de berge ou de restauration du milieu par rapport aux solutions traditionnelles. Par

Érosion côtière baie de Plaisance

contre, il n'existe pas de « recette » paramétrique pour définir les caractéristiques géométriques de ces solutions. Seuls des projets-pilotes avec suivi sur plusieurs années ou des essais en modèle réduit permettraient de concevoir de telles solutions dans le contexte de la Baie de Plaisance. Il est recommandé de lancer sans trop tarder :

- un programme de recherche de matériaux disponibles pour le genre de projet envisagé, de façon à définir des granulométries de matériaux réalistes,
- un programme d'essais en modèle réduit visant à cerner les paramètres géométriques de ce genre de solutions dans la Baie de Plaisance (et ailleurs au Québec – secteur de Pointe-aux-Loups, Gaspésie, Côte-Nord),
- l'intervention d'urgence aux étangs aérés et celle pour la protection du chemin du Gros Cap devraient être vus comme projets pilotes pour la solution de rechargement avec des matériaux grossiers. Ils devraient donc faire l'objet d'un suivi régulier, suite à leur mise en place, pour vérifier leur comportement dans le temps, en particulier suite aux tempêtes qui se produiront inévitablement. Les données et informations qui pourront en être tirées seront très utiles pour valider et, au besoin, apporter des correctifs aux concepts proposés dans la présente étude.

Le nouveau laboratoire de l'INRS-ETE à Québec permettrait de réaliser des essais à des échelles très intéressantes pour le genre de problématique à résoudre. Ce programme d'essais devrait normalement intéresser plusieurs ministères provinciaux et fédéraux, de même que de nombreuses municipalités.

1.0 INTRODUCTION

Les Îles-de-la-Madeleine sont situées au sud-est du Golfe du Saint-Laurent (figure 1.1). La Baie de Plaisance est située dans la portion sud des îles, et fait face à l'est.

La municipalité des Îles de la Madeleine a demandé à Roche Ltée, Groupe-conseil (qui a retenu les services des Consultants Ropars inc. (CRI) et du Groupe-Conseil LaSalle (GCL) comme sous-traitants pour l'appuyer) d'étudier la problématique d'érosion des berges des secteurs de Gros-Cap, depuis les étangs aérés dans la baie de la Grande Échouerie, jusqu'à la Pointe de la Martinique, au début des enrochements de protection de la route 199. La zone d'étude a été subdivisée en quatre secteurs qui sont situés à l'extrémité nord et au nord de la Baie de Plaisance, tel que montré à la figure 1.2 : le secteur des étangs aérés, Gros-Cap, la Pointe de la Martinique, la Plage de la Martinique ou chemin des Chalets. En cours d'étude, un cinquième secteur a été ajouté au mandat, soit le secteur historique de La Grave à Havre-Aubert.

Ce rapport est le compte rendu final de l'étude. Il présente les activités effectuées de façon à définir, dans un premier temps, la problématique d'érosion des berges, et dans un second temps, à proposer des interventions visant à corriger les problèmes en relation avec cette érosion.

Tel que défini dans les termes de référence préparés par la Ville, le mandat a consisté, en résumé, à réaliser les activités suivantes :

- Prendre connaissance de l'ensemble des données existantes relatives à la problématique d'érosion : bornes d'érosion, photographies aériennes multidates, photos terrains multidates, données de bathymétrie, sismique, LIDAR, orthophotos, analyses granulométriques, données provenant de la Gestion des données scientifiques intégrées (GDSI) du Service hydrographique du Canada (SHC) de Pêches et Océans Canada (MPO),
- Réaliser un modèle numérique d'élévation en continu, intégrant les données du levé LIDAR 2009 (partie terrestre incluant l'arrière côte, la plage et l'estran à marée basse) et du levé bathymétrique au sonar interférométrique (zone immergée entre le 2 et le 10 m marégraphique) fournis par le Service de l'atténuation des risques du Ministère de la Sécurité Publique (SARMSP). Compléter le modèle vers la plage avec 20 profils de plage fournis par le SAR-MSP, et vers les grandes profondeurs (plus de 10 mètres) avec les données du SHC fournies par le SAR-MSP. Créer une vue 3D de l'ensemble des données et faire au moins 12 transects perpendiculaires à la côte,
- Analyser la variation des niveaux d'eau en considérant les données des stations du SHC (Service Hydrographique du Canada) des Îles-de-la-Madeleine (Cap-aux-Meules, Havre Aubert, Millerand, Grande-Entrée) et celles de Charlottown. Tenir compte du rehaussement du niveau marin selon les dernières prédictions du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Analyser les niveaux extrêmes et déduire les niveaux d'eau de conception des ouvrages côtiers envisagés,

- Analyser la granulométrie des sédiments de plage,
- Déterminer le régime des vagues au large, calculer les vagues extrêmes prédites au large, établir les principales combinaisons de direction, périodes et hauteurs des vagues,
- Modéliser la transformation des vagues à l'approche de la côte (différentes combinaisons de périodes, hauteurs et directions des vagues, et de niveaux d'eau. Calculer le régime des vagues sur 12 transects le long des ouvrages envisagés. Déduire les vagues caractéristiques en termes de hauteur et de fréquence qui serviront au dimensionnement des ouvrages côtiers envisagés,
- Analyser le transport sédimentaire. Expliquer la dynamique d'ensemble du transport des sédiments dans la baie de Plaisance,
- Procéder à l'étude et à la validation de scénarios pour la protection contre l'érosion. Proposer un dimensionnement et une méthode de construction, fournir des croquis d'avant-projet de chacun des ouvrages proposés. Estimer le coût de chacun des ouvrages proposés, y inclus les coûts d'entretien,
- Proposer des scénarios alternatifs s'il y a lieu.

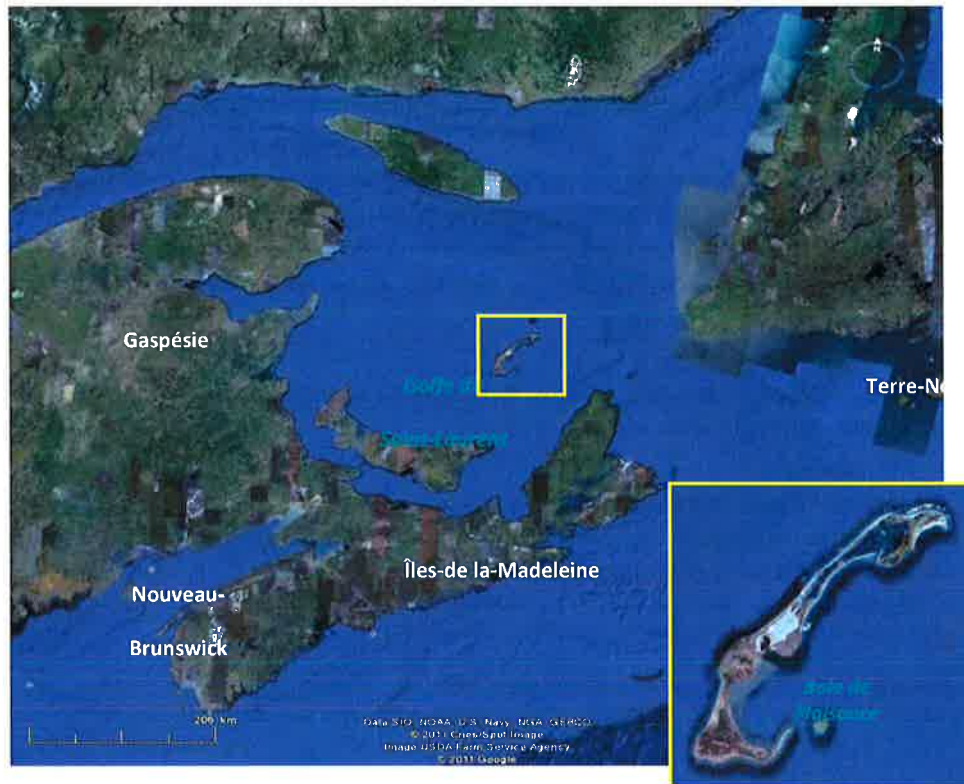


Figure 1.1 – Les Îles de la Madeleine



Figure 1.2 - Les cinq secteurs de la zone d'étude

2.0 SITUATION ACTUELLE

2.1 Caractéristiques des zones évaluées

Du point de vue morphologique, les zones des secteurs de Gros-Cap (incluant les étangs aérés) et de la Pointe de la Martinique se présentent sous la forme d'alternances de falaises de grès ou sable induré en érosion et de petites plages. Le secteur de la plage de la Martinique ou chemin des Chalets était (avant que les chalets ne s'installent) une dune sablonneuse séparant la baie de Plaisance d'une zone marécageuse. Le secteur de La Grave est une plage entre des falaises en érosion.

De nombreuses interventions de protection de berge ont déjà eu lieu dans ces secteurs pour tenter de contrer l'érosion de ces zones côtières, avec des succès variables.

La construction domiciliaire qui a pris une ampleur remarquable depuis quelques décennies a amplifié l'impact des phénomènes d'érosion qui étaient déjà en cours sur cette portion de la côte des Îles de la Madeleine. Les changements climatiques (disparition des glaces dans le Golfe et hausse du niveau moyen des océans) devraient également contribuer à accélérer l'érosion de ces côtes.

2.2 Visite des sites

Une visite de terrain a été effectuée à l'occasion de la réunion de démarrage du projet le 26 janvier 2011. Une tempête du secteur nord-est a soufflé le 27 janvier, ce qui a été l'occasion de revoir la zone d'étude avant, pendant et immédiatement après la tempête (26-27-28 janvier).

Tous les secteurs à l'étude ont été visités au moins à deux occasions (dont certains pendant la tempête à marée haute) et d'autres secteurs (hors mandat) ont également fait l'objet de visites pour évaluer de façon plus globale le phénomène d'érosion aux Îles et observer l'efficacité de certaines interventions de protection faites au cours des années, autant du côté de la Baie de Plaisance que dans les secteurs de Havre-aux-Maisons et Pointe-aux-Loups.

2.2.1 Secteur des étangs aérés

Le secteur des étangs aérés est le secteur le plus au nord de la zone à l'étude. Ce secteur est caractérisé par des caps en érosion du côté nord, une plage relativement bien développée au niveau des étangs et enfin des caps en érosion du côté sud (secteur adjacent dans la présente étude). Cette plage est la première vraie plage du secteur en partant du havre de Cap-aux-Meules et en allant vers le sud.

L'exutoire des étangs (conduite protégée par des enrochements) pourrait jouer le rôle d'un épi et retenir le transit sédimentaire en provenance du nord s'il avait la moindre efficacité. Les observations sur place montrent que cet enrochement ne retient pas vraiment de sédiments, ni d'un côté ni de l'autre de l'exutoire, les profils de plage se correspondent assez bien des deux côtés de l'exutoire et aucune inflexion des profils de plage n'est visible près de l'exutoire. Il est probable que les quantités de sédiments en transit dans le secteur sont largement insuffisantes pour être retenues par l'exutoire des étangs aérés et alimenter la plage.



Figure 2.32 Pointe de la Martinique – Roche constituant la falaise : grès / sable induré surmonté de graviers

2.2.5 Secteur de La Grave (Havre-Aubert)

Le secteur historique de La Grave est essentiellement une plage entre deux secteurs de caps en érosion. L'extrémité ouest de la plage est protégée de façon artificielle par un enrochement puis par un mur. Le centre de la plage semble encore relativement stable, l'absence de bâtiments pouvant expliquer cette stabilité relative. Le secteur oriental de la plage a été érodé au point que des bâtiments se retrouvent dans l'eau lors des événements de très hauts niveaux d'eau. Certains propriétaires ont tenté de protéger leur propriété à l'aide d'enrochement et/ou de blocs de béton. Certains solages ont été complètement dégaris du remplissage qui les protégeait et au moins une fondation s'est affaissée, nécessitant une intervention de redressement et de soutien du bâtiment affecté.



Figure 2.33 Extrémité occidentale de la plage de La Grave – Enrochement et mur



Figure 2.34 Milieu et partie occidentale de la plage de La Grave



Figure 2.35 Début de la protection placée par les propriétaires des maisons



Figure 2.36 Fondation de bâtiment affaissée, suite à l'érosion de la plage



Figure 2.37 Fondation de maison exposée par l'érosion de la plage



Figure 2.38 Protection de berge improvisée dans la partie orientale de la plage

Des photos prises en 2002 montrent que la maison de la photo précédente était déjà à cette époque protégée par les enrochements que l'on retrouve en 2011.



Figure 2.39 Vue de la partie orientale de La Grave en 2002



Figure 2.40 Protection de berge devant la maison la plus à l'est sur la plage de La Grave en 2002

2.2.6 Autres secteurs

2.2.6.1 Secteur de l'hôpital de Cap-aux-Meules

Le secteur de l'hôpital de Cap-aux-Meules est en érosion sévère. Il est remarquable de constater la quasi-absence de plages au pied de ces falaises en érosion. Seules quelques microplages de galets se retrouvent de place en place.

Par endroits, l'érosion de la falaise se fait par effondrement vertical du terrain (cheminées) en retrait de la face externe de la falaise. Ce type d'érosion se retrouve également dans le secteur de la Pointe de la Martinique. Des trous apparaissent régulièrement le long de la promenade. Quelques actions de protection ont été faites au niveau des trous qui menaçaient directement certaines portions de la promenade.

3.0 MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN

La première étape de l'étude consistait à mettre au point un modèle numérique d'élévation de terrain intégrant tous les relevés topographiques et bathymétriques disponibles dans la zone à l'étude.

Afin de pouvoir utiliser le même modèle de terrain pour la modélisation de la transformation des vagues du large, un modèle d'ensemble allant jusqu'à des profondeurs de -40 m a d'abord été mis au point. Ce modèle utilise un maillage flexible qui permet de varier la résolution des mailles de calculs. Le modèle présente ainsi des mailles de quelques centaines de mètres au large et des mailles de l'ordre de 10 à 15 m dans les secteurs d'intérêt (section 3.3).

Pour l'extraction des transects de plage, nécessitant une représentation beaucoup plus précise des fonds, les données bathymétriques et topographiques ont été traitées à l'aide d'un maillage aux différences finies (cellules rectangulaires) offrant une résolution de l'ordre du mètre (section 3.5).

3.1 Données bathymétriques et topographiques

Quatre principales sources de données ont été utilisées pour mettre au point le modèle numérique d'élévation de terrain :

- Levé LIDAR effectué par l'université du Québec à Rimouski (UQAR) en 2009 sur la zone couvrant la partie terrestre, incluant l'arrière côte, la plage et l'estran à marée basse (réf. [4]). Dans les secteurs des étangs aérés, Gros-Cap, Baie de Plaisance et La Grave¹, le levé LIDAR comptait près de 4,6 millions de points ;
- Levé bathymétrique au sonar interférométrique relevé par le Centre Interdisciplinaire de Développement en Cartographie des Océans (CIDCO) pour la zone immergée entre les isobathes -2 m et -10 m (niveaux marégraphiques) (réf. [3]). Ce levé a été réalisé à la demande du Service de l'atténuation des risques du Ministère de la Sécurité publique (SAR-MSP) et comptait près de 77,8 millions de points ;
- Levés hydrographiques fournis par le Service hydrographique du Canada (SHC) pour couvrir les zones plus au large et la bande de données manquante entre les données LIDAR et les données bathymétriques du CIDCO. Une grille de résolution de 50 m par 50 m intégrant les levés les plus récents a été fournie par le SHC ;
- Dessin en format AutoCAD « idm_topo_a.dwg » obtenu auprès de la municipalité des Îles de la Madeleine pour la ligne de rivage. Dans les secteurs d'intérêt, cette ligne de rivage a par la suite été modifiée pour inclure les relevés topographiques du LIDAR.

Toutes les données bathymétriques et topographiques disponibles ont été combinées dans l'interface de pré-traitement MikeZero. Comme les données du SHC couvraient la zone entière du modèle

¹ Noms des fichiers utilisés : BaiePlaisance1_grd.xyz, BaiePlaisance2_grd.xyz, BaiePlaisance3_grd.xyz, BaiePlaisance4_grd.xyz, Havre-Aubert2_grd.xyz, GrosCap1_grd.xyz et GrosCap2_grd.xyz.

numérique et se superposaient à certains endroits aux données de haute résolution du CIDCO, les données du CIDCO, plus précises et plus récentes, ont été privilégiées.

3.2 Zéro des cartes et niveau moyen des mers

L'équivalence entre le zéro des cartes (ZC) et le niveau moyen des mers (NMM) est établie par le SHC à trois endroits différents dans la zone à l'étude (tableau 3.1). Compte tenu de la superficie importante couverte par le modèle numérique, la valeur moyenne des équivalences ZC-NMM a été utilisée pour convertir les niveaux référencés d'un système à l'autre. Ainsi, sur la base des informations données par le SHC, il faut soustraire 0,65 m à un niveau marégraphique (ou ZC) pour le convertir en niveau géodésique (ou NMM).

Tableau 3.1 : Équivalences ZC et NMM dans le secteur de la Baie de Plaisance

Station	ZC (m)	NMM (m)	ZC - NMM
79KZ130 (Cap-aux-Meules)	3,206	2,441	0,765
79KZ090 (Havre-Aubert)	14,096	13,477	0,619
M01L9062 (Île d'Entrée)	3,291	2,727	0,564
		moyenne	0,65 m

Il est à noter que l'UQAR et le CIDCO ont également utilisé cette équivalence moyenne pour la conversion de leurs données (réf. [4]).

3.3 Modèle d'ensemble

Le nombre de données bathymétriques et topographiques disponibles dans la zone d'ensemble du modèle dépassait largement la capacité d'interpolation du modèle numérique et les données ont dû être filtrées. Pour les données LIDAR et les données bathymétriques du CIDCO en eau peu profonde, la résolution finale des données est de 5 m. Plus au large, la résolution finale des données du CIDCO est de 15 m. L'espacement des données du SHC (50 m) n'a pas été modifié.

Les élévations du LIDAR et du sonar interférométrique du CIDCO étaient déjà exprimées en niveau géodésique. Les données du SHC, initialement référencées par rapport au zéro des cartes, ont donc été converties en niveaux géodésiques (voir section précédente). Toutes les coordonnées en plan ont été référencées selon le système de projection MTM4 NAD83.

La bathymétrie numérique du modèle d'ensemble est illustrée à la figure 3.1 et aux abords des secteurs des étangs aérés, de Gros-Cap et de La Martinique à la figure 3.3. Les figures 3.2 et 3.4 présentent le maillage correspondant dans chacune de ces zones. Le secteur de La Grave est illustré à la figure 3.5. Tel que mentionné précédemment, le modèle d'ensemble présente des mailles de

quelques centaines de mètres au large et des mailles de l'ordre de 10 à 15 m dans les secteurs d'intérêt.

Finalement, une vue tridimensionnelle de la bathymétrie dans la Baie de Plaisance est illustrée à la figure 3.6.

3.4 Précision des données bathymétriques et topographiques

Le modèle numérique de terrain présenté à la section précédente résulte de l'interpolation des données disponibles dans le secteur de l'étude. Tel que mentionné à la section 3.1, les levés LIDAR et les relevés CIDCO utilisés dans le montage du modèle numérique sont tous deux récents et comptent chacun plusieurs millions de points. La précision du terrain modélisé dans les zones couvertes par ces relevés est donc excellente.

Entre les relevés LIDAR et CIDCO, la précision du modèle numérique de terrain est toutefois discutable. En effet, la modélisation de la bathymétrie dans cette zone repose entièrement sur les données du SHC, qui comportent plusieurs sources d'incertitude :

- Le fichier gridé de bathymétrie fourni par le SHC est lui-même une extraction d'un modèle de terrain intégrant toutes les données disponibles au SHC. La résolution et la provenance des données brutes à l'origine de cette grille ne nous ont pas été précisées;
- Bien que le fichier gridé ne soit pas spécifiquement daté, la plupart des levés hydrographiques réalisés par le SHC dans la baie de Plaisance datent des années 1984-1985. Les relevés du SHC ayant servi à l'élaboration du modèle de terrain datent donc probablement de plus de 25 ans.

Compte tenu de la date des relevés du SHC, il est possible qu'ils ne reflètent plus avec exactitude la bathymétrie des fonds. De plus, il est possible qu'un certain degré d'imprécision provienne de la façon dont le fichier gridé est produit.

En l'absence d'autres données, il a tout de même été décidé d'utiliser les données du SHC dans la zone comprise entre les relevés LIDAR et CIDCO. Il convient toutefois de souligner que la précision de cette source de données est incertaine et que le modèle numérique de terrain qui en résulte présente le même degré d'imprécision.

Pour mieux connaître la bathymétrie des fonds en eau peu profonde et valider les données du SHC, il serait recommandé d'effectuer un sondage bathymétrique au sondeur électronique standard (si les profondeurs d'eau le permettent) ou des transects de plage à intervalles réguliers.

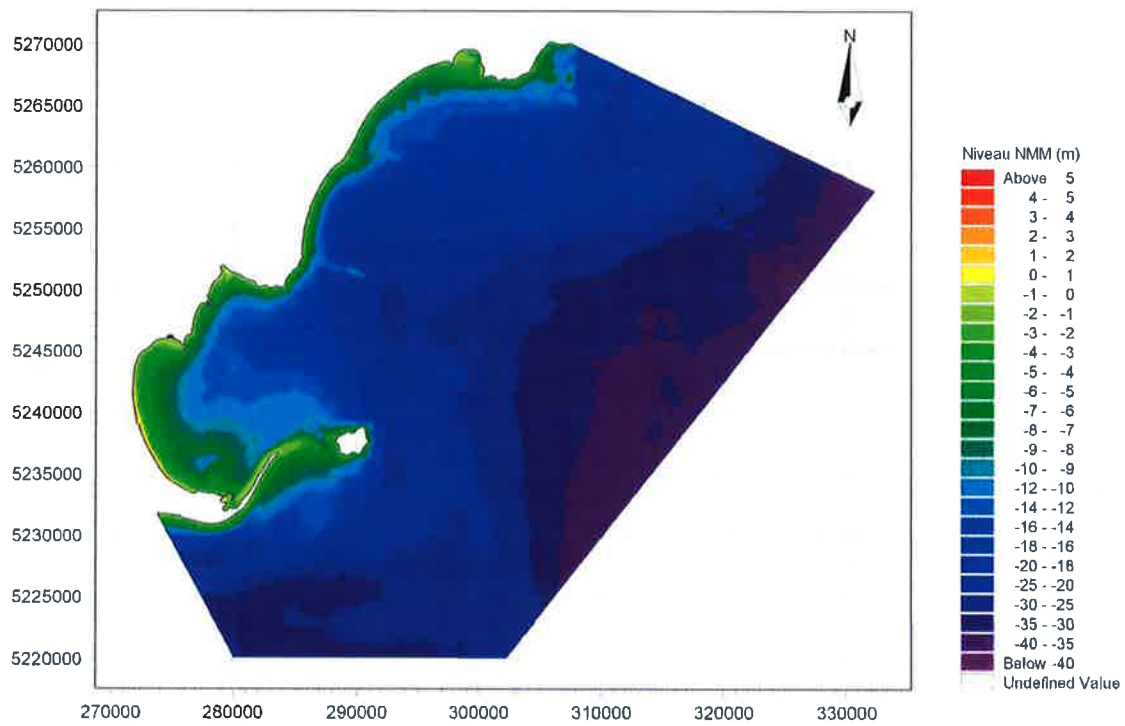


Figure 3.1 : Bathymétrie numérique dans la zone d'étude globale

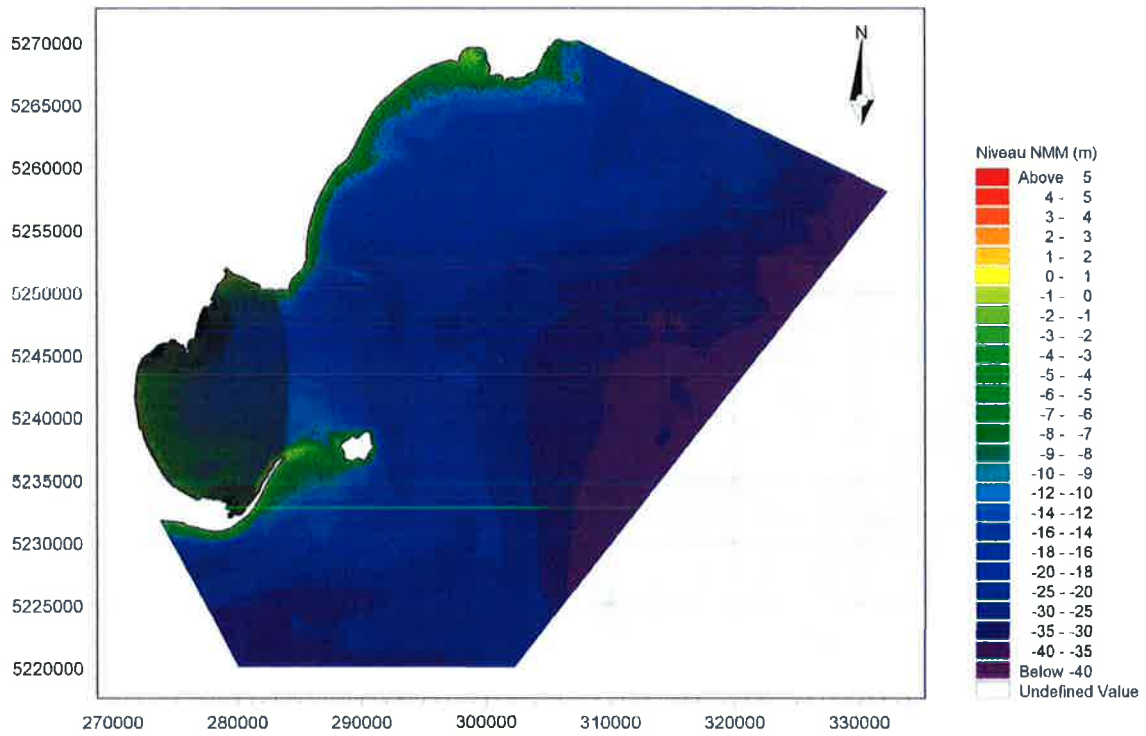


Figure 3.2 : Densité du maillage dans la zone d'ensemble

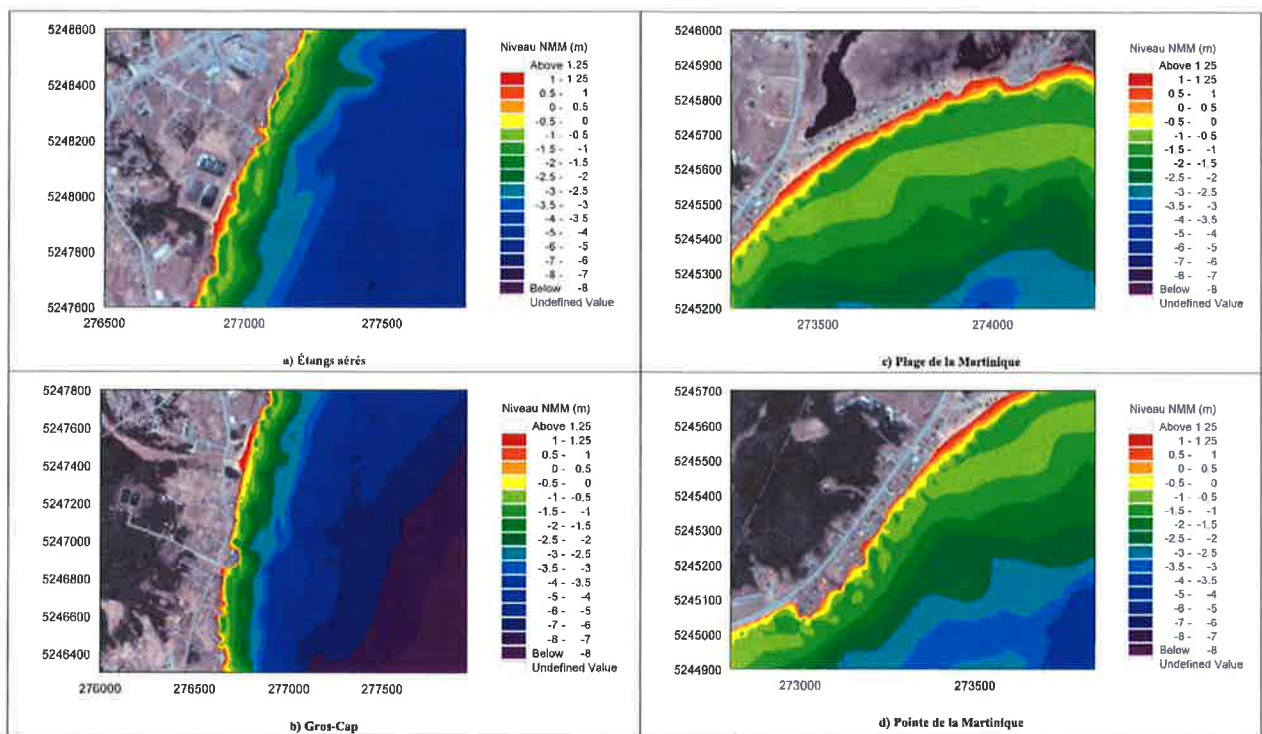


Figure 3.3 : Bathymétrie numérique dans les secteurs d'intérêt

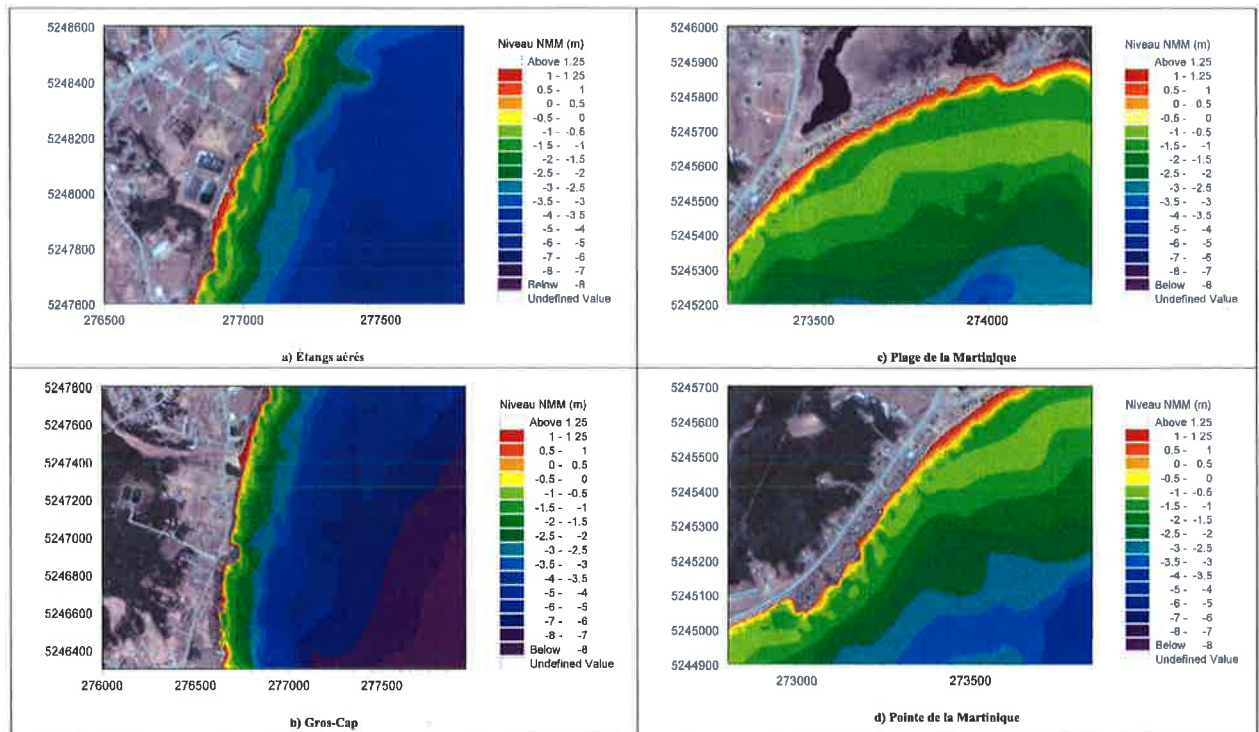


Figure 3.4 : Densité du maillage dans les secteurs d'intérêt

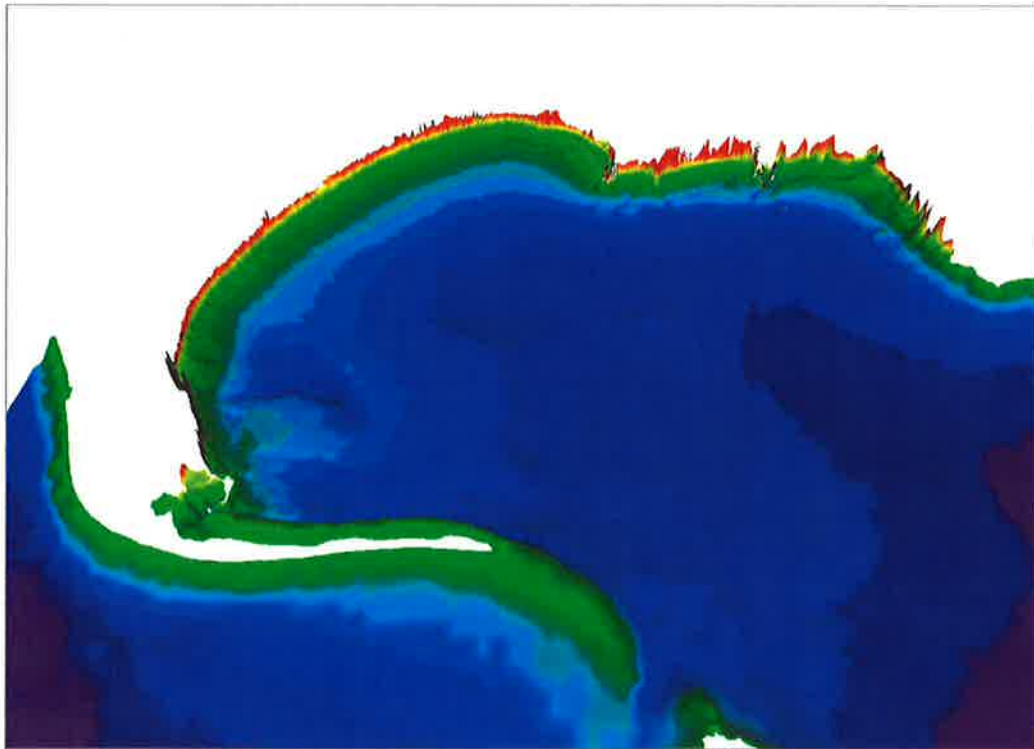


Figure 3.5 : Vue tridimensionnelle de la bathymétrie de la Baie de Plaisance

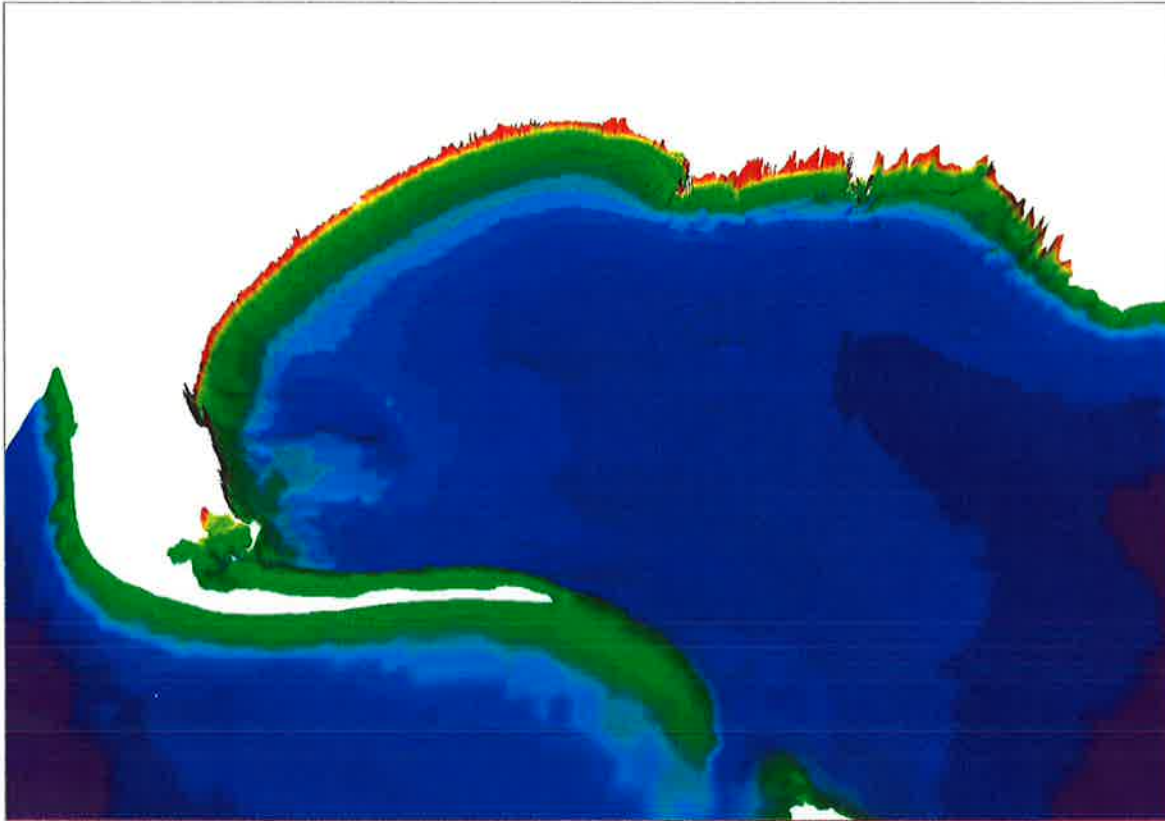


Figure 3.6 : Vue tridimensionnelle de la bathymétrie de la Baie de Plaisance

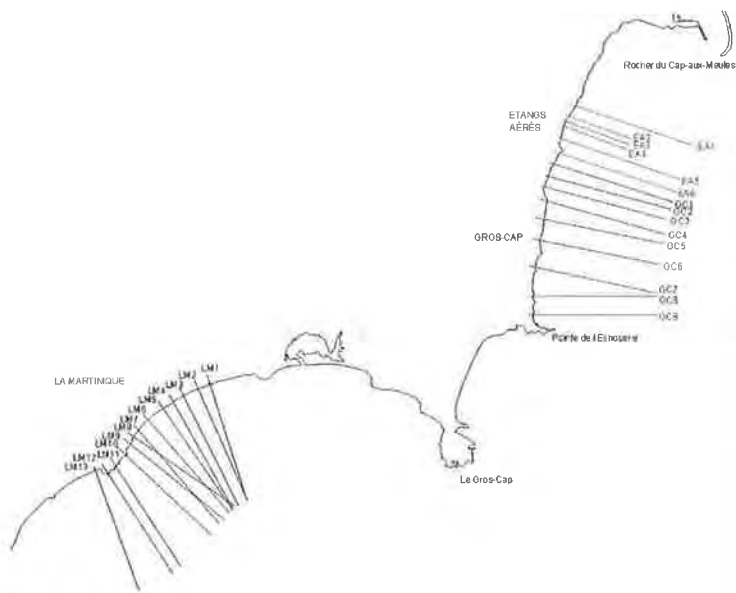
3.5 Transects

Le modèle numérique de terrain d'ensemble décrit à la section 3.3 a été mis au point selon un maillage flexible permettant d'optimiser les temps de calculs pour la modélisation numérique de la transformation des vagues du large et des courants littoraux. Les mailles du modèle numérique près de la côte sont ainsi de l'ordre de 10 à 15 m.

Pour offrir une représentation plus détaillée de la topographie et de la bathymétrie près de la côte, notamment la position des falaises et des dunes littorales, des modèles de terrain plus précis ont été mis au point pour chaque secteur d'intérêt. Les données LIDAR et du CIDCO n'ont pas été filtrées, et des cellules carrées de 1 m par 1 m ont été utilisées pour modéliser le terrain. La résolution de la grille (1 m) ne doit pas ici être confondue avec la résolution des données de base, qui est du même ordre pour les données LIDAR et CIDCO (1 m), mais beaucoup plus grossière pour les données du SHC (50 m).

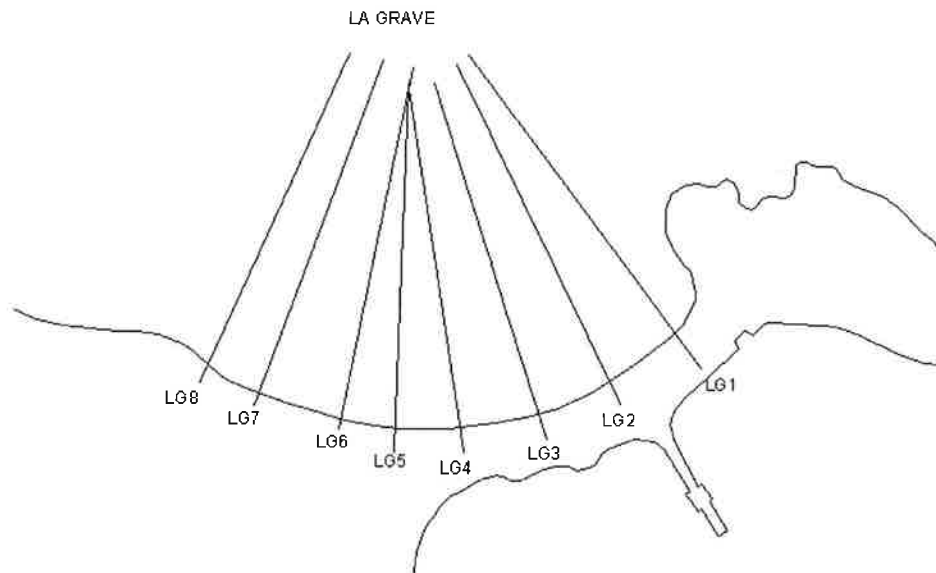
Les figures 3.7 et 3.8 et les tableaux qui les accompagnent présentent la position des transects de chacun des secteurs. La distance couverte par les relevés topographiques et bathymétriques le long de chaque transect est également indiquée. Cette information permet de cibler les tronçons de transects qui sont moins précis (i.e. basés sur les données du SHC). On remarque ainsi que ce sont les transects dans le secteur de la Martinique qui sont le moins précis, les données du CIDCO étant situées dans la majeure partie des cas à plus de 600 m du rivage.

La description des transects obtenus pour chaque secteur à l'étude est présentée aux sections suivantes.



Nom du transect	Extrémité côte (MTM4)		Extrémité large (MTM4)		Couverture des données		
	X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	LIDAR	SHC	SONAR
EA1	276949.13	5248141.62	277992.68	5247793.77	0 - 70 m	70 - 330 m	> 330 m
EA2	276909.59	5248053.26	277473.41	5247848.04	0 - 70 m	70 - 275 m	> 275 m
EA3	276892.49	5248006.27	277456.31	5247801.06	0 - 70 m	70 - 265 m	> 265 m
EA4	276877.10	5247963.98	277440.92	5247758.77	0 - 70 m	70 - 255 m	> 255 m
EA5	276847.36	5247858.88	277890.91	5247511.03	0 - 70 m	70 - 265 m	> 265 m
EA6	276809.09	5247752.56	277652.56	5247404.74	0 - 70 m	70 - 265 m	> 265 m
GC1	276772.64	5247849.11	277821.58	5247317.87	0 - 95 m	95 - 285 m	> 285 m
GC2	276740.63	5247540.36	277804.42	5247260.42	0 - 95 m	95 - 275 m	> 275 m
GC3	276710.00	5247420.00	277764.00	5247165.00	0 - 110 m	110 - 265 m	> 265 m
GC4	276692.65	5247342.76	277752.52	5247048.36	0 - 110 m	110 - 265 m	> 265 m
GC5	276659.94	5247188.61	277738.58	5246972.88	0 - 100 m	100 - 315 m	> 315 m
GC6	276629.94	5247011.81	277708.58	5246795.88	0 - 90 m	90 - 345 m	> 345 m
GC7	276606.72	5246780.48	277683.12	5246553.87	0 - 60 m	60 - 205 m	> 205 m
GC8	276583.00	5246533.00	277683.00	5246490.00	0 - 50 m	50 - 195 m	> 195 m
GC9	276583.00	5246368.00	277683.00	5246390.00	0 - 80 m	80 - 225 m	> 225 m
LM1	273878.89	5245869.35	274210.13	5244820.42	0 - 80 m	80 - 675 m	> 675 m
LM2	273772.51	5245823.00	274180.00	5244790.00	0 - 65 m	65 - 660 m	> 660 m
LM3	273649.22	5245753.55	274141.16	5244769.88	0 - 50 m	50 - 650 m	> 650 m
LM4	273559.01	5245701.19	274093.21	5244739.62	0 - 55 m	55 - 650 m	> 650 m
LM5	273467.00	5245655.00	274020.00	5244690.00	0 - 70 m	70 - 665 m	> 665 m
LM6	273339.06	5245538.01	274059.48	5244706.75	0 - 95 m	95 - 660 m	> 660 m
LM7	273254.51	5245437.00	273995.00	5244700.00	0 - 85 m	85 - 655 m	> 655 m
LM8	273215.00	5245392.00	273970.00	5244680.00	0 - 85 m	85 - 645 m	> 645 m
LM9	273171.91	5245337.00	273945.00	5244645.00	0 - 85 m	85 - 625 m	> 625 m
LM10	273116.96	5245265.70	273870.00	5244590.00	0 - 110 m	110 - 545 m	> 545 m
LM11	273058.00	5245176.00	273840.00	5244200.00	0 - 65 m	65 - 440 m	> 440 m
LM12	272985.00	5245121.75	273560.00	5244205.00	0 - 115 m	115 - 460 m	> 460 m
LM13	272905.00	5245096.68	273440.00	5244160.00	0 - 60 m	60 - 495 m	> 495 m

Figure 3 7 : Localisation des transects extraits du modèle de terrain numérique

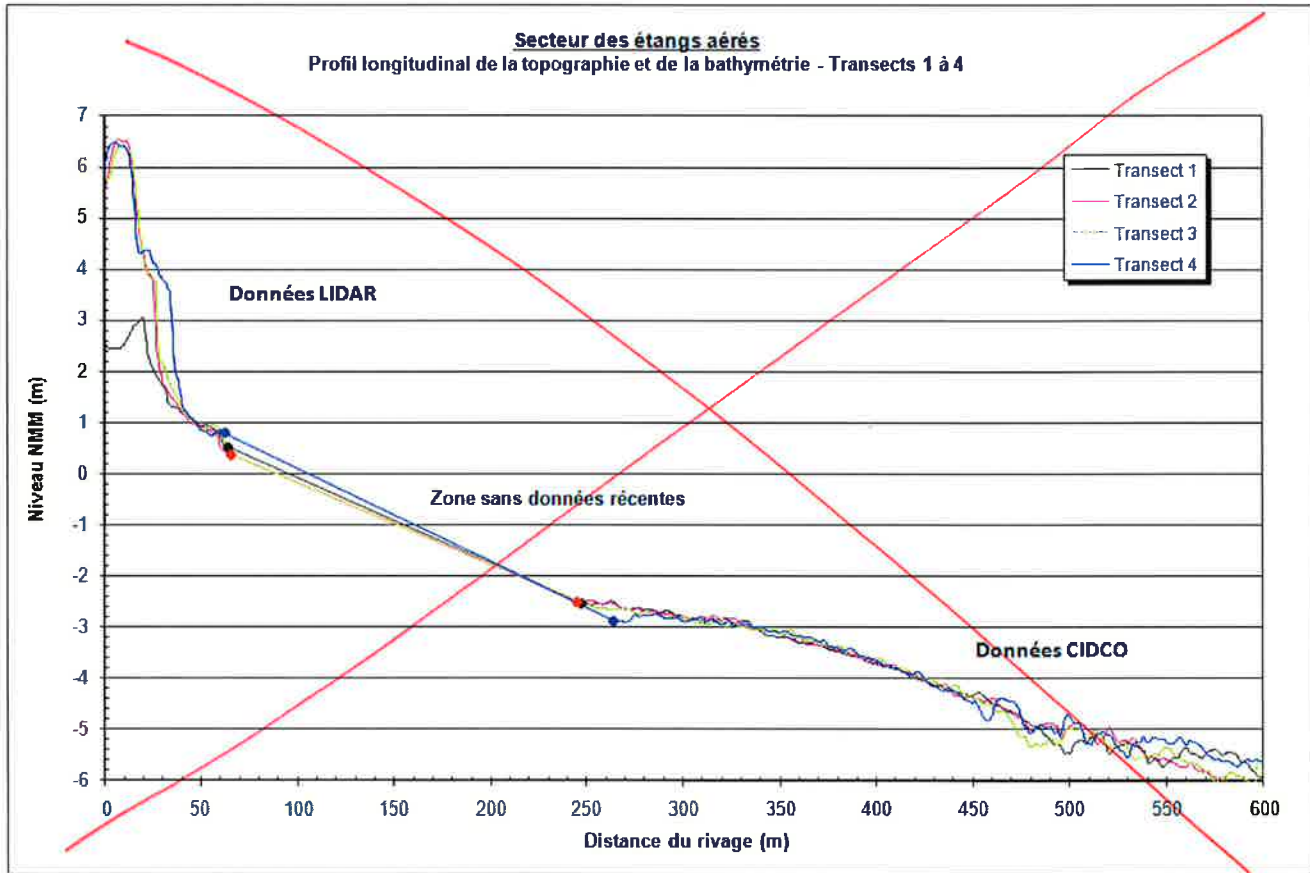


Nom du transect	Extrémité côte (MTM4)		Extrémité large		Couverture des données		
	X1 (m)	Y1 (m)	X2 (m)	Y2 (m)	LIDAR	SHC	SONAR
LG1	279485	5233177	279203	5233550	0 - 55 m	55 - 335 m	> 335 m
LG2	279388	5233133	279190	5233538	0 - 20 m	20 - 340 m	> 340 m
LG3	279297	5233092	279162	5233516	0 - 35 m	35 - 350 m	> 350 m
LG4	279198	5233076	279130	5233510	0 - 35 m	35 - 345 m	> 345 m
LG5	279114	5233076	279131	5233516	0 - 45 m	45 - 350 m	> 350 m
LG6	279046	5233104	279136	5233534	0 - 30 m	30 - 325 m	> 325 m
LG7	278944	5233132	279099	5233543	0 - 25 m	25 - 305 m	> 305 m
LG8	278878	5233160	279059	5233552	0 - 35 m	35 - 285 m	> 285 m

Figure 3.8 : Localisation des transects extraits du modèle numérique - Secteur de La Grave.

3.5.1 Bathymétrie des différents secteurs

Tel que déjà expliqué, la reconstitution de la bathymétrie des différents secteurs a été faite à partir de l'information disponible, soit le relevé LIDAR (zones émergées), la bathymétrie récente de CIDCO (interféromètre) et la bathymétrie du Service hydrographique du Canada (utilisée pour tenter de pallier au manque d'information dans la zone sans données récentes entre le LIDAR et le relevé de CIDCO). Dans l'exemple de la figure suivante, on se retrouve avec environ 200 m sans données de bathymétrie récente devant les étangs aérés, de la zone de marnage jusqu'à une élévation de 2,5 m sous le niveau moyen des mers.



Il est important de noter que la bathymétrie et la topographie des sites à l'étude évoluent rapidement et de façon cyclique au cours d'une année. Il est donc recommandé de prendre cette information avec prudence, surtout en ce qui concerne la position des falaises et des dunes littorales. Il est également connu que des barres littorales se retrouvent en avant de certaines plages et qu'elles évoluent de façon significative avec les saisons et les tempêtes.

3.5.2 Secteur des étangs aérés

Le secteur des étangs aérés a été décrit par six transects, dont le dernier EA6 est plutôt apparenté au secteur de Gros-Cap, mais permet de montrer les conditions aux limites du secteur des étangs aérés.

La bathymétrie de ce secteur se caractérise par une zone relativement horizontale de 500 m à 1 km au large de la côte à la profondeur de 5 à 6 m sous le niveau moyen des mers (NMM). De 200 à 500 m du rivage, la pente moyenne du fond marin est de 0,9 % et dans les 200 premiers mètres du rivage, la pente moyenne est de 1,5 %. Certains transects comme EA4, EA5 et EA6 présentent une dépression près de la côte, par contre cette information est à prendre avec précaution, car elle provient des données éparées et relativement anciennes du SHC.

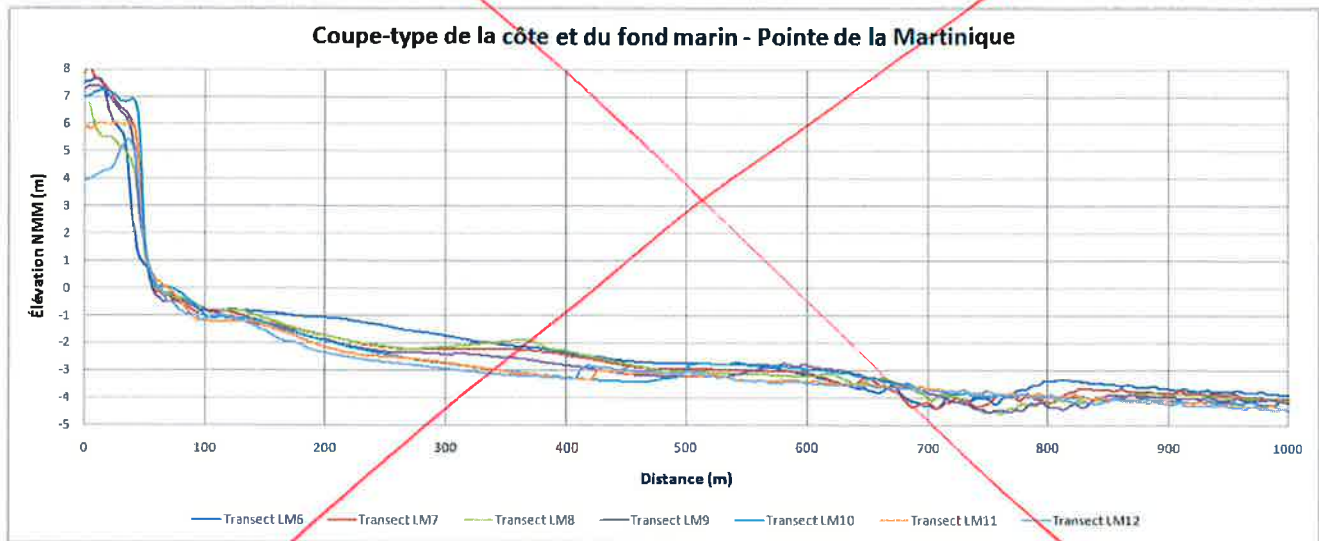


Figure 3.13 Coupe type de la côte et du fond marin – Pointe de la Martinique

3.5.6 Secteur de La Grave

Le secteur historique de La Grave a été décrit par huit transects (LG1 à LG4 pour le secteur Est et LG5 à LG8 pour le secteur Ouest). La bathymétrie des zones à faible profondeur d'eau est sujette à caution. Les données disponibles ne sont ni récentes ni détaillées et devraient être réactualisées en vue de projet de construction.

La bathymétrie de ce secteur se caractérise par une plage à pente relativement abrupte à l'extrémité orientale de la plage, s'adoucissant un peu vers le centre du secteur et disparaissant en allant vers l'ouest pour faire place à des falaises en érosion. Sous le zéro des cartes marines, la pente du fond marin est faible (en moyenne de l'ordre de 0,8 % du côté est et de 1,1 % du côté ouest). À un peu plus de 300 m au large de la plage, le fond marin semble devenir rocheux.

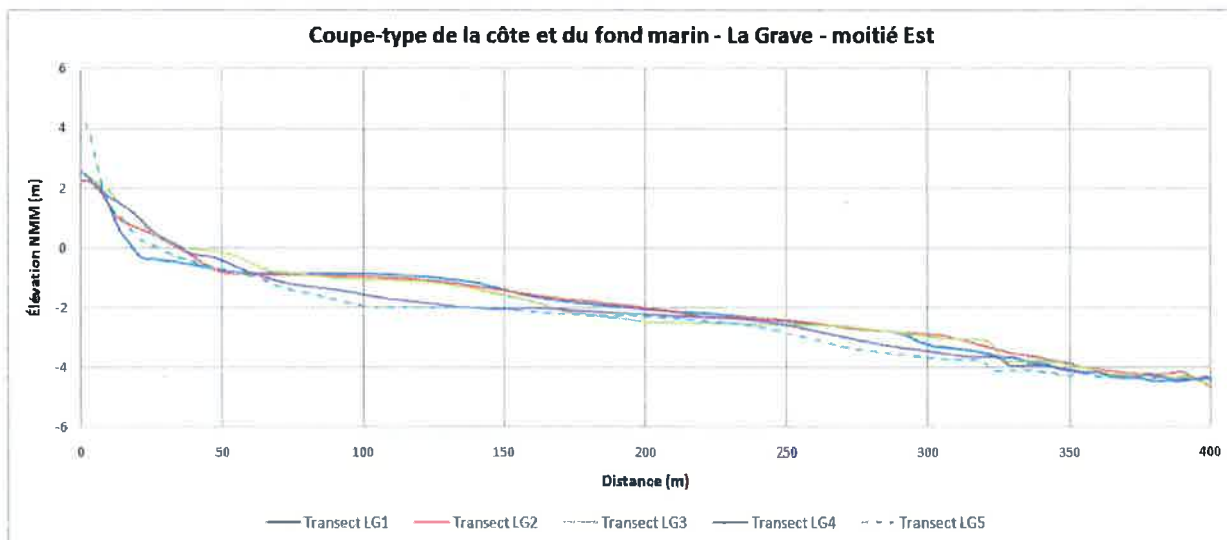


Figure 3.14 Coupe type de la côte et du fond marin – La Grave secteur Est

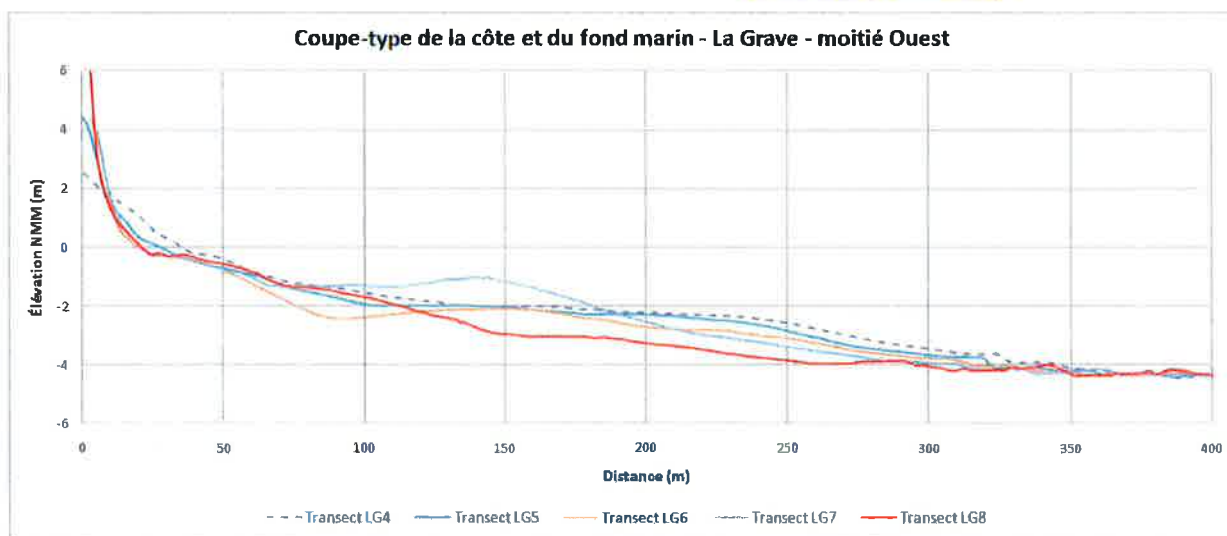


Figure 3.15 Coupe type de la côte et du fond marin – La Grave secteur Ouest

4. ANALYSE DES NIVEAUX D'EAU

4.1 Avertissement concernant les niveaux d'eau dans la baie de Plaisance

Les informations de niveau d'eau et de bathymétrie fournies par le Service hydrographique du Canada (SHC) pour la baie de Plaisance sont référencées par rapport au Zéro des Cartes marines (ou ZC) établi par le SHC. Ces informations de niveau d'eau et les bathymétries fournies par le SHC ne sont cohérentes ni dans l'espace, ni dans le temps.

Par exemple, les informations du SHC indiquent une différence d'élévation géodésique de l'ordre de 15 cm entre le Zéro des Cartes de Cap-aux-Meules et celui de Havre-Aubert.

Le Zéro des Cartes de Cap-aux-Meules a été établi en 1964 et on estime à environ 20 cm le décalage entre l'élévation géodésique du ZC établie en 1964 et celle qu'on pourrait mesurer en 2011 (remontée du niveau moyen des océans et affaissement isostatique des îles).

Il est hors de portée du présent mandat de résoudre les différentes incohérences des informations de base fournies par le SHC. Malgré les efforts faits pour tenir compte de ces incohérences dans ce rapport, il est probable que les différentes informations d'élévation qui apparaissent dans ce rapport ont été établies avec une marge d'erreur d'au moins 10 cm.

4.2 Niveaux d'eau à Cap-aux-Meules

Les informations générales de niveau d'eau fournies par le Service hydrographique du Canada (SHC) pour Cap-aux-Meules sont les suivantes (par rapport au zéro des cartes marines ou ZC) :

Une évaluation par la méthode des moments des hauts niveaux d'eau annuels faite à partir de la base de données actuellement disponible pour Cap-aux-Meules indique des niveaux d'eau (ZC) de +1,96 m, +2,18 m et +2,28 m pour respectivement les récurrences de 10, 30 et 50 ans. Par contre, ce type d'analyse des extrêmes annuels ne semble pas du tout adapté à la surreprésentation des extrêmes de niveaux d'eau hauts observés à Cap-aux-Meules ces dernières années.

Une réévaluation par la méthode des moments de tous les extrêmes de hauts niveaux d'eau faite à partir de la base de données actuellement disponible pour Cap-aux-Meules indique plutôt des niveaux d'eau (ZC) de +2,04 m, +2,13 m, +2,20 m, + 2,31 m et +2,36 m pour respectivement les récurrences de 2, 5, 10, 30 et 50 ans.

En tenant compte d'une évaluation éventuellement optimiste (faible) de la remontée du niveau d'eau moyen des océans (changements climatiques) et de l'affaissement isostatique des Îles (valeur globale retenue de 5 mm/an), il est recommandé de considérer les niveaux d'eau extrêmes suivants dans la région de Cap-aux-Meules ou Gros-Cap :

▲ Période de retour d'un jour par an :	+1,48 m ZC ou	+0,72 m NMM
▲ Période de retour de 12 heures par an :	+1,55 m ZC ou	+0,79 m NMM
▲ Période de retour d'un an :	+1,90 m ZC ou	+1,14 m NMM
▲ Période de retour de 2 ans :	+2,03 m ZC ou	+1,27 m NMM
▲ Période de retour de 5 ans :	+2,15 m ZC ou	+1,39 m NMM
▲ Période de retour de 10 ans :	+2,25 m ZC ou	+1,49 m NMM
▲ Période de retour de 30 ans :	+2,46 m ZC ou	+1,70 m NMM
▲ Période de retour de 50 ans :	+2,51 m ZC ou	+1,75 m NMM

4.9 Prédiction de niveaux d'eau hauts à Havre-Aubert

Les niveaux d'eau n'ont été enregistrés à Havre-Aubert que sur une très courte période. Il existe une période d'une vingtaine de jours pendant laquelle il est possible de comparer les niveaux d'eau enregistrés à Cap-aux-Meules et ceux enregistrés à Havre-Aubert (du 31 mai au 20 juin 1966). Cette comparaison indique que les niveaux d'eau par rapport au zéro des cartes marines sont décalés d'environ 15 cm en moyenne, les niveaux étant plus bas à Cap-aux-Meules qu'à Havre-Aubert. Comme le zéro des cartes marines n'est qu'un repère local, il faudrait plutôt en déduire que les zéros des cartes marines entre ces deux sites sont décalés de 15 cm en élévation par rapport à un repère plus global tel que le NMM. Cette valeur de 15 cm n'est pas très éloignée des 14,6 cm donnés par le SHC concernant les conversions de niveau marégraphiques en niveaux géodésiques (voir chapitre 3.2). La valeur de 15 cm sera retenue.

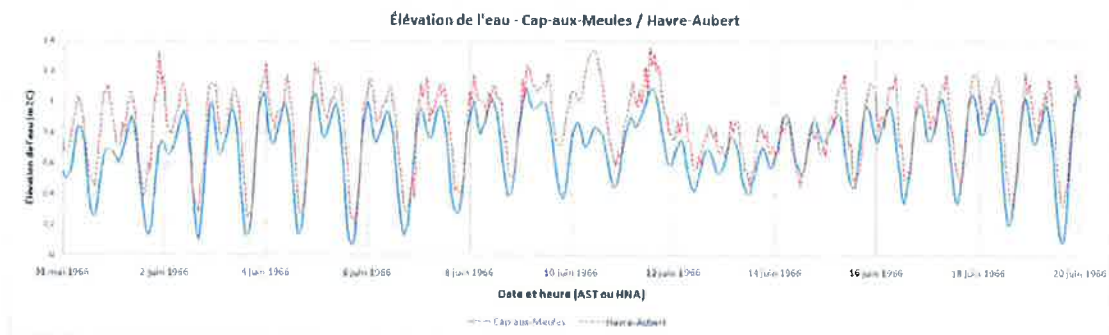


Figure 4.16 Comparaison des niveaux d'eau à Cap-aux-Meules et Havre-Aubert en juin 1966

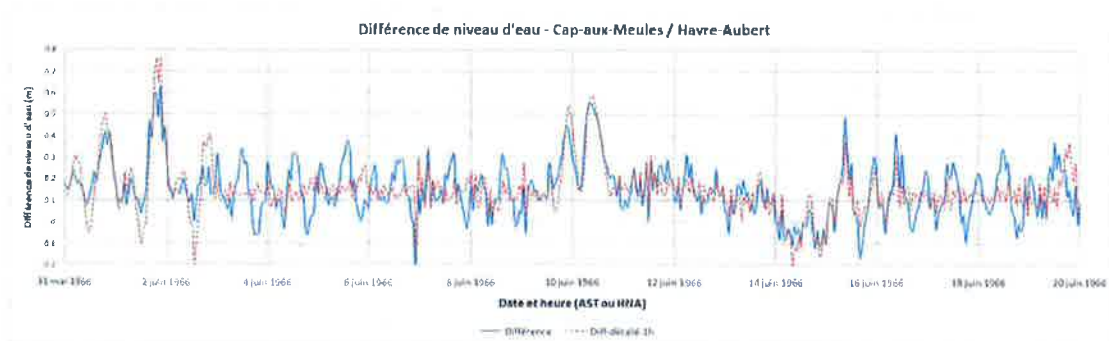


Figure 4.17 Différence de niveau d'eau entre Cap-aux-Meules et Havre-Aubert en juin 1966

Les Tables des marées et courants du SHC (volume 2 – Golfe du Saint-Laurent) indiquent que les niveaux d'eau de pleine mer supérieure de grande marée prédits pour Havre-Aubert sont 9 cm en dessous de ceux prédits pour Cap-aux-Meules. En l'absence de données à long terme concernant les niveaux d'eau à Havre-Aubert, l'hypothèse a été faite que cette différence devrait se reporter sur les niveaux d'eau extrêmes.

En tenant compte d'une évaluation éventuellement optimiste (faible) de la remontée du niveau d'eau moyen des océans (changements climatiques) et de l'affaissement isostatique des Îles (valeur globale retenue de 5 mm/an), il est recommandé de considérer les niveaux d'eau extrêmes suivants dans la région de Havre-Aubert :

- ▲ Période de retour d'un jour par an : +1,39 m ZC ou +0,77 m NMM
- ▲ Période de retour de 12 heures par an : +1,46 m ZC ou +0,84 m NMM
- ▲ Période de retour d'un an : +1,81 m ZC ou +1,19 m NMM
- ▲ Période de retour de 2 ans : +1,94 m ZC ou +1,32 m NMM
- ▲ Période de retour de 5 ans : +2,06 m ZC ou +1,44 m NMM
- ▲ Période de retour de 10 ans : +2,16 m ZC ou +1,54 m NMM
- ▲ Période de retour de 30 ans : +2,37 m ZC ou +1,75 m NMM
- ▲ Période de retour de 50 ans : +2,42 m ZC ou +1,80 m NMM

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

5. ANALYSE DE LA GRANULOMÉTRIE

Des cartes bathymétriques (à partir des relevés de CIDCO) et des prélèvements / analyses de sédiments ont été réalisés par l'UQAR dans le secteur de Gros-Cap. La figure suivante illustre l'information disponible dans les secteurs à l'étude.

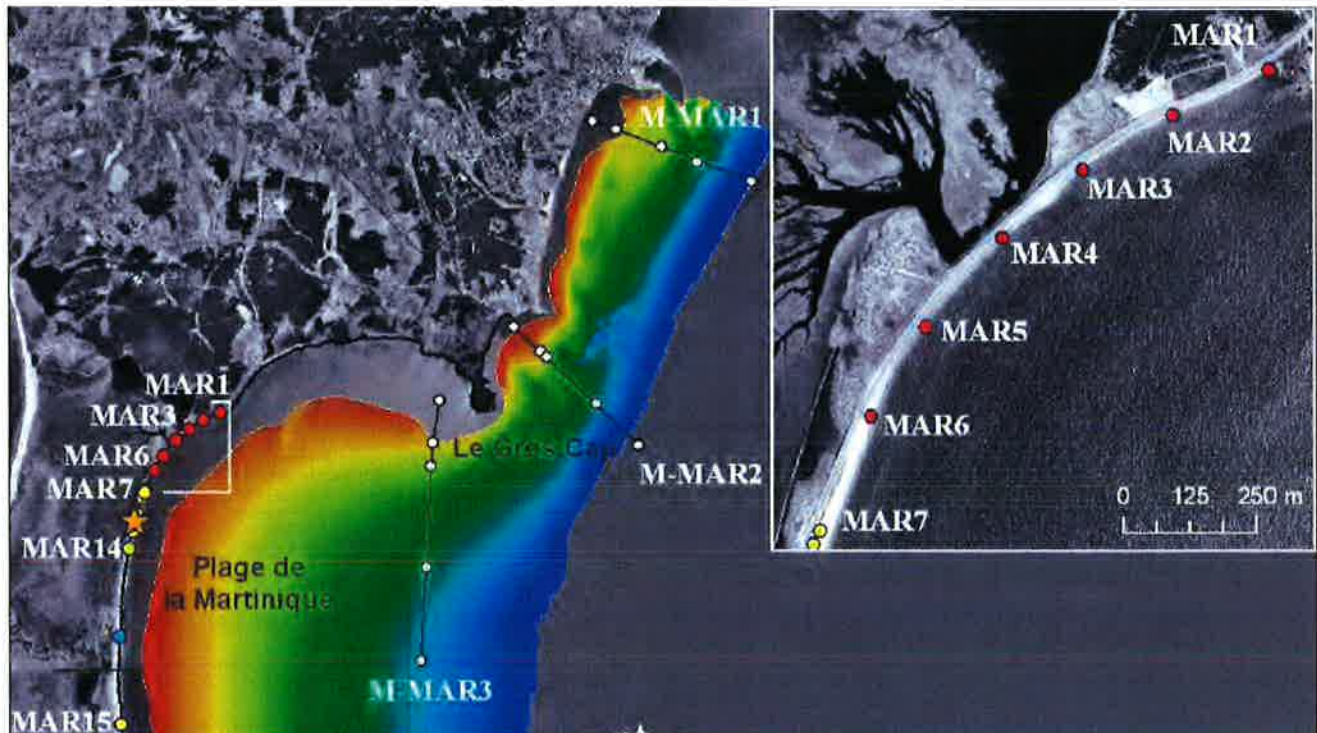


Figure 5.1 Localisation des profils et prélèvements de sédiments dans la baie de Plaisance

La couverture bathymétrique de CIDCO s'arrête par une profondeur de 2,5 à 3 m. Comme les relevés LIDAR ne couvrent pas la zone immergée, ceci laisse de grandes zones peu profondes sans information bathymétrique récente. Seuls quelques points de bathymétrie sont disponibles sur les feuilles d'opération du Service hydrographique du Canada (SHC).

Les analyses de granulométrie des sédiments prélevés par l'UQAR sont présentées dans les deux figures suivantes, soit les sédiments prélevés en mer au large de Gros-Cap (M-MAR1 à M-MAR-3) et les sédiments prélevés sur la plage le long de la route 199 au sud de la Pointe de la Martinique (MAR2, MAR4 et MAR6).

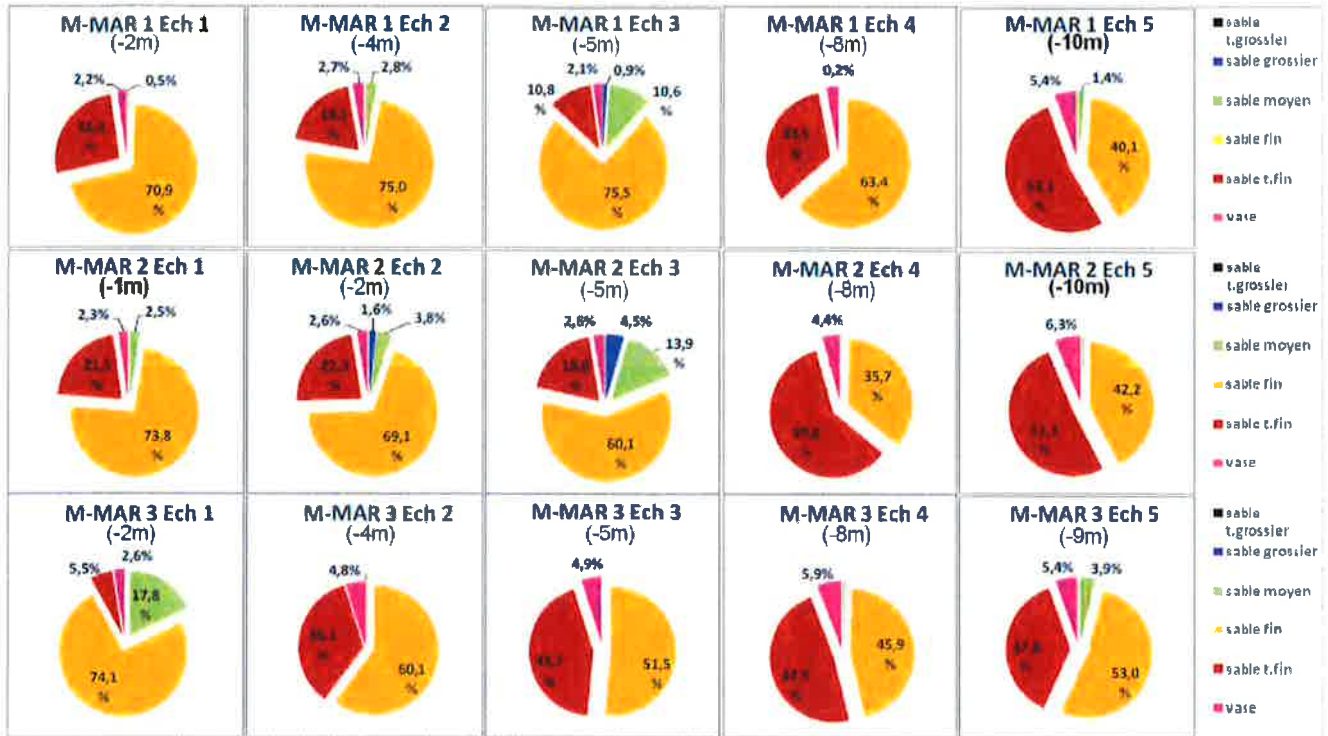


Figure 5.2 Granulométrie des sédiments prélevés au large de Gros-Cap

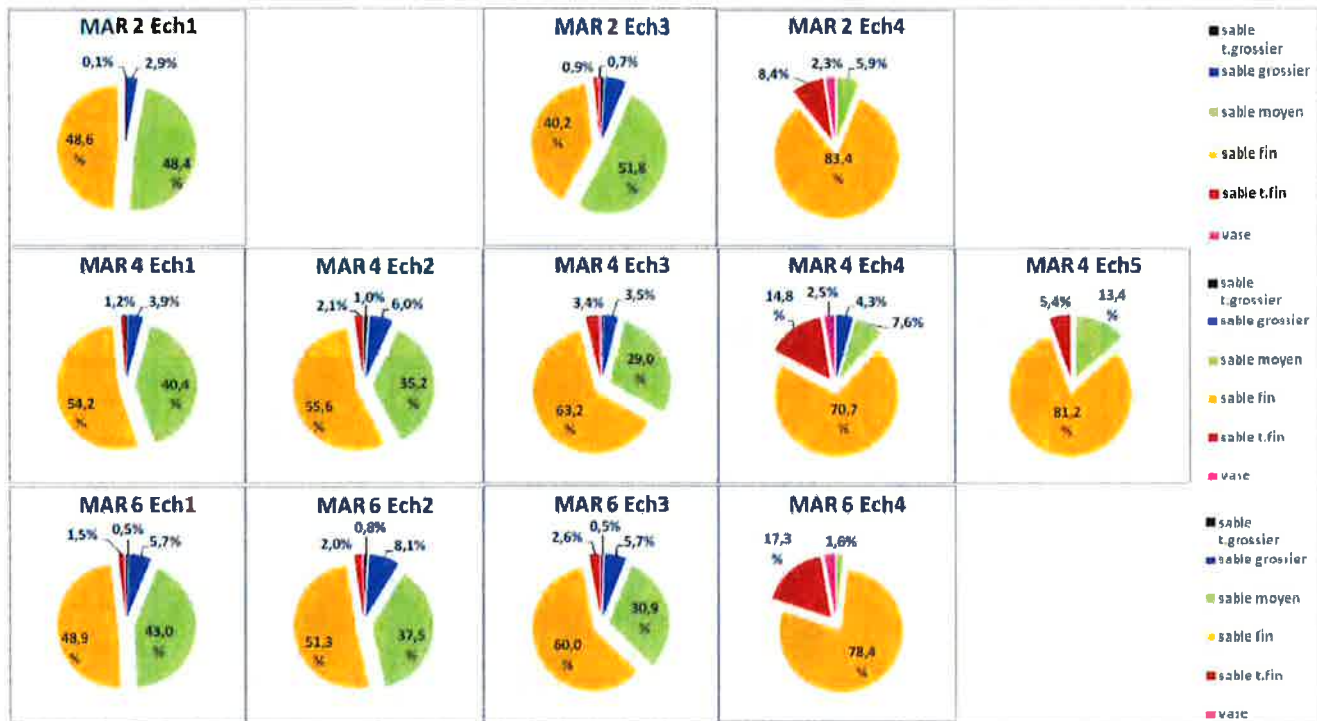


Figure 5.3 Granulométrie des sédiments prélevés sur la plage au sud de la Pointe de la Martinique

Les sédiments prélevés près de la côte devant les falaises de Cap-aux-Meules et Gros-Cap sont en général composé à 90 ou 95 % de sable fin et d'un peu de sable très fin. En s'éloignant de la côte, la proportion des sables fins et très fins s'inverse.

Les sédiments prélevés sur la plage au sud de la Pointe de la Martinique sont essentiellement un mélange de sable fin et de sable moyen où le sable fin prédomine en général.

Pour les besoins de modélisation hydrosédimentaire, les sédiments seront considérés comme des sables fins, soit ayant un diamètre de l'ordre de 0,25 mm.

6. RÉGIME DES VAGUES

6.1 Stratégie d'analyse des vagues

Les vagues qui frappent le secteur de Gros-Cap peuvent provenir de deux zones distinctes, soit le large (surtout secteurs est à nord-est) et l'intérieur de la baie de Plaisance (secteurs sud à sud-est). Le climat des vagues devant Gros-Cap est une combinaison de ces deux ensembles de vagues, celles en provenance du large dominant en termes de hauteur et de période des vagues.

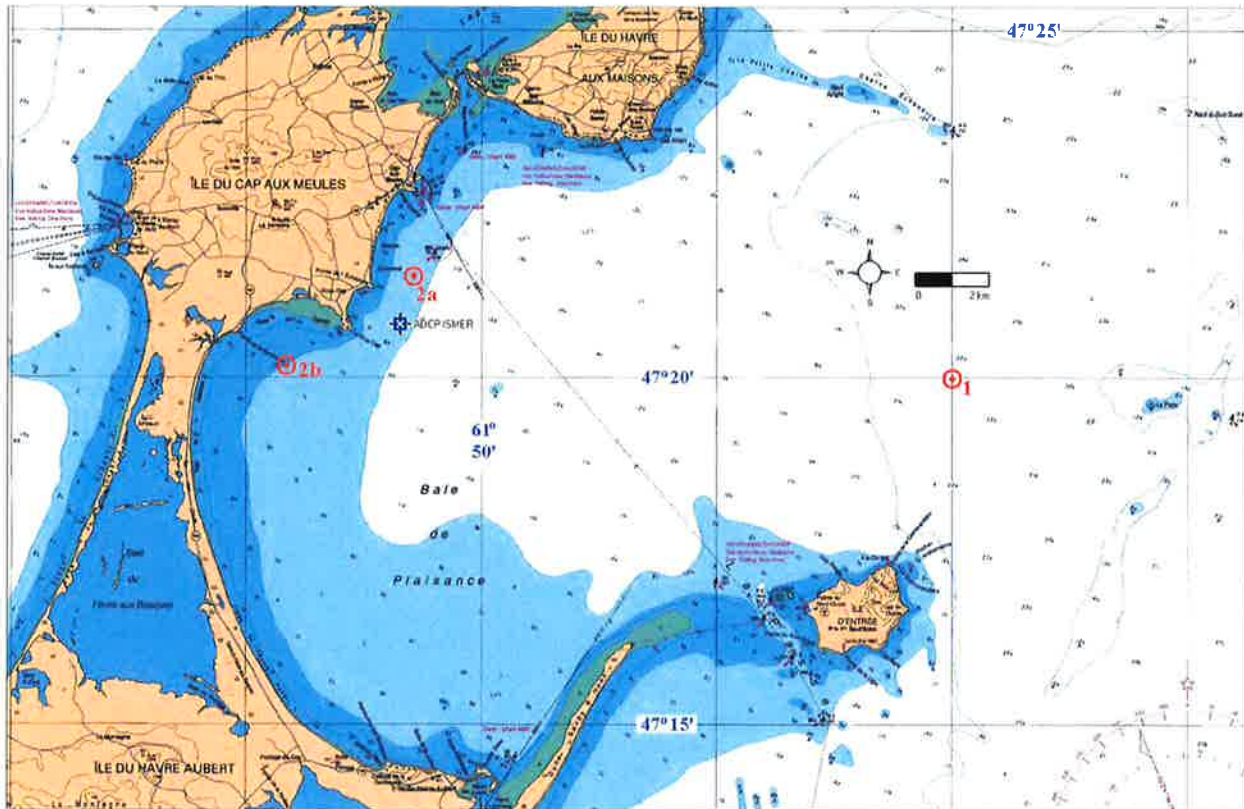


Figure 6.1 Extrait de la carte marine 4024 – Position des points de calcul des fetchs

En utilisant le logiciel Gener, les vagues ont été reconstituées au large de Gros-Cap (point 1 de la figure 6.1) à l'aide d'un modèle mathématique sur ordinateur, à partir des données de vent enregistrées à la station de l'aéroport des îles de la Madeleine. Ces vagues au large sont ensuite réfractées pour obtenir le climat des vagues près de la côte, qui servira à dimensionner les ouvrages de protection.

Pour s'assurer de bien représenter toutes les vagues qui peuvent affecter la côte, les vagues ont été générées dans la baie de Plaisance (points 2a et 2b de la figure précédente) à partir des vents enregistrés à la station de l'aéroport des îles de la Madeleine. Ces vagues de la baie ont ensuite été combinées à celles réfractées en provenance du large pour obtenir le climat complet des vagues près de la côte de Gros-Cap.

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

Des mesures de vagues ont été faites par l'UQAR en 2010 devant Gros-Cap (voir localisation sur la figure 6.1), à l'aide d'un ADCP⁸. À cause d'un problème survenu au cours de la période de mesure, seules les données de niveau d'eau (ou hauteur de vague) de cet instrument sont disponibles du 12 mai au 11 juillet 2010. Les données de direction des vagues ne sont pas disponibles. Malgré leur très courte durée, ces mesures de vagues ont été utilisées pour tenter de valider le modèle de génération de vagues utilisé dans le cadre de cette étude.

6.2 Données de vent

En l'absence de données de mesures de vagues à long terme, le modèle de génération de vagues utilise des données de vent d'une station réelle ou virtuelle située à proximité de la zone d'intérêt pour prédire des vagues.

Les données de vents sur l'année complète (du 1^{er} janvier au 31 décembre) de deux stations d'Environnement Canada aux Îles de la Madeleine ont été comparées, soit :

- les données de la station « Grindstone Island C » entre 1968 et 1982 et
- les données de la station 7053KGR « Îles de la Madeleine (Aut) » entre 1991 et 2010.

Les roses des vents obtenues avec ces séries de données sont reproduites aux figures 6.2 et 6.3.

⁸ Acoustic Doppler Current Profiler
Érosion côtière baie de Plaisance
Îles-de-la-Madeleine

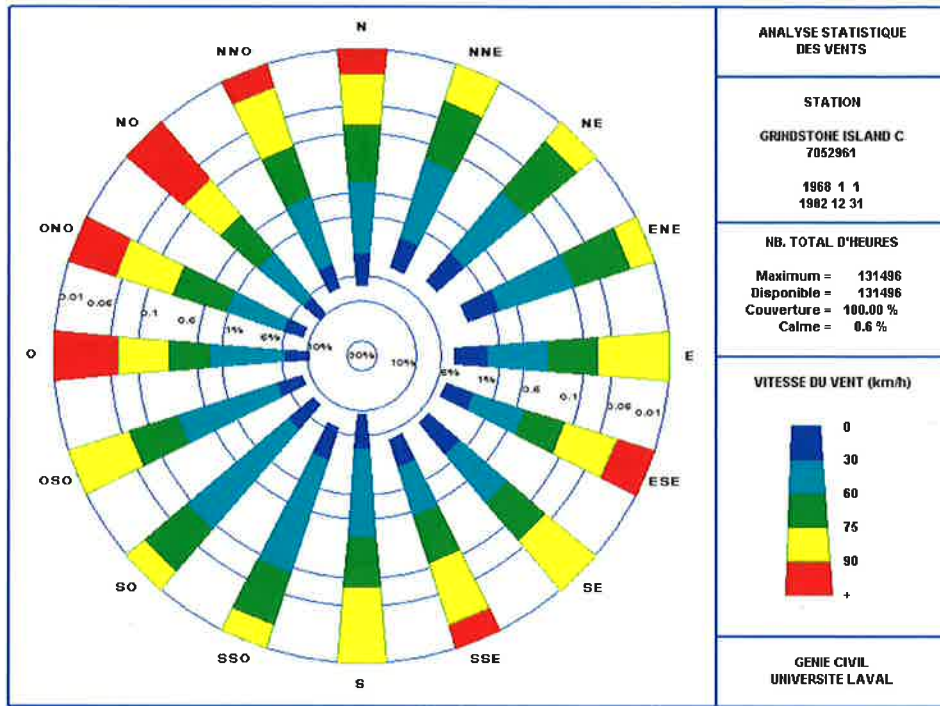


Figure 6.2 Rose des vents – Station Grindstone Island C – 1968 à 1982

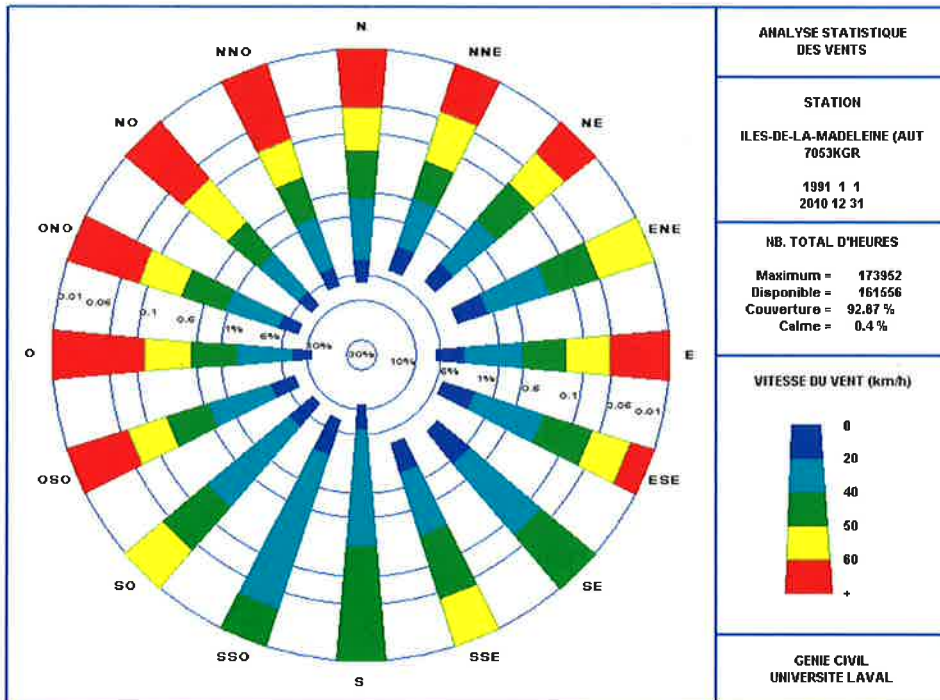


Figure 6.3 Rose des vents – Station Iles-de-la-Madeleine (Aut) – 1991 à 2010

On peut lire sur les figures précédentes, selon les seize directions principales, les fréquences des vents dont la vitesse est supérieure à 0, 20, 40, 50 et 60 km/h. Sur ces figures, 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 et la période de temps calme.

La comparaison des deux figures indique que la base de données de 1968 à 1982 fournit des vitesses de vent significativement inférieures à celles provenant de la base de données plus récente (1991 à 2010), surtout en provenance des secteurs est et nord-est, ceux desquels proviennent les vagues qui provoquent le plus de dommages le long des côtes de la Baie de Plaisance. C'est donc la série de données les plus récentes qui sera retenue dans la suite des calculs, soit celle de la station « Iles de la Madeleine (7053KGR) ».

Les statistiques globales des vents pour la série de données retenue (1991 à 2010) sont présentées dans le tableau 6.1. La rose des vents correspondante est celle de la figure 6.3.

Tableau 6.1 Statistiques globales des vents de 1991 à 2010

ANALYSE STATISTIQUE DES VENTS
STATION : ÎLES-DE-LA-MADELEINE (AUT) POUR LA PÉRIODE ALLANT DU 1991-01-01 AU 2010-12-31

ENSEMBLE DES DONNÉES																		
Vit. (km/h)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO	Total	Total cumulatif
CALME																	0,435	100,000
1 - 5	0,21	0,17	0,18	0,16	0,23	0,17	0,17	0,17	0,28	0,20	0,17	0,17	0,21	0,15	0,14	0,15	2,952	99,565
6 - 10	0,55	0,56	0,40	0,37	0,78	0,59	0,53	0,52	1,08	0,94	0,94	0,76	0,91	0,55	0,56	0,52	10,564	96,613
11 - 15	0,93	0,60	0,44	0,55	1,04	0,90	0,69	0,66	1,90	1,55	1,65	1,17	1,56	1,13	0,90	0,80	16,472	86,049
16 - 20	1,20	0,68	0,55	0,60	1,06	0,92	0,63	0,62	2,68	1,69	1,64	1,15	2,13	1,31	1,18	0,97	18,998	69,577
21 - 25	0,85	0,45	0,38	0,35	0,65	0,53	0,31	0,37	2,00	1,11	1,09	0,83	1,47	0,88	0,93	0,75	12,947	50,579
26 - 30	0,93	0,51	0,43	0,31	0,69	0,51	0,31	0,44	2,04	0,94	1,22	0,96	1,80	1,10	1,19	0,93	14,298	37,633
31 - 35	0,69	0,34	0,34	0,23	0,53	0,34	0,16	0,32	1,25	0,43	0,74	0,77	1,40	0,84	0,98	0,78	10,162	23,335
36 - 40	0,32	0,17	0,17	0,10	0,27	0,14	0,07	0,18	0,42	0,10	0,23	0,35	0,76	0,54	0,51	0,45	4,765	13,173
41 - 45	0,28	0,19	0,16	0,09	0,23	0,11	0,04	0,13	0,18	0,03	0,11	0,29	0,72	0,46	0,48	0,36	3,863	8,408
46 - 50	0,17	0,14	0,09	0,05	0,15	0,06	0,02	0,07	0,05	0,01	0,04	0,13	0,41	0,23	0,32	0,22	2,170	4,545
51 - 55	0,06	0,07	0,03	0,02	0,07	0,03	0,00	0,02	0,01	0,00	0,02	0,06	0,18	0,12	0,16	0,10	0,946	2,376
56 - 60	0,06	0,06	0,03	0,01	0,05	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,06	0,15	0,07	0,14	0,08	0,772	1,429
61 - 65	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,03	0,08	0,04	0,05	0,04	0,374	0,657
66 - 70	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00					0,01	0,02	0,03	0,03	0,01	0,03	0,191	0,282
71 - 75	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00		0,00			0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,052	0,092
76 - 80	0,00	0,00			0,00	0,00						0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,028	0,040
81 - 85	0,00	0,00		0,00							0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,009	0,011
86 - 90													0,00		0,00		0,001	0,002
91 - 95			0,00														0,001	0,001
96 - 100																	0,000	0,000
101 - 105																	0,000	0,000
106 - 110																	0,000	0,000
111 - 115																	0,000	0,000
116 - 120																	0,000	0,000
121 - 125																	0,000	0,000
126 & plus																	0,000	0,000
* TOTAL *	6,29	3,99	3,23	2,86	5,79	4,33	2,94	3,54	11,89	6,99	7,87	6,76	11,82	7,47	7,56	6,22		
Nombre total de valeurs :	173952			Nombre de valeurs disponibles :			161556			Pourcentage de couverture :			92,87%					
Note : Pourcentage de couverture basé sur le nombre de valeurs disponibles																		

6.3 Génération des vagues au large

En l'absence de données de vagues sur une période assez longue, le modèle « GENER⁹ » a été utilisé pour calculer les vagues dans la région de Cap-aux-Meules à l'aide des données de vents de la station « Îles de la Madeleine (7053KGR) » entre 1991 et 2010 et des fetchs, soit les distances sur lesquelles souffle le vent qui forme les vagues dans une direction donnée.

Plusieurs facteurs d'amplification (1,0, 1,1 et 1,2) ont été appliqués aux vitesses des vents pour théoriquement ramener les vents mesurés sur terre à des vents sur l'eau. Cependant, une

⁹ Ouellet, Y., Université Laval

comparaison des quelques données disponibles de la campagne de l'ISMER à l'aide d'un ADCP en 2010 avec les hauteurs de vagues modélisées indique que le facteur multiplicatif le plus plausible est de 1,0 sur les vitesses de vent de la station # 7053KGR. C'est ce facteur multiplicatif qui a été retenu dans les calculs suivants.

Les calculs ont été faits en tenant compte de l'année complète pour s'assurer de tenir compte de l'impact de la disparition des glaces sur la stabilité des ouvrages de protection.

6.4 Fetchs

Les fetchs permettant de calculer la hauteur des vagues au large ont été déterminés à partir des cartes marines. Afin de calculer les deux climats de vagues nécessaires à une évaluation adéquate de ce paramètre, trois positions de calcul des fetchs ont été retenues, soit :

- une position au large ($47^{\circ} 14' N - 61^{\circ} 24' W$) de Cap-aux-Meules (point 1 de la figure 6.1),
- une position près de la côte de Gros-Cap (point 2a de la figure 8.1), devant les étangs aérés ($47^{\circ} 21' 28'' N - 61^{\circ} 51' 26'' W$),
- une position devant la plage de la Martinique (point 2b de la figure 8.1) ($47^{\circ} 20' 11'' N - 61^{\circ} 54' 09'' W$).

Les fetchs utilisés suivant les directions d'intérêt sont calculés à l'aide de la méthode des fetchs effectifs et sont reproduits dans le tableau 6.2 pour la position au large (point 1) et les positions près de la côte (points 2a et 2b). À noter que le fetch utilisé correspond à la moyenne plus un demi-écart-type. Un calcul similaire a été fait pour le secteur de La Grave.

Tableau 6.2 Fetchs effectifs selon les directions au large de Gros-Cap

Fetch (km)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
Point 1	280	347	306	233	265	180	110	95	128	150	135	150	180	150	75	155
Point 2a	2,7	4,6	29,7	108	213	123	38,1	14,1	12,7	11,0	6,9	2,8	1,3	1,2	1,4	1,9
Point 2b	1,7	1,9	27,4	109	207	93,3	23,6	11,6	8,8	5,7	3,7	2,7	2,2	1,9	1,6	1,7

6.5 Vagues au large (point 1)

À l'aide d'un modèle paramétrique sur ordinateur, les données de vent à l'aéroport des Îles de la Madeleine ont été utilisées pour la reconstitution des vagues près de Gros-Cap. Aucun facteur d'amplification n'a été appliqué aux vitesses du vent. Le modèle 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 Gros-Cap. Les données du vent sont préalablement lissées pour éliminer le plus possible les irrégularités présentes dans les données de ce genre.

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

Le tableau 6.3 donne, pour l'ensemble des directions, les statistiques des vagues reconstituées à partir de la série de données de fetchs au large. Les paramètres utilisés dans les calculs sont indiqués au début du tableau. Les pourcentages calculés à partir des effectifs (nombre de valeurs correspondant à un intervalle de hauteur et de période) sont indiqués pour les hauteurs dans les colonnes de droite libellées A, B et C et pour les périodes dans les lignes du bas libellées de la même façon. Les notes explicatives de ces libellés sont fournies en bas de page. Des tableaux similaires ont été compilés pour chacune des 16 directions, mais n'ont pas été présentés dans ce rapport à cause de leur volume.

Tableau 6.3 Statistiques globales des vagues au large – Vents de 1991 à 2010 (F=1)

Direction des vagues : Ensemble des données																			
Station : Îles de la Madeleine (Aut) (7053KGR)											Correction =			1					
Du 1991-01-01 au 2010-12-01											Fetch :			- km					
Projet : BP_IdM-Aut_91-10_10											Profondeur			100 m					
HAUTEUR Hs (mètres)	PÉRIODE Tp (secondes)														TOTAL LIGNE	A(%)	B(%)	C(%)	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13					
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	&					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	plus					
0,00-0,25	4612	16687	14582	1528	1											37410	23,18	23,16	99,9
0,25-0,50	15	1128	8751	16689	4223	58										30864	19,12	19,1	76,74
0,50-0,75		54	1323	5680	11447	4321	185									23010	14,26	14,24	57,64
0,75-1,00		7	206	1566	4512	7881	3057	42								17271	10,7	10,69	43,39
1,00-1,25		1	19	513	1397	3984	5916	1637	12							13479	8,35	8,34	32,7
1,25-1,50			5	169	457	1524	4136	4033	267							10591	6,56	6,56	24,36
1,50-1,75				47	150	564	1438	4095	1483	40						7817	4,84	4,84	17,81
1,75-2,00				8	58	174	596	1924	3042	197						5999	3,72	3,71	12,97
2,00-2,25					26	78	238	964	2127	753	35					4221	2,62	2,61	9,25
2,25-2,50					10	38	106	262	1023	1320	171					2930	1,82	1,81	6,64
2,50-3,00					1	15	52	159	839	1698	687	49				3494	2,16	2,16	4,83
3,00-3,50						3	12	35	152	371	1047	415	1			2036	1,26	1,26	2,66
3,50-4,00						1	1	5	16	78	520	383	125			1129	0,7	0,7	1,4
4,00-4,50								4	3	20	65	345	124			561	0,35	0,35	0,71
4,50-5,00								1		5	9	161	119	21		316	0,2	0,2	0,36
5,00-5,50									1	1	3	27	49	53		134	0,08	0,08	0,16
5,50-6,00												1	28	58		87	0,05	0,05	0,08
6,00-6,50												1	1	31		33	0,02	0,02	0,03
6,50-7,00														8		8	0	0	0,01
7,00-7,50														1		1	0	0	0
7,50&plus																0	0	0	0
TOTAL COL	4627	17877	24886	26200	22282	18641	15737	13161	8965	4483	2537	1376	447	172	161391				
A(%)	2,9	11,1	15,4	16,2	13,8	11,6	9,8	8,2	5,6	2,8	1,6	0,9	0,3	0,1					
B(%)	2,9	11,1	15,4	16,2	13,8	11,5	9,7	8,1	5,5	2,8	1,6	0,9	0,3	0,1					
C(%)	99,9	97	86	70,6	54,3	40,6	29	19,3	11,1	5,6	2,8	1,2	0,4	0,1					
Nombre de valeurs											Pourcentages selon les lignes et les colonnes basé sur le nombre de valeurs								
Selon cette direction :	161391										A : Selon cette direction								
Selon l'ensemble des directions :	161556										B : Selon l'ensemble des directions								
Pourcentage selon cette direction :	99,9%										C : Pourcentage de dépassement déduit de 'B'								

À partir de ces résultats, on a tracé sur la figure 6.4 la rose correspondante des vagues (échelle de 0 à 3,0 m pour les hauteurs de vagues). L'échelle logarithmique permet de mettre en évidence les fortes vagues.

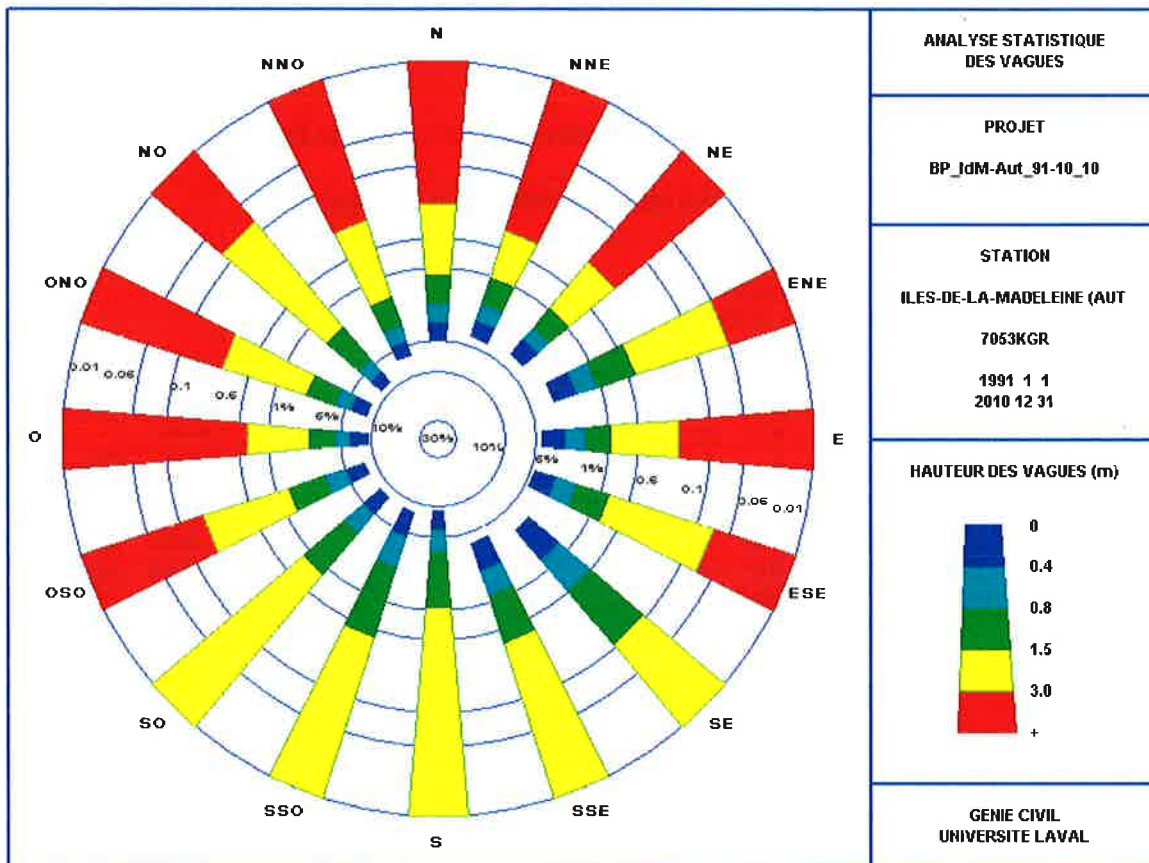


Figure 6.4 Rose des vagues au large de Cap-aux-Meules pour la période 1991 à 2010 (F=1)

6.6 Vagues extrêmes prédites au large

L'évaluation de la hauteur des vagues non réfractées ayant une période de retour de 25 à 100 ans a été faite selon les méthodes de Gumbel et de Weibull pour l'année entière. La figure 6.5 présente les résultats pour la méthode de Gumbel (année) pour les vagues calculées au large de la baie de Plaisance.

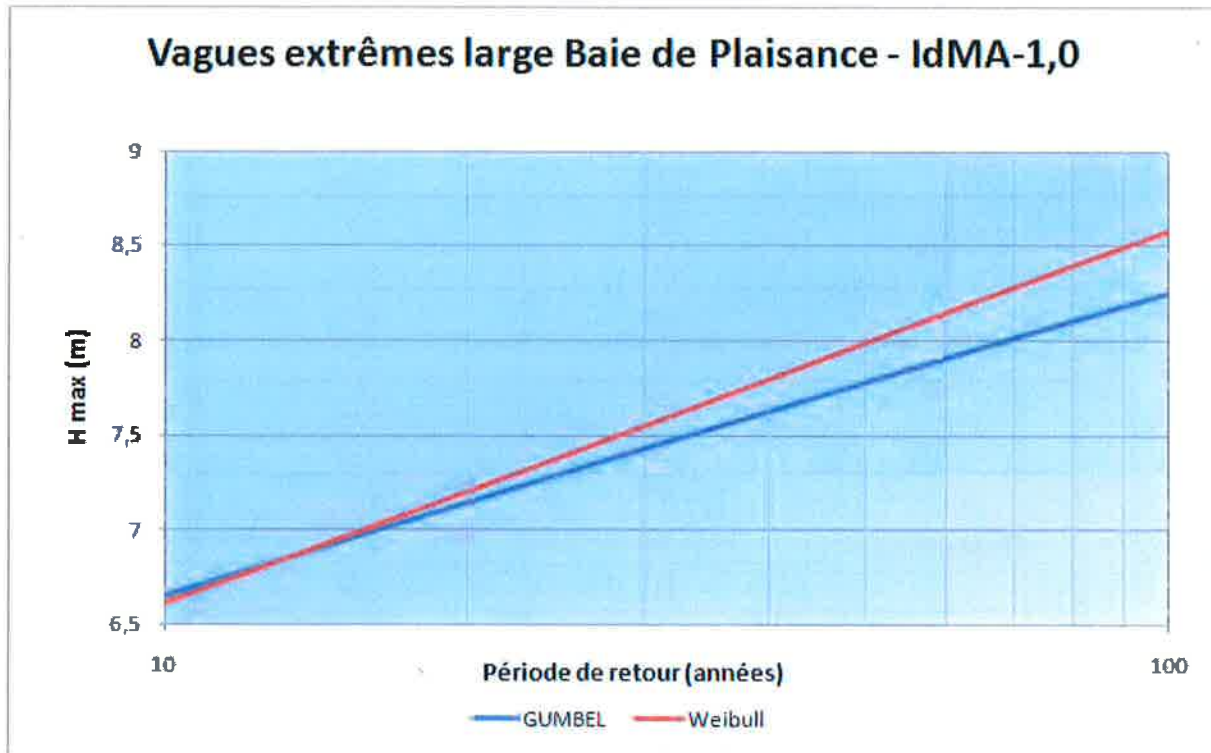


Figure 6.5 Prédiction de Hs au large de Gros-Cap (méthodes de Gumbel et Weibull)

Pour les vagues générées au large de Gros-Cap, la hauteur significative des vagues prédite pour une période de retour de 100 ans est de l'ordre de 8,3 m si on se fie à la série de données de vents de 1991 à 2010, sans facteur de majoration appliqué aux vitesses de vent.

Pour une période de retour de 50 ans, la hauteur significative des vagues prédites est de l'ordre de 7,9 m pour la même série de données de vents de 1991 à 2010 sans facteur de majoration sur la vitesse des vents.

6.7 Conditions de vagues au large considérées pour la réfraction

Suite à l'analyse qui précède, les conditions de vagues au large qui ont été considérées dans l'analyse de la réfraction sont indiquées dans le tableau suivant. L'analyse de réfraction sert à établir le climat de vagues près de la côte ; elle fait l'objet du prochain chapitre.

Tableau 6.4 : Conditions de vagues au large considérées dans la modélisation

Direction	Période T_p (s)	Hauteur significative H_s (m)
Nord	12	3,97
	14	5,92
Nord-nord-est	12	4,12
	14	5,74
Nord-est	12	4,03
	14	5,57
Est-nord-est	10	2,81
	12	4,17
	14	6,00
Est	8	1,97
	10	2,88
	12	3,99
	14	5,71
Est-sud-est	12	4,41
	14	7,08
Sud-est	10	3,01

7. CLIMAT DE VAGUES PRÈS DE LA CÔTE

7.1 Modélisation de la transformation des vagues du large

L'élaboration d'un concept optimal pour la protection des berges contre l'érosion nécessite d'abord de connaître les caractéristiques des vagues aux abords immédiats de la côte. Une modélisation de la réfraction, qui implique la simulation de la transformation de la hauteur et de la direction des vagues du large à l'approche du littoral, a donc été réalisée à l'aide du modèle bidimensionnel MIKE 21 SW (*Spectral Wave*).

7.1.1 Modèle numérique

MIKE 21 SW est un modèle commercial, conçu au Danemark par la firme *DHI Water & Environment*, qui utilise un maillage flexible (éléments triangulaires) permettant d'augmenter la résolution de la modélisation à l'approche du littoral ou des points d'intérêts devant être pris en compte de manière plus précise.

Le module SW intègre les développements les plus récents pour la simulation de la génération et de la transformation des vagues en eaux profondes et côtières. Les simulations permettent de reproduire les phénomènes de réfraction, de dissipation par déferlement et/ou frottement sur le fond, de génération des vagues par le vent, d'interaction non linéaire entre les vagues et d'interaction vagues-courants.

7.1.2 Limites de la zone modélisée

Comme l'indique la figure 3.1, le modèle numérique reproduit la bathymétrie d'une zone d'environ 60 km par 50 km.

7.1.3 Conditions aux limites

Les caractéristiques des vagues ont été reconstituées au large de la Baie de Plaisance à partir des données de vent enregistrées à la station des Îles-de-la-Madeleine (7053KGR) (section 6.2). Seize (16) combinaisons *direction – période – hauteur de vague* ont été considérées (voir tableau 6.4).

Pour chacune des simulations, des conditions de vagues identiques étaient imposées aux trois limites du modèle situées en mer. Le spectre directionnel des vagues était discrétisé avec un angle $D\theta = 22,5^\circ$, sur un secteur de 360° . L'indice d'étalement directionnel des vagues a été fixé à 5, ce qui correspond à un écart-type de $23,28^\circ$ par rapport à la direction de propagation moyenne.

7.1.4 Niveau d'eau

Les simulations ont été effectuées pour un niveau d'eau de +1,9 m ZC, ce qui correspond à un niveau d'eau de +1,25 m en NMM. D'après l'analyse des niveaux d'eau aux Îles-de-la-Madeleine, ce niveau d'eau est atteint avec une récurrence d'une heure/année (section 4.7).

7.1.5 Déferlement

Tous les résultats de simulation ont été obtenus en tenant compte de l'influence du déferlement. MIKE 21 SW simule la dissipation d'énergie due au déferlement selon la formulation proposée par Battjes & Janssen (réf. [5]). Le déferlement est alors contrôlé par trois paramètres pour lesquels les valeurs proposées dans la documentation de MIKE 21 SW ont été conservées:

$$\alpha = 1,0 \quad \gamma_1 = 1,0 \quad \gamma_2 = 0,8$$

Les valeurs de α et γ_2 sont conformes à Battjes & Janssen (réf. [5]) alors que celle de γ_1 est tirée de Holthuijsen et al. (réf. [2]). Les paramètres γ_1 et γ_2 influencent respectivement les limites de cambrure et de profondeur d'eau conduisant au déferlement.

7.1.6 Frottement sur le fond

Compte tenu des profondeurs d'eau relativement faibles caractérisant la zone à l'étude, il a été décidé de concert avec les intervenants du projet de tenir compte de la dissipation d'énergie des vagues attribuable au frottement sur les fonds.

La rugosité des fonds peut être spécifiée dans MIKE 21 SW à l'aide du paramètre de Nikuradse k_n qui peut s'exprimer comme suit:

$$k_n = 2,5 d_{50} \quad [7.1]$$

où d_{50} est le diamètre médian des sédiments, lequel est estimé à 0,25 mm (sable fin) dans la zone à l'étude (section 5.0).

7.2 Définition des points de calcul de la réfraction

Le domaine d'étude de l'érosion côtière défini par le mandat a été caractérisé, des étangs aérés à la Pointe de la Martinique ainsi que dans le secteur de La Grave, par des séries de points d'intérêt situés à des distances variables de la côte, soit une série « a » située à proximité immédiate de la côte (une vingtaine de mètres), une série « b » située un peu plus au large (une quarantaine de mètres) et une série « c » située encore plus au large (environ 175 m de la côte).

Les séries « a » et « b » définissent les conditions pour les ouvrages de génie civil adossés à la côte et la série « c » définit les conditions pour les ouvrages de protection avancée de la côte (brise-lames submersibles, butée de pied de plage, etc.).

Les six figures suivantes illustrent, pour chacune des zones à l'étude, la position des points de calcul de la réfraction ainsi que la position des différents transects permettant de définir la géométrie des fonds marins qui influencent la propagation des vagues vers la côte.

- Six transects (EA1 à EA6) ont été définis devant les étangs aérés,
- Neuf transects (GC1 à GC9) ont été définis dans la zone de Gros-Cap,
- Cinq transects (LM1 à LM5) ont été définis devant la plage du chemin des Chalets,

- Huit transects (LM6 à LM13) ont été définis devant la Pointe de la Martinique,
- Huit transects (LG1 à LG8) ont été définis devant la plage de La Grave.

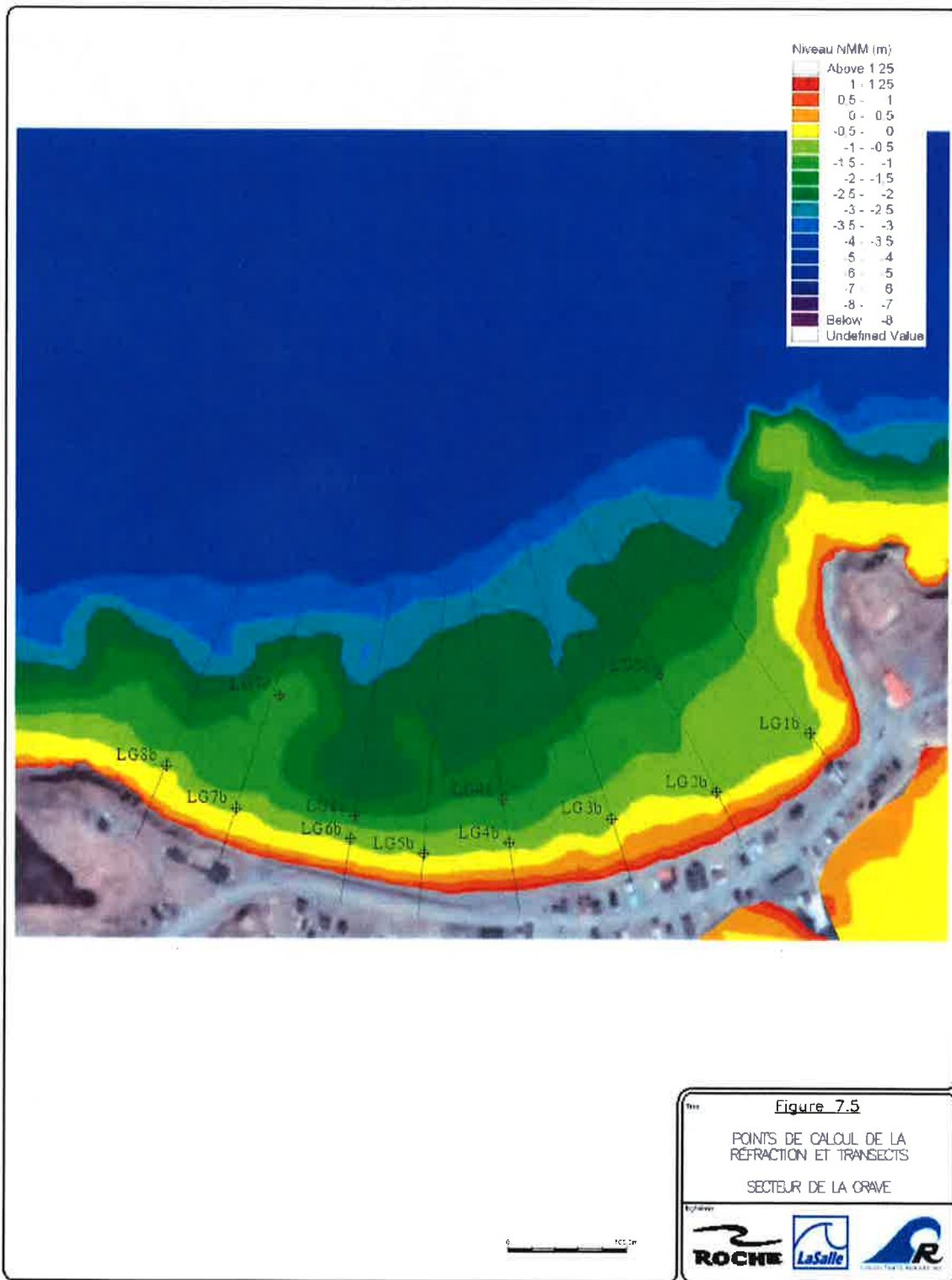


Figure 7.5 – Transects – Secteur de La Grave

Érosion côtière baie de Plaisance
Îles-de-la-Madeleine

Les coordonnées des soixante-douze points de calcul de la réfraction des vagues (MTM4) sont listées dans le tableau suivant. Treize points caractérisent la zone des étangs aérés alors que la zone de Gros-Cap est caractérisée par vingt points et que celle de La Martinique est caractérisée par vingt-sept points. Dix points caractérisent la zone de La Grave.

Tableau 7.1 Localisation des points de calcul de la réfraction

SECTEUR	#	Point	Localisation MTM4 (m)		SECTEUR	#	Point	Localisation MTM4 (m)	
			X	Y				X	Y
ÉTANGS AÉRÉS	1	EA1a	277 026	5 248 116	LA MARTINIQUE	34	LM1a	273 903	5 245 793
	2	EA1b	277 044	5 248 110		35	LM1b	273 909	5 245 774
	3	EA2a	276 974	5 248 034		36	LM2a	273 797	5 245 762
	4	EA2b	276 991	5 248 028		37	LM2b	273 805	5 245 744
	5	EA3a	276 951	5 247 977		38	LM3a	273 678	5 245 696
	6	EA3b	276 967	5 247 969		39	LM3b	273 685	5 245 682
	7	EA3c	277 085	5 247 922		40	LM4a	273 583	5 245 658
	8	EA4a	276 929	5 247 928		41	LM4b	273 593	5 245 640
	9	EA4b	276 947	5 247 922		42	LM5a	273 502	5 245 593
	10	EA5a	276 910	5 247 838		43	LM5b	273 513	5 245 577
	11	EA5b	276 928	5 247 835		44	LM6a	273 385	5 245 485
	12	EA6a	276 908	5 247 719		45	LM6b	273 398	5 245 470
	GROS-CAP	13	EA6b	276 926		5 247 713	46	LM7a	273 307
14		GC1a	276 849	5 247 625	47	LM7b	273 320	5 245 371	
15		GC1b	276 868	5 247 619	48	LM8a	273 264	5 245 344	
16		GC2a	276 799	5 247 525	49	LM8b	273 280	5 245 333	
17		GC2b	276 818	5 247 520	50	LM9a	273 235	5 245 281	
18		GC3a	276 778	5 247 433	51	LM9b	273 250	5 245 269	
19		GC3b	276 797	5 247 428	52	LM10a	273 196	5 245 191	
20		GC4a	276 771	5 247 321	53	LM10b	273 211	5 245 177	
21		GC4b	276 789	5 247 316	54	LM10c	273 317	5 245 069	
22		GC4c	276 918	5 247 300	55	LM11a	273 100	5 245 106	
23		GC5a	276 738	5 247 173	56	LM11b	273 111	5 245 089	
24		GC5b	276 758	5 247 169	57	LM12a	273 038	5 245 038	
25		GC6a	276 708	5 246 996	58	LM12b	273 049	5 245 021	
26		GC6b	276 728	5 246 992	59	LM13b	272 935	5 245 050	
27		GC6c	276 802	5 246 978	60	LM13b	272 942	5 245 031	
28		GC7a	276 666	5 246 768	61	LG1b	279 442	5 233 234	
29		GC7b	276 685	5 246 764	62	LG2b	279 363	5 233 184	
30		GC8a	276 653	5 246 530	63	LG2c	279 315	5 233 282	
31		GC8b	276 673	5 246 530	64	LG3b	279 275	5 233 161	
32		GC9a	276 679	5 246 370	65	LG4b	279 188	5 233 140	
33	GC9b	276 699	5 246 370	66	LG4c	279 182	5 233 177		
				67	LG5b	279 116	5 233 131		
				68	LG6b	279 054	5 233 143		
				69	LG6c	279 058	5 233 162		
				70	LG7b	278 958	5 233 169		
				71	LG7c	278 994	5 233 264		
				72	LG8b	278 899	5 233 205		

7.3 Coefficients de réfraction

La série des coefficients de réfraction obtenus du modèle MIKE 21 apparaît dans le tableau 7.2. Cette liste a servi à établir les séries complètes de coefficients de réfraction pour chacun des 72 points de calcul.

L'ensemble des valeurs des coefficients de réfraction ont été analysées de façon comparative par secteurs, pour faire ressortir les points les plus représentatifs d'un secteur donné. Les séries de coefficients étant relativement homogènes, huit points représentatifs ont été sélectionnés pour effectuer l'analyse des solutions en érosion côtière des différents secteurs au nord de la Baie de Plaisance, soit :

- Secteur des étangs aérés : EA1b
- Secteur de Gros-Cap : GC2b, GC6b et GC6c
- Secteur de la plage du chemin des Chalets : LM2b et LM5b
- Secteur de la Pointe de la Martinique : LM10c et LM11b

Pour le secteur de La Grave, deux points représentatifs ont été retenus, soit :

- Secteur est de La Grave : LG4b
- Secteur centre de La Grave : LG7b

Tableau 7.2 : Liste des coefficients de réfraction obtenus du modèle MIKE 21

SECTEUR	#	Point	N. de gage (mètres/mètre)	S07		S08		S09		S10		S11		S12		S13		S14		S15		S16		S17		S18		S19		S20		S21		S22		S23		S24		S25		S26		S27		S28		S29		S30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
				R-14.8	R-14.9	R-15.0	R-15.1	R-15.2	R-15.3	R-15.4	R-15.5	R-15.6	R-15.7	R-15.8	R-15.9	R-16.0	R-16.1	R-16.2	R-16.3	R-16.4	R-16.5	R-16.6	R-16.7	R-16.8	R-16.9	R-17.0	R-17.1	R-17.2	R-17.3	R-17.4	R-17.5	R-17.6	R-17.7	R-17.8	R-17.9	R-18.0	R-18.1	R-18.2	R-18.3	R-18.4	R-18.5	R-18.6	R-18.7	R-18.8	R-18.9	R-19.0	R-19.1	R-19.2	R-19.3	R-19.4	R-19.5	R-19.6	R-19.7	R-19.8	R-19.9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
ETANG ARES	1	EA1a	277 026	0.257	0.263	0.269	0.275	0.281	0.287	0.293	0.299	0.305	0.311	0.317	0.323	0.329	0.335	0.341	0.347	0.353	0.359	0.365	0.371	0.377	0.383	0.389	0.395	0.401	0.407	0.413	0.419	0.425	0.431	0.437	0.443	0.449	0.455	0.461	0.467	0.473	0.479	0.485	0.491	0.497	0.503	0.509	0.515	0.521	0.527	0.533	0.539	0.545	0.551	0.557	0.563	0.569	0.575	0.581	0.587	0.593	0.599	0.605	0.611	0.617	0.623	0.629	0.635	0.641	0.647	0.653	0.659	0.665	0.671	0.677	0.683	0.689	0.695	0.701	0.707	0.713	0.719	0.725	0.731	0.737	0.743	0.749	0.755	0.761	0.767	0.773	0.779	0.785	0.791	0.797	0.803	0.809	0.815	0.821	0.827	0.833	0.839	0.845	0.851	0.857	0.863	0.869	0.875	0.881	0.887	0.893	0.899	0.905	0.911	0.917	0.923	0.929	0.935	0.941	0.947	0.953	0.959	0.965	0.971	0.977	0.983	0.989	0.995	1.001	1.007	1.013	1.019	1.025	1.031	1.037	1.043	1.049	1.055	1.061	1.067	1.073	1.079	1.085	1.091	1.097	1.103	1.109	1.115	1.121	1.127	1.133	1.139	1.145	1.151	1.157	1.163	1.169	1.175	1.181	1.187	1.193	1.199	1.205	1.211	1.217	1.223	1.229	1.235	1.241	1.247	1.253	1.259	1.265	1.271	1.277	1.283	1.289	1.295	1.301	1.307	1.313	1.319	1.325	1.331	1.337	1.343	1.349	1.355	1.361	1.367	1.373	1.379	1.385	1.391	1.397	1.403	1.409	1.415	1.421	1.427	1.433	1.439	1.445	1.451	1.457	1.463	1.469	1.475	1.481	1.487	1.493	1.499	1.505	1.511	1.517	1.523	1.529	1.535	1.541	1.547	1.553	1.559	1.565	1.571	1.577	1.583	1.589	1.595	1.601	1.607	1.613	1.619	1.625	1.631	1.637	1.643	1.649	1.655	1.661	1.667	1.673	1.679	1.685	1.691	1.697	1.703	1.709	1.715	1.721	1.727	1.733	1.739	1.745	1.751	1.757	1.763	1.769	1.775	1.781	1.787	1.793	1.799	1.805	1.811	1.817	1.823	1.829	1.835	1.841	1.847	1.853	1.859	1.865	1.871	1.877	1.883	1.889	1.895	1.901	1.907	1.913	1.919	1.925	1.931	1.937	1.943	1.949	1.955	1.961	1.967	1.973	1.979	1.985	1.991	1.997	2.003	2.009	2.015	2.021	2.027	2.033	2.039	2.045	2.051	2.057	2.063	2.069	2.075	2.081	2.087	2.093	2.099	2.105	2.111	2.117	2.123	2.129	2.135	2.141	2.147	2.153	2.159	2.165	2.171	2.177	2.183	2.189	2.195	2.201	2.207	2.213	2.219	2.225	2.231	2.237	2.243	2.249	2.255	2.261	2.267	2.273	2.279	2.285	2.291	2.297	2.303	2.309	2.315	2.321	2.327	2.333	2.339	2.345	2.351	2.357	2.363	2.369	2.375	2.381	2.387	2.393	2.399	2.405	2.411	2.417	2.423	2.429	2.435	2.441	2.447	2.453	2.459	2.465	2.471	2.477	2.483	2.489	2.495	2.501	2.507	2.513	2.519	2.525	2.531	2.537	2.543	2.549	2.555	2.561	2.567	2.573	2.579	2.585	2.591	2.597	2.603	2.609	2.615	2.621	2.627	2.633	2.639	2.645	2.651	2.657	2.663	2.669	2.675	2.681	2.687	2.693	2.699	2.705	2.711	2.717	2.723	2.729	2.735	2.741	2.747	2.753	2.759	2.765	2.771	2.777	2.783	2.789	2.795	2.801	2.807	2.813	2.819	2.825	2.831	2.837	2.843	2.849	2.855	2.861	2.867	2.873	2.879	2.885	2.891	2.897	2.903	2.909	2.915	2.921	2.927	2.933	2.939	2.945	2.951	2.957	2.963	2.969	2.975	2.981	2.987	2.993	2.999	3.005	3.011	3.017	3.023	3.029	3.035	3.041	3.047	3.053	3.059	3.065	3.071	3.077	3.083	3.089	3.095	3.101	3.107	3.113	3.119	3.125	3.131	3.137	3.143	3.149	3.155	3.161	3.167	3.173	3.179	3.185	3.191	3.197	3.203	3.209	3.215	3.221	3.227	3.233	3.239	3.245	3.251	3.257	3.263	3.269	3.275	3.281	3.287	3.293	3.299	3.305	3.311	3.317	3.323	3.329	3.335	3.341	3.347	3.353	3.359	3.365	3.371	3.377	3.383	3.389	3.395	3.401	3.407	3.413	3.419	3.425	3.431	3.437	3.443	3.449	3.455	3.461	3.467	3.473	3.479	3.485	3.491	3.497	3.503	3.509	3.515	3.521	3.527	3.533	3.539	3.545	3.551	3.557	3.563	3.569	3.575	3.581	3.587	3.593	3.599	3.605	3.611	3.617	3.623	3.629	3.635	3.641	3.647	3.653	3.659	3.665	3.671	3.677	3.683	3.689	3.695	3.701	3.707	3.713	3.719	3.725	3.731	3.737	3.743	3.749	3.755	3.761	3.767	3.773	3.779	3.785	3.791	3.797	3.803	3.809	3.815	3.821	3.827	3.833	3.839	3.845	3.851	3.857	3.863	3.869	3.875	3.881	3.887	3.893	3.899	3.905	3.911	3.917	3.923	3.929	3.935	3.941	3.947	3.953	3.959	3.965	3.971	3.977	3.983	3.989	3.995	4.001	4.007	4.013	4.019	4.025	4.031	4.037	4.043	4.049	4.055	4.061	4.067	4.073	4.079	4.085	4.091	4.097	4.103	4.109	4.115	4.121	4.127	4.133	4.139	4.145	4.151	4.157	4.163	4.169	4.175	4.181	4.187	4.193	4.199	4.205	4.211	4.217	4.223	4.229	4.235	4.241	4.247	4.253	4.259	4.265	4.271	4.277	4.283	4.289	4.295	4.301	4.307	4.313	4.319	4.325	4.331	4.337	4.343	4.349	4.355	4.361	4.367	4.373	4.379	4.385	4.391	4.397	4.403	4.409	4.415	4.421	4.427	4.433	4.439	4.445	4.451	4.457	4.463	4.469	4.475	4.481	4.487	4.493	4.499	4.505	4.511	4.517	4.523	4.529	4.535	4.541	4.547	4.553	4.559	4.565	4.571	4.577	4.583	4.589	4.595	4.601	4.607	4.613	4.619	4.625	4.631	4.637	4.643	4.649	4.655	4.661	4.667	4.673	4.679	4.685	4.691	4.697	4.703	4.709	4.715	4.721	4.727	4.733	4.739	4.745	4.751	4.757	4.763	4.769	4.775	4.781	4.787	4.793	4.799	4.805	4.811	4.817	4.823	4.829	4.835	4.841	4.847	4.853	4.859	4.865	4.871	4.877	4.883	4.889	4.895	4.901	4.907	4.913	4.919	4.925	4.931	4.937	4.943	4.949	4.955	4.961	4.967	4.973	4.979	4.985	4.991	4.997	5.003	5.009	5.015	5.021	5.027	5.033	5.039	5.045	5.051	5.057	5.063	5.069	5.075	5.081	5.087	5.093	5.099	5.105	5.111	5.117	5.123	5.129	5.135	5.141	5.147	5.153	5.159	5.165	5.171	5.177	5.183	5.189	5.195	5.201	5.207	5.213	5.219	5.225	5.231	5.237	5.243	5.249	5.255	5.261	5.267	5.273	5.279	5.285	5.291	5.297	5.303	5.309	5.315	5.321	5.327	5.333	5.339	5.345	5.351	5.357	5.363	5.369	5.375	5.381	5.387	5.393	5.399	5.405	5.411	5.417	5.423	5.429	5.435	5.441	5.447	5.453	5.459	5.465	5.471	5.477	5.483	5.489	5.495	5.501	5.507	5.513	5.519	5.525	5.531	5.537	5.543	5.549	5.555	5.561	5.567	5.573	5.579	5.585	5.591	5.597	5.603	5.609	5.615	5.621	5.627	5.633	5.639	5.645	5.651	5.657	5.663	5.669	5.675	5.681	5.687	5.693	5.699	5.705	5.711	5.717	5.723	5.729	5.735	5.741	5.747	5.753	5.759	5.765	5.771	5.777	5.783	5.789	5.795	5.801	5.807	5.813	5.819	5.825	5.831	5.837	5.843	5.849	5.855	5.861	5.867	5.873	5.879	5.885	5.891	5.897	5.903	5.909	5.915	5.921	5.927	5.933	5.939	5.945	5.951	5.957	5.963	5.969	5.975	5.981	5.987	5.993	5.999	6.005	6.011	6.017	6.023	6.029	6.035	6.041	6.047	6.053	6.059	6.065	6.071	6.077	6.083	6.089	6.095	6.101	6.107	6.113	6.119	6.125	6.131	6.137	6.143	6.149	6.155	6.161	6.167	6.173	6.179	6.185	6.191	6.197	6.203	6.209	6.215	6.221	6.227	6.233	6.239	6.245	6.251	6.257	6.263	6.269	6.275	6.281	6.287	6.293	6.299	6.305	6.311	6.317	6.323	6.329	6.335	6.341	6.347	6.353	6.359	6.365	6.371	6.377	6.383	6.389	6.395	6.401	6.407	6.413	6.419

7.4 Calcul des climats de vagues réfractées

La série des coefficients de réfraction obtenus du modèle MIKE 21 a servi à établir le climat des vagues réfractées du large vers la côte au niveau des points retenus pour l'analyse.

Les figures suivantes représentent les courbes de fréquence de dépassement des vagues pour les différents points de calcul, courbes établies à partir des séries temporelles de vagues réfractées.

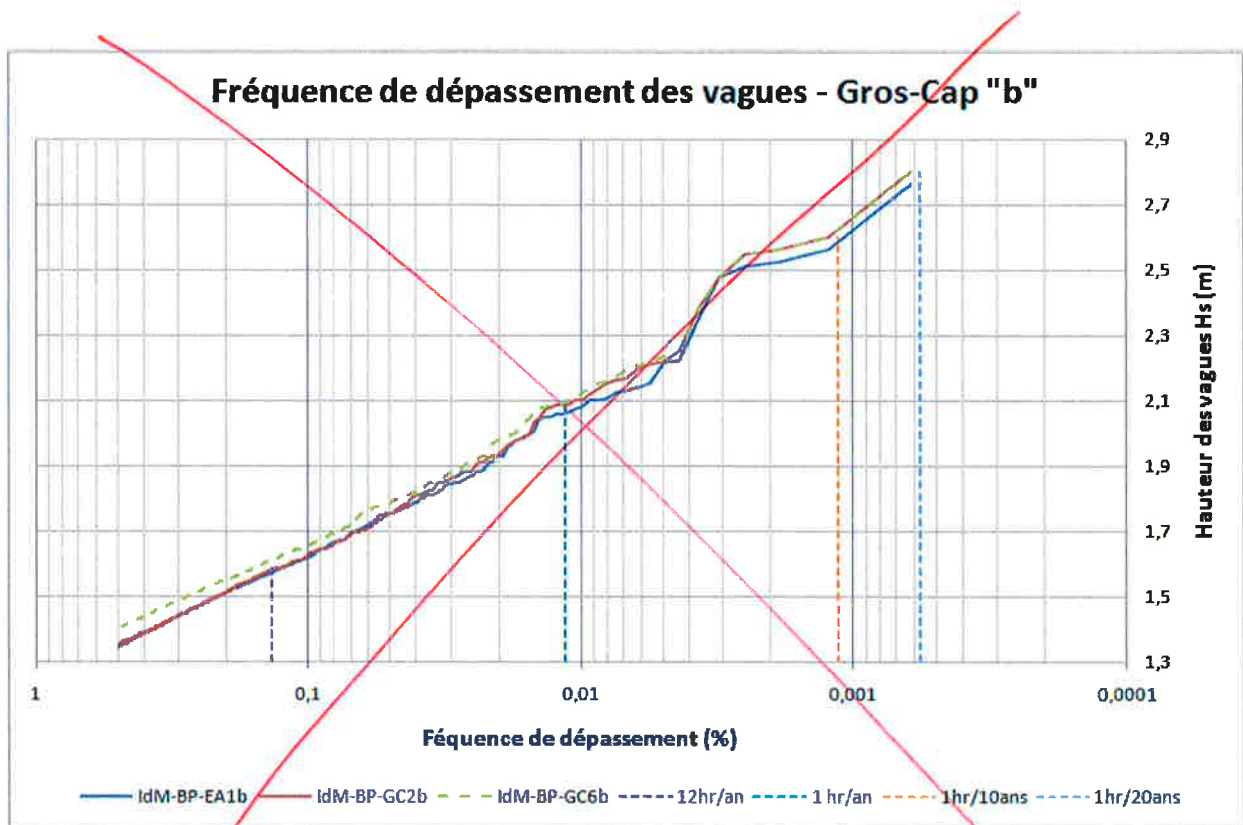


Figure 7.6 Fréquence de dépassement des hauteurs de vague – Secteur de Gros-Cap + Étangs aérés

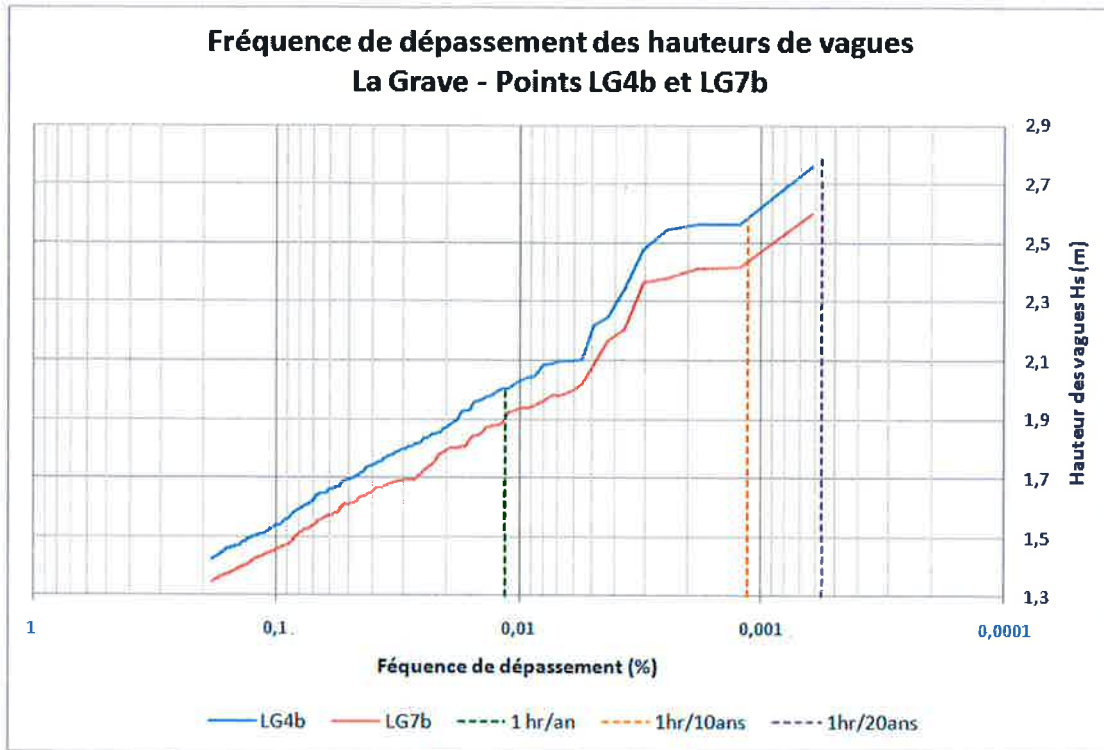


Figure 7.10 Fréquence de dépassement des hauteurs de vague – Secteur La Grave

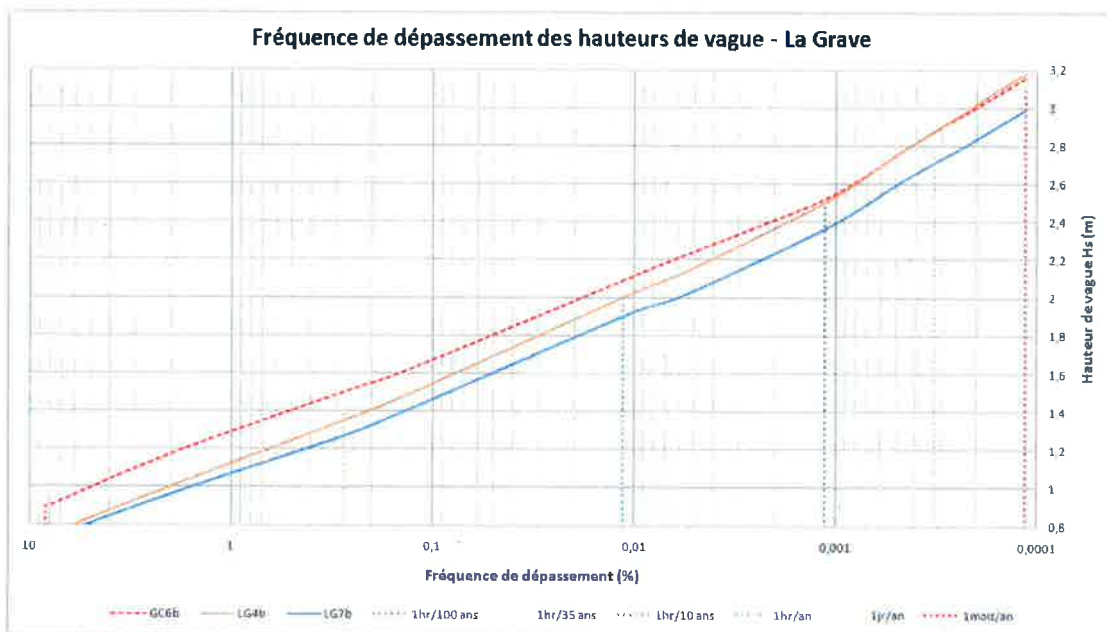


Figure 7.11 Prédiction de dépassement de hauteur de vague – Secteur La Grave

On parle donc d'une hauteur de vague réfractée de l'ordre de 0,7 m se produisant une fois par mois à une hauteur de vague de 3,0 à 3,2 m se produisant une fois tous les 100 ans pour le secteur de La Grave.

7.5 Calcul des fréquences conjuguées des vagues réfractées et des niveaux d'eau

Le calcul de la fréquence conjuguée des vagues et des niveaux d'eau a ensuite été fait à partir de l'étude des récurrences de niveaux d'eau à Cap-aux-Meules et de hauteur de vague en chacun des points de calcul. L'hypothèse d'indépendance complète des deux phénomènes a été faite pour effectuer ces calculs, c'est-à-dire qu'on a considéré que les vagues de tempête et les très hauts niveaux d'eau étaient des événements tout à fait indépendants. La figure suivante représente la fréquence conjuguée des vagues et des niveaux d'eau pour le point GC6b. Des calculs similaires ont été faits pour tous les points d'intérêt.

À chaque fois, les événements combinés (vague + niveau d'eau) correspondant à la récurrence de 35 ans ont été déterminés. La récurrence de 35 ans a été retenue comme correspondant à la vie utile normalement admise pour les ouvrages côtiers, surtout dans un contexte de changements climatiques.

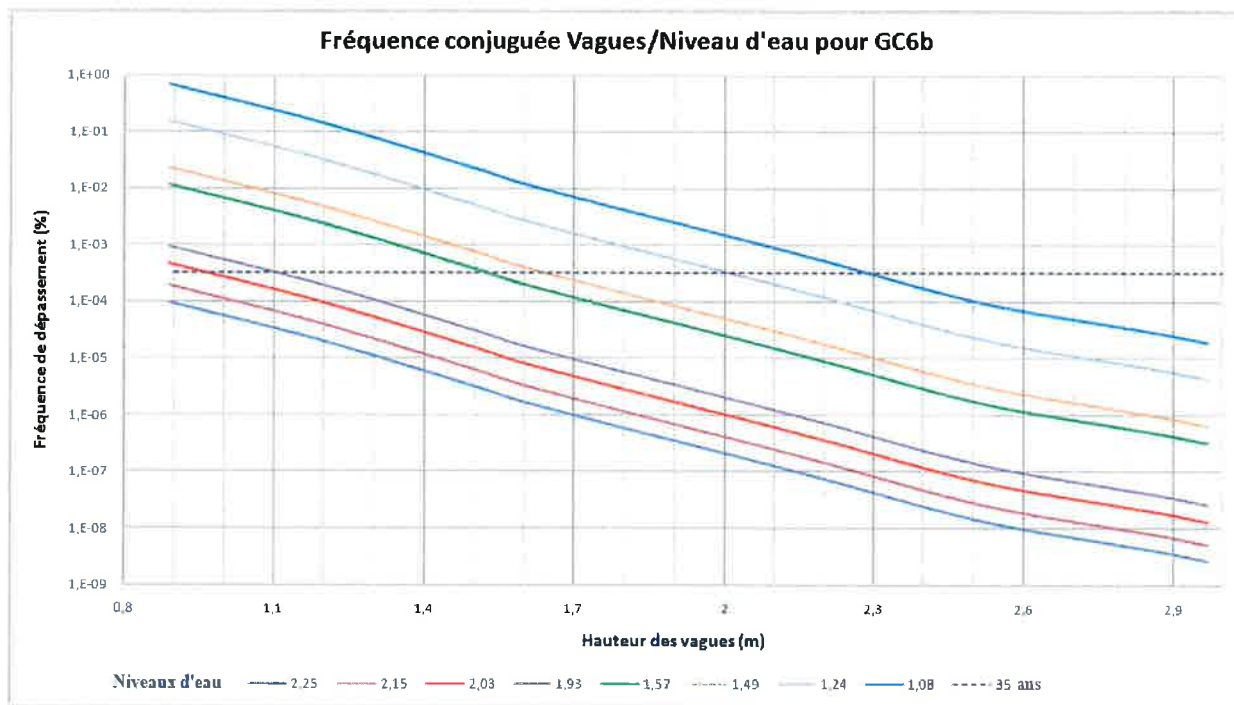


Figure 7.12 Fréquence conjuguée des vagues et niveaux d'eau pour GC6b

La figure suivante indique pour chacun des points d'intérêt la correspondance entre les hauteurs de vagues et les niveaux d'eau correspondant à une récurrence de 35 ans.

À la vue des résultats de ce calcul et en fonction des corrélations constatées entre l'occurrence de très hauts niveaux d'eau et de tempêtes du secteur est (figures 4.4 à 4.13), il n'est pas forcément évident que les hauteurs de vague et les niveaux d'eau extrêmes soient des paramètres tout à fait indépendants en ce qui concerne les côtes de la Baie de Plaisance. Selon la base de données de niveaux d'eau à Cap-aux-Meules, le niveau d'eau de +2,0 m ZC qui a été dépassé six fois depuis 2008 correspondrait à une hauteur de la vague de 1,0 m, ce qui ne semble pas très grand pour le niveau de dommage qui est constaté sur les rives de la Baie de Plaisance. Le niveau d'eau de +1,7 m ZC qui a été dépassé 46 fois depuis 2007 correspondrait à une hauteur de vague de 1,3 m, ce qui ne semble pas non plus très grand.

Pour résoudre cette question, une étude par événement combiné de niveau d'eau et de hauteur de vague serait requise, ce qui est hors de portée du présent mandat (ce genre d'étude relève plutôt d'une étude de maîtrise ou de doctorat). Il est possible que des études en cours à l'ISMER (UQAR) permettent dans quelques années de répondre à cette question.

Certaines précautions seront donc prises par rapport à ces paramètres de dimensionnement des ouvrages côtiers pour tenir compte de la possibilité de leur sous-estimation.

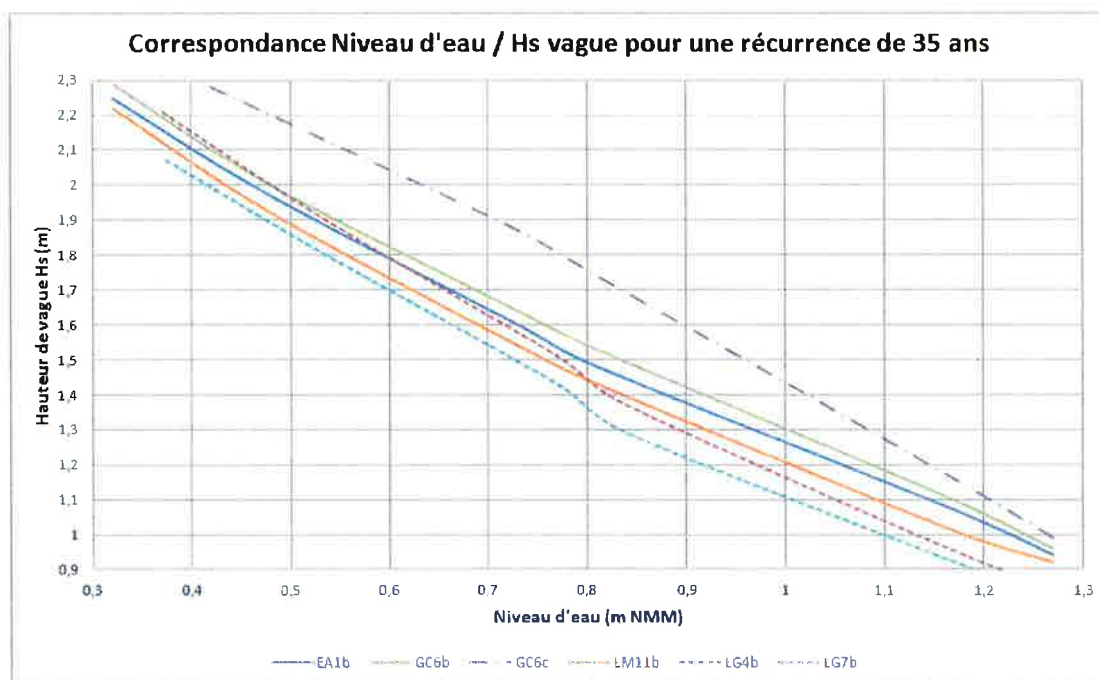


Figure 7.13 Correspondance entre vagues et niveaux d'eau pour une récurrence de 35 ans pour le secteur nord de la Baie de Plaisance et le secteur de La Grave.

8. COURANTS LITTORAUX ET DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE

8.1 Modèle numérique

Les contraintes de radiation des vagues fournies par le modèle de transformation des vagues du large ont été utilisées pour simuler les courants induits par les vagues le long de la côte des cinq secteurs d'intérêt. Les simulations ont été effectuées avec le module hydrodynamique de MIKE 21 FM et les mêmes paramètres généraux que ceux utilisés dans la modélisation de la transformation des vagues du large, soit un niveau d'eau de +1,25 m NMM (cf. section 7.1.4) et une rugosité des fonds équivalente à celle des sables fins (cf. section 7.1.6).

Le transport sédimentaire n'a pas fait l'objet d'une modélisation numérique en soi. Les résultats de modélisation, obtenus pour des cas de simulation bien précis, sont difficiles à synthétiser pour dresser un portrait clair et général du transport littoral. Les résultats de modélisation des courants littoraux ont plutôt été interprétés pour dégager les tendances générales de la dynamique sédimentaire de chaque secteur et émettre certaines recommandations quant aux solutions de protection envisagées.

8.2 Résultats

Les résultats de modélisation des courants littoraux sont présentés selon les cinq secteurs d'intérêt et pour quelques cas de vagues représentatifs des conditions de tempête obtenues à chaque site.

8.2.1 Secteur des étangs aérés

La figure 8.1 présente pour le secteur des étangs aérés les courants littoraux modélisés pour des vagues ayant une période de 12 secondes en provenance du nord, du nord-est (NE) de l'est et de l'est-sud-est (ESE).

Pour les vagues en provenance du nord jusqu'à l'est (figure 8.1a à 8.1c), les courants littoraux devant les étangs aérés sont orientés vers le sud-ouest. Au nord des étangs, les courants sont moins bien organisés et on remarque la présence de nombreux courants de retour. Ce patron d'écoulement est encore plus marqué pour les vagues en provenance de l'est et de l'ESE (figure 8.1c et 8.1d). On remarque pour ces deux directions de nombreux courants de retour, non seulement au nord des étangs, mais également au large de ceux-ci. Aucune direction dominante de courant littoral ne peut être identifiée pour les vagues en provenance de l'ESE (figure 8.1d).

Les patrons d'écoulement obtenus par modélisation numérique sont relativement complexes, et leur précision peut difficilement être évaluée sans données de validation. Il est toutefois intéressant de souligner la présence de figures sédimentaires (zones d'accumulation) sur l'image de haute résolution des fonds produite par les relevés du CIDCO dans les zones de courants de retour au large des étangs aérés (figure 8.5a).

Les courants littoraux et de retour notés sur les figures pourraient jouer un rôle négatif important sur la stabilité des sédiments placés lors d'un projet de recharge de plage qu'on pourrait tenter de mettre en œuvre dans le secteur. Ces courants ont tous tendance à

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

ailleurs qu'en eau très peu profonde serait entraîné loin au sud lors de ces tempêtes. L'intensité de ces courants littoraux indique que les projets de recharge de sable devant le chemin des Chalets ou la Pointe de la Martinique sont pratiquement voués à l'échec, à moins de mettre en œuvre un important système d'épis perpendiculaires à la côte.

8.2.4 Secteur de La Grave

La figure 8.5 présente pour le secteur de La Grave les courants littoraux modélisés pour des vagues ayant une période de 12 secondes en provenance du nord, du nord-est (NE) de l'est et de l'est-sud-est (ESE).

Les courants littoraux présentent les mêmes tendances générales en termes d'intensité et de direction de courants pour tous les cas de vagues simulés. Les courants les plus importants sont observés de part et d'autre du Cap des Demoiselles, et à l'extrémité ouest de la Pointe Shea. Des courants de sens opposés se rencontrent environ au centre de la plage, ce qui crée une zone de faibles vitesses dirigées vers le large.

Les quatre figures présentent un patron remarquablement constant du point de vue de la mobilité des sédiments. Du côté est de la plage de La Grave, les sédiments sont arrachés de la Pointe Shea, mais n'ont pas tendance à se déposer dans la partie est de la plage, les courants les portant plutôt vers le centre de la plage, puis vers le large. Du côté ouest, la tendance est au transport vers le centre de la plage de La Grave des sédiments détachés de la Butte de la Croix (au pied de la Colline des Demoiselles). Tous ces sédiments convergent vers le centre de la plage, ce qui explique relativement bien la stabilité apparente de cette partie centrale de la plage de La Grave.

Du point de vue des projets de stabilisation qui pourraient être envisagés pour la plage de La Grave, cette étude des courants engendrés par les vagues montre que tout projet de rechargement de la plage à l'aide de sable ou de sable et gravier devra se pencher sur la stabilisation de ces sables dans la partie est de la plage, sous peine d'augmenter la fréquence des interventions récurrentes de rechargement de plage. Une structure de protection située sur la partie ouest de la Pointe Shea devrait probablement améliorer cette stabilité, mais l'ampleur de cette structure reste à déterminer suite à des études hydrodynamiques. Il faudra en particulier s'assurer qu'une telle structure de protection n'empirera pas les choses du point de vue de la dynamique sédimentaire de la plage de La Grave.

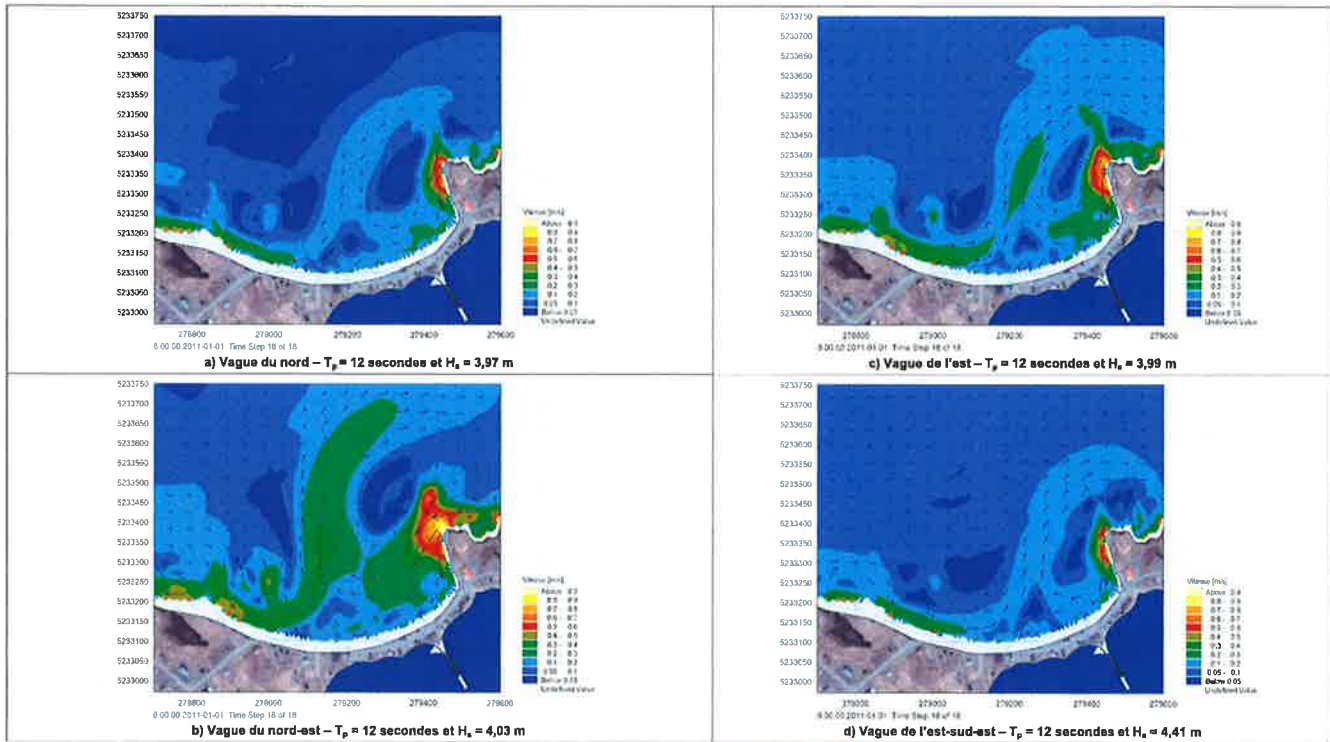


Figure 8.5 : Courants littoraux dans le secteur de La Grave

13. PROTECTION DE LA BERGE – SECTEUR DE LA GRAVE

13.1 Mécanisme d'érosion probable

Les mécanismes d'érosion reliés à la hausse des niveaux d'eau et à l'augmentation de l'énergie des vagues au niveau de la plage et des falaises mentionnés pour les secteurs précédents sont également impliqués dans les problèmes relevés dans le secteur de La Grave. La largeur de la plage a diminué entre les photos de 2002 et celles de 2011. Les courants littoraux dominants vers l'ouest devant la moitié orientale de cette plage expliqueraient assez bien la sensibilité particulière à l'érosion de l'extrémité est de ce secteur.

Les sédiments qui alimentent cette plage proviennent essentiellement de l'érosion de la pointe Shea à l'est et de la falaise de la bute de la Croix à l'ouest. Par contre, l'apport de sédiments est largement insuffisant par rapport aux phénomènes érosifs accompagnant la hausse des niveaux d'eau et la disparition des glaces. Les photos démontrent le caractère relativement ancien du phénomène d'érosion de la plage de ce secteur. Des protections étaient déjà en place en 2002 autour des maisons situées les plus à l'est. Les dernières décennies sont essentiellement caractérisées par l'accélération de l'érosion pour des raisons « naturelles » (si on oublie l'origine potentiellement anthropique de ces raisons – réchauffement climatique).

Une particularité de ce secteur est son caractère historique et récréotouristique qui fait que certaines solutions ont été pratiquement éliminées d'office car elles remettaient en cause ce caractère particulier du secteur.

13.2 Protection en enrochement

La protection de la berge à l'aide d'enrochements est le type de protection qui a été éliminé d'office pour la partie « plage » de ce secteur. Il serait possible de placer des enrochements contre le mur de protection de la route 199 et à l'ouest de ce mur au pied des falaises de la bute de la Croix (il existe déjà de tels enrochements derrière les Artisans du Sable).

Une évaluation des phénomènes de déferlement et de remontée des vagues sur l'enrochement de protection envisagé a été faite en fonction des conditions combinées des paramètres « vagues » et « niveaux d'eau » pour une durée de vie utile de 35 ans. Pour les niveaux d'eau supérieurs à +0,8 m NMM, les vagues correspondantes ne sont pas limitées par le déferlement. Par contre, pour des niveaux d'eau inférieurs à +0,8 m NMM, la profondeur d'eau limite la hauteur de vague pouvant atteindre la protection en enrochement. Ce phénomène a été pris en compte dans l'évaluation de la hauteur maximale des vagues en vue du dimensionnement des enrochements ($H_s \text{ max} = 1,75 \text{ m}$) et dans la remontée de ces vagues sur l'enrochement pour en déterminer l'élévation de la crête.

Le graphique suivant présente les résultats du calcul de la remontée des vagues sur l'enrochement (runup à 10%). Selon ces résultats, il faudrait placer la crête d'un enrochement au

pied des falaises de la partie ouest de La Grave à l'élévation +3,8 m NMM pour empêcher les vagues de trop le franchir.

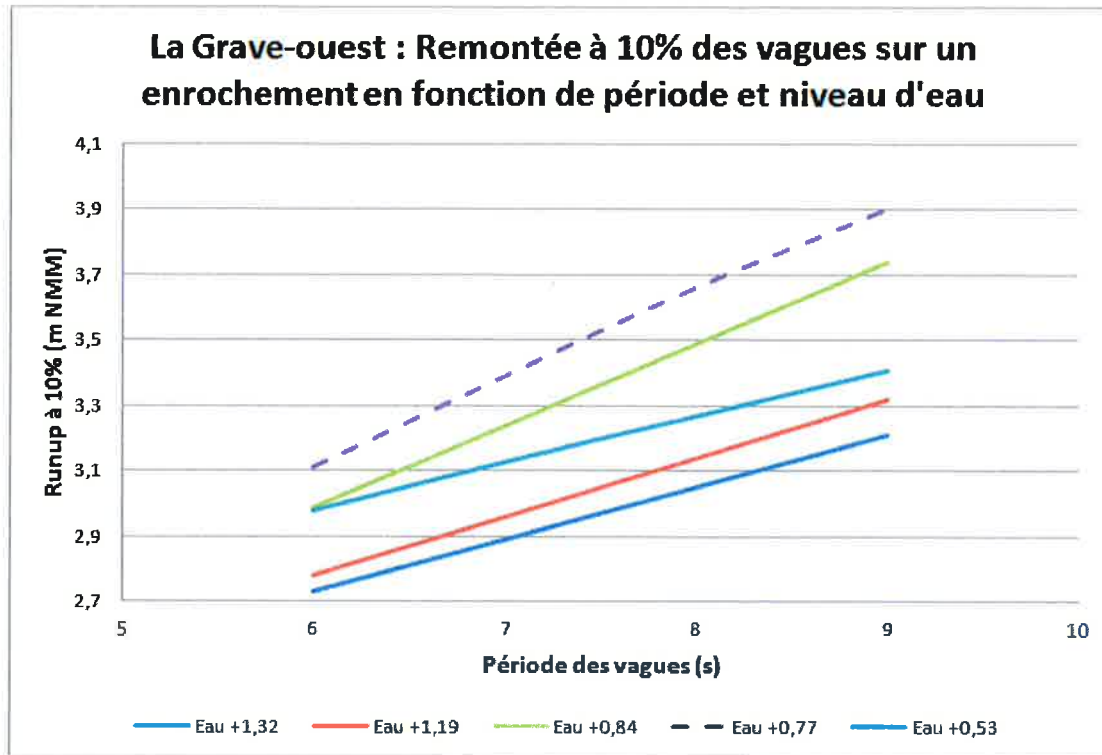


Figure 13.1 Remontée des vagues sur un enrochement dans la partie ouest de La Grave

Une vérification de l'élévation optimale de la crête de l'enrochement a été faite à l'aide des formules de calcul du débit de franchissement. Deux équations proposées dans le Coastal Engineering Manual (C.E.M.) du U.S. Army Corps of Engineers ont été retenues pour réaliser la présente évaluation. Ce sont les équations de Bradbury-Allsop (1988) et Pedersen (1996). Les deux équations s'appliquent relativement bien au cas du secteur de La Grave. Elles présentent l'inconvénient d'être basées sur l'hypothèse selon laquelle les vagues ne sont pas limitées par la profondeur. Ceci n'est pas tout à fait le cas de la protection de berge du secteur de La Grave pour les houles de dimensionnement, ce qui pourrait induire des problèmes dans l'interprétation de certains résultats.

La valeur cible de franchissement de 1 l/s/m a été retenue (voir chapitre 12.2) compte tenu des incertitudes concernant les différents paramètres de dimensionnement (dont la combinaison vague / niveaux d'eau).

Les calculs de quantité de franchissement de la protection ont été faits pour différentes combinaisons de niveau d'eau, de hauteur et de période de vagues correspondant à la récurrence de 35 ans.

Les résultats de ces calculs apparaissent dans la figure suivante pour une crête placée à l'élévation +3,7 m ZC ou +3,1 m NMM. Le pire cas de franchissement correspond à un niveau d'eau de +1,4 m ZC (0,8 m NMM) et à une période de pointe des vagues de 9 secondes.

Dans la légende de la figure, les abréviations « LG » correspondent à La Grave, « BA » à Bradbury-Allsop, « P » à Pedersen et les chiffres 7, 8 et 9 à la période de pointe des vagues.

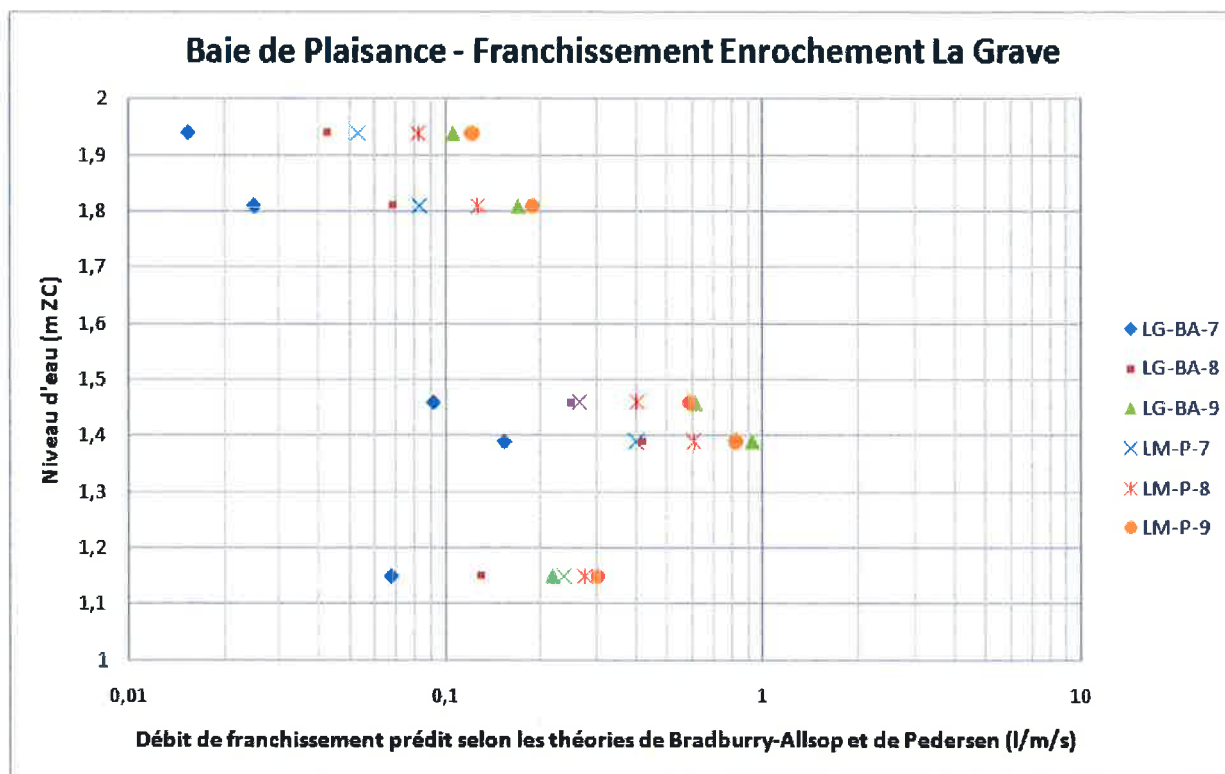


Figure 13.2 Débit de franchissement d'un enrochement dont la crête est à +3,1 m NMM

L'élévation de +3,1 m NMM a donc été retenue pour la crête de l'enrochement de protection de la zone ouest de La Grave.

Avec la vague de conception retenue ($H_s = 1,75$ m de hauteur), la formule de Hudson appliquée avec les paramètres suivants donne :

- Poids unitaire des enrochements : $2,6 \text{ t/m}^3$
- Poids unitaire de l'eau : $1,02 \text{ t/m}^3$
- Pente de la structure : 3H / 2V

- Coefficient de stabilité des enrochements K_D (tronc, déferlant, S.P.M.84²⁰) : 2,0
- Poids des unités de carapace calculé par la formule de Hudson : **1 à 2 tonnes**

Cette pierre devrait être placée sur une épaisseur de 1,7 m et la crête devrait avoir une largeur minimale de 2,6 m. La pierre-filtre à installer sous cette carapace serait de la pierre de 100 à 200 kg sur une épaisseur de 0,8 m. La figure suivante illustre l'installation de cette protection en enrochement du pied de la falaise du secteur ouest de La Grave. Pour des questions de logistique d'accès au pied de l'enrochement, il est nécessaire de prévoir une voie d'accès le long du pied de la falaise qui aurait une largeur minimale de 6 m au niveau du tout-venant sous la pierre-filtre.

Une problématique qui se retrouve dans tous les secteurs de falaise à l'étude est la quasi-absence de sédiments au pied des falaises. Sans investigations géotechniques en bonne et due forme, on s'attend à ne retrouver au pied des falaises qu'une mince couche (au plus quelques décimètres) de sédiments. La solution illustrée dans la figure suivante, soit le creusement d'une tranchée pour stabiliser le pied de l'enrochement, risque d'être difficile et onéreuse à réaliser. Une alternative serait de protéger cet enrochement à l'aide d'une butée de pied. Par contre, même cette butée de pied devra être sécurisée, ce qui entraînera un minimum d'excavation dans le roc. Pour les besoins de l'évaluation des coûts du concept de protection en enrochement, une tranchée de 1,2 m (moitié dans les sédiments, moitié dans le roc) a été considérée, cette tranchée étant comblée à l'aide d'une butée de pied en pierres de carapace.

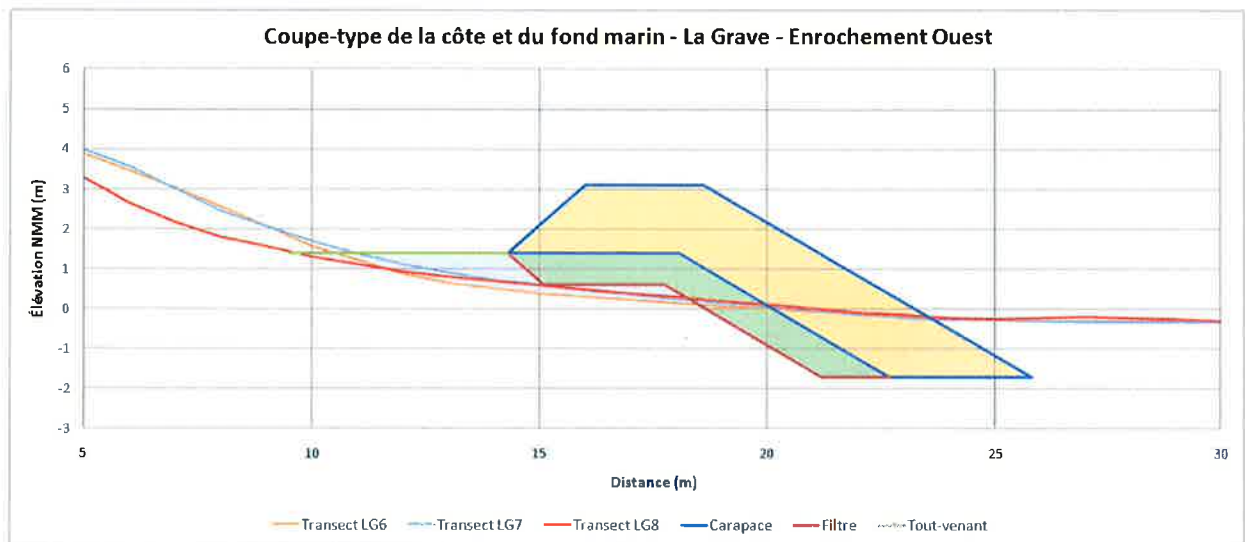


Figure 13.3 Coupe type d'une protection en enrochement de la partie ouest de La Grave

²⁰ Shore Protection Manual 1984 – U.S. Army Corps of Engineers

13.3 Rechargement de plage

La stabilité d'une plage naturelle et d'un rechargement de plage a été évaluée à partir des indications du C.E.M. Pour le diamètre caractéristique des sédiments de la zone à l'étude (0,25 mm), le profil naturellement stable de la plage est reproduit sur la figure suivante pour les deux zones de la pointe de La Grave (moitiés est et ouest).

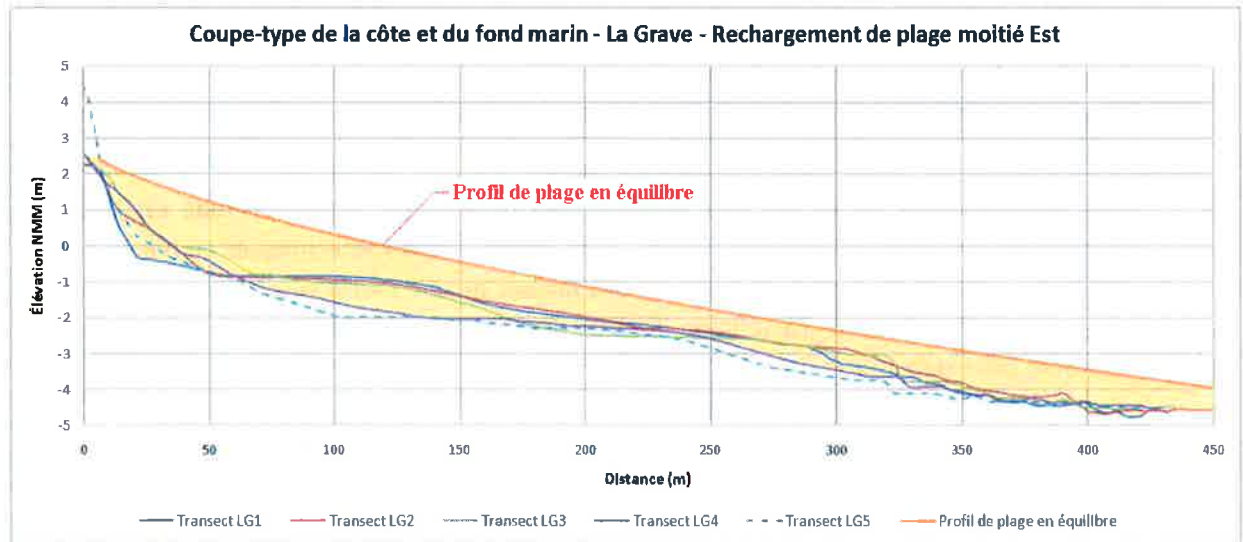


Figure 13.4 Coupe type d'une plage en équilibre devant la partie est de La Grave (plage)

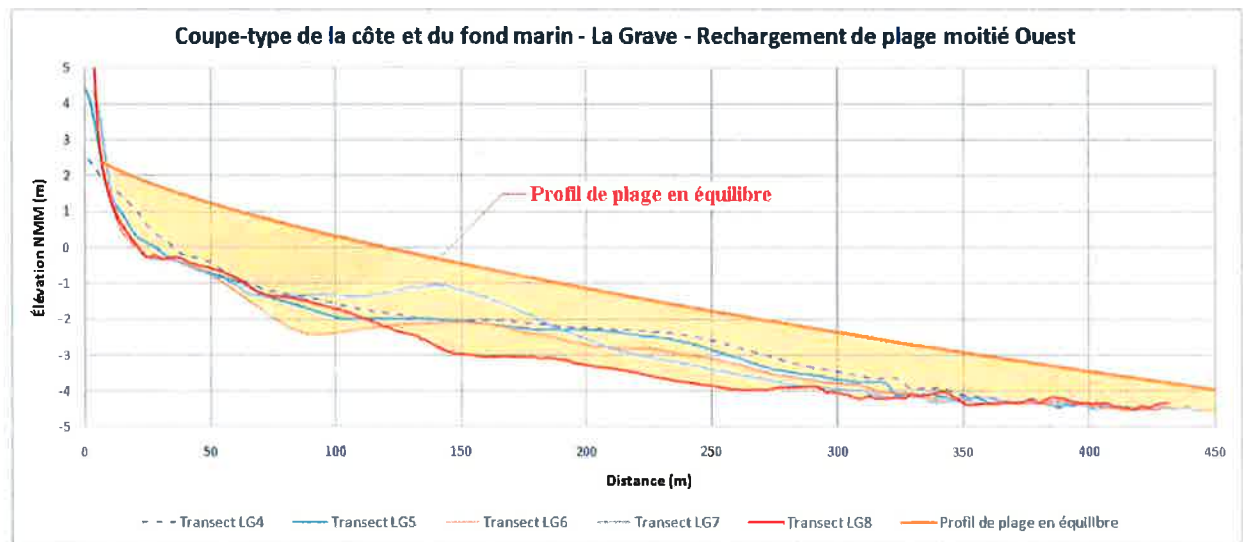


Figure 13.5 Coupe type d'une plage en équilibre devant la partie ouest de La Grave (falaise)

La partie supérieure de la plage a été placée à l'élévation +2,2 m NMM et la partie horizontale de cette partie de la plage a été limitée à une dizaine de mètres. Pour s'assurer de maintenir cette plage dans le cas d'événements de très hauts niveaux d'eau avec des vagues, il serait éventuellement requis de rehausser la plage et d'élargir la partie horizontale, la surélévation de 0,6 m de la plage par rapport aux niveaux d'eau extrêmes étant faible.

Le C.E.M. donne certains moyens d'évaluer un peu plus précisément les caractéristiques que devrait avoir un rechargement de plage. La figure suivante illustre le gain de pente d'équilibre théorique de la plage rechargée en passant d'un sable de 0,25 mm de diamètre à un sable de 0,3 mm de diamètre pour le secteur de La Grave. L'accroissement de la taille du sable améliore légèrement les choses pour la partie est de La Grave, les profils de la plage actuelle et ceux de la plage théoriquement en équilibre avec du sable de 0,3 mm de diamètre se rejoignant à environ 300 m du bord. Le gain est moins évident pour la partie ouest de La Grave.

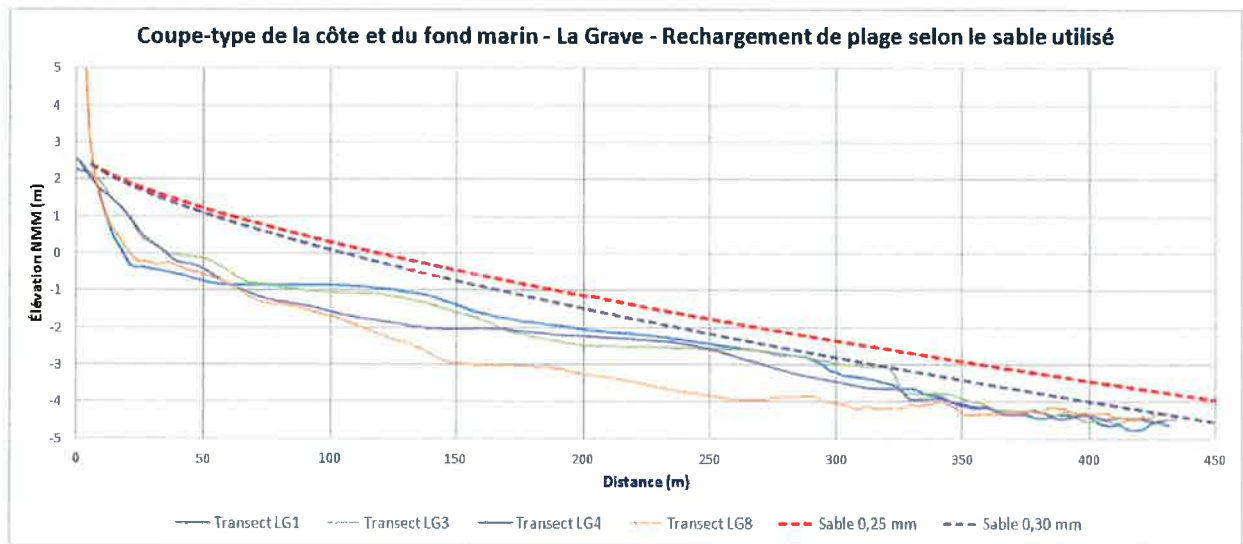


Figure 13.6 Coupe type d'une plage en équilibre devant La Grave selon le diamètre du sable

Pour commencer à avoir une intersection des profils de la plage « rechargée » et du fond naturel, il faudrait viser un sable ayant un diamètre caractéristique supérieur à 0,3 mm (au lieu des 0,25 mm du sable en place dans la Baie de Plaisance).

Devant la partie est de la plage de La Grave, il faudrait envisager plus de 650 m³/m de sable pour recharger la moitié est de la plage et près de 800 m³/m de sable pour recharger la moitié ouest de la plage (à condition d'être en mesure de retenir ce sable devant la plage). Même avec ces volumes et un sable présentant un diamètre de 0,3 mm, la relation concernant le volume critique de sédiments n'est pas respectée, ce qui laisse entrevoir des problèmes de stabilité de ce rechargement.

Du rechargement de plage en sable sans autre intervention n'est donc pas recommandable dans le secteur, les quantités requises pour un minimum de durabilité de ce rechargement étant importantes et les critères de stabilité et durabilité de ce rechargement de plage n'étant pas respectés. Pour un volume de $650 \text{ m}^3/\text{m}$ de sable de rechargement sur une largeur minimale de 350 m de la partie est de la plage de La Grave, on parle de $230\,000 \text{ m}^3$ de sable plus grossier que le sable de la Baie de Plaisance à installer devant la partie la plus touristique de la plage.

À ces quantités de sable s'ajouteraient l'épi de protection à l'extrémité ouest de la zone de recharge afin d'éviter une fuite latérale trop rapide des sédiments, des épis intermédiaires régulièrement espacés et éventuellement une butée de pied de plage pour éviter une fuite du sable vers le large. Les recharges récurrentes après la première recharge seraient probablement moins importantes, mais les quantités resteraient significatives en termes de quantités et de coûts. L'hypothèse de récurrence des rechargements de plage a été de placer un quart de la quantité initiale tous les 5 à 7 ans. Des études spécifiques devraient être entreprises pour confirmer ces hypothèses si cette solution est sérieusement envisagée.

13.4 Rechargement de plage avec butée de pied

La seule façon d'envisager un rechargement de plage devant la plage de La Grave serait de concevoir ce rechargement combiné à une butée de pied pour assurer la stabilité de la plage dans le sens perpendiculaire à la côte, à laquelle s'ajouteraient des épis régulièrement espacés.

De façon à tenter de minimiser les dommages à la butée de pied de la « plage suspendue » et pour éviter de rendre cette butée de pied trop apparente dans ce secteur touristique, il serait important de placer la crête de cette butée le plus bas possible de façon à ce que les vagues et les glaces ne détruisent pas rapidement cette butée de pied. Par contre, plus on place cette butée dans une profondeur d'eau importante, moins elle est efficace pour réduire la hauteur des vagues et plus il faut mettre de sable pour construire la plage suspendue.

Les figures suivantes illustrent la coupe type (partie est et partie ouest) d'un rechargement de plage sous la forme d'une « plage suspendue » dont le pied serait protégé par une butée qui pourrait être en enrochement ou en géotubes. Deux exemples de butée de pied sont illustrés, soit une butée dont la crête serait au 0,0 m NMM et une butée dont la crête serait à -1,5 m NMM.

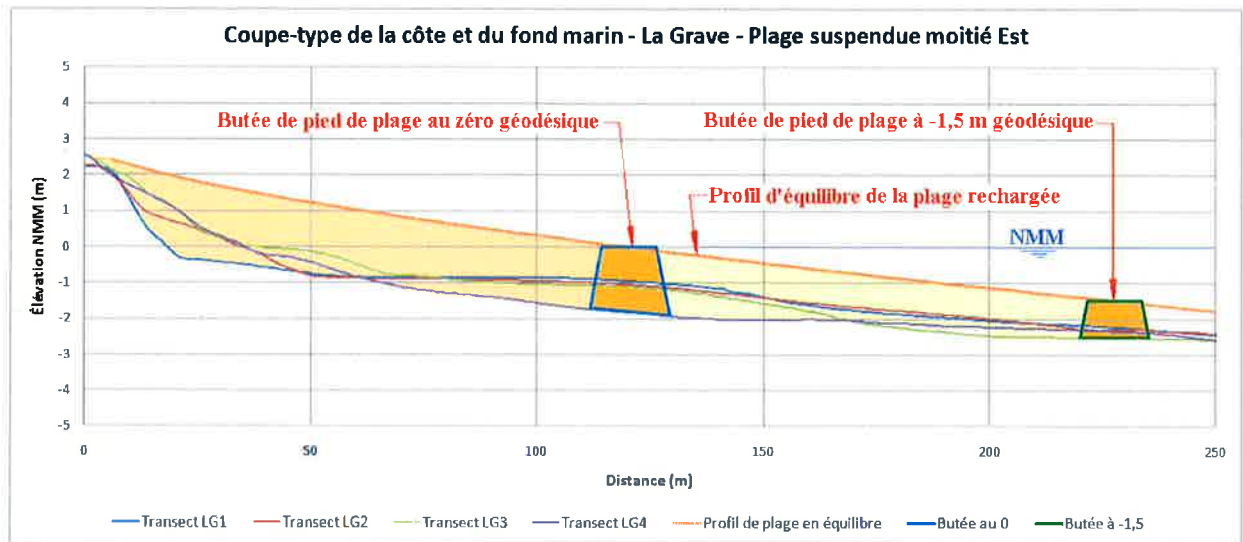


Figure 13.7 Coupe type d'une plage suspendue devant la plage de La Grave – partie est

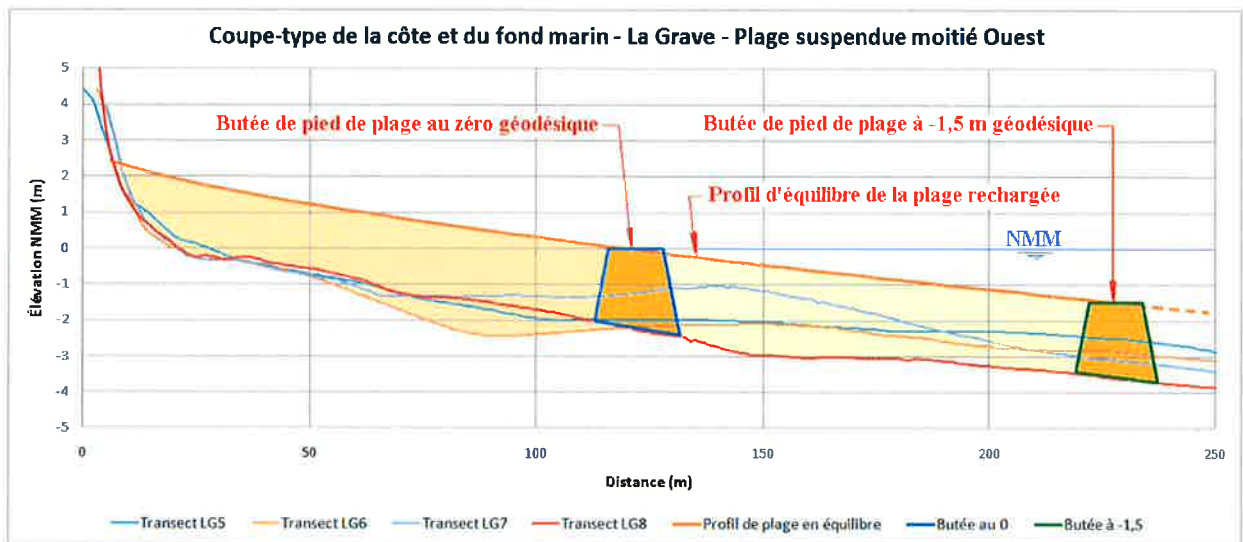


Figure 13.8 Coupe type d'une plage suspendue devant la plage de La Grave – partie ouest

Pour garder un minimum de caractère esthétique à ce secteur, il serait préférable de placer la crête de la berme de protection de pied de plage à -1,5 m NMM (la butée la plus éloignée du rivage sur les figures précédentes).

Une butée en enrochement pourrait être constituée de pierre de type « rip-rap » de 50 à 1500 kg placée avec une crête d'au moins 12 m de largeur. Cette pierre pourrait être directement déversée d'une barge. À cause des contraintes mécaniques auxquelles sera soumise cette pierre, il est requis d'aller chercher cette pierre à l'extérieur des îles de la Madeleine pour obtenir une qualité minimale des matériaux et une durabilité acceptable de l'ouvrage. La figure suivante illustre une butée en rip-rap dont la crête serait à -1,5 m NMM.

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

Le choix d'une butée en rip-rap placée au 0 NMM implique de placer environ 180 m³/m de sable de rechargement sur une largeur de 350 m de plage (correspondant uniquement au secteur est de La Grave). En plus des protections en pied de plage et des épis sur les côtés de la recharge et à distance régulière le long de la plage, on parle donc de 63 000 m³ de sable requis pour recharger une première fois cette plage suspendue dans la partie la plus touristique de La Grave.

Le choix d'une butée en rip-rap placée à -1,5 m NMM implique de placer environ 350 m³/m de sable de rechargement sur une largeur de 350 m de plage (correspondant uniquement au secteur est de La Grave). En plus des protections en pied de plage et des épis sur les côtés de la recharge et à distance régulière le long des falaises, on parle donc de 125 000 m³ de sable requis pour recharger une première fois cette plage suspendue dans la partie la plus touristique de La Grave.

Les recharges récurrentes après la première recharge seraient probablement moins importantes, mais les quantités resteraient significatives en termes de coûts. L'hypothèse de récurrence des rechargements de plage a été de placer un quart de la quantité initiale tous les 5 à 7 ans. Des études spécifiques devraient être entreprises pour confirmer ces hypothèses si cette solution est sérieusement envisagée.

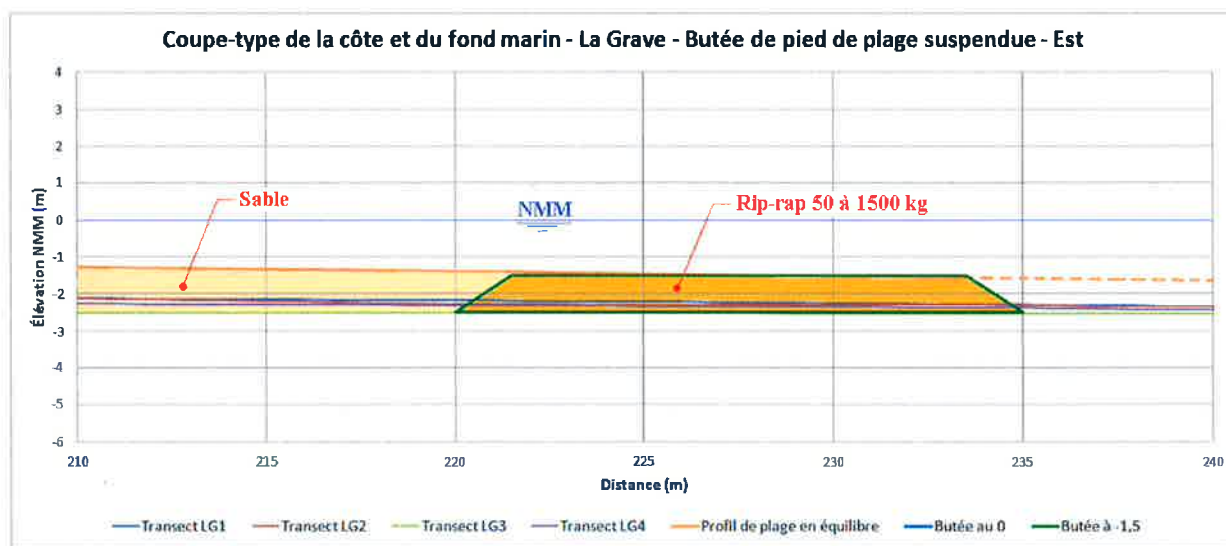


Figure 13.9 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en enrochement à -1,5 m NMM

L'autre méthode de butée de pied de plage serait l'utilisation de géotubes remplis d'un sable qui pourrait être plus fin que le sable en place puisque contenu dans les géotubes. Cette méthode a l'avantage d'utiliser du géotextile et du sable (disponible sur place alors que la pierre devra être importée). Par contre, ne serait-ce qu'à cause de la méthode de mise en place et des contraintes de vagues et de glace, il est difficilement envisageable de placer les géotubes avec la crête au niveau moyen des mers (sans parler du point de vue esthétique). Même une mise en place avec le dessus des géotubes à 1,5 m sous le NMM posera des défis logistiques et de sérieux risques en termes de durabilité. Des expériences de mise en place de géotubes au Mexique indiquent

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

une fragilité potentielle du géotextile par rapport aux contraintes induites par les vagues. L'expérience des géotubes mis en place à Tuktoyaktuk (Nunavut) dans les années 80 a clairement identifié le vandalisme et l'impact des débris flottants projetés par les vagues comme causes de la détérioration du géotextile. Enfin il reste l'inconnue que représentent les glaces dans le processus de dégradation des géotubes. Il sera donc indispensable de renforcer la membrane géotextile, soit en utilisant des fibres de Kevlar, soit en recouvrant le géotube d'un matelas de béton articulé. Même ces méthodes de protection des géotubes sont expérimentales, aucun exemple d'installation dans un environnement similaire n'ayant pu être trouvé. La figure suivante montre trois géotubes de 34 pieds (10,4 m) de circonférence placés côte à côte pour assurer une redondance à ce système relativement expérimental. Un tapis antiaffouillement est prévu sous les géotubes. Il est possible que deux géotubes soient suffisants et la compagnie Tencate/Terratube considère de n'en mettre qu'un seul. Une décision devra être prise quant au niveau de risque et à la durabilité acceptable d'un tel système.

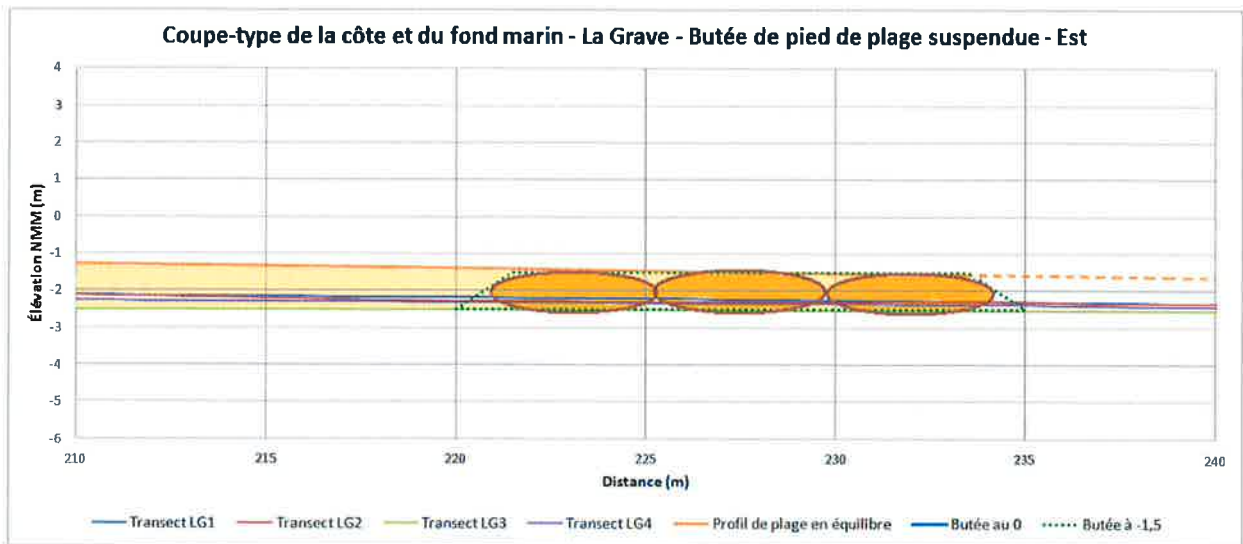


Figure 13.10 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en géotubes à -1,5 m NMM

Du rechargement de plage ne peut donc raisonnablement s'envisager dans le cas du secteur de la plage de La Grave qu'en parallèle à une protection en enrochement ou géotube du bas de plage (butée de pied de plage) parce que la géométrie de la plage et en particulier sa pente ne sont pas propices à une stabilité d'un rechargement en sable sans cette protection.

La mise en place de ce rechargement de plage pourrait prendre les dimensions illustrées sur le plan suivant (cas de la butée en pierre à -1,5 m NMM) pour ce qui est de la partie orientale de la plage de La Grave. Non seulement la butée de pied de plage devra être mise en place, mais il serait également nécessaire de placer des épis en pierre régulièrement le long de la zone rechargée en sable pour contenir ce sable latéralement.

La configuration des courants obtenue par l'étude numérique indique qu'il y aurait intérêt à étudier la mise en place d'un épi à l'extrémité nord-ouest de la pointe Shea pour tenter de diminuer les courants parallèles à la plage dans la partie est de La Grave, de façon à améliorer la rétention des sédiments dans ce secteur de La Grave. Il sera important de s'assurer que la mise en place d'un tel épi ne nuit pas à la dynamique sédimentaire du reste de l'anse Painchaud.

13.5 Rechargement de bas de falaise en matériaux grossiers

Du rechargement de plage en tout-venant de carrière des Îles (rip-rap), en galets importés, en gravier ou en sable et gravier pourrait être plus intéressant que du rechargement en sable dans le secteur ouest de la plage de La Grave (secteur de falaise), à cause de la pente d'équilibre de la plage qui serait nettement plus raide que celle d'un sable (voir chapitres 9.6 et 9.11). Il y a cependant un problème de durabilité de ce rechargement, qui devrait idéalement provenir des Îles de la Madeleine (distance de transport, retombées locales). Les matériaux en provenance des Îles étant très sensibles à la dégradation avec le temps, les contraintes hydrodynamiques et celles de gel/dégel, il est recommandé de bien documenter d'année en année les travaux temporaires de protection des étangs aérés pour obtenir une idée de la vitesse de dégradation de ces matériaux locaux. Bien que des données préliminaires aient pu être obtenues dans le cadre de la présente étude, une étude plus approfondie de disponibilité de pierre de type « rip-rap » local et de galets importés devra également être réalisée.

La géométrie requise pour que cette protection de berge en matériaux grossiers soit efficace a été définie en fonction de la remontée des vagues sur une plage présentant une pente de 10 %. La crête de la plage devrait se trouver à l'élévation +2,2 m NMM pour respecter le critère de remontée des vagues (runup 10 %) selon une condition de vague / niveau d'eau de 35 ans de période de retour.

Le calcul de la grosseur de la pierre de type « rip-rap » à mettre en place a été effectué à l'aide de l'équation proposée par le C.E.M. (chapitre VI-5-3-7, page VI-5-84). Avec une vague déferlante de 1,75 m de Hs, une pente de 10 % de la plage et une densité de la pierre de 2,6 t/m³, la pierre à mettre en place devrait avoir un poids compris entre 50 et 1 500 kg (300 à 950 mm de diamètre équivalent), la granulométrie du matériel devant être régulière entre ces deux limites.

Ce concept de protection de berge s'apparente plus à du rechargement de plage qu'à une protection en enrochement, surtout si des matériaux locaux (pierre de qualité marginale) sont utilisés. Il faut prévoir dans ce genre de concept des rechargements récurrents de la « plage » que va former la pierre qui sera mise en place et qui se dégradera sous l'effet des vagues et des glaces. L'hypothèse de récurrence des rechargements en matériaux grossiers locaux a été de placer un quart de la quantité initiale tous les 15 ans. Des études spécifiques quant à la durabilité de la pierre utilisée devraient être entreprises pour confirmer ces hypothèses si cette solution est sérieusement envisagée.

L'avantage de ce concept par rapport à une protection traditionnelle en enrochement est que le résultat des travaux de protection est une plage accessible, alors que l'enrochement traditionnel crée une barrière en termes d'accès à une plage qui est de toute façon dégradée à cause de la présence de l'enrochement.

D'autres avantages de ce concept par rapport à l'enrochement sont la diminution des risques liés à la réalisation des travaux (risques de réclamations dues aux conditions géotechniques ou météorologiques particulières et risques de dépassement des quantités apparaissant au contrat)

La figure suivante illustre la coupe type proposée dans le cas d'une telle protection de berge dans le secteur ouest de la plage de La Grave. La pierre de rip-rap locale serait mise en place selon une géométrie relativement facile à obtenir pour l'entrepreneur avec des bouteurs (pente externe de 3/1). Les vagues et la glace se chargeraient d'adoucir la pente externe de ce rechargement de plage pour se rapprocher de la pente de 10 dans 1 visée.

Ce concept pourrait éventuellement être appliqué à la face ouest de la pointe Shea de façon à améliorer la stabilité d'un concept de rechargement de plage en sable de la partie orientale de La Grave.

Un concept de rechargement réalisé à l'aide de galets importés ayant une durabilité améliorée par rapport aux matériaux locaux requerrait nettement moins de matériaux à mettre en place contre la falaise de la Pointe de la Croix et impliquerait potentiellement une diminution des coûts de ce type de projet par rapport au projet décrit ci-dessus utilisant des matériaux grossiers locaux (voir chapitre 9.8). Par contre, des matériaux plus résistants n'alimenteraient pas en sédiments les plages adjacentes de façon aussi efficace que des matériaux locaux.

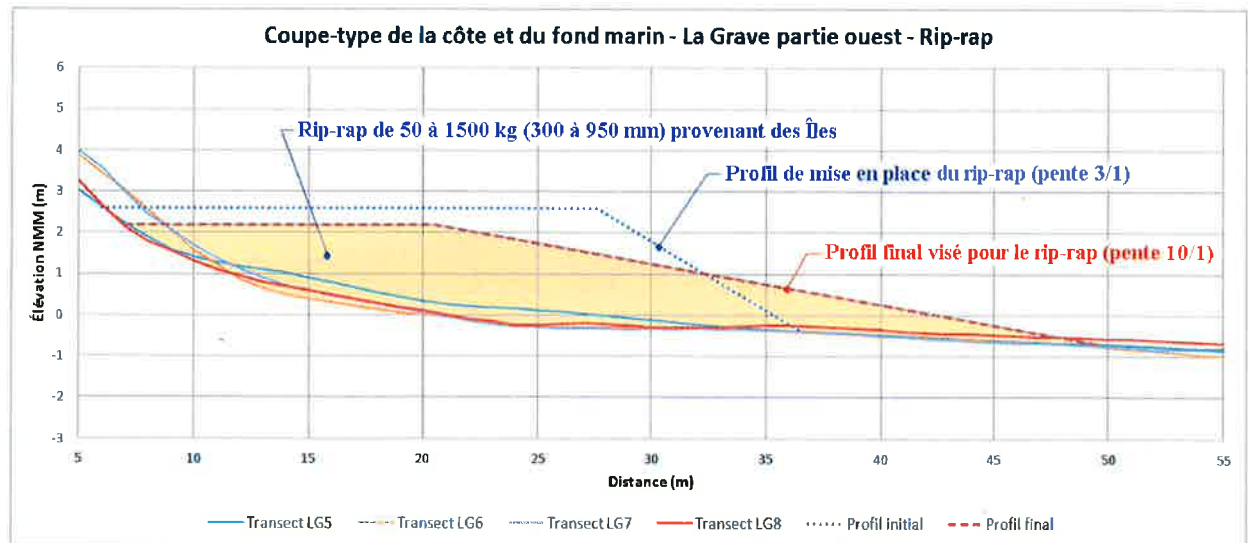


Figure 13.11 Coupe type d'une protection de berge en matériaux grossiers devant la partie ouest de la plage de La Grave

13.6 Rechargement de plage mixte

Des concepts de rechargement de plage mixte ont été développés entre autres dans le cadre de projets de restauration d'habitats. Ce genre de concept utilise différentes granulométries de matériaux, dont un noyau en matériaux grossiers (gravier, galets ou cailloux) destiné à résister aux événements extrêmes et un recouvrement de ce noyau à l'aide de matériaux plus fins (sable et/ou gravier).

Appliquée au site de La Grave, cette approche permettrait de minimiser l'empiètement des travaux de restauration sur le milieu marin tout en diminuant les risques pour au moins une partie des infrastructures existantes.

Du point de vue de la conception de ce genre d'ouvrage, il n'existe pas de « recette » paramétrique toute faite et la conception d'un tel projet doit passer soit par un processus de « projet-pilote » avec suivi de performance sur plusieurs années, soit par une phase d'essais en modèle réduit permettant de répondre aux questions concernant la performance et la durabilité du concept. Le Québec a la chance de posséder un laboratoire qui, par sa taille, est l'un des mieux équipés au monde pour ce genre d'essais (INRS-ETE à Québec).

La figure suivante présente un concept de plage mixte gravier / sable réalisée près de Everett (Puget Sound – Washington) dans le cadre d'un projet de restauration d'habitat pour le saumon²¹. Le concept s'articule autour d'un noyau en gravier (diamètre maximal de 76 mm) recouvert du côté externe d'un sable et gravier (diamètre maximal de 38 mm).

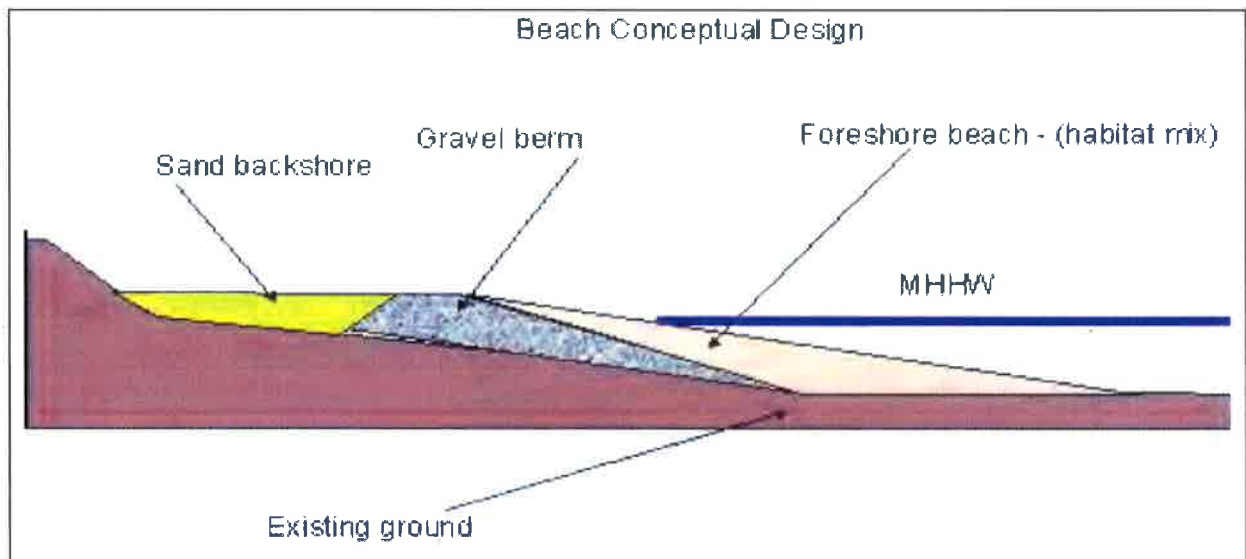


Figure 13.12 Exemple de concept de rechargement de plage mixte dans l'état de Washington USA

²¹ Houghton, J. & al. "Restoring the beaches of Puget Sound – Two promising prototypes in Everett, WA"

À cause des vagues qui sont plus fortes que dans la Baie de Plaisance que dans Puget Sound, pour obtenir la performance recherchée, le noyau d'un rechargement mixte requis le long de la plage de La Grave devra probablement être plus grossier.

13.7 Rechargement de plage avec épis

Du rechargement de plage avec épis sans butée de pied de plage ne semble pas être une avenue envisageable. La raison principale en est le non-respect des critères d'équilibre de la pente de la plage rechargée expliquée dans les chapitres précédents. Le sable de recharge de plage placé entre les épis fuirait par l'extrémité la plus au large des épis et cette fuite de matériel risquerait de ne même pas servir de protection au rivage en aval.

Une autre raison de ne pas envisager l'utilisation d'épis seuls pour retenir les sédiments est la trop faible quantité de sable qui semble circuler devant la plage de La Grave avec l'attaque généralement frontale des vagues qui semble induire autant de circulation des sédiments de la côte vers le large que de circulation parallèle à la côte de ces sédiments.

Par contre, ces épis perpendiculaires au rivage peuvent (et doivent probablement) être envisagés pour retenir une recharge de plage faite devant la plage de La Grave (avec butée de pied de plage).

13.8 Brise-lames submersibles au large

La mise en place d'un brise-lames submersible au large de la plage de La Grave a été évaluée en termes de faisabilité et d'efficacité à diminuer la hauteur des vagues au niveau de la côte.

Le fait de viser un brise-lames submersible (dont la crête se trouverait au maximum au zéro des cartes marines) fait en sorte que ce brise-lames serait sous plus de deux mètres d'eau lors des événements de très hauts niveaux d'eau. Les hauteurs de vagues de conception étant de cet ordre de grandeur (1,8 m à 2 m), ce genre de brise-lames serait tout à fait inefficace pour arrêter l'action érosive des vagues lors de ces très hauts niveaux d'eau. De plus, ce brise-lames se trouverait à une distance de 200 m du rivage.

Sans rechargement artificiel de la plage, il est illusoire de compter sur le transit littoral pour faire remonter le niveau de la plage en arrière du brise-lames submersible. Tout au plus verrait-on une certaine accumulation se produire immédiatement en amont du brise-lames, loin de la zone de marnage.

Il faudrait donc envisager des brise-lames partiellement submersibles (crête au niveau moyen de l'eau ou à +1 m NMM). Ces brise-lames seraient donc visibles une grande partie du temps et seraient fortement sollicités par les vagues et surtout les glaces. De plus, ils retiendraient l'eau à marée basse, d'autant que des épis seraient aussi requis. Cette option n'a donc pas été retenue.

13.9 Digue de protection au droit de l'ancien quai

La mise en place d'une digue de protection de la plage sur le site de l'ancien quai a été évoquée comme solution potentielle à l'érosion de la plage. Plusieurs problématiques doivent être résolues dans le cadre de cette solution.

La première problématique est que cette solution d'une protection au large ne devrait pas modifier rapidement et significativement l'état de vulnérabilité de la plage dans les conditions de tempête du secteur est. Il faudrait donc envisager cette solution dans une perspective à long terme et idéalement l'accompagner d'une solution de protection de la plage à court terme (rechargement en sable / gravier / galets par exemple).

La deuxième problématique est que, pour que le projet ait une chance de passer le test de l'évaluation environnementale, il faudra probablement s'orienter vers une solution pouvant être associée à une valorisation du milieu, comme un projet d'habitat pour le homard. Il sera donc difficile de penser à des murs de béton, mais réfléchir plutôt en termes de digue en enrochement ou en blocs de béton préfabriqués.

Une troisième problématique est celle de la pérennité de la structure proposée. Pour « certifier » cette pérennité, il sera requis de la rendre stable en conditions extrêmes. Pour ce faire, la crête de la structure devra être placée significativement plus haut que l'extrême de niveau d'eau de conception. Cette digue aura donc des dimensions relativement imposantes et les coûts de construction qui en découleront seront aussi imposants. De plus, si cette structure doit être rendue accessible aux piétons sur une base sécuritaire, il sera requis de hausser ses critères de stabilité, en l'occurrence encore augmenter ses dimensions et s'assurer que d'une part la structure reste stable au cours des tempêtes et d'autre part que, si l'accès à cette structure n'est pas règlementé par une autorité locale, son accès reste sécuritaire en tout temps.

Enfin, il reste à définir la géométrie idéale de cette structure pour protéger la plage (orientation et longueur). Il n'est pas du tout évident que la géométrie de l'ancien quai ait été significativement efficace dans ce sens. Des géométries alternatives devront être évaluées, en s'assurant que cette nouvelle structure n'aura pas d'effets potentiellement néfastes en termes de circulation générale des sédiments dans l'Anse Painchaud.

Une telle digue de protection de la plage de La Grave devra donc faire l'objet d'études spécialisées avant d'être proposée et son coût sera significatif.

13.10 Déplacement d'infrastructures

Le déplacement ou le déménagement de certaines résidences et de certaines infrastructures urbaines (route, services) devrait être envisagé dans le cas de La Grave, surtout lorsque ces infrastructures sont tellement avancées sur la plage qu'elles augmentent significativement le coût d'une solution globale. Les maisons les plus à l'est sont particulièrement visées par cette remarque, mais d'autres maisons gagneraient beaucoup à soit être posées sur pilotis (comme à

l'origine de La Grave), soit être reculées pour être moins sujettes à l'érosion. Les nombreux empiètements faits sur la plage de La Grave devraient être règlementés (installations temporaires estivales et non-installations permanentes requérant de la protection).

Dans une perspective à court ou moyen terme, le rehaussement de la structure et la mise sur pilotis de certains bâtiments pourraient atténuer l'effet catastrophique pour la plage des fondations étanches et profondes de plusieurs de ces bâtiments. La remarque s'applique également aux structures temporaires comme les terrasses. Il serait requis de s'assurer en concevant ces fondations sur pilotis que l'eau et les vagues peuvent effectivement passer sous le bâtiment sans obstacle autre que les pilotis. Ces pilotis devront pouvoir résister aux impacts des vagues de tempête et être placés assez profondément dans la plage pour ne pas être affectés par des phénomènes d'affouillement local autour des pilotis provoqués par les vagues lors des tempêtes.

La mise en place d'éléments de protection comme des blocs de béton en rangée est fortement déconseillée, ces blocs ayant pour conséquence la détérioration de la plage et l'augmentation des problématiques de vulnérabilité de l'ensemble des bâtiments sur La Grave. Les alternatives aux blocs de béton ne sont pas nombreuses sur une base individuelle. Il serait nettement préférable de reconstituer la plage à l'aide de graviers et galets autour des bâtiments affectés par l'érosion, mais si possible sur une base communautaire (au moins un secteur à la fois) pour en améliorer l'efficacité.

13.11 Solutions en érosion pour le secteur de La Grave

Les solutions les plus évidentes en matière de protection contre l'érosion du secteur de La Grave sont la protection à l'aide d'un **rechargement avec des matériaux grossiers** (rip-rap) dans la partie ouest du secteur (mur le long de la route 199 et falaises) et un **rechargement mixte** (noyau de matériaux grossiers recouvert de sable et gravier) pour la partie orientale plus touristique du secteur. Cette solution n'a toutefois pas pu être dimensionnée dans le cadre de la présente étude; elle nécessiterait une étude en modèle réduit pour bien étudier la stabilité des matériaux de rechargement, et éventuellement la nécessité d'inclure une butée de pied et des épis dans la solution.

La solution de protection du secteur ouest en rip-rap extrait des carrières des îles de la Madeleine est une solution nécessitant des rechargements réguliers. L'inconvénient principal de la solution en enrochement est la dégradation du peu de plage qui resterait en avant de l'enrochement, ce qui entraînerait la dégradation de la plage du secteur oriental de La Grave, le plus touristique, alors que la solution en rip-rap entretiendrait et améliorerait les plages adjacentes (dont celle du secteur historique) à travers le processus de dégradation des pierres constituant le rip-rap. Il est à noter que le secteur ouest ne requiert pas une intervention de protection immédiatement, mais qu'il pourrait devenir problématique dans le futur.

La solution de rechargement de plage du secteur historique est une solution nécessitant des rechargements réguliers. La mise en place de la butée de pied de plage et des épis transversaux limiterait les besoins en rechargement, mais ne les éliminerait pas. Il s'agit de la seule solution qui permet de conserver intégralement le cachet de ce secteur névralgique du tourisme au îles de la Madeleine. Outre les études d'optimisation du concept en modèle hydraulique, la recherche d'une source de sédiments de recharge est aussi à étudier.

Les coûts des deux solutions retenues pour ce secteur sont comme suit (voir détails en annexe)
 – les solutions de plage de galets ou de plage mixte n'ont pu être évaluées faute de méthode paramétrique permettant d'en déterminer les dimensions :

Solution 1 – Partie ouest - Rechargement de la plage avec matériaux grossiers (350 m)	Coût initial : 1 949 000 \$ Rechargements périodiques : <u>1 021 000 \$</u> Coût total : 2 970 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les à tous les 15 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans).
Solution 1 – Partie est - Rechargement de la plage (350 m) avec épis transversaux et butées de pied	Coût initial : 6 323 000 \$ Rechargements périodiques : <u>3 266 000 \$</u> Coût total : 9 589 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les à tous les 15 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans). À valider par des études complémentaires, y inclus modélisation physique.

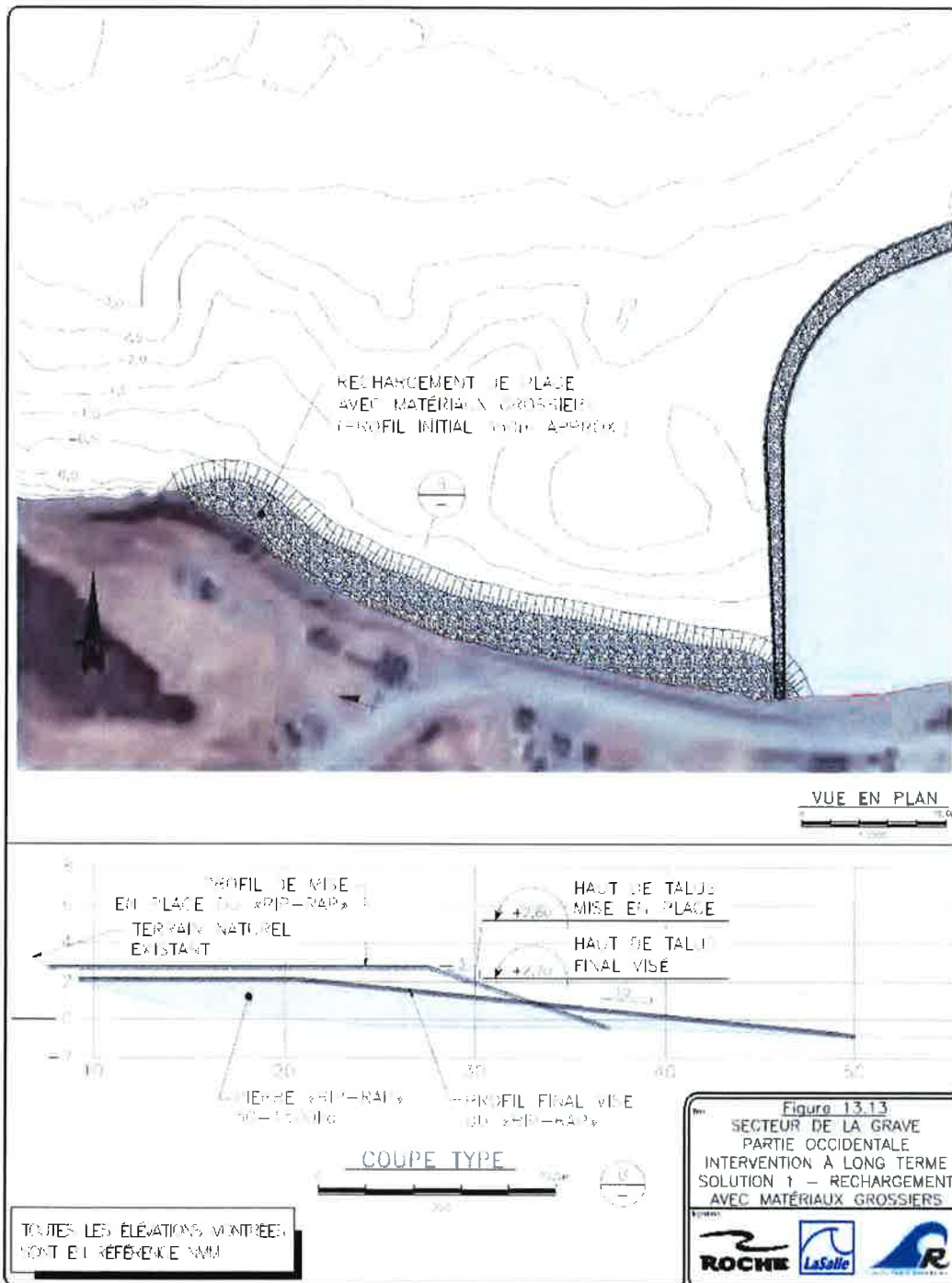


Figure 13.13 Secteur de La Grave – Partie ouest – Rechargement de la plage avec matériaux grossiers

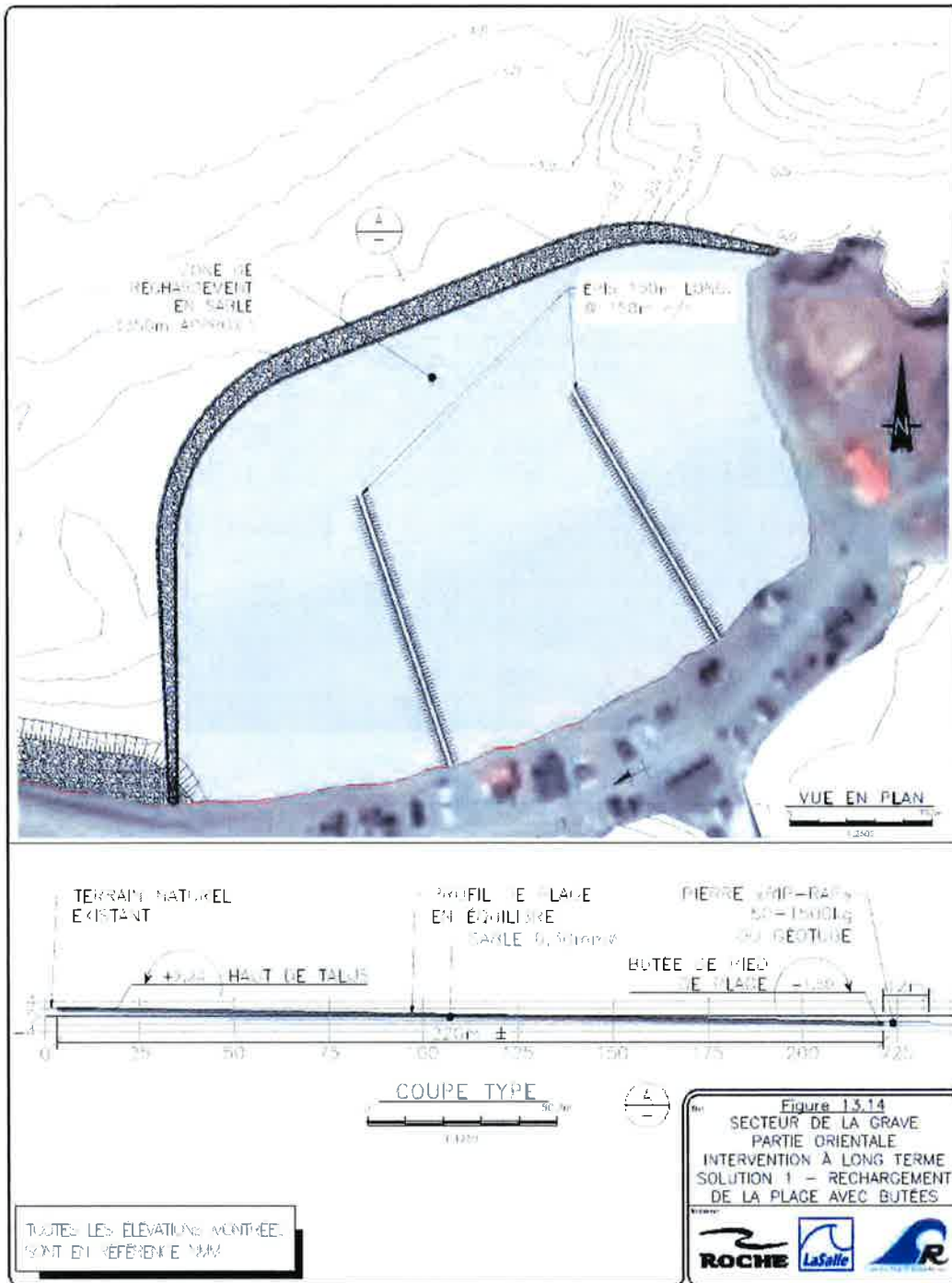


Figure 13.14 Secteur de La Grave – Partie est – Rechargement de la plage avec épis et butées

14. COÛT GLOBAL DU PROJET ET PLAN D'ACTION

14.1 Coût global des interventions proposées

L'ensemble des coûts des interventions proposées dans cette étude est résumé dans le tableau 14.1 qui suit. Même en choisissant la solution de moindre coût pour chaque secteur (qui n'est pas nécessairement la meilleure solution sur le plan environnemental ou sur le plan de l'utilisation du territoire), on obtient un coût total qui dépassera \$ 33 millions, sans compter le coût du déménagement éventuel des chalets de la plage de la Martinique.

Les remarques suivantes sont importantes pour bien comprendre les estimations de coûts produites dans cette étude :

- 1) La précision des estimations pourrait être affectée par les conditions géotechniques réelles des sites. À ce stade-ci, nous avons posé des hypothèses qui sont basées sur certaines observations visuelles et sur certaines données générales, concernant la profondeur du roc et les épaisseurs de matériaux meubles (sable) en surface. Des études géotechniques plus détaillées seront requises dans les prochaines étapes d'analyse du projet (conception détaillée et préparation des plans et devis pour construction) pour préciser les interventions à faire.
- 2) Les coûts unitaires proposés dans les estimations de coûts sont valides pour les solutions globales proposées. Certains coûts unitaires pourraient donc varier (probablement à la hausse) si les projets sont subdivisés en diverses phases de réalisation.
- 3) Compte tenu de l'envergure des solutions proposées, et du fait que ces projets doivent être considérés globalement sur le plan environnemental, il est certain qu'une étude d'impact environnemental devra être réalisée, avec la possibilité d'audiences publiques (BAPE). Il faut donc compter au moins 2 années avant d'en arriver à l'étape de réalisation.
L'intervention à court terme aux étangs aérés pourra probablement faire l'objet d'une exemption puisqu'il s'agit d'une mesure d'urgence, mais il faudra quand même obtenir un certificat d'autorisation du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). Il y a lieu de noter que l'ajout de pierre de carapace réalisé en août 2011 par la Ville dans le but de faire face à l'ouragan Irène (26 août 2011) a renforcé, du moins à court terme, la protection des étangs aérés.
- 4) Les coûts des diverses solutions sont présentés en dollars constants de 2011, même si certaines comportent des rechargements périodiques qui devront

être réalisés dans 7-8 ans (sable) ou dans 15 ans (matériaux grossiers). Ceci permet de comparer les valeurs actuelles des solutions.

- 5) Les solutions en enrochement comportent des risques plus élevés de dépassement de coûts lors des travaux, à cause des conditions des sites qui sont plus ou moins bien définies au présent stade des études, par exemple : connaissance approximative de la profondeur du roc (influe sur les coûts d'excavation), difficulté de prendre en compte les conditions particulières d'accès à diverses parties des ouvrages à construire, topographie et bathymétrie plus ou moins bien définies. Les solutions en rip-rap ou galets sont nettement moins susceptibles de connaître des problèmes de contrôle des coûts de construction.

- 6) Pour les solutions comportant des butées de pied, deux solutions techniques ont été décrites pour ces butées, soit les enrochements et les géotubes. Pour les estimations de coûts, seulement des enrochements ont été considérés, parce que les géotubes comportent, selon nous, un risque plus grand que les enrochements sur le plan de la durabilité (impacts d'objets flottants, glaces, rayons UV, vandalisme). Ceci ne signifie pas que les géotubes devraient être rejetés, mais simplement qu'il faudra les aborder avec une certaine prudence, s'ils apparaissent comme une alternative intéressante dans les étapes ultérieures d'analyse du projet.

SECTEUR DE LA GRAVE

Solution 1 – Partie ouest - Rechargement de la plage avec matériaux grossiers (350 m)	Coût initial : 1 949 000 \$ Rechargements périodiques : 1 021 000 \$ Coût total : 2 970 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 15 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans).
Solution 1 – Partie est - Rechargement de la plage (350 m) avec épis transversaux et butées de pied	Coût initial : 6 323 000 \$ Rechargements périodiques : 3 266 000 \$ Coût total : 9 589 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 15 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans). À valider par des études complémentaires, y inclus modélisation physique.

14.2 Recommandations

Il est certain que la Ville devra prioriser certaines interventions et en reporter d'autres, compte tenu du coût global très important du programme d'intervention.

14.2.1 Secteur des étangs aérés

La première priorité sera certainement le secteur des étangs aérés, pour lequel un budget de 1,2 à 1,4 million de dollars devra être prévu, selon qu'on décidera de mettre en place la solution de l'enrochement ou bien celle du rechargement avec matériaux grossiers.

À très court terme, une intervention d'urgence est proposée (voir section 9.11) pour assurer une protection minimum aux étangs, le temps de compléter les études techniques et environnementales, et d'obtenir les autorisations requises pour les solutions à plus long terme.

14.2.2 Chemin du Gros Cap, près de la garderie

Un second endroit où une intervention apparaît nécessaire rapidement est celui où la route se rapproche de la mer, dans le secteur de Gros Cap, à environ 400 m au sud de la garderie. La distance du bord de la route jusqu'au haut de la falaise est à peine 8 m à cet endroit. La protection de la route impliquerait le rechargement de la plage avec des matériaux grossiers, de façon à remplir l'échancrure dans la falaise pour créer une plage qui servira ensuite d'amortisseur de houle. NOTE : de la pierre (en faible quantité) a déjà été déversée à cet endroit, dans une tentative pour ralentir l'érosion.

Cette plage de matériaux grossiers pourrait être construite en forme d'arc de cercle et s'étendre sur une trentaine de mètres de longueur de littoral. Le travail pourra se faire à partir du sommet de la falaise, en y positionnant une grue qui pourra déposer la pierre sur la plage existante, au bas de la falaise. La grue serait alimentée par des camions qui transporteraient la pierre à partir

Érosion côtière baie de Plaisance

d'une carrière locale. Une particularité du site est qu'une ligne électrique le traverse, ce qui constituera un obstacle pour le travail.

Cette intervention constitue en fait la mise en place partielle de la solution 2 proposée pour ce secteur. Le volume de matériaux requis pourra être déterminé de façon exacte suite à un relevé topobathymétrique (à réaliser). Le coût devrait se situer entre 100 \$ et 200 000 \$. (taxes en sus).



Figure 14.1 – Vues du chemin de Gros Cap à protéger, près de la garderie

14.2.3 Secteur de La Grave, partie est

Le troisième secteur à protéger est celui de la partie est de La Grave, à cause de son caractère historique, patrimonial et touristique. Tel que décrit au chapitre 13, la seule intervention qu'il a été possible de dimensionner dans le cadre restreint de cette étude a été celle du rechargement de plage en sable. Par contre, il y a de sérieuses présomptions sur le fait que cette solution pourrait se révéler instable à cause des matériaux fins considérés. Une solution de rechargement utilisant un mélange de galets, graviers et sable serait nettement préférable, plus durable et probablement moins onéreuse que le rechargement en sable (les quantités de matériaux requis devant être moindres). Par contre, ce genre de rechargement ne se conçoit qu'au moyen d'essais en modèle réduit, suite à une étude des sources potentielles de ce genre de matériaux. Le coût de l'intervention de recharge en sable a été estimé à \$ 9,6 M (voir section 13.11) sur 35 ans.

14.2.4 Autres secteurs

Pour les autres secteurs, des choix devront être faits, selon les priorités de la Municipalité et les budgets qui seront disponibles.

14.3 Plan stratégique d'intervention

Un plan stratégique d'intervention devra donc être mis en place, le coût de l'ensemble des projets étant significatif.

Des solutions de protection de berge ou de rechargement de plage non traditionnelles ont été présentées dans ce rapport. Ces solutions ont le potentiel de réduire significativement le coût des protections de berge ou de restauration du milieu par rapport aux solutions traditionnelles. Par contre, il n'existe pas de « recette » paramétrique pour définir les caractéristiques géométriques de ces solutions. Seuls des projets-pilotes avec suivi sur plusieurs années ou des essais en modèle réduit permettraient de concevoir de telles solutions dans le contexte de la Baie de Plaisance. Il est recommandé de lancer sans trop tarder :

- un programme de recherche de matériaux disponibles pour le genre de projet envisagé, de façon à définir des granulométries de matériaux réalistes,
- un programme d'essais en modèle réduit visant à cerner les paramètres géométriques de ce genre de solutions dans la Baie de Plaisance (et ailleurs au Québec – secteur de Pointe-aux-Loups, Gaspésie, Côte-Nord),
- l'intervention d'urgence aux étangs aérés et celle pour la protection du chemin du Gros Cap devraient être vus comme projets pilotes pour la solution de rechargement avec des matériaux grossiers. Ils devraient donc faire l'objet d'un suivi régulier, suite à leur mise en place, pour vérifier leur comportement dans le temps, en particulier suite aux tempêtes qui se produiront inévitablement. Les données et informations qui pourront en être tirées seront très utiles pour valider et, au besoin, apporter des correctifs aux concepts proposés dans la présente étude.

Le nouveau laboratoire de l'INRS-ETE à Québec permettrait de réaliser des essais à des échelles très intéressantes pour le genre de problématique à résoudre. Ce programme d'essais devrait normalement intéresser plusieurs ministères provinciaux et fédéraux, de même que de nombreuses municipalités.

RÉFÉRENCES

- [1] KOMEN, G.L., CAVALERI, L., DONELAN, K., HASSELMANN, S., HASSELMANN, S. ET JANSSEN, P.A.E.M. (1994). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press, UK, 532 p.
- [2] HOLTHUIJSEN, L.H., BOOIJ, N. ET HERBERS, T.H.C (1989). *A prediction Model for Stationary Short-Crested Waves in Shallow Water with Ambient Currents*. Coastal Engineering, 13, pp. 23-54.
- [3] CIDCO (2010). *Levés côtiers pour l'évaluation de la dynamique sédimentaire aux îles-de-la-Madeleine*. Rapport de mission 1.0. Préparé pour le Ministère des Transports du Québec, février 2010.
- [4] BERNATCHEZ, P., TOUBAL, T., VAN-WIERTS, S., DREJZA, S. ET FRIESINGER, S. (2010). *Caractérisation géomorphologique et sédimentologique des unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups, route 199, îles-de-la-Madeleine*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport final remis au Ministère des Transports du Québec, avril 2010, 177p.
- [5] BATTJES, J.A. ET JANSSEN, J.P.F.M. (1979). *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Proc. 16th Int. Coastal Engineering Conference, 1978, Hamburg, ASCE, New York, N.Y., pp 567-587.

ANNEXE
ESTIMATIONS DE COÛTS

Érosion côtière baie de Plaisance
Îles-de-la-Madeleine

Secteur La Grave partie ouest**Intervention à long terme - Solution 1****Rechargement de la plage avec avec matériaux grossiers (350 m) 350 ml**

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	151 000 \$
2	Pierre RIP-RAP (50 - 1500 kg)	21000	m ³	60	1 260 000 \$
	SOUS-TOTAL				1 411 000 \$
3	Contingences			20%	283 000 \$
4	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			15%	255 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				1 949 000 \$

Rechargements récurrents: cette solution nécessitera des rechargements périodiques

Hypothèse pour matériaux grossiers: 25% du volume initial à tous les 15 ans, soit 50% sur la vie utile du projet (35 ans)

Note: estimation de coût en dollars constants

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	79 000 \$
3	Pierre Rip-Rap (50 - 1500 kg) Rechargement à tous les 15 ans)	11 000	m ³	60	660 000 \$
	SOUS-TOTAL				739 000 \$
4	Contingences			20%	148 000 \$
5	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			15%	134 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				1 021 000 \$

TOTAL DU PROJET (Taxes en sus)	2 970 000 \$
---------------------------------------	---------------------

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

Secteur La Grave partie est

Intervention à long terme - Solution 1

Rechargement de la plage avec butée (350 m)

350 ml

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	491 000 \$
2	Sable 0,30mm dia.	108 500	m ³	20	2 170 000 \$
3	Pierre RIP-RAP (50 - 1500 kg)	16 000	m ³	120	1 920 000 \$
	SOUS-TOTAL				4 581 000 \$
4	Contingences			20%	917 000 \$
5	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			15%	825 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				6 323 000 \$

Rechargements récurrents: cette solution nécessitera des rechargements périodiques

Hypothèse: 25% du volume initial à tous les 7-8 ans, soit 100% sur la vie utile du projet (35 ans)

Note: estimation de coût en dollars constants

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	260 000 \$
2	Sable 0,30mm dia.	108 500	m ³	20	2 170 000 \$
	SOUS-TOTAL				2 430 000 \$
4	Contingences			20%	486 000 \$
5	Études (environnement, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			12%	350 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				3 266 000 \$

TOTAL DU PROJET (Taxes en sus)					9 589 000 \$
---------------------------------------	--	--	--	--	---------------------

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine



FQM

INGÉNIERIE ET
INFRASTRUCTURES



Les Îles-de-la-Madeleine
Municipalité

**Annexe 10 : Analyse coûts-avantages des options
d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine**

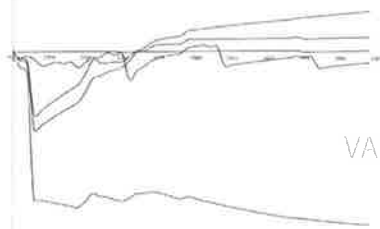
Ouranos, mars 2016



Extraits Secteur La Grave



Raymond Brow via Flickr



$$VAN = \sum_{t=1}^T \frac{\text{avantages}_t}{(1+\rho)^t} - \sum_{t=1}^T \frac{\text{coûts}_t}{(1+\rho)^t}$$

ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION EN ZONE CÔTIÈRE AUX ÎLES-DE-LA-MADELEINE

Rapport final
Mars 2016



Ressources naturelles Canada / Natural Resources Canada

Canada

Fondsvert Québec

ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION EN ZONE CÔTIÈRE AUX ÎLES-DE-LA-MADELEINE

**PROJET : ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES RÉPERCUSSIONS DES
CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES
OPTIONS D'ADAPTATION EN ZONE CÔTIÈRE AU QUÉBEC**

Directrice de projet : Manon Circé, Ouranos

Équipe de réalisation :

Laurent Da Silva, Ouranos
Guillaume Duff, Ouranos
Ursule Boyer-Villemare, Ouranos
Sylvie Corbeil, AECOM
François Morneau, Ouranos
Claude Desjarlais, Ouranos
Travis Logan, Ouranos

Principaux collaborateurs :

Pascal Bernatchez, UQAR
Steeve Dugas, UQAR
Susan Drejza, UQAR
Municipalité des Îles-de-la-Madeleine
Jean-Pierre Savard, Ouranos
Philippe Roy, Ouranos

Révision et mise en page: Beatriz Osorio, Ouranos, et Katherine Pineault, Ouranos

Crédit photo page couverture : Raymond Brow via Flickr

Numéro de projet : 540010-000

Citation suggérée : Circé, M., Da Silva, L., Duff, G., Boyer-Villemare, U., Corbeil, S., Desjarlais, C., Morneau F. (2016) Analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine. Ouranos, Montréal. 174 pages et annexes

Mars 2016



REMERCIEMENTS

La présente étude a été réalisée avec le soutien du Groupe de travail sur l'économie de la Plateforme canadienne d'adaptation au changement climatique, présidée par Ressources naturelles Canada. Elle a également bénéficié de l'appui financier du Fonds vert du Gouvernement du Québec dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques.

Cette étude a été rendue possible grâce à de nombreuses collaborations, dont notamment celle de Pascal Bernatchez et de son équipe du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) qui ont partagé avec Ouranos leur expérience et leurs connaissances approfondies des processus hydrosédimentaires et de la dynamique des vagues sur les côtes du Québec.

Nous tenons à remercier la municipalité des Îles-de-la-Madeleine pour sa collaboration et son support indéfectible, notamment Serge Bourgeois, Benoît Boudreau et Caroline Richard. L'apport précieux des nombreux partenaires locaux, dont les membres du comité local d'orientation, a permis d'avoir accès aux informations et aux données essentielles à la réalisation du projet. Nous voulons également saluer la précieuse aide de Louis Vigneau (Transports Québec) et de Guglielmo Tita.

Nous tenons également à souligner la contribution des membres des différents comités mis en place dans le cadre du projet. Leur participation a permis, entre autres, de mieux

intégrer l'ensemble des enjeux de la zone d'étude : Josée Michaud (Bureau des Changements climatiques), Nick Xenos (Ressources naturelles Canada), Jean-Pierre Revéret (UQAM), Adam Fenech (UPEI), Dominique Bérubé (UNB), Élisabeth Marceau (MPO), Graham Frank (Baird), Marcel Roussy (MAPAQ), Rénald Méthot (MAMOT), Jacinthe Girard (MDDELCC), Laurence Laperrière (MDDELCC), Jean-Denis Bouchard (MDDELCC), François Hazel (MPO), Michel Michaud (Transports Québec), Guylène Chouinard (Transports Québec), Hélène Latérière (MCC), Valérie Labrecque (MRC Kamouraska) et Paul Gingras (MRC La Mitis).

Finalement, nous remercions toutes les organisations et firmes qui ont fourni des données essentielles à cette analyse, notamment les firmes Roche et Consultants Ropars.



RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Peu d'études ont porté jusqu'à maintenant sur l'évaluation économique des impacts des changements climatiques et des options d'adaptation en zone côtière dans l'Est-du-Québec. Un programme de travail a ainsi été lancé par le Groupe de travail sur l'économie de la Plateforme canadienne d'adaptation au changement climatique, présidée par Ressources naturelles Canada. Ce programme vise à développer des connaissances économiques et des outils afin d'aider les décideurs des secteurs privés et publics au Canada à faire de meilleurs choix d'investissement et décisions de politique publique. Dans le cadre de ce programme, le projet de recherche *Évaluation économique des répercussions des changements climatiques et analyse coûts-avantages des options d'adaptation* visait l'étude des régions côtières du Québec et des provinces atlantiques.

Au Québec, l'étude a été réalisée par Ouranos avec comme partenaire de recherche principal le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), qui a développé un imposant bagage de connaissances en matière d'érosion et de submersion sur les côtes du Québec. Les objectifs de l'étude étaient d'évaluer les impacts économiques de l'érosion sur les régions maritimes du Québec dans un contexte de changement climatique et d'analyser les coûts et les avantages de différentes options d'adaptation à l'érosion et à la submersion côtières.

Dans le cadre de la présente étude, cinq sites ont fait l'objet d'analyses coûts-avantages (ACA) : il s'agit des Îles-de-la-Madeleine, de Maria, de Carleton-sur-Mer, de Percé et de Kamouraska. Le présent rapport s'intéresse au littoral des Îles-de-la-Madeleine situé au milieu du golfe du Saint-Laurent.

Le littoral des Îles-de-la-Madeleine subit déjà d'importants impacts liés aux changements climatiques, lesquels se traduisent par la montée du niveau marin, l'adoucissement hivernal et la perte du couvert de glace dans le golfe du Saint-Laurent, ainsi que la modification du régime des tempêtes. La modification de ces paramètres hydro-climatiques vient accélérer et amplifier les aléas côtiers d'érosion et de submersion menaçant plusieurs infrastructures se trouvant en bord de mer, dont des bâtiments résidentiels et commerciaux, mais également des installations et des sites touristiques d'importance pour la vitalité économique et le dynamisme touristique des Îles-de-la-Madeleine.

Approche méthodologique

Cette étude vise à déterminer, à l'aide de l'analyse coûts-avantages, les options d'adaptation les plus avantageuses pour protéger la zone côtière des Îles-de-la-Madeleine des impacts de l'érosion et de la submersion qui s'intensifient à cause des changements climatiques. L'étude s'appuie sur des projections d'érosion future fournies par le LDGIZC de l'UQAR, de même que sur des projections de niveaux d'eau extrêmes développées conjointement par Ouranos et le LDGIZC.

L'analyse coûts-avantages consiste à comparer d'un point de vue économique l'ensemble des avantages et des coûts de différentes options d'adaptation techniquement réalisables. L'ACA se base sur deux indicateurs économiques pour comparer les options d'adaptation à la non-intervention : la valeur actualisée nette (VAN) et le ratio avantages-coûts.

L'étude présente une évaluation des impacts économiques, environnementaux et sociaux ainsi que des coûts des options d'adaptation. Ces derniers comprennent à la fois les coûts des études préparatoires, de construction et d'entretien des différentes solutions. Quant aux avantages de l'adaptation, ils proviennent en majeure partie des coûts évités et des gains liés à l'usage du littoral.

Les avantages et les coûts des différentes options d'adaptation proposées sont actualisés à 4 % sur la période d'étude, soit de 2015 à 2064. Ils sont évalués dans une perspective régionale, soit pour l'ensemble des Îles-de-la-Madeleine.

Zone d'étude

La zone d'étude des Îles-de-la-Madeleine a été divisée en 3 secteurs, soit les secteurs Cap-aux-Meules, La Grave et Grande-Entrée. Ces secteurs regroupaient initialement 20 segments de côte découpés en fonction des caractéristiques physiques de la côte et d'occupation du sol. Une analyse plus détaillée a conduit à la rétention de 6 segments distincts dans le secteur Cap-aux-Meules, d'un segment dans le secteur La Grave et d'un segment dans le secteur Grande-Entrée pour un total de 8 segments. La figure A présente les trois secteurs à l'étude aux Îles-de-la-Madeleine.

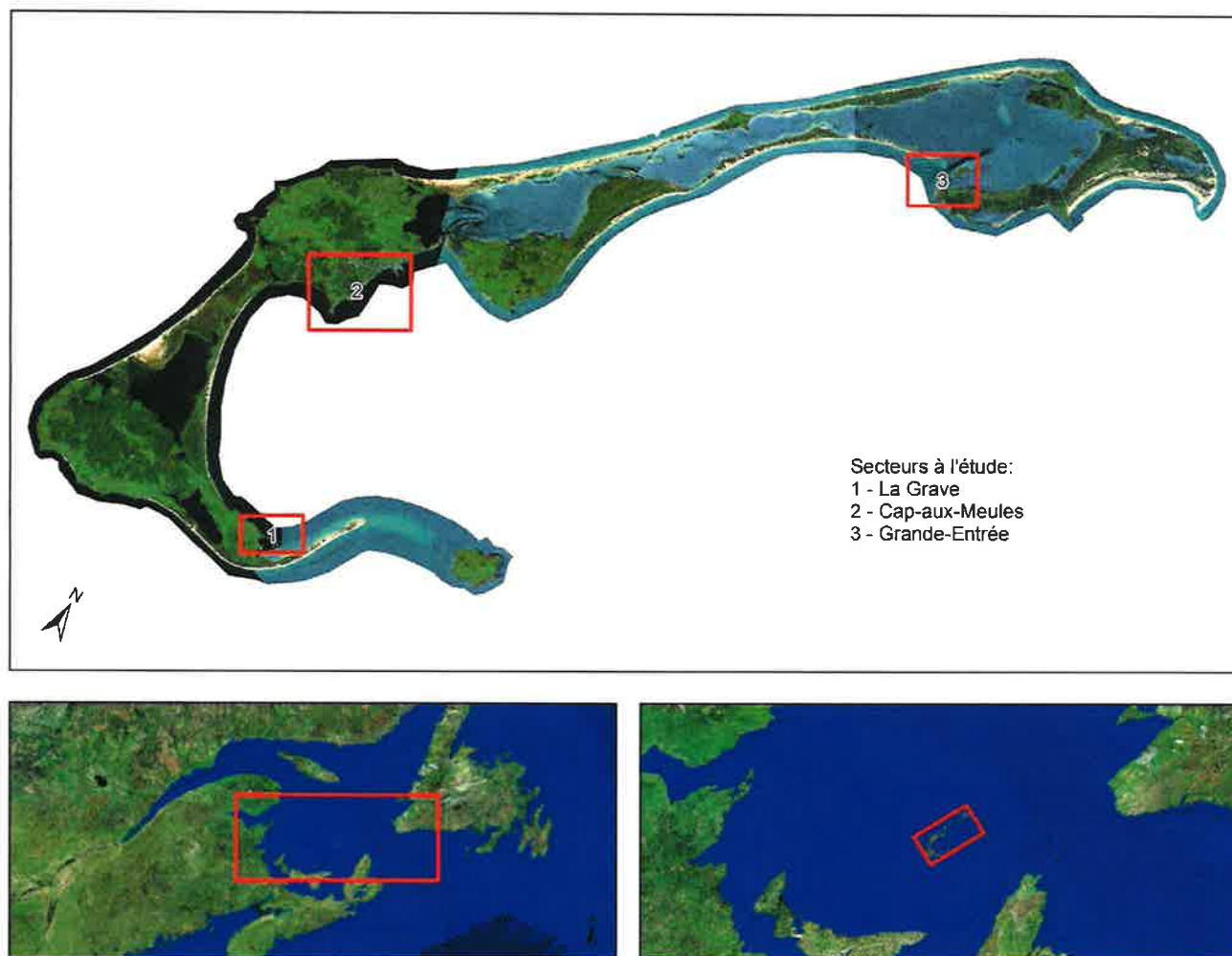


Figure A – Carte de la zone d'étude et localisation des trois secteurs étudiés

Options d'adaptation

Les options d'adaptation étudiées comprennent des structures côtières rigides (enrochement, riprap), des structures côtières mobiles (recharge de plage en gravier, recharge de plage avec butée), ainsi qu'une option sans structure côtière combinant l'immunisation et la relocalisation stratégique lorsque des actifs sont touchés par l'érosion, la submersion ou les deux. Les options d'adaptation considérées dans chacun des 8 segments à l'étude sont présentées au tableau A.

Tableau A – Options d'adaptation considérées dans chacun des segments

Secteur	Segment	Structure côtière rigide	Structure côtière mobile	Solution sans structure côtière
Cap-aux-Meules	Camping Gros-Cap	Riprap Enrochement		Relocalisation stratégique
	Gros-Cap Est	Riprap Enrochement	Recharge de plage avec butée	Relocalisation stratégique
	Échouerie Ouest	Riprap Enrochement		Relocalisation stratégique
	Route municipale	Riprap Enrochement		Relocalisation stratégique
	Plage municipale	Riprap Enrochement	Recharge de plage avec butée	Relocalisation stratégique
	Centre-ville	Riprap Enrochement		Relocalisation stratégique
La Grave		Riprap Enrochement	Recharge de plage en gravier	Immunisation et relocalisation stratégique
Grande-Entrée		Riprap Enrochement	Recharge de plage avec épis	Immunisation et relocalisation stratégique

Les solutions techniques étudiées, tout particulièrement les structures d'ingénierie, ont été tirées de l'étude conceptuelle réalisée par la firme Roche (Roche, 2011) et d'une étude complémentaire réalisée pour évaluer la faisabilité technique de certaines options d'adaptation à La Grave par Consultants Ropars (Ropars, 2016). Ces études de conception fournissent uniquement une évaluation préliminaire des options envisageables. Le design des ouvrages prend en compte les conditions hydrodynamiques, l'érosion, la sédimentation et les contraintes géotechniques liées aux

segments à l'étude. Les options d'adaptation ont été conçues pour éviter tout problème d'érosion et de submersion au cours des 50 prochaines années.

Les principales conclusions relatives aux trois secteurs d'intervention retenus aux Îles-de-la-Madeleine sont exposées ci-dessous.

Secteur Cap-aux-Meules

Le secteur Cap-aux-Meules est constitué de 14 segments, dont 6 ont été retenus aux fins d'analyse économique. Les segments qui ont fait l'objet de l'ACA sont présentés à la figure B. Ils couvrent plus de 6 km de côtes alternant entre des zones de terrasses de plage et de falaises de grès. Les segments étudiés abritent une diversité d'actifs de grande importance pour l'économie régionale et le dynamisme touristique des Îles-de-la-Madeleine, dont le camping du Gros-Cap, une plage municipale, un sentier multifonctionnel, des hébergements touristiques et un bâtiment industriel majeur.



- 1 - Camping Gros-Cap
- 2 - Gros-Cap Est
- 3 - Échouerie Ouest
- 4 - Route municipale
- 5 - Plage municipale
- 6 - Centre-ville

Échouerie Ouest). Ce sont également les options d'adaptation ayant les ratios avantages-coûts les plus élevés. Autrement dit, ces options permettent à la fois de maximiser la quantité totale des bénéfices générés par l'intervention et de tirer un maximum de bénéfices pour chaque dollar consenti.

Les segments où la relocalisation stratégique est privilégiée ont des avantages nets beaucoup plus faibles tout en ayant des ratios avantages-coûts qui suggèrent une bonne rentabilité sociale de l'option. Cette option génère peu d'avantages, mais coûte également peu cher.

La plupart des analyses de sensibilité suggèrent que les options d'adaptation retenues dans les 6 segments sont robustes aux variations dans les hypothèses de base des ACA. La seule exception est le segment Centre-ville où les analyses de sensibilité favorisent parfois le riprap et parfois la non-intervention. Ces résultats doivent être mis en perspective considérant que l'efficacité d'un riprap n'a pas été confirmée par une étude d'ingénierie spécifique dans ce segment. La hauteur des falaises implique que d'autres processus d'érosion (notamment éolien et cryogénique) sont en jeu dans ce type de côte. Il est possible qu'une protection en riprap en bas de falaise ne puisse pas totalement freiner l'ensemble des processus actifs.

La Grave

Le secteur La Grave, d'une longueur de 6,5 km, est constitué de cinq segments dont les caractéristiques côtières et le niveau de vulnérabilité diffèrent grandement. Après une analyse préliminaire des segments, seul le site patrimonial de La Grave a été retenu aux fins de l'analyse économique. Le segment La Grave est constitué d'un tombolo de 440 m reliant deux îlots rocheux. Il abrite le cœur historique, patrimonial et culturel de La Grave.

L'ACA a permis d'évaluer que la non-intervention pour ce segment aurait des impacts appréhendés d'une valeur actualisée de plus de 40 M\$ sur 50 ans, générés principalement par la perte de retombées touristiques et une baisse de la valeur d'usage du site. Toutes les options d'adaptation considérées, à l'exception de l'immunisation et

de la relocalisation stratégique, permettent de préserver intégralement la majeure partie du segment La Grave.

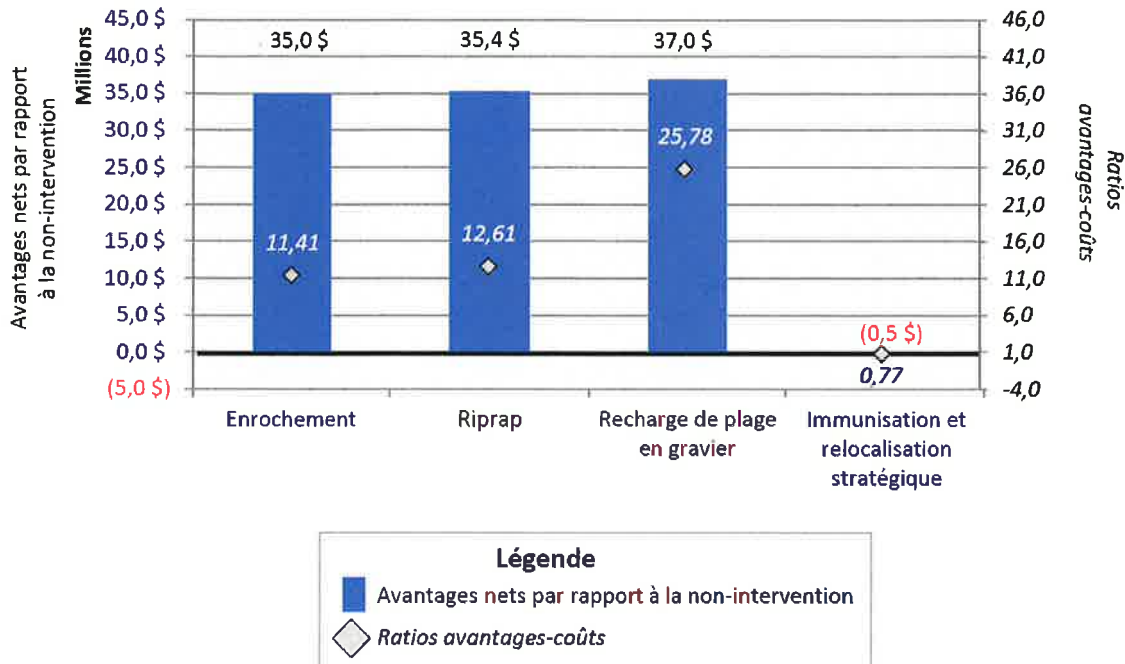


Figure C – Avantages nets de chaque option par rapport à la non-intervention et ratios avantages-coûts

Comme indiqué à la figure C, l'option d'adaptation la plus rentable économiquement est la recharge de plage en gravier grâce à un coût de mise en œuvre relativement faible et au fait qu'elle permettrait d'accroître la valeur d'usage du littoral. Les analyses de sensibilité ont permis de démontrer la robustesse de ce résultat qui apparaît toujours comme l'option la plus avantageuse lorsque des variables clés sont modifiées (taux d'actualisation, niveaux d'eau extrêmes et retombées économiques).

Grande-Entrée

Le segment Pointe de Grande-Entrée est une zone basse largement artificialisée par les installations portuaires qui accueillent la plus grande flottille de pêche des Îles-de-la-Madeleine. La portion non artificialisée est composée d'une côte à terrasse de plage qui est en recul rapide depuis le milieu des années 2000.

Au cours des 50 prochaines années, l'érosion viendra gruger une proportion importante de la Pointe de Grande-Entrée sans toutefois venir toucher les infrastructures majeures dans la zone, soit les installations portuaires et l'usine de transformation des produits de la mer. Quant à la submersion, les épisodes de niveaux d'eau extrêmes généreront des dommages aux quelques bâtiments résidentiels et commerciaux présents dans la zone.

Malgré ces impacts appréhendés, l'ACA a montré que la non-intervention serait l'option la plus avantageuse pour ce segment d'un point de vue économique. Les structures côtières considérées sont trop coûteuses en comparaison aux dommages qu'elles permettent d'éviter, et ce, même en utilisant un coût de construction minimal. Quant à l'option de relocalisation et d'immunisation, elle n'est pas économiquement efficace. En conséquence, en vertu des conditions prévalant actuellement dans le segment Pointe de Grande-Entrée et de l'évolution des aléas côtiers au cours des cinquante prochaines années, il apparaît plus avantageux économiquement de ne pas agir.

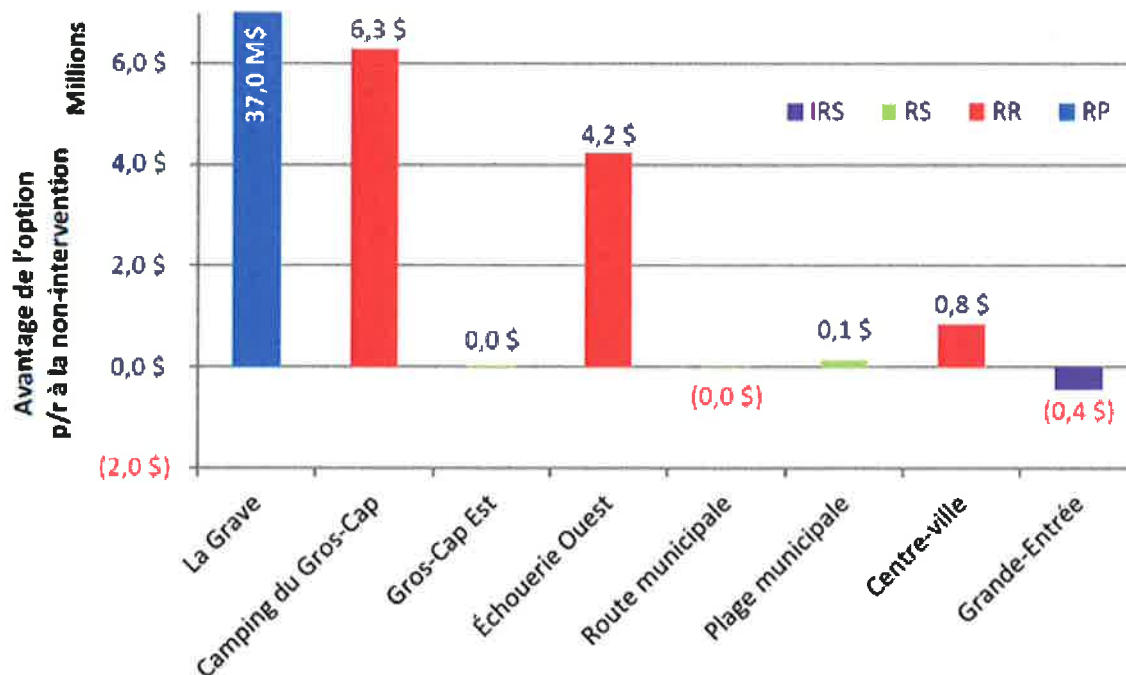
Conclusion

L'analyse coûts-avantages des options d'adaptation proposées pour éviter les dommages dus aux aléas côtiers sur le littoral des Îles-de-la-Madeleine vise principalement à aider les décideurs à sélectionner les options les plus avantageuses, et ce, en comparant l'ensemble des coûts et avantages économiques sur un horizon temporel de 50 ans.

La figure D permet, pour chacun des 8 segments à l'étude, de visualiser la valeur actualisée nette de l'option la plus avantageuse par rapport à l'option de non-intervention. Il est ainsi possible de constater que pour 2 segments, soit Route municipale et Pointe de Grande-Entrée, la non-intervention constitue l'option la plus avantageuse du point de vue économique. Pour les segments La Grave, Camping du Gros-Cap, Échouerie Ouest, Centre-ville et Plage municipale, la mise en place de différentes options est nettement préférable à la non-intervention. Pour le segment Gros-Cap Est, les avantages nets de l'option la plus avantageuse (relocalisation stratégique) par rapport à la non-intervention sont très faibles et ne permettent pas de statuer clairement sur l'option à privilégier d'un point de vue économique.

Aux Îles-de-la-Madeleine, certains segments de côte à protéger abritent des actifs économiques majeurs ou des attraits touristiques fortement utilisés qui sont vulnérables à l'érosion. Considérant la valeur des pertes anticipées et le type de côte (basses falaises rocheuses) sur lequel ces infrastructures sont situées, des structures côtières rigides comme le riprap sont justifiées économiquement. Pour d'autres segments, situés sur de basses côtes où l'usage du littoral a une valeur importante, tant pour les touristes que pour les résidents, les options d'adaptation privilégiées favorisent le maintien d'une côte naturelle avec des structures côtières mobiles ou une stratégie de relocalisation des actifs à risque. C'est le cas des segments Plage municipale et La Grave.

Finalement, dans les segments où les impacts appréhendés sont faibles, comme c'est le cas à Gros-Cap Est et à Route municipale, les options d'adaptation considérées sont très légèrement avantageuses ou encore non justifiées économiquement.



Légende : IRS : Immunisation et relocalisation stratégique; RS : Relocalisation stratégique; RR : Riprap; RP : Recharge de plage

Figure D – Valeur actualisée nette des options les plus avantageuses par rapport à la non-intervention



TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
2. CONTEXTE DE L'ÉTUDE	4
2.1 ZONE D'ÉTUDE.....	4
2.2 PROBLÉMATIQUES LIÉES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES	7
2.3 PROCÉDURE DE SEGMENTATION ET DE SÉLECTION.....	8
3. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	11
3.1 PROCESSUS CONSULTATIF	11
3.2 ANALYSE HYDRODYNAMIQUE	13
3.2.1 Hypothèses relatives à la submersion	14
3.2.2 Hypothèses relatives à l'érosion.....	17
3.3 ANALYSE ÉCONOMIQUE.....	18
3.3.1 Identification des options d'adaptation.....	19
3.3.2 Identification des impacts appréhendés	20
3.3.3 Monétisation des impacts appréhendés	22
3.3.4 Estimation des dommages par submersion.....	23
3.3.5 Estimation des dommages causés par l'érosion.....	23
3.3.6 Estimation des coûts des options d'adaptation.....	24
3.3.7 Comparaison des coûts et des avantages.....	24
3.3.8 Analyse de sensibilité des résultats.....	26
4. SECTEUR CAP AUX MEULES	27
 4.1 — DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SECTEUR	27
 4.1.1 Segment Camping du Gros Cap	29

4.1.2	Gros-Cap Est	31
4.1.3	Segment Échouerie Ouest	32
4.1.4	Segment Route municipale	33
4.1.5	Segment Plage municipale	34
4.1.6	Segment Centre-ville	35
4.1.7	Problématique	36
4.1.8	Option de non-intervention	37
4.1.9	Options d'adaptation	37
4.1.10	Impacts appréhendés	41
4.2	ESTIMATION MONÉTAIRE DES IMPACTS	43
4.2.1	Impacts liés à l'érosion	43
4.2.2	Impacts économiques	45
4.2.3	Impacts environnementaux	47
4.2.4	Impacts sociaux	47
4.2.5	Estimation du coût de la non-intervention et des options d'adaptation	49
4.3	ANALYSE COÛTS-AVANTAGES	51
4.3.1	Camping Gros-Cap	51
4.3.2	Gros-Cap Est	61
4.3.3	Échouerie Ouest	69
4.3.4	Route municipale	78
4.3.5	Plage municipale	85
4.3.6	Centre-ville	94
4.4	CONCLUSION	104
5.	SECTEUR LA GRAVE	106
5.1	DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SECTEUR	106
5.1.1	Problématique	109
5.1.2	Option de non-intervention	110
5.1.3	Options d'adaptation	110
5.1.4	Impacts appréhendés	114
5.2	ESTIMATION MONÉTAIRE DES IMPACTS	116
5.2.1	Impacts liés à l'érosion et à la submersion	116
5.2.2	Impacts économiques	119
5.2.3	Impacts sociaux	120

5.2.4	Estimation du coût de la non-intervention et des options d'adaptation...	123
5.3	ANALYSE COÛTS-AVANTAGES	125
5.3.1	Calcul des coûts sur 50 ans	125
5.3.2	Analyse de sensibilité	132
5.3.3	Taux d'actualisation	133
5.3.4	Niveaux d'eau extrêmes	134
5.3.5	Aucun impact sur les retombées économiques	135
5.3.6	Synthèse de l'analyse de sensibilité	136
5.4	CONCLUSION	137
	SECTEUR GRANDE-ENTRÉE	138
6.1	DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SECTEUR	138
6.1.1	Problématique	140
6.1.2	Option de non-intervention	141
6.1.3	Options d'adaptation	141
6.1.4	Impacts appréhendés	144
6.2	ESTIMATION MONÉTAIRE DES IMPACTS	146
6.2.1	Impacts dus à l'érosion et à la submersion	146
6.2.2	Impacts économiques	148
6.2.3	Impacts sociaux	149
6.2.4	Estimation du coût de la non-intervention et des options d'adaptation...	150
6.3	ANALYSE COÛTS-AVANTAGES	152
6.3.1	Calcul des coûts sur 50 ans	152
6.3.2	Calcul des avantages sur 50 ans	155
6.3.3	Valeur actualisée nette et comparaison des options	155
6.4	ANALYSE DE SENSIBILITÉ	159
6.4.1	Taux d'actualisation	159
6.4.2	Diminution du coût des options	160
6.4.3	Synthèse de l'analyse de sensibilité	161
6.5	CONCLUSION	161
7.	CONCLUSION GÉNÉRALE	163
8.	GLOSSAIRE	166
9.	RÉFÉRENCES	171



LISTE DES ANNEXES

Annexe A Estimation des dommages de submersion

~~**Annexe B** Valeur d'usage du littoral à Cap-aux-Medues~~

Annexe C Coûts de relocalisation et d'immunisation des bâtiments

Annexe D Valeur d'usage et touristique du segment La Grave

~~**Annexe E** Coûts annuels des différentes options pour la période 2015-2064 pour le secteur Cap-aux-Medues~~

Annexe F Coûts annuels des différentes options pour la période 2015-2064 pour le secteur La Grave

~~**Annexe G** Coûts annuels des différentes options pour la période 2015-2064 pour le secteur Grande-Entrée~~



LISTE DES ACRONYMES

ACA	Analyse coûts-avantages
CA	Comité aviseur
CC	Changements climatiques
CLO	Comité local d'orientation
CR	Comité régional
CT	Comité technique
DAM	Domage annuel moyen
ISQ	Institut de la statistique du Québec
LDGIZC	Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières
MAMOT	Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du Territoire
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MCC	Ministère de la Culture et des Communications
MDDELCC	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
MPO	Pêches et Océans Canada
MRC	Municipalité régionale de comté
NI	Non-intervention
NMM	Niveau moyen des mers
PIB	Produit intérieur brut
Ratio A/C	Ratio avantages-coûts
RS	Relocalisation stratégique
UQAR	Université du Québec à Rimouski
VAN	Valeur actualisée nette



SYMBOLES ET UNITÉS

mm :	millimètre
cm :	centimètre
m :	mètre
km :	kilomètre
m. lin. :	mètre linéaire
\$:	dollars de 2012 à moins d'indications contraires



1. INTRODUCTION

Le Québec possède plus de 3 000 kilomètres de littoral dans l'Est de son territoire. Cette zone maritime, qui comprend la Côte-Nord, le Bas-Saint-Laurent, la Gaspésie, les Îles-de-la-Madeleine et l'île d'Anticosti, comptait en 2014 une population de 388 000 habitants répartie en 212 municipalités dont 110 sont situées sur la côte (ISQ, 2014a). Plus du tiers de cette population vit à moins de 500 mètres des berges et plus de 90 %, à moins de 5 km (Bourque et Simonet, 2008). Le produit intérieur brut (PIB) de la zone maritime en 2013 atteignait 17,1 milliards de dollars avec comme principales industries la pêche, le tourisme, les alumineries et des installations portuaires assurant le transport des produits miniers en plus d'importantes infrastructures de transport terrestre (ISQ, 2014b).

Ces collectivités font face à une transformation sans précédent de leur environnement côtier causée par les changements climatiques (CC). En modifiant les principaux paramètres à la base des processus côtiers, les CC menacent l'intégrité des zones côtières. À titre d'exemple, la tempête maritime de décembre 2010 a généré des dommages évalués à plus de 30 millions de dollars aux infrastructures publiques et à quelque 740 propriétés riveraines de l'estuaire et du golfe Saint-Laurent ainsi que de la baie des Chaleurs. (Quintin et al., 2015). C'est dans ce contexte qu'Ouranos a entrepris l'analyse des options d'adaptation à l'érosion et à la submersion marine qui menacent les côtes du Québec.

La présente étude fait partie d'un projet de recherche appuyé par Ressources naturelles Canada et le Fonds vert du Québec, qui s'intéresse aux impacts des CC et aux options d'adaptation pouvant protéger les actifs et les usages du littoral. Ce projet inclut une évaluation globale des répercussions de l'érosion sur le littoral du Québec maritime qui a déjà été publiée. Il comporte également cinq études de cas qui vise à déterminer la viabilité économique de différentes options d'adaptation pour protéger le littoral. Les coûts et les avantages de différentes options d'adaptation sont comparés afin de déterminer lesquelles parmi ces options offrent un avantage net.

Ce rapport s'intéresse aux Îles-de-la-Madeleine, archipel de 13 000 habitants situé au centre du golfe du Saint-Laurent (Statistique Canada, 2013). Le territoire est formé de sept îles reliées par des cordons dunaires offrant plus de 300 km de plage aux quelques 50 000 touristes qui le visitent annuellement. Le littoral des Îles-de-la-Madeleine est particulièrement vulnérable à l'érosion et à la submersion, étant constitué de falaise de grès très friable, de terrasse de plage et de cordon dunaire de faible élévation. De nombreux bâtiments, infrastructures et sites historiques et touristiques sont menacés par ces aléas.

Le deuxième chapitre de ce rapport présente la zone d'étude et ses principales caractéristiques géomorphologiques, hydrosédimentaires et socioéconomiques. Il décrit sommairement les segments à l'étude et les critères ayant conduit à leur choix. Enfin, il expose la problématique côtière aux Îles-de-la-Madeleine.

Le troisième chapitre présente la démarche méthodologique de l'étude. Ce chapitre débute en rappelant l'approche participative qui a été privilégiée tout au cours de l'étude afin d'identifier les enjeux, les impacts et les options d'adaptation. Enfin, les grandes lignes de l'analyse hydrosédimentaire et de la méthodologie économique sont résumées.

Les trois chapitres suivants présentent, plus en détail, l'approche méthodologique et les résultats de l'analyse coûts-avantages (ACA) réalisée pour chacun des secteurs à l'étude. Chaque chapitre comprend une description des caractéristiques et des enjeux du secteur et présente les options d'adaptation envisagées ainsi que leurs impacts

potentiels. Ces impacts sont quantifiés, puis monétisés aux fins de l'analyse coûts-avantages.

Les coûts et les avantages des différentes options d'adaptation considérées dans un segment donné sont ensuite comparés afin de déterminer lesquelles parmi ces options sont les plus avantageuses. Les résultats de l'ACA sont présentés en détail et des analyses de sensibilité sont réalisées pour tester leur robustesse. Dans le cas du chapitre portant sur Cap-aux-Meules, les résultats sont présentés successivement pour les 6 segments compris dans le secteur. Chaque chapitre se termine par une présentation synthèse des options d'adaptation les plus avantageuses au plan économique.

Enfin, la conclusion du rapport permet au lecteur d'avoir une vue d'ensemble des résultats obtenus pour les trois secteurs étudiés dans la municipalité des Îles-de-la-Madeleine.



2. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Le présent chapitre décrit d'abord les principales caractéristiques de la zone d'étude, suivies d'une description des problématiques liées aux aléas côtiers aux Îles-de-la-Madeleine. Le processus de segmentation du littoral est ensuite exposé, de même que les critères ayant conduit au choix des segments à l'étude. Les caractéristiques générales des segments retenus sont finalement présentées.¹

2.1 ZONE D'ÉTUDE

Sis en plein cœur du golfe du Saint-Laurent, l'archipel des Îles-de-la-Madeleine est localisé à 105 km de l'Île-du-Prince-Édouard, à 95 km du Cap-Breton et à 215 km de la péninsule gaspésienne (voir figure 2.1). Il est composé de douze îles dont sept sont rattachées par des dunes et des ponts. La route 199, longue de 88 km, s'étend d'un bout à l'autre de l'archipel. À celle-ci s'ajoutent 240 kilomètres de routes secondaires dont 218 kilomètres sont entretenus par la municipalité et le reste, soit 22 kilomètres, par Transports Québec.

¹ Le lecteur est invité à consulter les chapitres consacrés à chacun des segments à l'étude afin d'obtenir la description détaillée de chaque segment.

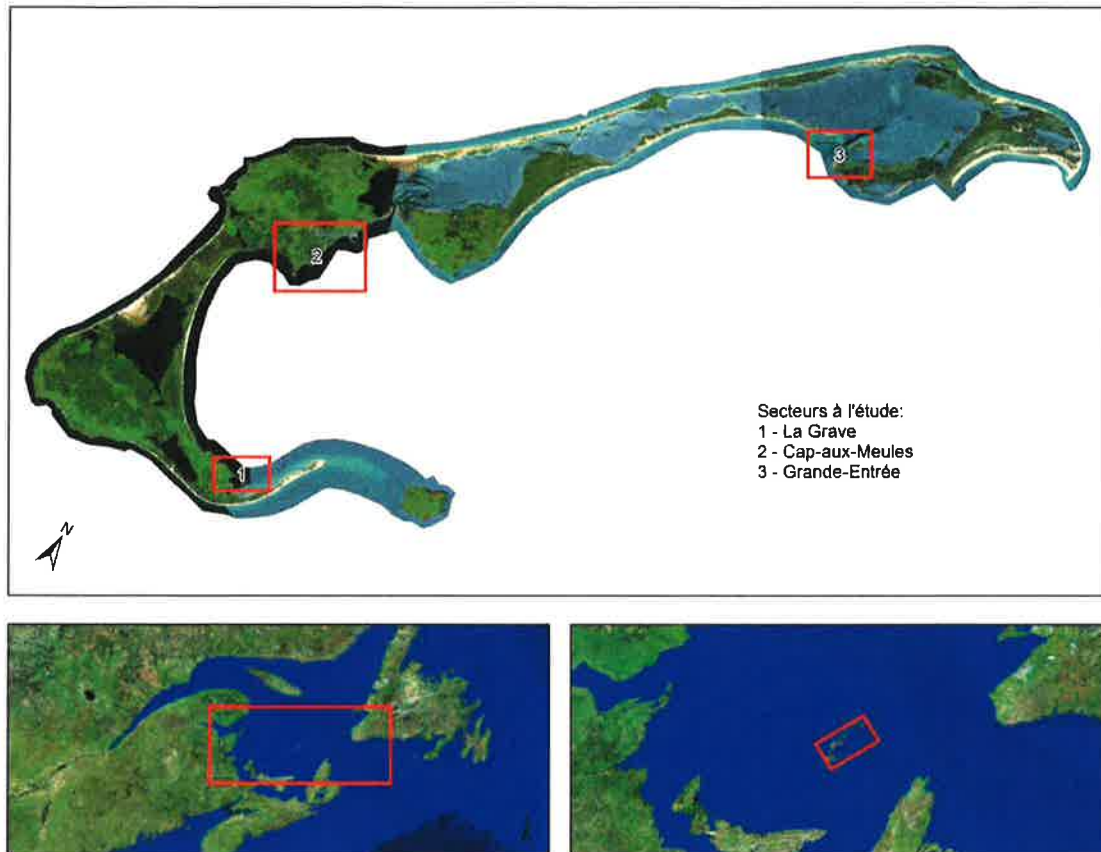


Figure 2.1 – Carte de la zone d'étude

L'occupation des Îles-de-la-Madeleine par l'homme n'est pas récente : Vikings, Amérindiens, pêcheurs basques et bretons y auraient séjourné et exploité les nombreuses ressources locales. Bien que Jacques Cartier rendit officiel ses passages aux Îles-de-la-Madeleine dès 1534, ce n'est qu'après la conquête anglaise de 1760 que la colonisation fut effective et que les premiers Acadiens s'y établirent. Aujourd'hui plus de 13 000 personnes vivent aux Îles-de-la-Madeleine dont la moitié est regroupée sur l'île de Cap-aux-Meules.

L'économie des Îles-de-la-Madeleine s'articule essentiellement autour de deux activités saisonnières soit : l'exploitation et la transformation des ressources halieutiques ainsi que le tourisme. Bien que l'industrie de la pêche demeure l'épine dorsale de l'économie locale, la part du tourisme ne cesse d'augmenter, de 20 000 visiteurs au début des

années 70, le nombre de visiteurs oscille aujourd'hui autour de 55 000 visiteurs annuellement. Cet engouement touristique est dû au milieu naturel exceptionnel de l'archipel de même qu'aux caractéristiques particulières de la vie des Madelinots. La part permanente de l'activité économique, quant à elle, est assurée par le secteur tertiaire, les services publics, parapublics et communautaires ainsi que par l'exploitation du sel (Mines Seleine à Grosse-Île). L'aquaculture, l'agroalimentaire ainsi que les arts et culture constituent des secteurs d'activités économiques en développement depuis les deux dernières décennies.

L'aéroport, situé sur l'île de Havre-aux-Maisons, dessert l'ensemble des Îles-de-la-Madeleine. Du mois d'avril au mois de janvier, l'approvisionnement des Îles-de-la-Madeleine est en grande partie assuré par un transport maritime hebdomadaire, entre Montréal et Cap-aux-Meules. À cela s'ajoute le transport de camions de marchandises et de passagers via le traversier assurant tout au long de l'année la liaison entre la ville de Souris (Île-du-Prince-Édouard) et Cap-aux-Meules.

Les principales caractéristiques des îles où se situent les secteurs à l'étude sont les suivantes :

Cap-aux-Meules

Cap-aux-Meules constitue l'île centre des Îles-de-la-Madeleine. La route 199 à cet endroit est une artère animée où l'on retrouve des établissements commerciaux, des services privés, des services fédéraux et provinciaux, ainsi que, des institutions de santé et de services sociaux. La population de Cap-aux-Meules n'a pas cessé de croître au cours des 50 dernières années ce qui s'est traduit par un développement à caractère urbain, avec rues, petits lotissements, alignement des bâtiments, etc.

Grande-Entrée

Grande-Entrée abrite le plus important port de pêche des Îles-de-la-Madeleine en termes de flottille et de la valeur des débarquements, en grande majorité constitués de homard. Au cours des dernières décennies, la population de l'île de Grande-Entrée a enregistré une décroissance importante due à l'exode d'une partie de sa population vers l'île centrale.

L'Île-du-Havre-Aubert

Premier lieu d'habitation permanent aux Îles-de-la-Madeleine, Havre-Aubert était jadis le village le plus peuplé, chef-lieu du comté et principale place d'affaires. À partir des années 1950, Havre-Aubert a vu graduellement décroître son importance au profit de l'île centrale avec la mise en place du réseau routier et d'un port de mer à Cap-aux-Meules. Cependant, elle a su tirer profit de son riche patrimoine naturel et bâti pour se créer un capital touristique qui en fait aujourd'hui un lieu de séjour prisé des visiteurs. C'est sur cette île que l'on retrouve le secteur La Grave, faisant l'objet d'une ACA dans le cadre de la présente étude.

2.2 PROBLÉMATIQUES LIÉES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

La position de l'archipel des Îles-de-la-Madeleine, situé en plein cœur du Golfe du Saint-Laurent rend ses côtes exposées aux vagues de tempêtes pouvant se former dans l'Atlantique Nord ou à même le Golfe du Saint-Laurent. Le côté est des Îles, où sont situés les trois secteurs à l'étude, est particulièrement vulnérable aux vagues de tempêtes provenant du nord-est.

À cette exposition naturelle s'ajoutent la modification des conditions hydroclimatiques découlant des CC qui viendra influencer la vulnérabilité des Îles-de-la-Madeleine aux aléas côtiers. D'une part, le rehaussement global du niveau des mers se superposera à la subsidence des Îles-de-la-Madeleine qui s'enfoncent à un rythme estimé entre 1,5 et 4,1 mm par année (Koozmare et al., 2008; James et al., 2014; Han et al., 2015). La combinaison de ces deux phénomènes devrait mener à une augmentation du niveau marin de l'ordre de 50 cm environ d'ici 50 ans. D'autre part, l'adoucissement des conditions hivernales causera une réduction du couvert de glace et une augmentation potentielle des tempêtes en période d'eau libre, modifiant l'efficacité avec laquelle les tempêtes produiront des dommages sur la côte et par le fait même leur influence sur l'érosion des côtes.

La dynamique côtière et la sensibilité des côtes à l'érosion ont été analysées par l'UQAR. Les chercheurs du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières de l'Université du Québec à Rimouski (LDGIZC-UQAR) ont noté que plusieurs études avaient été effectuées depuis le début des années 2000. Ces études démontrent

que la vitesse de déplacement du littoral lors de la période allant des années 90 à aujourd'hui serait représentative de l'évolution future du trait de côte, et ce, pour les prochaines décennies. Selon Bernatchez et al. (2008), cette dernière période serait caractérisée par un réchauffement important des températures moyennes annuelles. Ce réchauffement serait significatif depuis les années 80 pour ce qui est des températures hivernales.

Malgré que Bernatchez et Dugas (2014) aient noté des contraintes liées à la disponibilité des données relatives à l'évolution de la côte du Québec maritime, LDGIZC-UQAR disposait pour les Îles-de-la-Madeleine de données historiques et de données récentes sur l'évolution côtière (1990 à aujourd'hui). Ainsi, LDGIZC-UQAR a pu déterminer des taux de déplacement probables d'ici 2065 pour les huit segments géomorphologiques étudiés. Sommairement, les Îles-de-la-Madeleine, de par leur exposition et la composition géologique de leurs côtes présentent les taux d'érosion les plus importants du Québec maritime. Les taux probables estimés pour les secteurs à l'étude varient entre quelques centimètres par année dans les formations calcaires à des taux de plus d'un mètre dans les falaises de grès ou les terrasses de plage et les dunes. Ces taux sont présentés et expliqués dans les chapitres traitant plus spécifiquement de chacun des secteurs à l'étude.

Il est à noter qu'en raison de l'exposition du littoral et de la composition géologique des côtes des Îles-de-la-Madeleine, les côtes peuvent subir des reculs importants lors d'un seul événement de tempête. Toutefois, compte tenu de la difficulté de prédire quels segments de côte pourraient être affectés par de tels événements de tempête dans le futur, l'érosion due aux événements de tempête a été prise en compte directement dans le calcul des taux d'érosion historiques.

2.3 PROCÉDURE DE SEGMENTATION ET DE SÉLECTION

Le littoral des secteurs à l'étude aux Îles-de-la-Madeleine a fait l'objet d'une segmentation de manière à ce que chaque segment de littoral soit suffisamment homogène pour y appliquer une même option d'adaptation. (LDGIZC-UQAR, 2015). En effet, une option d'adaptation envisagée pour une terrasse de plage n'est pas nécessairement la même que pour une flèche littorale ou un marais maritime, par

exemple. Les critères de segmentation utilisés sont le type de côte, la dynamique hydrosédimentaire, l'état de la côte, les protections existantes et l'environnement bâti. Suivant ce processus de segmentation et l'analyse préliminaire des enjeux spécifiques à chaque segment, 8 segments ont été sélectionnés et soumis à une ACA.

Dans le cadre de cette étude, un total de 8 segments a été retenu dans les 3 secteurs des Îles-de-la-Madeleine (tableau 2.1). Ces segments font face aux problématiques d'érosion, de submersion ou les deux à divers degrés.

Tableau 2.1 – Liste des segments à l'étude par secteur

Secteurs	Segments à l'étude	Longueur (m)
Cap-aux-Meules	Camping du Gros-Cap	1 734
	Gros-Cap Est	180
	Échouerie Ouest	460
	Route municipale	1 258
	Plage municipale	345
	Centre-Ville	2 163
La Grave		440
Grande-Entrée		1 208

Il est à noter que l'ensemble de ces segments sont touchés par des problèmes d'érosion tandis que la submersion ne constitue une problématique que pour les secteurs de Grande-Entrée et de La Grave.

Le secteur Cap-aux-Meules, qui couvre un plus de 6 km de côte, comprend 6 segments, nommément le Camping du Gros-Cap, Gros-Cap Est, l'Échouerie Ouest, la Route municipale, la Plage municipale et le Centre-ville. Le secteur Grande-Entrée, couvre une distance de plus d'un kilomètre et comprend la zone portuaire de Grande-Entrée et une portion de la dune de la Pointe. Enfin, le secteur La Grave, s'étend sur une distance de 440 m couvrant essentiellement le secteur historique de La Grave.

Chaque segment est décrit en détail aux chapitres 4 à 6, puisqu'un chapitre est consacré à chacun des secteurs. Ces chapitres, en plus de présenter une description des caractéristiques et de la problématique des segments, identifient les options

d'adaptation considérées, leurs impacts potentiels, leurs coûts ainsi que les résultats de l'ACA et de l'analyse de sensibilité.



3. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Ce chapitre présente d'abord le processus consultatif mis en place par Ouranos afin de s'assurer de la pertinence de l'étude pour les décideurs locaux et régionaux. Les approches méthodologiques privilégiées dans le cadre de cette étude pour effectuer l'analyse hydrodynamique et l'analyse économique sont ensuite exposées.

3.1 PROCESSUS CONSULTATIF

La réalisation d'une analyse coûts-avantages nécessite une bonne compréhension des enjeux économiques, environnementaux et sociaux présents sur le territoire d'étude, de même que de la façon dont ces enjeux seront affectés par les interventions proposées.

Dans le cadre de ce projet, quatre comités ont été mis sur pied pour assister l'équipe de projet dans l'avancement de l'analyse : un comité local d'orientation, un comité régional, un comité technique et un comité aviseur. Le tableau 3.1 résume l'implication de chacun de ces quatre comités dans les différentes activités réalisées.

Dans chaque municipalité ciblée par l'étude, un comité local d'orientation (CLO) composé d'intervenants du milieu, de décideurs, de fonctionnaires et d'élus a été mis sur pied par la municipalité, afin d'orienter les travaux de l'étude en fonction des besoins et des réalités locales. Dans le cas des Îles-de-la-Madeleine, le comité local d'orientation était composé essentiellement de fonctionnaires municipaux, de même que de fonctionnaires du MTQ et d'intervenants de groupes environnementaux (Comité ZIP et Attention Fragiles). En plus de fournir de nombreuses données à l'équipe de projet, les



membres du comité local d'orientation se sont réunis à quatre reprises au cours de la réalisation de l'étude. La première rencontre a eu lieu en début d'étude afin de discuter des objectifs et de la méthodologie de l'ACA, de définir avec précision les différents segments biophysiques retenus et de discuter de façon préliminaire des options d'adaptation envisagées pour chacun des segments. Au même moment, l'équipe de projet avait rencontré le conseil municipal afin d'obtenir le support des autorités politiques au projet.

Tableau 3.1 - Processus consultatif et rôle des comités

Activités		CLO	CR	CT	CA
1	Définition de l'approche méthodologique				X
2	Validation des segments biophysiques	X			
3	Validation des scénarios d'érosion				X
4	Identification d'options d'adaptation	X	X	X	
5	Identification des impacts des options étudiées	X	X		
6	Évaluation économique des coûts et avantages	X		X	
7	Analyses coûts-avantages à l'horizon 2065				X

CLO : Comité local d'orientation, CR : Comité régional, CT : Comité technique, CA : Comité avisier

La deuxième rencontre a permis d'échanger sur les options d'adaptation à retenir pour chacun des segments étudiés et d'identifier les impacts potentiels de ces options sur les milieux humain et biophysique. La troisième rencontre du comité local d'orientation visait, quant à elle, à discuter des hypothèses posées pour estimer la valeur économique des impacts.

Enfin, une dernière rencontre visait à présenter les résultats préliminaires de l'étude au CLO, afin de prendre en considération leurs commentaires et suggestions. Tous les élus du conseil municipal ont été invités à cette dernière rencontre afin qu'ils puissent se familiariser avec l'approche méthodologique et s'approprier les résultats.

Le comité régional (CR), pour sa part, a participé à l'identification des options d'adaptation potentielles et des impacts que ces options pourraient avoir sur la faune, la



flore, les infrastructures et les activités de pêche. Les résultats préliminaires de l'étude ont aussi été discutés avec le CR afin de valider certaines conclusions. Les cinq ministères québécois représentés sur le comité régional incluent le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), le ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire (MAMOT), le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), le ministère de la Culture et des Communications (MCC) et le Ministère des Transports du Québec (MTQ). Des représentants du ministère Pêches et Océans Canada siégeaient également sur ce comité.

Quant au comité technique (CT), il était composé de spécialistes dans le domaine côtier, dont deux ingénieurs côtiers, deux géomorphologues, un océanographe et des économistes. Le comité s'est rencontré une fois en début d'étude lors d'une séance de remue-méninges afin de proposer, pour chacun des segments, des options d'adaptation aux problématiques côtières en jeu.

Enfin, le comité aviseur regroupait des spécialistes du milieu côtier et de l'analyse coûts-avantages, ainsi que des représentants des organismes finançant le projet. Ce comité avait comme mandat de valider les grandes orientations de recherche du projet et la méthodologie adoptée pour réaliser les différentes étapes de l'étude. Le comité s'est réuni deux fois au cours du projet.

3.2 ANALYSE HYDRODYNAMIQUE

L'érosion et la submersion sont des phénomènes complexes auxquels sont exposés les actifs et activités en bordure du littoral des Îles-de-la-Madeleine. Cette section présente d'abord les hypothèses reliées à la submersion (3.2.1) suivies de celles relatives à l'érosion des côtes (3.2.2). Dans les deux cas, les informations géomorphologiques proviennent directement ou sont dérivées de la *Base de données d'évolution, de classification et d'utilisation des zones côtières du Québec* (LDGIZC-UQAR, 2015).



3.2.1 Hypothèses relatives à la submersion

Les épisodes de submersion résultent de niveaux d'eau extrêmes, lesquels proviennent de la conjugaison de deux phénomènes : la *surcote* de niveau d'eau marégraphique et les hautes vagues. La submersion se produit lorsque la hauteur du niveau d'eau, combinée à la hauteur du niveau des vagues, excède la hauteur du terrain à l'arrière de la zone littorale. Une partie de ce débordement provient du *jet de rive* ou *runup*, c'est-à-dire du phénomène de transformation de l'énergie des vagues après leur déferlement en un courant ascendant vers la rive.

Les vagues se forment lors des épisodes de grands vents qui surviennent généralement lors des tempêtes. On s'attend donc généralement à ce qu'une surcote de tempête soit accompagnée de forts vents et donc de vagues (sauf lorsqu'il y a un couvert de glace, que les vents ne sont pas suffisamment forts ou que les vents ne sont pas orientés dans le secteur critique à un segment de côte en particulier). Dans l'approche statistique pour déterminer les récurrences de niveaux d'eau totaux pouvant causer de la submersion à la côte, ces paramètres ont donc été considérés comme partiellement dépendants.

En ce qui concerne les conditions futures, les récurrences de niveaux d'eau totaux seront affectées par l'augmentation du niveau marin relatif et l'adoucissement hivernal. Le premier est dû principalement au réchauffement des océans (par expansion thermique) et à l'enfoncement du continent (*ajustement isostatique*). Quant à l'adoucissement des températures hivernales, il est anticipé qu'il réduira la superficie de glace de mer, ce qui laissera libre cours à la formation de vagues pendant une période annuelle plus longue (Bernatchez et al., 2008).

À la lumière de ces fondements, l'approche générale a consisté à élaborer des périodes de retour de hauteurs de submersion pour la situation actuelle de même que pour les horizons temporels de 2030 et 2055, afin de soutenir le développement de projections de niveaux d'eau extrêmes. Ces niveaux d'eau incluent l'impact des changements climatiques et s'appuient sur une série d'hypothèses concernant :

- les probabilités de surcotes de tempête;
- les probabilités de vagues et le *jet de rive* associé;



- les paramètres qui feront varier les probabilités dans le futur, c'est-à-dire la hausse du niveau marin et le mouvement isostatique; et
- les probabilités conjointes de surcote de tempête et de vagues dans le présent et le futur entre les extrêmes de niveaux d'eau et de vague (hypothèse des paramètres partiellement dépendants).

Les hypothèses retenues sont résumées au tableau 3.2. La méthodologie complète est disponible dans un rapport méthodologique complémentaire à la présente étude (Boyer-Villemaire et al., 2016).

Tableau 3.2 – Résumé des hypothèses sous-tendant les probabilités de submersion pour les Îles-de-la-Madeleine

Paramètre	Hypothèses, explications et sources de données
Hausse du niveau marin	<ul style="list-style-type: none"> - RCP 8.5 du GIEC (2013) : interpolation des valeurs annuelles à partir d'une polynomiale d'ordre 2 sur les valeurs décennales fournies par le GIEC, appliquées pour les intervalles 2010-2030 et 2010-2055 - Hausses utilisées : actuel : +2 cm; 2030 : +13 cm; 2055 : +29 cm
Mouvement isostatique	<ul style="list-style-type: none"> - Valeur de -3,5 mm/an estimées Koohzare et al., 2008.
Récurrence des niveaux d'eau extrêmes	<ul style="list-style-type: none"> - Données : issues du modèle de Z. Xu (2015), Institut Maurice-Lamontagne / Pêches et Océans Canada. <ul style="list-style-type: none"> o La Grave : Niveaux d'eau modélisés à Cap-aux-Meules o Grande-Entrée : Niveaux d'eau modélisés à Grande-Entrée - Récurrences : analyse probabiliste par la méthode de dépassement de seuils (plus petit maximum annuel) basée sur l'estimation des paramètres et l'ajustement des résidus à une distribution de Gumbel
Récurrence des hauteurs significatives de vagues (Hs)	<ul style="list-style-type: none"> - Données : Modèle de vagues au large GENEREUX, 1980-2012, récif de la Perle (47.34667 / -61.52583), Neumeier et al., 2013. - Récurrences : analyse probabiliste par la méthode de dépassement de seuils (plus petit maximum annuel) basée sur l'estimation des paramètres et l'ajustement des résidus à une distribution de Gumbel
Probabilités conjointes des niveaux d'eau extrêmes et des vagues	<ul style="list-style-type: none"> - Hypothèse des paramètres partiellement dépendants : basée sur une analyse statistique exploratoire, où : <ul style="list-style-type: none"> - 8 événements sur 121 événements extrêmes sont survenus à la fois en eau libre, avec des fortes vagues et des vagues provenant du secteur critique (6,6 %).
Jet de rive	<ul style="list-style-type: none"> - Les mesures de terrain combinées au LIDAR ont permis de calibrer un paramètre de transformation des vagues au large en jet de rive à



Paramètre	Hypothèses, explications et sources de données
Hausse du niveau marin	- RCP 8.5 du GIEC (2013) : interpolation des valeurs annuelles à partir d'une polynomiale d'ordre 2 sur les valeurs décennales fournies par le GIEC, appliquées pour les intervalles 2010-2030 et 2010-2055 - Hausses utilisées : actuel : +2 cm; 2030 : +13 cm; 2055 : +29 cm
	la côte à 15,5 %. Ce paramètre s'applique à La Grave et Grande-Entrée.

À la lumière des hypothèses précédentes, les tableaux 3.3 et 3.4 présentent les niveaux de submersion actuels et futurs pour les secteurs vulnérables à la submersion, soit La Grave et Grande-Entrée. Les tableaux présentent à la fois les niveaux d'eau extrêmes avec et sans jet de rive. Les niveaux sans jet de rive sont réservés aux secteurs protégés par un cordon ou une flèche littorale qui bloque le jet de rive (fond de la lagune à Grande-Entrée). À partir de ces niveaux extrêmes pour diverses récurrences, il a été possible de créer des scénarios de probabilité d'occurrence et de les transformer en dommages à l'environnement bâti, comme décrit à la section 3.3.

Tableau 3.3 – Niveaux de submersion futurs pour La Grave

Niveau extrême total (m géodésique)						
Période de retour	Sans jet de rive			Avec jet de rive		
	2005	2030	2055	2005	2030	2055
2 ans	0,89	1,12	1,35	1,62	1,85	2,08
5 ans	1,01	1,24	1,47	1,86	2,09	2,32
10 ans	1,10	1,33	1,56	2,02	2,25	2,48
20 ans	1,19	1,42	1,65	2,19	2,42	2,65
30 ans	1,24	1,47	1,70	2,28	2,51	2,74

Tableau 3.4 – Niveaux de submersion futurs pour Grande-Entrée

Niveau extrême total (m géodésique)						
Période de retour	Sans jet de rive			Avec jet de rive		
	2005	2030	2055	2005	2030	2055
2 ans	0,77	1,00	1,23	1,50	1,73	1,96



5 ans	0,93	1,16	1,39	1,77	2,00	2,23
10 ans	1,04	1,27	1,50	1,97	2,20	2,43
20 ans	1,16	1,39	1,62	2,16	2,39	2,62
30 ans	1,23	1,46	1,69	2,27	2,50	2,73

3.2.2 Hypothèses relatives à l'érosion

Les taux d'érosion utilisés ont été fournis par le LDGIZC. Ils ont été calculés sur une base historique à l'aide de photographies aériennes, de bornes de mesures sur le terrain et d'imageries satellitaires. Le choix du taux de déplacement probable par l'UQAR est expliqué de manière détaillée dans Bernatchez et al. (2015). Il est essentiellement basé sur une évaluation d'experts du mode d'évolution de la côte et de la période historique la plus représentative de ce mode d'évolution, en tenant compte des impacts attendus des changements climatiques sur ce dernier.

Les taux probables sont présentés au tableau 3.5. Ces taux indiquent que tous les secteurs/segments seront en érosion. Les Îles-de-la-Madeleine affichent parmi les taux de recul les plus importants de l'Est-du-Québec. Certains secteurs de terrasse de plage ou de dunes sont en érosion à un rythme dépassant un mètre par année (Grande-Entrée). Les secteurs de falaises de grès comme à Cap-aux-Meules montrent des taux inférieurs, mais relativement rapides, avoisinant cinquante centimètres par année.

Tableau 3.5 – Taux d'érosion probable pour les Îles-de-la-Madeleine

Segment	Taux probable (m/an)	Recul événementiel (m)
Secteur Cap-aux-Meules		
Camping du Gros-Cap	-0,37 à -0,82	-4,4
Gros-Cap Est	-0,45 à -1,0	-4,4 à -12,2
Échouerie Ouest	-0,45	-4,4
Route municipale	-0,38	-4,4
Plage de Cap-aux-Meules	-0,38 à -0,64	-4,4 à -12,5
Centre-ville	-0,31 à -0,43	-4,4 à -12,5



Secteur Grande-Entrée		
Zone portuaire	0	0
Dune de la Pointe Ouest	-1,61	-12,5
Secteur La Grave		
Secteur historique	-0,23	-16,9

Les reculs événementiels sont présentés à titre informatif seulement. De manière générale, ce taux de recul événementiel dépend du degré de consolidation de la côte; les côtes rocheuses étant les moins exposées à ce phénomène, alors que les flèches littorales et marais maritimes étant les plus exposés. Par ailleurs, les structures anthropiques complexifient les patrons de réfraction des vagues et peuvent concentrer ces phénomènes à certains endroits. Cependant, il n'est pas possible de prévoir l'occurrence de ces événements d'érosion et il n'existe pas de récurrences de ce type d'événement pour les Îles-de-la-Madeleine. Ce type de risque ponctuel à la côte est inclus dans les taux historiques, mais ni sa probabilité ni le moment de son occurrence ne sont explicitement considérés dans la méthode basée sur les taux annuels probables.

3.3 ANALYSE ÉCONOMIQUE

L'objet de cette étude est de comparer les différentes options d'adaptation à la non-intervention afin de déterminer s'il est préférable d'intervenir et quelle option d'adaptation serait la plus avantageuse économiquement, en tenant compte de l'ensemble des coûts et avantages sociaux, économiques et environnementaux.

La méthode utilisée est l'analyse coûts-avantages (ACA) qui permet de comparer la somme des avantages nets de chaque option d'adaptation, du point de vue de l'ensemble de la société. Il s'agit d'une méthode largement utilisée en analyse économique, notamment par les différents ordres de gouvernement depuis plusieurs décennies et dont les modalités sont bien connues des utilisateurs. Sur une période donnée, elle permet de prendre en compte les composantes économiques, environnementales et sociales d'un projet en estimant la valeur monétaire des impacts



du projet sur ces différentes composantes. L'ACA permet de comparer dans le temps différentes options d'adaptation sur une base commune à l'aide d'indicateurs, soit la valeur actualisée nette (VAN) et le ratio avantages-coûts (ratio A/C). Il devient alors possible de classer les options étudiées en fonction de leur performance économique.

Il est important de préciser qu'une ACA n'est pas une analyse financière. L'ACA prend en considération les avantages et les coûts directs et indirects d'une option, alors qu'une analyse financière s'intéresse seulement aux flux monétaires pour le promoteur. Ainsi, les coûts des externalités liées à la réalisation d'un projet, tels que les impacts sociaux et environnementaux, ne sont pas inclus dans une analyse financière, alors qu'ils le sont dans le cadre d'une analyse coûts-avantages.

La réalisation d'une ACA inclut six étapes principales : 1) identification des options d'adaptation possibles 2) identification des impacts appréhendés des options d'adaptation et de la non-intervention; 3) monétisation des impacts négatifs (coûts) et des impacts positifs (avantages); 4) estimation des coûts de mise en œuvre des options d'adaptation; 5) comparaison des coûts et des avantages; 6) analyse de sensibilité des résultats.

3.3.1 Identification des options d'adaptation

À la lumière du contexte de la zone d'étude et des rencontres réalisées avec les comités local, régional et technique, trois types d'options d'adaptation ont été sélectionnées pour chacun des segments à l'étude : des structures côtières rigides, des structures côtières mobiles et des options ne nécessitant pas d'intervention côtière (tableau 3.6).

Tableau 3.6 – Options d'adaptation étudiées pour chacun des secteurs et segments

Secteur	Segment	Structure côtière rigide	Structure côtière mobile	Option sans structure côtière
Cap-aux-Meules	Camping Gros-Cap	Riprap Enrochement		Relocalisation stratégique
	Gros-Cap Est	Riprap Enrochement	Recharge avec butée	Relocalisation stratégique
	Échouerie Ouest	Riprap Enrochement		Relocalisation stratégique
	Route	Riprap		Relocalisation



	municipale	Enrochement		stratégique
	Plage municipale	Riprap Enrochement	Recharge avec butée	Relocalisation stratégique
	Centre-ville	Riprap Enrochement		Relocalisation stratégique
La Grave		Riprap Enrochement	Recharge de plage en gravier	Immunisation relocalisation stratégique
Grande-Entrée		Riprap Enrochement	Recharge de plage avec épis	Immunisation relocalisation stratégique

Les structures rigides représentent des structures d'ingénierie côtière classique, telles que des murs et des enrochements, qui modifient en profondeur la dynamique sédimentaire. Les structures mobiles, comme la recharge de plage, permettent un certain mouvement naturel des sédiments. Les options sans intervention côtière, quant à elles, visent plutôt à réduire l'exposition des actifs aux aléas en agissant sur les actifs à risque plutôt que sur le milieu. Le détail de la mise en œuvre, les coûts et les implications techniques de chacune des options sont décrits dans les chapitres consacrés à chacun des segments.

Les structures côtières rigides et mobiles qui ont été retenues pour analyse proviennent d'une étude réalisée par la firme Roche pour la municipalité des Îles-de-la-Madeleine (Roche, 2011). Compte tenu des différents paramètres biophysiques, géomorphologiques et océanographiques de la côte aux Îles-de-la-Madeleine, Roche a identifié de façon préliminaire des ouvrages qui pourraient protéger le littoral des Îles-de-la-Madeleine contre les aléas côtiers pour une période de 35 ans. L'extrapolation de la durée de vie des ouvrages de 35 à 50 ans et des coûts afférents s'est fait grâce à des consultations auprès d'ingénieurs côtiers. Les options d'adaptation pour le secteur La Grave ont été conçues de manière préliminaire par Consultants Ropars dans le cadre d'un rapport technique préparé pour Ouranos (Ropars, 2016).

3.3.2 Identification des impacts appréhendés

Une fois que les options d'adaptation pour un segment donné du littoral sont choisies, l'analyse économique peut alors débuter. Étant donné que chaque option exige d'intervenir dans un milieu où il existe déjà des activités économiques et sociales, il est



essentiel d'évaluer comment ces activités seront affectées par l'option proposée. Il en va de même pour l'environnement naturel qui est souvent perturbé par l'intervention humaine.

Un premier groupe d'impacts provient des aléas côtiers (érosion et submersion) et leurs conséquences directes. Il s'agit, entre autres, des pertes ou dommages aux terrains et aux bâtiments, ainsi que des coûts entraînés par le nettoyage des débris, les mesures d'urgence et les coûts d'évacuation. Ces impacts sont appelés dans le cadre de cette étude les impacts directs de l'érosion et de la submersion. Ils seront amplifiés par les changements climatiques dans la municipalité des Îles-de-la-Madeleine.

En plus des impacts liés directement à l'érosion et à la submersion, il y a les impacts économiques, environnementaux² et sociaux. Le tableau 3.7 présente les impacts positifs et négatifs appréhendés aux Îles-la-Madeleine.

Tableau 3.7 – Ensemble des impacts appréhendés aux Îles-de-la-Madeleine

Impacts	Impacts négatifs	Impacts positifs
Liés à l'érosion et à la submersion	<ul style="list-style-type: none"> - Perte ou dommage aux terrains - Pertes ou dommages aux bâtiments résidentiels ou commerciaux - Perte ou dommages aux infrastructures publiques - Nettoyage de débris 	
Économiques	<ul style="list-style-type: none"> - Diminution de la valeur économique des propriétés - Pertes de marchandises et de revenus commerciaux - Pertes d'achalandage touristiques - Pertes d'emplois 	

² Les impacts environnementaux considérés dans le cadre de cette étude se limitent aux impacts à moyen et long termes des options d'adaptation sur le milieu biophysique. Les impacts appréhendés pendant la réalisation des travaux sont exclus, car ils sont généralement de durée trop limitée pour avoir un effet significatif sur la VAN. Toutefois, les études d'impact environnemental, dont les coûts sont pris en compte dans l'ACA, considéreront ces impacts comme il se doit selon les pratiques reconnues dans le domaine.



Impacts	Impacts négatifs	Impacts positifs
Environnementaux	- Perte d'habitats naturels	
Sociaux	<ul style="list-style-type: none"> - Perte de vue sur la mer - Perte d'accès à la mer - Détérioration de l'usage récréatif du littoral - Diminution de la qualité de vie (anxiété, insécurité, etc.) - Détérioration du paysage - Détérioration du patrimoine historique et culturel 	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de l'usage récréatif du littoral - Amélioration de la qualité de vie (sécurité) Amélioration du paysage

3.3.3 Monétisation des impacts appréhendés

Une fois les impacts des options d'adaptation identifiés et quantifiés, il est nécessaire d'estimer leur valeur monétaire. Dans le cadre de cette étude, plusieurs méthodes d'évaluation ont été utilisées selon la nature des impacts à valoriser et la disponibilité des données.

La monétisation des impacts à partir de transactions réalisées sur le marché a été privilégiée. Toutefois, en l'absence d'un marché pour le type d'impact considéré, les méthodes basées sur un marché connexe permettant de monétiser indirectement la valeur d'un impact ont été utilisées. Il s'agit, entre autres, de la méthode des prix hédoniques et celle des coûts de transport. Enfin, faute de données provenant de transactions directes ou indirectes, la monétisation de certains impacts a nécessité de recourir à des méthodes basées sur un marché hypothétique comme l'évaluation contingente.

Les hypothèses relatives à la monétisation des impacts des options d'adaptation sont présentées dans le chapitre portant sur chaque segment à l'étude. Quant aux principales hypothèses pour estimer les dommages causés par la submersion et l'érosion, elles sont brièvement expliquées ci-dessous.



3.3.4 Estimation des dommages par submersion

L'estimation des dommages probables causés par les événements de submersion est réalisée sur la base d'une approche par analyse de risque. Dans le cadre de cette étude, le risque est défini comme étant la combinaison des dommages causés par un aléa et de la probabilité de ce même aléa, et ce, pour l'ensemble des aléas possibles. Dans le domaine côtier plus spécifiquement, le risque est donc la combinaison des dommages associés aux épisodes de niveaux d'eau extrêmes et de leurs probabilités d'occurrence.

Pour chacun des bâtiments présents dans la zone d'étude, la projection des niveaux d'eau extrêmes de 2, 5, 10, 20 et 30 ans de récurrence ont été établis et les dommages correspondants ont été estimés. Pour ce faire, la hauteur d'eau atteinte a été comparée à la cote d'élévation du plancher principal pour ensuite calculer le dommage monétaire à l'aide d'une des courbes de dommages-hauteur d'eau. Ces courbes proviennent de Bonnifait (2005) et elles ont été construites de sorte à tenir compte des principales caractéristiques du bâtiment ayant une influence sur les dommages :

- Nombre d'étages
- Présence d'un sous-sol
- Sous-sol fini ou non fini

Une fois les dommages établis pour chaque événement, le dommage annuel moyen pour chaque bâtiment est calculé à l'aide de l'approximation de Riemann. Essentiellement, ce calcul est réalisé en additionnant les produits des dommages associés à chaque événement par la probabilité d'occurrence de ces événements. Les détails de ce calcul se trouvent à l'annexe A.

3.3.5 Estimation des dommages causés par l'érosion

Les dommages annuels liés à la perte de terrain sont calculés à partir de la projection linéaire des taux d'érosion probable, au prorata de la valeur de la superficie perdue. La valeur de la superficie totale provient du rôle d'évaluation 2014 qui reflète les prix du marché de 2012.



En cas de non-intervention, la perte économique est calculée à partir du moment où le trait de côte rejoint le point du bâtiment le plus près de la côte. Lorsqu'un bâtiment est exposé, une perte équivalente à la valeur foncière du bâtiment est comptabilisée. En fonction de la superficie de terrain restante au moment de la perte, une perte résiduelle de valeur du terrain est également enregistrée. Si la superficie restante de terrain est encore suffisamment grande pour qu'une nouvelle construction soit bâtie sur le terrain, ce sont plutôt les pertes annuelles de terrain qui continuent à être comptabilisées.

3.3.6 Estimation des coûts des options d'adaptation

En plus des coûts liés aux impacts appréhendés, l'analyse coûts-avantages exige d'estimer les coûts de mise en œuvre et d'entretien des options d'adaptation. En général, ces coûts sont déterminés à partir de projets similaires ou en faisant appel à des ingénieurs spécialisés dans la conception des options considérées. Quoique ces coûts soient relativement faciles à estimer, puisqu'ils sont basés sur des projets déjà réalisés, ils demeurent tout de même approximatifs.

Dans la présente étude, les coûts des options d'adaptation impliquant des travaux de génie ont été estimés par la firme Roche (Roche, 2011) dans le cadre d'un mandat visant à identifier de façon préliminaire les ouvrages qui pourraient protéger le littoral aux Îles-de-la-Madeleine. Pour les options d'ingénierie étudiées dans le secteur La Grave, les coûts ont été établis en combinant les quantités estimées dans le cadre de l'étude de conception préliminaire réalisée par Consultants Ropars et les prix unitaires présentés dans l'étude de la firme d'ingénierie Roche (Roche, 2011).

Par ailleurs, en ce qui concerne le coût de l'immunisation ou du déplacement des actifs, la firme Héneault et Gosselin a fourni des coûts unitaires en fonction du type de revêtement des bâtiments. Ces coûts unitaires (au mètre linéaire) sont conformes aux coûts de mobilisation des équipements aux Îles-de-la-Madeleine.

3.3.7 Comparaison des coûts et des avantages

Après avoir estimé les différents coûts et avantages de chacune des options d'adaptation et de la non-intervention, la prochaine étape consiste à calculer la somme



des avantages nets sur la période d'étude afin de pouvoir comparer les options entre elles. Ce calcul repose sur des hypothèses de base qui sont décrites ci-dessous.

a) *Population d'intérêt*

Dans le cadre de cette étude, la population considérée pour l'estimation des coûts et des avantages des options d'adaptation est la population des Îles-de-la-Madeleine. Le choix de la population d'intérêt se fait généralement sur la base des individus qui vont le plus bénéficier du projet parce qu'ils sont des usagers directs des infrastructures à risque ou qu'ils profitent indirectement des retombées économiques de la zone d'étude. Dans ce cas-ci, la population des Îles-de-la-Madeleine serait la première à bénéficier des options d'adaptation en vue de protéger le littoral.

b) *Horizon temporel*

L'horizon temporel retenu pour cette étude est de 50 ans, soit de 2015 à 2064. Le choix de cet horizon est lié à la durée de vie des infrastructures côtières. Une période de 50 ans représente une durée de vie réaliste pour de telles infrastructures. Ainsi, les options d'adaptation considérées dans l'ACA devront permettre de protéger le littoral sur l'ensemble de la période d'étude.

c) *Actualisation*

La méthode utilisée pour agréger les avantages et les coûts liés à une option d'adaptation donnée sur l'horizon temporel considéré est l'actualisation de ces derniers. Cette méthode permet de ramener les valeurs considérées pour chacune des années sur une même base à l'aide d'un facteur d'actualisation. La formule ci-dessous est utilisée pour estimer la valeur actualisée des avantages et des coûts :

$$VAN = \frac{f_i}{(1+r)^i}$$

Où :

VAN : Valeur actualisée nette

f = flux monétaires (avantages ou coûts)

i : période à laquelle le flux monétaire est observé

r : taux d'actualisation



Le taux d'actualisation représente le coût d'opportunité des fonds engagés tout au long de l'horizon considéré. Un taux d'actualisation plus élevé signifie que la valorisation des coûts et avantages futurs est moindre. Dans la présente étude, le taux d'actualisation choisi est de 4 %. Il s'agit du taux recommandé par Ouranos dans son guide de l'évaluation des avantages et des coûts de l'adaptation (Webster et al., 2008) et retenu pour la réalisation des études régionales lancées par Ressources naturelles Canada. Puisque le taux d'actualisation peut influencer les résultats de l'ACA, une analyse de sensibilité de $\pm 2\%$ est également réalisée. Une telle analyse permet de vérifier si le résultat obtenu (soit la VAN) est robuste à un changement d'hypothèse.

Une autre hypothèse de cette étude est l'unité monétaire choisie, soit le dollar canadien de 2012. Il a été choisi en raison de la disponibilité des données économiques pour cette année de référence, notamment les valeurs foncières.

Quant aux résultats de l'ACA, ils sont présentés à l'aide de la valeur actualisée nette, soit la VAN. La VAN a l'avantage d'indiquer directement la perte ou le gain économique lié à chaque option en plus de l'ampleur de cet élément. Le ratio avantages-coûts est aussi utilisé, lorsque cela est opportun, afin de présenter les résultats en terme relatif. Ceci permet généralement de favoriser les options les moins coûteuses parmi celles qui ont une VAN similaire.

3.3.8 Analyse de sensibilité des résultats

L'analyse de sensibilité permet d'examiner la robustesse de la VAN obtenue lorsque les hypothèses importantes de l'analyse varient. Ainsi, les paramètres ou hypothèses ciblés par une telle analyse sont choisis par rapport à l'influence qu'ils peuvent avoir sur les résultats de l'ACA. Cela apporte une information complémentaire sur la variabilité potentielle des résultats, aidant ainsi les décideurs à faire des choix mieux informés.

Les trois prochains chapitres présentent les analyses coûts-avantages réalisées pour chacun des segments à l'étude en se référant aux méthodologies et hypothèses précédemment énoncées dans ce chapitre.



5. SECTEUR LA GRAVE

5.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SECTEUR

Le secteur La Grave s'étend sur environ 1,5 km de la falaise rocheuse au centre de l'anse à Painchaud (la butte à Napoléon) jusqu'à la route 199 se rendant au port de pêche de Havre-Aubert. Ce secteur a été initialement découpé en 5 segments en fonction d'un certain nombre de critères dont le régime hydrosédimentaire, le type de côte, le degré d'artificialisation de la côte et le cadre bâti. La figure 5.1 présente les 5 segments ayant été analysés initialement le long du littoral du secteur La Grave.

Suite à cette analyse préliminaire, 4 segments sur 5 ont été omis de l'ACA. Ces segments et les raisons pour lesquelles ils n'ont pas été retenus sont indiqués au tableau 5.1.

Ainsi, dans le secteur La Grave, seul un segment est retenu aux fins de l'ACA. Il s'agit du segment qui couvre le site patrimonial de La Grave, soit le segment 3 de l'analyse préliminaire. Ce segment est en fait un tombolo qui s'étend côté mer sur 440 m de côtes dont 40 % sont artificialisées par des enrochements et des blocs de béton.



Figure 5.1 – Image satellite du secteur La Grave

La dérive littorale dominante transporte les sédiments de l'ouest vers l'est. La partie côté mer du tombolo est soumise à de fortes vagues. Selon les données du suivi de l'érosion des berges du LDGIZC (2015), la côte est de manière générale plutôt stable.

Tableau 5.1 – Segments du secteur La Grave omis de l'ACA

Segment	Localisation	Caractéristiques	Raisons de l'omission
Segment 1	Segment de 170 m constitué de falaises rocheuses s'étendant du milieu de l'anse à Painchaud (butte de Napoléon) jusqu'au mur du MTQ.	Falaises rocheuses de plus de 10 m de hauteur. Taux d'érosion très faible de -0,12 m/an.	Aucun enjeu. Aucun actif touché par l'érosion sur l'horizon temporel retenu.
Segment 2	De la fin du segment 1, sur une distance de 180 m, tout le long du mur en place jusqu'au secteur historique.	Falaises rocheuses à 100 %, entièrement artificialisées. Le mur qui longe la route 199 jusqu'à La Grave a été mis en place par le MTQ en 2000. La route est sise à environ 4 m d'altitude derrière le mur.	Aucun enjeu. Le mur devrait protéger la route jusqu'en 2050. À terme, le ministère des Transports devrait réinvestir pour protéger la route nationale, entre autres, pour maintenir l'accès aux bâtiments et infrastructures plus à l'est.
Segment 4	Segment de 322 m s'étendant de la falaise rocheuse à l'est de La Grave jusqu'à la pointe Shea.	Falaises rocheuses d'environ 8 m de hauteur (60 %) et falaises rocheuses à sommet meuble (40 %). Quelques encoches à l'endroit des zones meubles. Aucune mesure de protection.	Aucun enjeu. Aucun actif à risque. Les bâtiments sont suffisamment éloignés et non exposés d'ici 2065.
Segment 5	Segment de 442 m de côte rocheuse reliant le secteur patrimonial de La Grave au port de pêche de Havre-Aubert et aux étangs aérés situés sur la pointe aux Poux	Falaises rocheuses au haut desquelles se trouve la route nationale (199).	Sur l'horizon temporel retenu, l'érosion conduira à la perte de la route d'accès au port de pêche et à l'usine d'épuration. Compte tenu du peu de temps et de données disponibles pour estimer les pertes potentielles, l'équipe de projet a fait le choix de ne pas retenir ce segment et de concentrer ses recherches sur la portion historique du secteur La Grave. De plus, il est fort probable que le Ministère des Transports du Québec et la municipalité choisiront de protéger ce segment quels que soit les résultats de l'ACA, puisque les enjeux économiques et d'assainissement sont majeurs.

Les taux de déplacement ont varié entre -0,70 et +0,02 m/an entre 2005 et 2012. Toutefois, des reculs majeurs peuvent survenir ponctuellement lors des hauts niveaux d'eau. Ainsi, des reculs de -6,0 m et de -9,6 m furent mesurés en 2010-2011. Du côté intérieur du tombolo, les taux de déplacement sont pratiquement nuls et sont attribuables à des modifications anthropiques ponctuelles.

Ainsi, du côté mer, le taux de recul probable projeté est de -0,23 m/an (1963-1983) et le recul événementiel de -16,9 m. Du côté intérieur, le taux de recul probable est nul alors que le recul événementiel estimé est de -2,4 m.

Le village de La Grave constitue le site historique, culturel et touristique le plus important des Îles-de-la-Madeleine. Ce site demeure très fragile aux aléas côtiers.

À l'époque, les premiers habitants avaient une parfaite compréhension du milieu dans lequel ils se sont installés puisque le village a été érigé au départ dans une zone d'accumulation. Plusieurs des bâtiments présents sur le site étaient construits sur pilotis ou sans fondation et donc étaient peu endommagés lors des tempêtes. Au fil du temps, la vocation du site s'est modifiée, passant de la pêche au tourisme et certains propriétaires ont rénové, construit des solages et mis en place des structures de protection plus réfléchies, afin de contrer l'érosion et la submersion sur leur terrain.

5.1.1 Problématique

La problématique dans ce segment est liée à la fois à l'érosion et à la submersion. En effet, l'artificialisation de la côte a entraîné une diminution progressive des dépôts de sédiments ce qui a réduit la largeur et l'épaisseur de la plage accentuant la vulnérabilité de tout le segment. Lors des événements de tempêtes, l'eau s'écoule de part et d'autre du tombolo et certains bâtiments sont littéralement attaqués par les vagues qui déferlent.

Avec les changements dans le régime des tempêtes et la hausse du niveau marin attendue, la fréquence des événements de submersion sur le tombolo devrait s'accroître et l'érosion devrait s'accroître. Dans ce secteur, les actifs principaux sont majoritairement des bâtiments commerciaux et quelques bâtiments résidentiels.

5.1.2 Option de non-intervention

L'option de non-intervention constitue le scénario de référence de l'ACA et suppose que la situation actuelle évoluera au cours des 50 prochaines années sans qu'aucune option d'adaptation ne soit mise en place. La non-intervention implique que le segment subirait des épisodes de submersion pouvant endommager les bâtiments à cet endroit, ceux-ci ayant une faible élévation ou étant situés très près de la rive. Elle implique également un recul graduel de la côte à un rythme annuel de -0,23 m/an.

Plus concrètement, il y aura des pertes de terrain et certains bâtiments se retrouveront exposés à mesure que la côte reculera. Des bâtiments à risque sont localisés tout le long du segment. Il est supposé que ces derniers seront démolis lorsque la côte les touchera en leur point le plus près du rivage, puisqu'il ne sera plus sécuritaire de les exploiter commercialement ou d'y habiter. Pour les bâtiments n'étant pas exposés à l'érosion à l'horizon 2065, mais qui connaîtront des problèmes de submersion, il est supposé que les propriétaires répareront les dommages à chaque épisode de submersion. Ainsi, dans l'option de non-intervention, la submersion n'entraîne pas la démolition du bâtiment, elle cause plutôt des dommages en fonction des hauteurs d'eau atteintes lors des épisodes de tempêtes. Cette option est cohérente avec la stratégie actuelle qui prévaut où les propriétaires encaissent les assauts de la mer lors des grandes tempêtes d'automne et d'hiver et réparent ensuite leurs installations en prévision de la saison touristique.

5.1.3 Options d'adaptation

Les options d'adaptation étudiées pour ce segment visent à réduire les impacts de l'érosion et des épisodes de submersion sur l'environnement bâti. Considérant le type de côte de ce segment, les options d'adaptation envisagées sont la recharge de plage en gravier, le riperap, l'enrochement et l'immunisation combinée à la relocalisation stratégique des bâtiments. Les structures d'ingénierie proposées ont été développées par Consultants Ropars (Ropars, 2016) sur la base des informations hydrodynamiques, géomorphologiques et topographiques du site de La Grave. Toutefois, une étude plus détaillée devra être réalisée pour valider la faisabilité technique de ces options et leur conception.

a) Recharge de plage en gravier

La protection du site historique de La Grave contre les épisodes de submersion et d'érosion peut se faire à l'aide d'une recharge de plage en gravier. Cette solution de protection de berge renforcerait le cordon dunaire qui constitue La Grave à cet endroit. Ce type de protection en gravier plutôt qu'en sable permet de réduire les quantités de matériel nécessaires pour une recharge de plage, puisque les sédiments seraient moins mobiles ce qui réduirait l'intensité du transit sédimentaire. La granulométrie suggérée correspond à un diamètre médian de 15 mm. La figure 5.2 illustre la coupe-type théorique de la recharge de plage recommandée pour le segment.

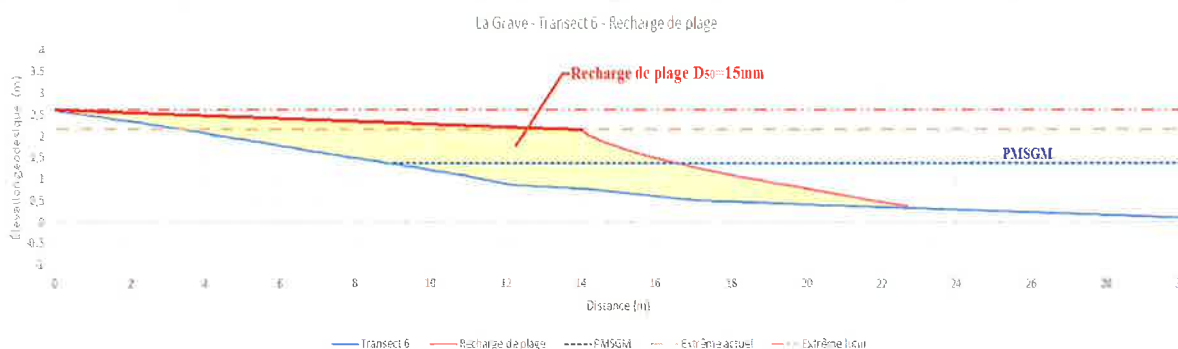


Figure 5.2 – Coupe-type d'une recharge de plage en gravier pour le segment de La Grave

L'élévation recommandée de la crête de plage est de 2,2 m au-dessus du NMM, ce qui ferait en sorte que l'élévation finale de la recharge de plage serait plus élevée que certaines portions de la route actuelle.

À moyen et long termes, il faudrait effectuer des recharges de plage récurrentes. Un rechargement de la plage en gravier devrait être réalisé tous les 7 ans suite à la mise en place de l'ouvrage, soit six recharges sur un horizon de 50 ans. La première recharge nécessiterait 50 % de la quantité initiale de gravier déchargé lors de la réalisation de l'ouvrage, tandis que les autres recharges exigeraient seulement 20 % de la quantité initiale.

Les matériaux de recharge pourraient devoir être importés de l'extérieur des Îles-de-la-Madeleine à cause de la granulométrie visée (gravier) et de la qualité de matériaux

requis pour obtenir une durabilité minimale conforme à la durée de vie de conception de l'ouvrage. La provenance du matériel de recharge va évidemment influencer le coût de cette option.

b) Riprap

Le riprap est constitué de pierres de carrière de différentes grosseurs disposées en vrac sur la côte avec une pente de 3/1. La pente adoucie, en comparaison à un enrochement classique, permet d'absorber et de diffuser l'énergie des vagues avant qu'elles n'atteignent le rivage. Vu cette pente, la hauteur atteinte par le jet de rive (runup), lorsque les vagues frappent l'ouvrage, est inférieure à celle atteinte en présence d'un enrochement. Par conséquent, l'élévation nécessaire de la crête est plus faible pour un riprap que pour un enrochement. À La Grave, l'élévation moyenne de la crête du riprap devrait être de 3 m au-dessus du NMM.

Ce concept de protection peut être mis en place avec des pierres qui se trouvent dans les carrières des Îles-de-la-Madeleine. Il est cependant requis de sélectionner la meilleure qualité de pierres disponibles dans ces carrières. Le riprap nécessite un entretien régulier par une recharge partielle de matériaux. Sur l'horizon d'étude, il est prévu que des recharges aux 15 ans seraient réalisées, la première nécessitant 40 % du matériel de la recharge initiale, la seconde 20 % et la troisième 15 %.

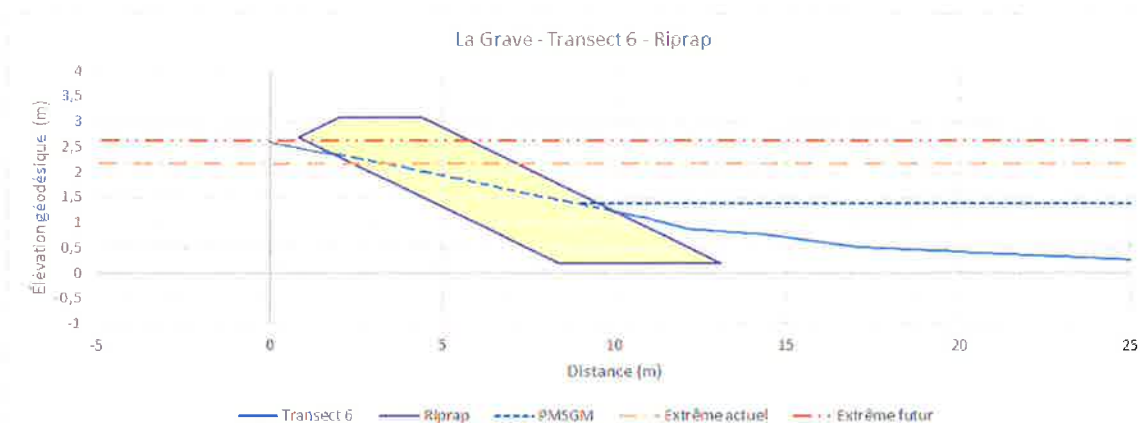


Figure 5.3 – Coupe- type d'un riprap pour le segment de La Grave

c) Enrochement

Une protection de la berge en enrochement est également envisagée dans le segment de La Grave. La conception de cet ouvrage suggère un enrochement sur 2 couches avec une pente de 1,5/1. La couche supérieure serait composée de pierres de carapace de 0,5 à 1,0 tonne (650 à 850 mm) qui permettraient de résister aussi bien aux impacts de la glace et des vagues. La couche inférieure serait composée de pierres de 50 à 100 kg (300 à 400 mm) sur une épaisseur de 0,65 m. Le noyau de cette protection consisterait en du tout-venant de carrière.

La figure 5.4 illustre la coupe-type de l'enrochement qui est recommandée pour le segment de La Grave. Ce concept d'enrochement exige une qualité de pierre qui ne se retrouve pas dans les carrières des Îles, ce qui augmente significativement le coût des matériaux requis. Quant à l'entretien, en supposant que les pierres installées respectent tous les critères de qualité requis pour ce type d'ouvrage et que l'installation soit réalisée selon les règles de l'art, aucune intervention supplémentaire n'est prévue sur l'horizon d'étude.

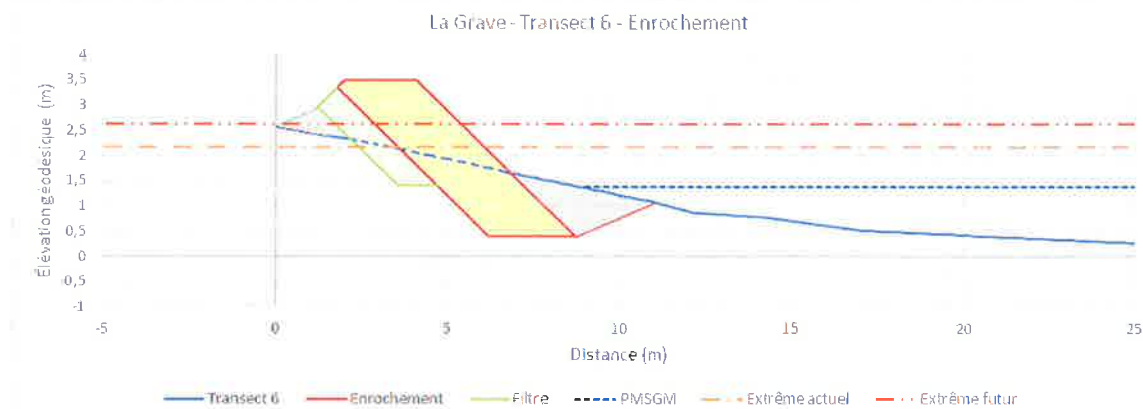


Figure 5.4 – Coupe- type d'un enrochement pour le segment de La Grave

d) Immunisation combinée à la relocalisation stratégique

L'immunisation des bâtiments est envisagée dès que le niveau d'eau extrême engendré par une tempête de récurrence 20 ans peut atteindre le rez-de-chaussée d'un bâtiment. Cette option consiste essentiellement à remblayer le terrain à une élévation suffisante

ou à placer le bâtiment sur pilotis afin qu'il ne puisse plus subir de dégâts liés à la submersion.

Quand le bâtiment est exposé à l'érosion, c'est-à-dire lorsque le recul du trait de côte atteint le bâtiment, celui-ci est déménagé sur un autre terrain. Compte tenu de la valeur historique, culturelle et touristique de La Grave, les bâtiments seront relocalisés le plus tard possible, soit seulement lorsque le trait de côte atteindra le bâtiment. Ici, aucune marge de sécurité (généralement 5 mètres) n'est employée, car le type de côte sur lequel sont sis les bâtiments à La Grave ne pose aucune contrainte de sécurité pour permettre à la machinerie d'opérer.

Dans le segment La Grave, un seul bâtiment est à immuniser avant d'être touché par l'érosion. Afin de maintenir l'intégrité du site le plus longtemps possible, ce bâtiment sera immunisé puis relocalisé une fois exposé à l'érosion.

5.1.4 Impacts appréhendés

Ce segment étant un site patrimonial d'importance, il importe que les interventions sur le littoral répondent à des impératifs de protection et soient conçues de manière à minimiser les impacts négatifs appréhendés.

Les impacts appréhendés sont de deux types. D'une part, il y a les impacts associés aux aléas côtiers (l'érosion et la submersion), lesquels comprennent essentiellement l'ensemble des dommages causés aux bâtiments, infrastructures et aux terrains. D'autre part, il y a les impacts de nature économique, environnementale ou sociale découlant de la non-intervention et des options d'adaptation proposées.

Le tableau 5.2 indique le type d'impacts appréhendés selon les 5 options étudiées dans le cadre de l'analyse coûts-avantages du segment La Grave, soit la non-intervention (NI), la recharge de plage en gravier (RP), le riprap (RR), l'enrochement (E) ainsi que l'immunisation combinée à la relocalisation stratégique (IRS).

Tableau 5.2 – Impacts appréhendés selon les options d'adaptation – Segment La Grave

Type d'impacts	Impact appréhendé	NI	RP	RR	E	IRS
Impacts liés à l'érosion/submersion	Pertes physiques de terrain	X				X
	Dommages ou pertes de bâtiments résidentiels et commerciaux	X				X
	Dommages aux infrastructures	X				X
Impacts économiques	Perte des retombées économiques de l'achalandage touristique	X				X
Impacts sociaux	Modification de la valeur d'usage pour les touristes	X	X	X	X	X
	Modification de la valeur du site de La Grave pour les résidents	X	X	X	X	X
	Qualité de vie (anxiété, insécurité, dérangement)	X				X
	Modification de la vue ou de l'accès à la mer	X				X

En matière d'impacts liés à l'érosion et à la submersion, la non-intervention implique des pertes de terrain, la démolition de bâtiments et des dommages aux bâtiments et infrastructures publiques. La recharge de plage en gravier, le riprap et l'enrochement permettent de prévenir ces dommages pour les 50 prochaines années. Il n'y a donc pas d'impact découlant de l'érosion et de la submersion pour ces options une fois qu'elles seront mises en place. L'option d'immunisation et de relocalisation stratégique, quant à elle, bien qu'elle ne freine pas les processus d'érosion et de submersion, réduit les dommages aux bâtiments qui y sont liés.

Les impacts économiques concernent la non-intervention et l'immunisation combinée à la relocalisation stratégique. Ceux-ci sont causés par des variations de comportements touristiques (durée de séjour aux Îles-de-la-Madeleine) suite à la transformation progressive du cadre bâti de La Grave qui sera peu à peu détruit par les aléas d'érosion

et de submersion. Les options d'adaptation consolidant le cordon littoral permettent d'éviter ces pertes.

Au niveau des enjeux sociaux, la perte partielle du site historique de La Grave entraîne une perte de la valeur d'usage accordée au site par les touristes et les résidents. La valeur d'usage correspond à la valeur accordée par chacun des visiteurs lorsqu'ils se rendent au site patrimonial de La Grave pour profiter de l'atmosphère, des commerces et du paysage. Cette valeur sera diminuée par la perte partielle du site et sera également modifiée par chacune des options d'adaptation qui viendra modifier le littoral.

De plus, au niveau des enjeux sociaux, il est anticipé que la non-intervention et la relocalisation stratégique priveraient les résidents relocalisés d'une vue et/ou d'un accès à la mer. Également, l'insécurité associée à posséder une résidence ou un commerce exposé aux aléas des tempêtes et pouvant donc subir régulièrement des dommages est un autre facteur d'ordre social. Cette situation réduit la qualité de vie des propriétaires.

Aucun impact environnemental n'a été identifié à moyen ou long terme dans ce segment. Les consultations effectuées auprès d'experts n'ont pas permis d'identifier d'enjeux environnementaux nécessitant d'être pris en compte. La réalisation d'une étude d'impact environnemental est toutefois considérée dans le coût des options. Une telle étude permettra de déterminer avec plus de précision si des impacts environnementaux sont présents, qu'ils soient de nature temporaire ou permanente.

5.2 ESTIMATION MONÉTAIRE DES IMPACTS

5.2.1 Impacts liés à l'érosion et à la submersion

Les coûts de l'érosion et de la submersion associés à la non-intervention correspondent globalement aux avantages qu'offrent la majorité des options d'adaptation. À moins d'avis contraire, tous les impacts présentés dans les paragraphes qui suivent sont associés à la situation de non-intervention.

a) Pertes physiques de terrain

Des pertes de terrain sont prévues annuellement en raison de l'érosion dans le segment La Grave. La superficie perdue est calculée en se basant sur le taux d'érosion probable

fourni par le LDGIZC, soit -23 cm par année. La valeur économique des terrains a été estimée en se référant au rôle d'évaluation 2014 des Îles-de-la-Madeleine, lequel est représentatif des conditions de marché de 2012.

Les pertes de terrain sont comptabilisées jusqu'à ce que le bâtiment principal d'une unité d'évaluation soit considéré exposé. À partir de ce moment, la valeur du terrain restant est considérée perdue et les pertes de terrain des années subséquentes ne sont plus comptabilisées, car il est considéré non constructible. Il est à noter que la valeur résiduelle d'un terrain, lorsqu'il est considéré non constructible, est déterminée en soustrayant de la valeur initiale du terrain la valeur des pertes annuelles déjà estimées en lien à l'érosion.

Comme mentionné précédemment, des pertes de terrain sont comptabilisées pour l'option de non-intervention de même que pour l'immunisation combinée à la relocalisation stratégique des bâtiments. Des pertes liées à l'érosion sont aussi comptabilisées pour la recharge de plage, le riprap et l'enrochement, mais seulement pour la période précédant leur réalisation, c'est-à-dire avant 2018.

b) Dommages ou pertes de bâtiments résidentiels et commerciaux

Les pertes de bâtiments causés par l'érosion ont été comptabilisées en fonction de l'exposition des bâtiments. Cette exposition est constatée une fois que le point du bâtiment le plus près de la côte est touché par le recul de la ligne de rivage. Normalement, une fois que le bâtiment est exposé, celui-ci est considéré comme une perte totale et la valeur inscrite au rôle d'évaluation est utilisée pour comptabiliser cette perte. Si aucun autre bâtiment résidentiel n'est présent sur le lot, le terrain est également considéré comme non constructible et perd sa valeur résiduelle (valeur totale du terrain moins les pertes annuelles de terrain enregistrées). Les pertes de bâtiments reliées à l'érosion sont seulement constatées en cas de non-intervention.

Sur un horizon de 50 ans, il est estimé que 14 bâtiments seront touchés par l'érosion dans le segment La Grave dont deux dès 2015.

Les dommages aux bâtiments dus aux épisodes de submersion sont estimés grâce aux courbes de hauteurs d'eau/dommages développées par Bonnifait (2005) et ce, pour

chaque classe d'événement retenue (2, 5, 10, 20 et 30 ans) et pour chaque type de bâtiments. Ces courbes de dommages permettent ensuite de calculer un dommage annuel moyen (DAM) pour chaque bâtiment. Celui-ci est constant à travers le temps à l'intérieur des trois horizons de projection des niveaux marins soit 2015-2029, 2030-2054 et 2055-2064. Pour chacun de ces horizons, le DAM est calculé afin de tenir compte de la hausse du niveau marin prévue dans la zone. L'annexe A décrit plus en détail le calcul des dommages de submersion.

Afin de ne pas comptabiliser deux fois des dommages dus à l'érosion et à la submersion, dès qu'une résidence est exposée à l'érosion, le DAM n'est plus comptabilisé, car la résidence est alors considérée comme perte totale.

Selon les calculs réalisés, 24 bâtiments sont vulnérables à la submersion (rez-de-chaussée inférieur au niveau d'eau 20 ans), soit un peu plus de la moitié des bâtiments localisés dans ce segment, sur l'horizon temporel retenu.

Le tableau 5.3 résume le nombre de bâtiments affectés par les aléas d'érosion et de submersion dans le segment de La Grave. Au total, 31 bâtiments sont soit touchés par l'érosion ou la submersion au cours des 50 prochaines années. Ces bâtiments sont majoritairement commerciaux (74 %).

Tableau 5.3 – Nombre de bâtiments affectés par l'érosion ou la submersion – La Grave

Type de bâtiment	Érosion* seulement	Submersion seulement	Érosion* et submersion	Total
Résidentiel principal	2	5	1	8
Commercial	5	12	6	23
Total	7	17	7	31

*Érosion : les bâtiments sont affectés par l'érosion lorsque la ligne de rivage touche au bâtiment à l'intérieur de l'horizon de 50 ans.

Les dommages aux bâtiments liés aux épisodes de submersion sont constatés pour la non-intervention et pour l'option de l'immunisation combinée à la relocalisation stratégique. Les autres options d'adaptation viennent freiner la submersion du côté mer en assurant une protection contre les ondes de tempêtes et contre le jet de rive.

Cependant, les options n'interviennent pas du côté lagune, il est ainsi possible que les surcotes de tempête soient suffisamment importantes pour submerger la zone. Des dommages résiduels de submersion ont donc été calculés pour chacune des options en projetant les niveaux d'eau extrêmes sans jet de rive.

Pour ce qui est de l'option d'immunisation combinée à la relocalisation stratégique, des dommages aux bâtiments non immunisés sont enregistrés lorsqu'un bâtiment est touché par des épisodes de submersion avant qu'il ne le soit par l'érosion sur l'horizon de 50 ans.

c) Dommages ou pertes d'infrastructures publiques

La tempête de décembre 2010 a engendré un épisode de submersion qui a nécessité une opération de nettoyage, de remise en état des lieux de même que la restauration du profil de la plage et ce, pour un montant total d'environ 20 000 \$. C'est sur cette base que le coût des dommages aux infrastructures lors de tempête a été établi sur la période d'analyse.

Pour chaque événement de niveau d'eau extrême supérieur au niveau atteint lors de la tempête de 2010, il est supposé que des coûts de remise en état des lieux seraient encourus par la municipalité. Les dommages de tempêtes sont ensuite multipliés par la probabilité d'occurrence pour calculer le DAM associé aux dommages aux infrastructures publiques. Cette méthode est similaire au calcul de dommages pour les bâtiments.

5.2.2 Impacts économiques

Les impacts économiques sont liés à la perte du site historique de La Grave, du moins tel qu'on le connaît actuellement. Cette perte correspond au changement de comportement des touristes dû à leur appréciation du site, lesquels pourraient venir moins longtemps aux Îles-de-la-Madeleine advenant une détérioration du site de La Grave. Elle correspond à la perte des retombées économiques (dépenses d'hébergement et autres dépenses) due à une modification de comportement (nombre de visites et durée). Elle a été calculée à partir des résultats du sondage réalisé sur le

site par l'équipe d'Ouranos au cours de l'été 2015. Voir l'annexe D pour le détail du calcul.

La non-intervention et l'immunisation combinée à la relocalisation stratégique entraînent une perte partielle du site historique qui a été monétisée en calculant la perte économique afférente. Cette perte est comptabilisée dans le temps en fonction de la proportion des bâtiments qui devraient être relocalisés annuellement par rapport aux 39 bâtiments localisés actuellement dans le segment La Grave. Ainsi, la perte économique s'accroît progressivement à mesure que davantage de bâtiments sont relocalisés en raison de l'érosion. Pour les autres options (RP, RR et E), la perte d'achalandage touristique n'est considérée que pour les années précédant la mise en place des structures.

5.2.3 Impacts sociaux

a) *Perte ou gain de vue ou d'accès à la mer*

Afin d'établir la valeur de la vue et d'accès à la mer, les données provenant des évaluations de plusieurs bâtiments et terrains résidentiels, réalisées par une firme d'évaluateurs agréés de la région gaspésienne, ont été analysées. Elles ont permis de comparer des terrains de plusieurs municipalités, dont Maria, New Richmond, Carleton-sur-Mer, etc. Une régression linéaire simple a permis d'extraire l'influence de la vue sur la mer et de l'accès à la mer sur le prix des terrains en contrôlant les autres facteurs pouvant affecter le prix des terrains tels la proximité à des services publics ou à des commerces. En utilisant cette méthode, les primes moyennes de vue sur la mer et d'accès à la mer obtenues sont respectivement de 8 797 \$ et 19 131 \$. Ainsi, dans les villes à l'étude, un terrain permettant d'avoir un accès à la mer, toutes choses étant égales par ailleurs, coûterait 19 000 \$ de plus qu'un terrain n'offrant pas un tel accès. De la même manière, un terrain offrant une vue sur la mer, indépendamment de l'accès à la mer, vaudrait environ 8 800 \$ de plus qu'un terrain sans vue sur la mer.

Sur l'horizon temporel considéré, l'érosion touchera 14 bâtiments dans le segment La Grave, lesquels seront déplacés et perdront ainsi leur vue et accès à la mer.

b) Qualité de vie

L'influence des tempêtes sur la qualité de vie des gens vivant dans les zones à risque est une problématique qui est bien documentée (voir notamment Brisson et Richardson, 2009). Cependant, il est extrêmement difficile de chiffrer la valeur de cette perte de jouissance en termes économiques. Ainsi, dans le cadre de cette analyse, cet aspect est traité qualitativement en soulignant que toutes les options d'adaptation étudiées devraient, comparées à la non-intervention, améliorer la qualité de vie des résidents en diminuant l'insécurité.

c) Modification ou perte de la valeur d'usage de La Grave pour les touristes et les résidents

Les options de non-intervention et d'immunisation combinée à la relocalisation stratégique supposent que l'érosion entrainera la perte graduelle d'une partie importante du cadre bâti de La Grave.

Les résultats du sondage ont permis d'établir une valeur d'usage du segment La Grave. Cette valeur d'usage a été calculée de manière différente pour les touristes et pour les résidents.

- 1) La valeur d'usage des touristes est égale à la volonté de payer pour accéder au site multiplié par le nombre de fois que les touristes visitent le site de La Grave en moyenne durant leur séjour. Selon les hypothèses retenues, le nombre de touristes visitant le site est de 47 885 par année en moyenne.
- 2) La valeur d'usage accordée par les résidents, quant à elle, correspond à la volonté de payer pour préserver le site. Cette valeur comprend donc la valeur patrimoniale, culturelle de même que la valeur d'usage anticipée du site au courant des prochaines années. Le nombre de résidents correspond ici au nombre d'habitants adultes des Îles-de-la-Madeleine selon le recensement de 2011, soit 10 565 individus.

Pour l'option de non-intervention, la perte de valeur d'usage est proportionnelle au pourcentage de bâtiments perdus à La Grave (39 bâtiments au total). Ainsi, la perte s'accroît progressivement sur l'horizon temporel considéré. Plus spécifiquement, pour

les touristes, la valeur d'usage annuelle totale est multipliée par la proportion de bâtiments perdus pour calculer la perte de valeur d'usage annuelle. Pour les résidents, la perte de valeur est également calculée en proportion du nombre de bâtiments perdus. Cette valeur n'est pas calculée sur une base annuelle, mais plutôt sur la valeur d'usage totale future exprimée par les résidents.

Pour les autres options (RP, RR et E), la valeur d'usage du segment La Grave varie proportionnellement à l'achalandage (fréquence et durée des visites) de ce dernier. Les structures d'ingénierie (recharge de plage, rirrap et enrochement) prévues sur le segment entraînent une modification de l'usage de cette dernière pour les résidents. Dans le cas de la recharge de plage, l'élargissement de la plage rend encore plus attrayant le site historique, tandis que c'est le contraire pour l'enrochement et le rirrap. Le tableau 5.4 résume les variations de valeur d'usage en fonction des différentes options d'adaptation.

Tableau 5.4 – Variation de valeur d'usage du site de La Grave en fonction des options d'adaptation

Options d'adaptation	Variation de la valeur d'usage	
	Résidents	Touristes
Non-intervention	(167 248 \$)	(6 776 732 \$)
Recharge de plage	(34 237 \$)	172 805 \$
Enrochement	(64 205 \$)	(1 975 502 \$)
Rirrap	(64 205 \$)	(1 975 502 \$)
Immunisation combinée à la relocalisation stratégique	(167 248 \$)	(6 776 732 \$)

Le détail des calculs effectués pour déterminer la valeur d'usage de La Grave pour les résidents et les touristes est présenté à l'annexe D.

5.2.4 Estimation du coût de la non-intervention et des options d'adaptation

L'option de non-intervention et les options d'adaptation envisagées impliquent toutes des coûts de différentes envergures. Ces derniers ont été estimés à partir de consultations réalisées auprès d'experts dans le domaine.

La relocalisation stratégique consiste à déplacer un bâtiment en s'éloignant du bord de mer, sur le même terrain s'il y a de la place, ou sur un nouveau terrain en le transportant sur la route (ce qui est le cas à La Grave). Les coûts de déménagement des bâtiments sont des coûts génériques fournis par la firme de déménagement Héneault et Gosselin Inc. Les prix fournis varient entre 1 300 \$ et 2 100 \$ du mètre linéaire selon les différents revêtements de bâtiments et la nature de la relocalisation (sur le même terrain ou sur un autre terrain). Voir l'annexe C pour les détails des coûts employés.

Ces coûts unitaires ont été appliqués à chacun des bâtiments nécessitant d'être relocalisé en fonction de leur revêtement extérieur respectif. S'ajoute à ces coûts, le coût de gestion des fils sur le trajet de relocalisation.

Les coûts de relocalisation stratégique sur d'autres terrains comprennent également l'aménagement de services dans les quartiers qui accueilleront les bâtiments déménagés. Ces coûts sont estimés à un peu plus de 30 000 \$ par nouveau terrain aménagé comprenant le raccordement aux égouts et à l'aqueduc de même que la route d'accès.

L'immunisation des bâtiments touchés par des épisodes de submersion, mais qui ne seraient pas touchés par l'érosion, consiste à soulever et à mettre sur pilotis les bâtiments à risque. Dans le segment La Grave, un seul bâtiment devra être immunisé avant d'être relocalisé. Les coûts de l'immunisation sont égaux aux coûts de déplacement auxquels s'ajoutent les coûts de déconnexion des fils d'un bâtiment qui sont de 3 416 \$.

Dans le cas de la recharge de plage en gravier, du riprap et de l'enrochement, les coûts ont été établis sur la base des quantités de matériaux estimées par Consultants Ropars (Ropars, 2016) et des prix unitaires présentés dans le rapport de Roche (Roche, 2011). Le coût d'aménagement de la recharge de plage en gravier est évalué à 1 624 \$ du

mètre linéaire. Une recharge de plage de ce type nécessite des recharges d'entretien tous les 7 ans. Ainsi, sur un horizon de 50 ans, 6 recharges additionnelles sont requises. La première recharge exigerait 50 % du matériel initial et les autres 20 % seulement. Le coût de la recharge initiale et des recharges d'entretien est détaillé au tableau 5.5.

Tableau 5.5 – Coûts de la recharge de plage en gravier et des recharges d'entretien

Année	Coûts de la recharge
2018	714 560 \$
2025	400 154 \$
2032	160 061 \$
2039	160 061 \$
2046	160 061 \$
2053	160 061 \$
2060	160 061 \$

Le coût d'aménagement du riprap est estimé à 1 261 \$ du mètre linéaire. À ce montant, il faut ajouter 7,5 % de frais d'ingénierie et 7,5 % pour les études préparatoires durant les deux années précédant la construction. Les coûts de construction, les frais d'ingénierie et les coûts des études incluent 20 % de frais de contingence. De plus, cette option requiert une recharge tous les 15 ans, soit 3 recharges sur la durée de vie utile de l'ouvrage. La première recharge nécessiterait 40 % de la quantité initiale des matériaux utilisés, tandis que les deuxième et troisième recharges exigeraient respectivement 20 et 15 % de la quantité initiale de matériaux.

L'enrochement, pour sa part, entraîne des coûts qui sont évalués à 1 311 355 \$ sur l'ensemble de l'horizon d'étude. Ces coûts incluent la mise en place de l'enrochement, de même que les coûts des études préparatoires. L'enrochement n'entraîne pas de coûts d'entretien sur la période d'étude.

Il est important de mentionner que la non-intervention a également un coût de mise en œuvre puisqu'elle suppose que les bâtiments exposés seront démolis. Le coût de

démolition des bâtiments a été estimé à 54 \$ le mètre carré en plus de coûts fixes de 3 240 \$ pour l'enlèvement des fondations.

5.3 ANALYSE COÛTS-AVANTAGES

Cette section présente l'ensemble des coûts et avantages estimés sur un horizon temporel de 50 ans pour l'option de non-intervention et chacune des options d'adaptation envisagées dans le segment La Grave. Une comparaison des coûts et des avantages est par la suite effectuée dans le cadre du calcul de la VAN afin de comparer la performance économique de chaque option.

5.3.1 Calcul des coûts sur 50 ans

Les coûts sont présentés pour la non-intervention et chacune des options d'adaptation. Ces coûts sont actualisés au taux de 4 % sur la période 2015-2064.

a) Coûts liés à la non-intervention

Les coûts liés à la non-intervention concernent essentiellement les dommages encourus par la submersion de même que par l'érosion. Puisque la méthodologie de calcul des dommages de submersion est basée sur une approche par analyse de risque, les dommages sont répartis sur l'ensemble de la période en s'accroissant en 2030 et 2055 en raison de la hausse prévue du niveau marin.

Plus précisément, le dommage annuel moyen (DAM) associé à la submersion varie entre 58 735 \$ et 119 602 \$ sur l'horizon d'étude. Ces dommages concernent 24 bâtiments et représentent une somme actualisée de 1,76 M\$ sur l'horizon 2015-2064.

Les dommages d'érosion s'appliquent, quant à eux, de manière ponctuelle à mesure que les bâtiments sont exposés à l'érosion. De 2015 à 2064, 14 bâtiments sont exposés à l'érosion, dont deux dès 2015, pour un coût total actualisé de 987 645 \$. La démolition de ces bâtiments coûterait 142 221 \$. Finalement, les pertes de terrain sont calculées annuellement et se chiffrent à 33 693 \$ sur l'ensemble de la période.

Les dommages actualisés liés au nettoyage des débris et à la réfection du profil de plage lors des tempêtes sont estimés à 28 170 \$.

Comme mentionné antérieurement, les impacts économiques concernent la perte associée à une modification du comportement des touristes, si le site devenait de moins en moins attrayant. Au total, sur la période d'analyse, la perte anticipée de revenus touristiques totalise 30 M\$.

Au niveau social, la non-intervention entraîne une perte de vue et d'accès à la mer pour les bâtiments exposés qui seront démolis. La perte monétaire associée à cet élément se chiffre à 234 690 \$. De plus, cette option prévoit la démolition de 14 bâtiments en raison de l'érosion ce qui engendrera une perte de valeur d'usage accordée par les résidents à ce site totalisant 167 248 \$ sur l'horizon à l'étude. La perte de la valeur d'usage (volonté de payer) accordée par les touristes correspond, pour sa part, à 6,78 M\$ sur l'horizon temporel.

Ainsi, en tenant compte de tous ces éléments, l'ensemble des coûts liés à la non-intervention sur une période de 50 ans représente une somme d'environ 40,14 M\$. L'annexe F présente les coûts annuels par catégorie.

b) Coûts liés à la recharge de plage en gravier

Le coût actualisé de mise en place de la recharge de plage en gravier implique à la fois des coûts d'ingénierie, d'études préparatoires, de construction et d'entretien. Ces coûts s'élèvent à 1,49 M\$.

La mise en place de l'ouvrage permet d'éviter tous les coûts liés à l'érosion et à la submersion à partir de 2018 alors que l'ouvrage sera complété. D'ici là, des dommages de 244 952 \$ dus à l'érosion sont à prévoir sur la période d'analyse. En ce qui concerne la problématique de submersion, la recharge de plage permet d'éviter tous les dommages causés par les niveaux d'eau extrêmes provenant du côté mer. Les niveaux d'eau extrêmes du côté de la baie pourraient toutefois causer certains dommages aux bâtiments. Ces dommages résiduels correspondent à 464 646 \$ sur l'ensemble de la période d'étude et ont été calculés en fonction des niveaux d'eau extrêmes sans jet de rive.

La variation de l'achalandage touristique entraînera des pertes économiques au cours de la période de mise en place de l'ouvrage (2015-2017) pour un montant actualisé de

1,04 M\$. Des dommages pour un montant actualisé de 1 400 \$ sont également comptabilisés au cours de cette même période au titre de frais de nettoyage et de remise en état des lieux.

Cette option permettra l'élargissement de la plage existante ce qui rendra plus attrayant le site de La Grave. Les impacts sociaux comprendront une augmentation de la valeur d'usage accordée par les touristes (172 805 \$) et une baisse globale de la valeur pour les résidents (-34 237 \$) sur la période d'analyse.

Les coûts totaux associés à la mise en place de la recharge de plage dans ce segment totalisent donc 3,1 M\$ sur l'horizon temporel retenu. L'annexe F présente les coûts annuels par catégorie.

c) Coûts liés au riprap

La mise en œuvre de l'option du riprap comprend des coûts d'ingénierie, d'études préparatoires et de construction représentant une somme actualisée de 826 553 \$. Des coûts d'entretien totaux de 144 211 \$ sont également associés à la recharge en matériaux grossiers qui doit être effectuée tous les 15 ans, soit à trois reprises pendant la période d'étude.

Tout comme l'option de la recharge de plage en gravier, des dommages dus à l'érosion ont été comptabilisés de 2015 à 2017, avant que l'ouvrage soit finalisé. Les coûts actualisés sur cette période sont de 244 952 \$. Les dommages résiduels de submersion s'élèvent quant à eux à 464 646 \$. Les dommages aux infrastructures publiques reliés aux tempêtes s'élèvent à 1 400 \$ étant donné que ceux-ci seront évités suite à la mise en place de l'ouvrage.

Cette option entrainera cependant une diminution de la largeur de la plage et rendra l'esthétisme de celle-ci moins attrayante. La perte de valeur d'usage qui lui est associée est de 64 205 \$ pour les résidents et de 1,98 M\$ pour les touristes. La perte économique (dépenses d'hébergement et autres dépenses) associée à la diminution de l'achalandage touristique du site totalise 1,04 M\$ sur la période d'analyse.

Ainsi, les coûts totaux actualisés liés à la mise en place du riprap totalisent 4,8 M\$ sur l'horizon temporel 2015-2064. L'annexe F présente les coûts annuels par catégorie.

d) Coûts liés à l'enrochement

Les coûts de mise en œuvre de l'enrochement comprennent des coûts d'ingénierie, d'études préparatoires et de construction représentant une somme actualisée de 1,31 M\$. Aucun entretien n'est nécessaire pour cette option.

Quant aux coûts associés à l'érosion et à la submersion, ils sont les mêmes que ceux de l'option du riprap, soit 244 952 \$ et 464 646 \$ respectivement. Les dommages aux infrastructures publiques reliés aux tempêtes s'élèvent également à 1 400 \$.

La perte de la valeur d'usage associée à l'enrochement est la même que celle associée au riprap, soit 64 205 \$ pour les résidents et de 1,98 M\$ pour les touristes. La perte économique (dépenses d'hébergement et autres dépenses) associée à la diminution de l'achalandage touristique du site totalise, pour sa part, 1,04 M\$ sur la période d'analyse.

Ainsi, les coûts totaux actualisés liés à la mise en place de cette option sont de 5,1 M\$ sur l'horizon temporel 2015-2064 et la différence de coûts entre cette option et l'option du riprap est uniquement dû au coût de mise en œuvre. L'annexe F présente les coûts annuels par catégorie.

e) Coûts liés à l'immunisation combinée à la relocalisation stratégique

De nombreuses composantes des coûts de cette option sont similaires à la non-intervention. C'est le cas, des impacts économiques et sociaux et du coût des dommages dus à l'érosion et aux tempêtes qui totalisent respectivement 30 M\$, 7,18 M\$, 1,02 M\$ et 28 170 \$.

Toutefois, l'immunisation combinée à la relocalisation stratégique entraîne une réduction importante des dommages dus à la submersion grâce à l'immunisation des bâtiments. Ceux-ci totalisent 342 628 \$ comparativement à 1,76 M\$ pour la non-intervention sur l'horizon temporel considéré.

Le coût du riprap totalise 2,02 M\$ et comprend l'immunisation de 24 bâtiments sur l'horizon à l'étude.

Au total, les coûts associés à l'immunisation combinée à la relocalisation stratégique sont de 40,6 M\$ sur l'horizon temporel retenu. L'annexe F présente les coûts annuels par catégorie.

5.3.2. Calcul des avantages sur 50 ans

Les options d'adaptation étudiées dans le segment La Grave ne génèrent pas d'avantages en termes environnementaux ou touristiques. Toutefois, la recharge de plage entraîne une légère augmentation de la valeur d'usage de la plage pour les touristes et les résidents du fait de l'élargissement de cette dernière. Cet avantage est estimé à environ 172 000 \$ sur l'horizon d'étude.

5.3.3. Valeur actualisée nette et comparaison des options

La valeur actualisée nette (VAN) a été calculée pour chacune des options d'adaptation étudiées, en utilisant les coûts quantifiés et monétisés auparavant. La VAN permet, entre autres, de discriminer les options en fonction de leur performance économique, et ce, même s'il y a absence d'avantages directs. La ventilation des VAN de chaque option d'adaptation est présentée au tableau 5.6 et à la figure 5.5.

Aucune des options envisagées ne génère une VAN positive et donc un avantage net pour la société. Toutefois, trois des quatre options ont une VAN inférieure à la VAN de la non-intervention, ce qui démontre qu'il est préférable d'intervenir.

L'absence d'intervention coûterait près de 40 M\$ à la société sur 50 ans, essentiellement en raison des pertes des retombées touristiques liées à une diminution graduelle de l'achalandage au fur et à mesure de la déperdition du bâti dans le segment. L'option de l'immunisation et de la relocalisation stratégique, bien que réduisant les dommages liés à la submersion, est encore plus coûteuse que la non-intervention compte tenu du coût relativement élevé de mise en œuvre.

Tableau 5.6 – Coûts et avantages actualisés des options d'adaptation – Segment La Grave

Coûts annualisés nets	Non-intervention	Recharge de plage en gravier	Enrochement	Riprap	Immunsation combinée à la relocalisation stratégique
Érosion*	(1 021 338 \$)	(244 952 \$)	(244 952 \$)	(244 952 \$)	(1 021 334 \$)
Submersion	(1 761 000 \$)	(464 646 \$)	(464 646 \$)	(464 646 \$)	(342 628 \$)
Coûts des options	(142 221 \$)	(1 494 401 \$)	(1 311 355 \$)	(970 765 \$)	(2 021 360 \$)
Impacts économiques	(30 006 713 \$)	(1 035 522 \$)	(1 035 522 \$)	(1 035 522 \$)	(30 006 713 \$)
Impacts sociaux	(7 178 671 \$)	138 569 \$	(2 039 707 \$)	(2 039 707 \$)	(7 178 671 \$)
Tempêtes	(28 170 \$)	(1 400 \$)	(1 400 \$)	(1 400 \$)	(28 170 \$)
VAN	(40 138 113 \$)	(3 102 352 \$)	(5 097 581 \$)	(4 756 991 \$)	(40 598 876 \$)
Avantages p/r non-intervention		37 035 761 \$	35 040 532 \$	35 381 123 \$	(460 762 \$)
Ratio avantages-coût		25,78	11,41	12,61	0,77

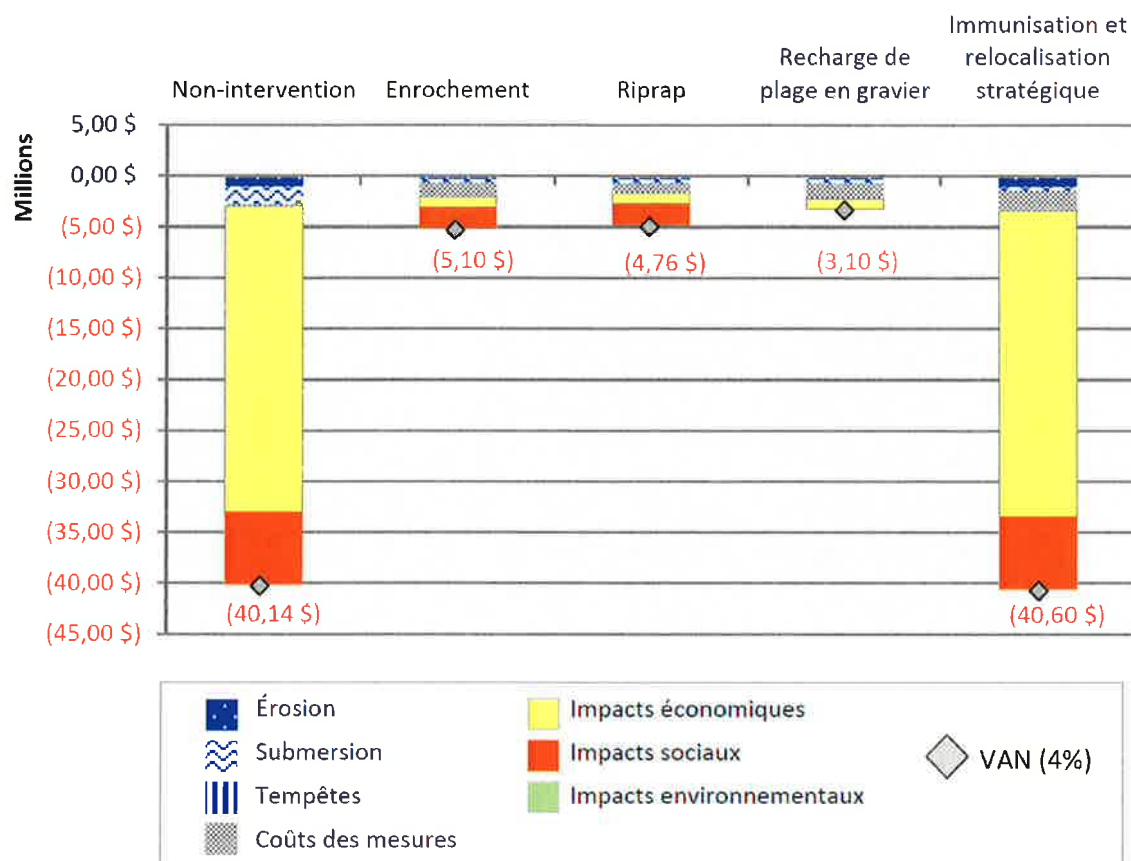


Figure 5.5 – Ventilation des coûts et avantages par option – Segment La Grave

Les structures d'ingénierie présentent un avantage important, de l'ordre de 35 M\$, du fait qu'elles permettent de réduire substantiellement les impacts économiques et sociaux des aléas côtiers une fois mis en place. La recharge en gravier constitue l'option la plus avantageuse parmi les structures d'ingénierie, puisqu'elle entraîne une légère augmentation de la valeur d'usage du segment plutôt qu'une diminution comme les autres options.

Le ratio avantages-coûts favorise également la recharge de plage en gravier. Pour chaque dollar consenti par la société pour protéger La Grave grâce à une recharge de plage en gravier, des avantages de 26 \$ sont attendus.

La figure 5.6 illustre la somme cumulée des avantages nets par rapport à la non-intervention actualisée à un taux de 4 % sur la période 2015-2064. Ce graphique permet de voir que la recharge de plage en gravier constitue l'option la plus avantageuse pour ce segment sur tout l'horizon temporel retenu.

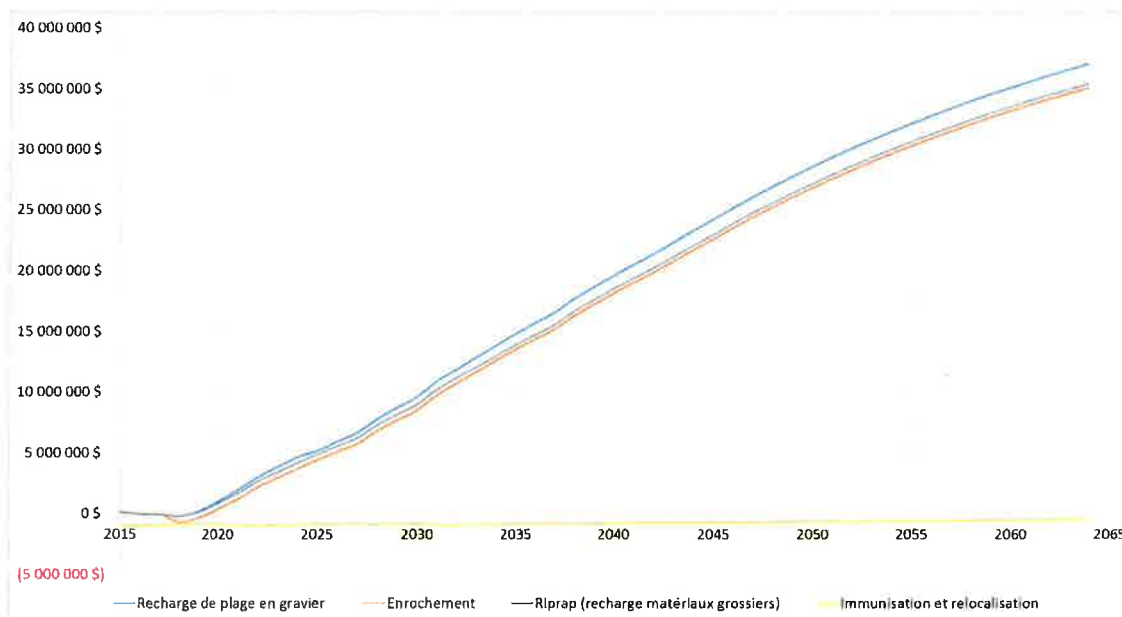


Figure 5.6 – Somme actualisée des avantages nets par rapport à la non-intervention entre 2015 et 2064 – La Grave

5.3.2 Analyse de sensibilité

Cette section présente les VAN obtenues lorsque des hypothèses clés de l'ACA sont modifiées. L'objectif de cette analyse est d'examiner la robustesse de la VAN suite à de telles modifications. Les hypothèses ciblées incluent le taux d'actualisation, les niveaux d'eau extrêmes ainsi que l'ampleur des variations de retombées économiques. Le tableau 5.7 résume les analyses de sensibilité réalisées.

Tableau 5.7 – Paramètres des analyses de sensibilité – Segment La Grave

Paramètre	Variation
Taux d'actualisation	± 2 %
Niveaux d'eau extrêmes	± 50 cm
Retombées économiques	Aucune (- 100 %)

5.3.3 Taux d'actualisation

L'utilisation d'un taux d'actualisation plus faible a pour effet d'accorder une importance relative plus grande aux impacts ayant lieu à des moments plus éloignés dans l'horizon temporel, alors que c'est l'inverse pour un taux d'actualisation plus élevé. Le tableau 5.8 présente les résultats de l'analyse de sensibilité sur le taux d'actualisation.

Tableau 5.8 – Variation de la VAN en fonction du taux d'actualisation – La Grave

Options d'adaptation	Taux d'actualisation		
	2 %	4 % (base)	6 %
VAN non-intervention	(65 334 785 \$)	(40 138 113 \$)	(26 495 597 \$)
VAN recharge de plage en gravier	(3 448 509 \$)	(3 102 352 \$)	(2 874 758 \$)
VAN enrochement	(6 288 302 \$)	(5 097 581 \$)	(4 381 030 \$)
VAN riprap	(6 006 170 \$)	(4 756 991 \$)	(4 016 740 \$)
VAN immunisation combinée à la relocalisation stratégique	(65 353 449 \$)	(40 598 876 \$)	(27 172 144 \$)
Recharge de plage en gravier - Avantage net par rapport à la non-intervention	61 886 276 \$	37 035 761 \$	23 620 839 \$
Enrochement - Avantage net par rapport à la non-intervention	59 046 483 \$	35 040 532 \$	22 114 567 \$
Riprap - Avantage net par rapport à la non-intervention	59 328 614 \$	35 381 123 \$	22 478 856 \$
Immunisation et relocalisation stratégique - Avantage net par rapport à la non-intervention	(18 664 \$)	(460 762 \$)	(676 547 \$)

La VAN de chaque option varie à la baisse lorsque le taux d'actualisation diminue, alors qu'elle augmente lorsque le taux atteint 6 %. En comparaison à la non-intervention, une baisse du taux d'actualisation augmente significativement les avantages des options d'adaptation, alors qu'une hausse du taux d'actualisation les diminue. Toutefois, dans tous les cas, la recharge de plage en gravier demeure l'option d'adaptation la plus avantageuse. De plus, l'ordre des options ne change pas suite à une variation du taux d'actualisation.

5.3.4 Niveaux d'eau extrêmes

La projection des niveaux d'eau extrêmes et de leurs périodes de retour est un exercice très complexe qui dépend à la fois de la disponibilité et de la qualité des données dans les secteurs à l'étude. Cette projection implique de combiner de nombreux facteurs biophysiques ayant des niveaux d'incertitude à différents degrés. Le rehaussement marin, les valeurs extrêmes de vagues et de niveaux d'eau sont des paramètres pour lesquels la plage de valeurs possibles dans le futur n'est pas connue avec certitude.

Afin de mettre en perspective ces incertitudes, les niveaux d'eau extrêmes retenus aux fins de l'analyse ont été augmentés et diminués de 50 cm par rapport aux hypothèses de base. Les résultats de cette analyse de sensibilité sont présentés au tableau 5.9.

Cette analyse de sensibilité a une limite importante, car il est possible que les options d'adaptation étudiées ne soient plus suffisantes pour protéger contre des niveaux d'eau extrêmes augmentés de 50 cm. Néanmoins, cette analyse a l'avantage de comparer les résultats dans un contexte où les dommages associés à la submersion seraient beaucoup plus élevés que ceux anticipés aux niveaux d'eau extrêmes utilisés dans le cadre de cette étude.

Une diminution des niveaux d'eau extrêmes entraîne une hausse de la VAN de chacune des options considérées, tandis qu'une hausse produit l'effet inverse. Dans les deux cas, la recharge de plage en gravier constitue l'option la plus avantageuse sur 50 ans pour la société et l'ordre des options n'est pas modifié. La sensibilité des résultats à l'ampleur des niveaux d'eau extrême est faible en comparaison des autres facteurs comme le taux d'actualisation ou les retombés économiques.

Tableau 5.9 – Variation de la VAN en fonction du niveau d'eau – La Grave

Options d'adaptation	Taux d'actualisation		
	-50 cm	Hypothèses de base	+50 cm
VAN non-intervention	(39 436 078 \$)	(40 138 113 \$)	(42 728 574 \$)
VAN recharge de plage en gravier	(2 976 036 \$)	(3 102 352 \$)	(3 597 824 \$)
VAN enrochement	(4 971 264 \$)	(5 097 581 \$)	(5 593 053 \$)
VAN riprap	(4 632 302 \$)	(4 756 991 \$)	(5 254 091 \$)
VAN immunisation combinée à la relocalisation stratégique	(40 322 699 \$)	(40 598 876 \$)	(41 256 966 \$)
Recharge de plage en gravier - Avantage net par rapport à la non-intervention	36 460 043 \$	37 035 761 \$	39 130 750 \$
Enrochement - Avantage net par rapport à la non-intervention	34 464 814 \$	35 040 532 \$	37 135 521 \$
Riprap - Avantage net par rapport à la non-intervention	34 803 776 \$	35 381 123 \$	37 474 483 \$
Immunisation et relocalisation stratégique - Avantage net par rapport à la non-intervention	(886 620 \$)	(460 762 \$)	1 471 608 \$

5.3.5 Aucun impact sur les retombées économiques

Étant donné l'importance des impacts économiques dus à une diminution de l'achalandage touristique, c'est-à-dire des pertes de dépenses touristiques qui s'élèvent à 30 M\$ en non-intervention sur un horizon de 50 ans, une analyse de la sensibilité des résultats de l'ACA à une réduction de ces pertes a été réalisée. Il est supposé ici, pour chacune des options à l'étude, qu'il n'y aura aucune modification de l'achalandage touristique au site de La Grave, et ce, malgré les dommages causés par les aléas côtiers. Les résultats de l'analyse sont présentés au tableau 5.10.

L'absence de pertes de retombées touristiques fait augmenter toutes les VAN, en particulier la VAN de la non-intervention et celle de l'immunisation combinée à la relocalisation stratégique. Il en résulte une diminution importante des avantages comparatifs de la recharge de plage par rapport à la non-intervention. Toutefois, la

recharge de plage en gravier constitue l'option la plus avantageuse sur ce segment et l'ordre de préférence des options demeure le même que dans l'ACA initiale.

Tableau 5.10 – Variation de la VAN en l'absence de retombées économiques – La Grave

Options d'adaptation	Hypothèses de base	Aucun impact économique
VAN non-intervention	(40 138 113 \$)	(10 131 400 \$)
VAN recharge de plage en gravier	(3 102 352 \$)	(2 066 830 \$)
VAN enrochement	(5 097 581 \$)	(4 062 059 \$)
VAN riprap	(4 756 991 \$)	(3 723 097 \$)
VAN immunisation combinée à la relocalisation stratégique	(40 598 876 \$)	(10 639 961 \$)
Recharge de plage en gravier - Avantage net par rapport à la non-intervention	37 035 761 \$	8 064 570 \$
Enrochement - Avantage net par rapport à la non-intervention	35 040 532 \$	6 069 342 \$
Riprap - Avantage net par rapport à la non-intervention	35 381 123 \$	6 408 304 \$
Immunisation et relocalisation stratégique - Avantage net par rapport à la non-intervention	(460 762 \$)	(508 561 \$)

5.3.6 Synthèse de l'analyse de sensibilité

Les résultats des analyses de sensibilité indiquent que les résultats de l'ACA initiale sont robustes. L'option de la recharge de plage en gravier est toujours la plus avantageuse par rapport à la non-intervention dans le segment La Grave même lorsque des hypothèses clés varient (tableau 5.11).

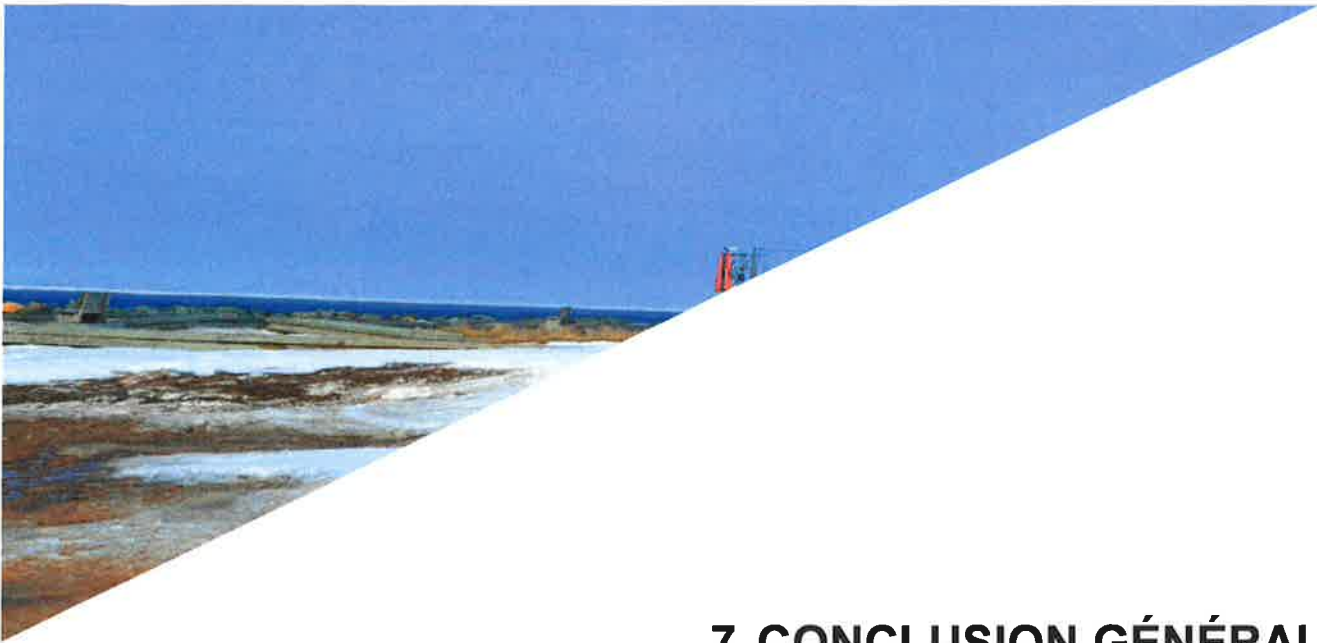
Tableau 5.11 – Options les plus avantageuses selon les analyses de sensibilité – Segment La Grave

Hypothèse modifiée	Option la plus avantageuse
Hypothèses de base	Recharge de plage en gravier
Taux d'actualisation de 2 %	Recharge de plage en gravier
Taux d'actualisation de 6 %	Recharge de plage en gravier
Niveaux d'eau extrêmes - 50 cm	Recharge de plage en gravier
Niveaux d'eau extrêmes +50 cm	Recharge de plage en gravier
Aucune retombée économique	Recharge de plage en gravier

5.4 CONCLUSION

L'ACA a permis d'évaluer que la non-intervention pour ce segment aurait des impacts appréhendés de plus de 40 M\$, générés principalement par la perte de retombées touristiques et une baisse de la valeur d'usage du site pour les résidents et les touristes. Toutes les options d'adaptation considérées, à l'exception de l'immunisation et de la relocalisation stratégique, permettent de préserver la majeure partie de l'intégrité du site de La Grave.

L'option d'adaptation la plus rentable économiquement est la recharge de plage en gravier grâce à un coût de mise en œuvre relativement faible et à une valeur d'usage accrue tout en étant efficace pour lutter contre les épisodes de tempête. Les analyses de sensibilité ont permis de démontrer la robustesse de ce résultat qui apparaît comme l'option la plus avantageuse lorsque des variables clés sont modifiées.

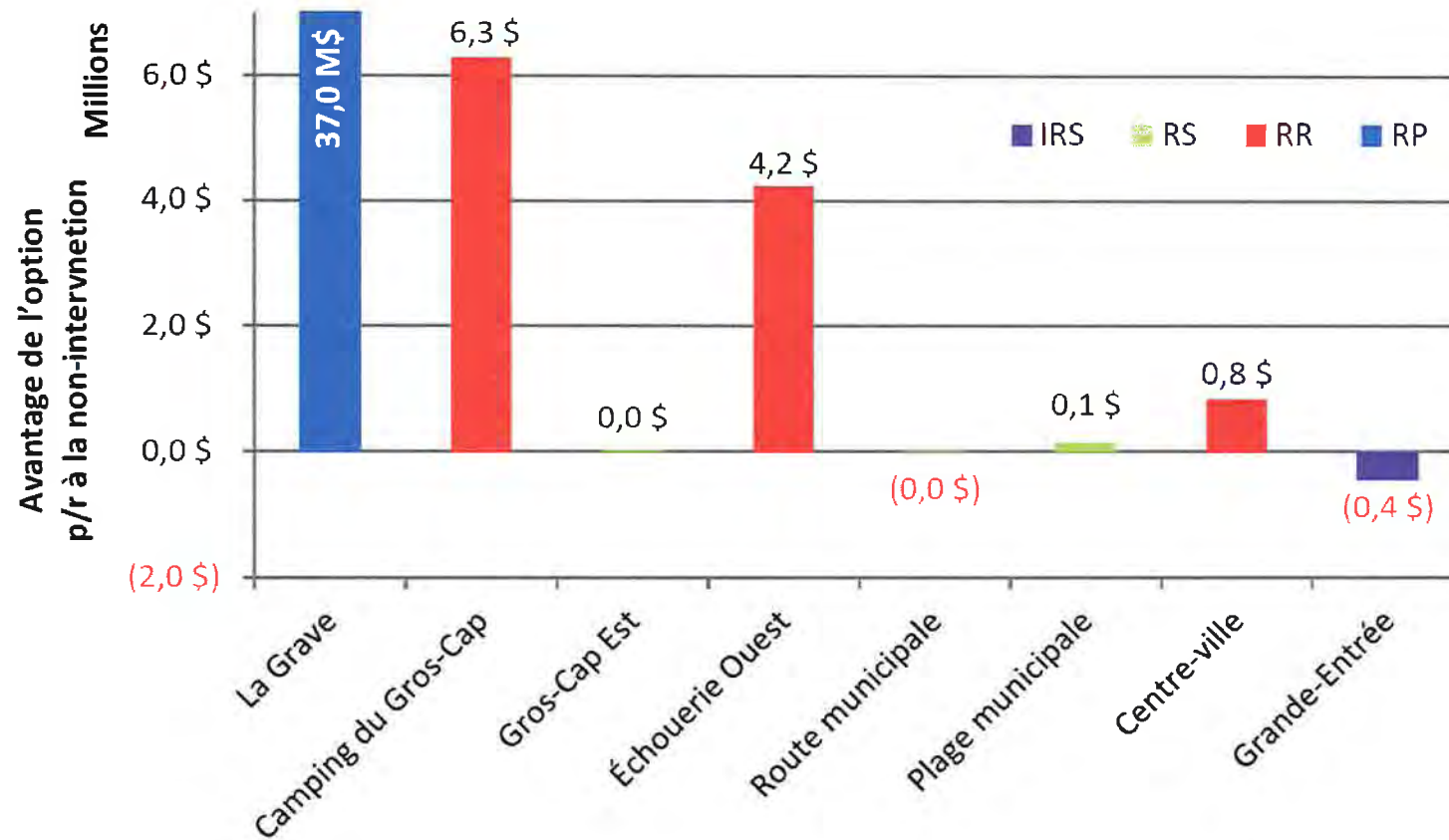


7. CONCLUSION GÉNÉRALE

L'analyse coûts-avantages des options d'adaptation proposées pour éviter les dommages dus aux aléas côtiers sur le littoral des Îles-de-la-Madeleine vise principalement à aider les décideurs à sélectionner les options les plus avantageuses, et ce, en comparant l'ensemble des coûts et avantages économiques sur un horizon temporel de 50 ans.

La figure 7.1 permet, pour chacun des 8 segments à l'étude, de visualiser la valeur actualisée nette de l'option la plus avantageuse par rapport à l'option de non-intervention. Il est ainsi possible de constater que pour 2 segments, soit Route municipale et Pointe de Grande-Entrée, la non-intervention constitue l'option à privilégier du point de vue économique.

Pour les segments La Grave, Camping du Gros-Cap, Échouerie Ouest, Centre-ville et Plage municipale, la mise en place de différentes options d'adaptation est nettement préférable à la non-intervention. Pour le segment Gros Cap Est, les avantages nets de l'option la plus avantageuse (relocalisation stratégique) par rapport à la non-intervention sont très faibles et ne permettent pas de statuer clairement sur l'option la plus avantageuse d'un point de vue économique.



Légende : IRS : Immunisation et relocalisation stratégique; RS : Relocalisation stratégique; RR : Riprap; RP : Recharge de plage

Figure 7.1 – Valeur actualisée nette des options les plus avantageuses par rapport à la non-intervention aux Îles-de-la-Madeleine

Aux Îles-de-la-Madeleine, certains segments de côte à protéger abritent des actifs économiques majeurs ou des attraits touristiques fortement utilisés qui sont vulnérables à l'érosion au cours des cinquante prochaines années. Considérant la valeur des pertes anticipées et le type de côte (basses falaises rocheuses) sur lequel ces infrastructures sont situées, des options d'adaptation rigides comme le riprap sont justifiées économiquement. Dans d'autres segments, situés sur de basses côtes où l'usage du littoral a une valeur importante, tant pour les touristes que pour les résidents, les options d'adaptation retenues favorisent un maintien d'une côte naturelle avec des interventions d'ingénierie mobiles ou une stratégie de relocalisation des actifs à risque sans intervention sur le littoral. C'est le cas de la Plage municipale et du segment de La Grave.

Finalement, dans les segments où les impacts appréhendés sont faibles, comme c'est le cas pour les segments Gros-Cap Est et Route municipale, les options d'adaptation considérées sont très légèrement avantageuses ou même non justifiées économiquement.



8. GLOSSAIRE

Ajustement eustatique : variation du niveau moyen des mers (relative par rapport aux continents supposés stables) dont les facteurs en cause sont, par exemple, les variations thermiques des océans, la fonte des glaciers et les dynamiques de glaciation et déglaciation.

Ajustement isostatique : également appelé rebond postglaciaire ou glacio-isostasie, se définit comme le soulèvement de masses terrestres consécutif à la déglaciation et plus précisément à la fonte des calottes glaciaires, puisque les masses terrestres, antérieurement *déprimées* (par compression sous les charges de glace) se relèvent durant la période postglaciaire.

Analyses coûts-avantages (ACA) : étude d'un programme ou d'une activité par l'analyse qualitative et quantitative de tous les avantages et de tous les coûts relatifs à l'implantation et au fonctionnement de ce programme ou de cette activité (Office québécois de la langue française, 1998). **darérive littorale** : le déplacement le long d'un littoral de matières (sédiments, sable), causé par les vents et le déferlement entraînant un courant parallèle à la côte. Le terme désigne à la fois le courant parallèle à la côte et le déplacement des sédiments qui est causé par ce courant.

Diamètre médian (D_{50}) : diamètre correspondant au point milieu de la distribution de la taille des pierres. Ceci signifie que si le diamètre médian est de 50 cm, la proportion de

pierres de diamètre supérieur à 50 cm sera de 50 %, alors que la proportion de pierres de diamètre inférieur à 50 cm sera de 50 % également.

Domage annuel moyen (DAM) : coût moyen des dommages causés par les événements de submersion auxquels un bâtiment sera soumis lors d'une année typique. Le dommage annuel moyen est calculé à l'aide des probabilités de niveaux d'eau extrême et des dommages sur le bâtiment associés à chaque niveau correspondant.

Effet de bout : lorsque les vagues frappent une paroi rigide et imperméable, tel un mur ou un enrochement, leur énergie est réorientée aux extrémités de l'ouvrage, ce qui peut accélérer l'érosion des rives voisines.

Épis : ouvrage de protection contre l'érosion côtière, positionné de manière perpendiculaire à la côte et formée d'empilements de roches ou de pieux verticaux enfouis dans le sol et placés les uns à côté des autres, visant à retenir les particules de sédiments transportées par les vagues, tout en permettant une certaine circulation d'eau.

Estran : aussi appelé zone intertidale (ou de marnage), l'estran est la partie du littoral située entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées.

Fetch : distance en mer ou sur un plan d'eau au-dessus de laquelle souffle un vent donné sans rencontrer d'obstacle (une côte) depuis l'endroit où il est créé ou depuis une côte s'il vient de la terre; plus le fetch est important plus la hauteur des vagues sera grande, à l'opposé, à l'abri d'une côte (sous le vent d'une côte), la hauteur des vagues sera très faible, même si le vent est très fort, car le fetch y est plus petit.

Immunisation : mesure d'adaptation à la submersion qui consiste à rehausser les bâtiments par un remblayage du terrain jusqu'à une élévation suffisante afin d'éliminer ou de réduire les dommages causés par la submersion.

Jet de rive : phénomène de courant montant sur la côte après le point de déferlement des vagues, dont la hauteur dépend de la hauteur significative des vagues, leur période et l'inclinaison de la plage sur laquelle celles-ci déferlent. Il est à noter que le terme de *jet de rive* est utilisé de manière inclusive et équivalente au *wave setup*.

Lidar : acronyme de l'expression « lighth detection and ranging », désignant une technologie de mesure à distance qui, par l'analyse d'un faisceau de lumière – souvent un laser – renvoyé à son émetteur, permet de déterminer certaines propriétés du terrain à l'étude telle que la topographie.

Niveau moyen (relatif) des mers (NMM) : hauteur moyenne de la surface de la mer, par rapport à un niveau de référence suffisamment stable; on le considère généralement issu de la différence entre les niveaux eustatique (mesure du niveau marin relative par rapport aux continents supposés stables) et isostatique (voir rebond isostatique).

Non-intervention (NI) : option de référence qui implique un laisser-aller des structures de protection existantes et une accumulation des dommages de submersion et d'érosion par les actifs dans les zones d'étude.

Produit intérieur brut (PIB) : mesure de la richesse créée dans l'année par les unités de production résidentes « qui constitue » un indicateur de croissance (OQLF, 1989).

Ratio avantages-coûts (A/C) : quotient obtenu en divisant la valeur quantitative des avantages tirés d'une activité, d'un programme ou d'un projet, par les coûts afférents à cette activité, ce programme ou ce projet (ICCA, 2006).

Recharge de plage : méthode de protection contre l'érosion côtière qui consiste à transporter du sable et/ou du gravier sur une plage, soit en le déposant directement sur celle-ci ou en marge du site, pour produire un engraissement artificiel de la plage qui augmentera sa capacité à protéger la côte, en absorbant l'énergie des vagues. Cette méthode nécessite un entretien récurrent.

Récurrence : Les récurrences ou « période de retour » font référence à la probabilité d'un niveau d'eau extrême donné. Par exemple, un niveau d'eau de récurrence 20 ans devrait survenir en moyenne une fois au courant des 20 prochaines années. Les récurrences peuvent être également exprimées en termes de probabilités annuelles. Un évènement de récurrence 20 ans aura 5 % de probabilité de survenir chaque année.

Relocalisation stratégique : option d'adaptation à l'érosion et/ou à la submersion qui consiste à déplacer les bâtiments à risque vers des zones sécuritaires (non exposées

aux aléas). Les seuils utilisés sont les suivants : lorsque les bâtiments lorsqu'ils sont à moins de 5 mètres du littoral ou que l'élévation de leur rez-de-chaussée est inférieure au niveau d'eau extrême de récurrence 20 ans

Riprap : mesure de protection contre l'érosion due aux vagues ou aux glaces qui consiste à déverser une couche de roches ou d'autres matériaux disposés en vrac, dont les tailles granulométriques sont diversifiées, et qui sert à absorber et diffuser l'énergie des vagues avant qu'elle n'atteigne la structure à protéger.

Schorre : terme désignant la partie basse des marais salés qui n'est inondée que lors des grandes marées et qui est colonisée par de la végétation tolérante au sel.

Submersion : phénomène naturel d'inondation par la mer qui survient lorsque la limite supérieure du jet de rive dépasse le niveau supérieur de la ligne de rivage ou de la structure de protection.

Subsidence (géologique) : un lent affaissement de la lithosphère (le continent) entraînant un dépôt progressif de sédiments sous une profondeur d'eau constante.

Surcote : un dépassement anormal du niveau de la marée haute ou du recul de la marée basse induit par des conditions météorologiques inhabituelles, comme une dépression atmosphérique, une tempête, un ouragan, auxquels leurs effets à ceux des marées astronomiques (la portion induite par la lune et le soleil).

Transit sédimentaire : voir dérive littorale

Valeur actualisée nette (VAN) : différence entre les avantages et les coûts actualisés découlant de la mise en place d'un projet, d'un programme ou d'une politique. L'actualisation est l'opération consistant à ramener les avantages et les coûts survenant à différents moments dans l'horizon d'étude à une année de référence.

Végétalisation : méthode de protection contre l'érosion qui consiste à planter des végétaux adaptés au milieu côtier qui retiennent les sédiments grâce à leurs racines; il peut s'agir de ballots de terre et de matières végétales ou de plantations de plantes et d'arbustes en bordure de la côte, dont les racines doivent être denses et profondes

(exemple les rosiers, les framboisiers pour les plages, l'ammophile ou « blé de mer » pour les milieux dunaires).

Zéro géodésique : repère d'altitude basé sur le positionnement en trois dimensions d'un point dans un système géodésique sélectionné, lui-même dépendant d'une projection de la surface terrestre; en Amérique du Nord, les systèmes de référence géodésique les plus utilisés sont WGS84 (*world geodetic system*), notamment utilisé par le système mondial GPS, et le NAD83 (*North American datum*).

Zéro marégraphique : aussi appelé zéro hydrographique ou zéro des cartes, la référence de niveau commune pour les mesures de profondeur en mer (ou plan de référence des sondes) sur une carte marine ainsi que pour les prédictions de marée.



9. RÉFÉRENCES

Bartik, T.J. (2003) Social costs of jobs lost due to environmental regulations, Upjohn Institute Working Paper, No. 13-193, Récupéré le 12 mai 2015 à <http://www.econstor.eu/bitstream/10419/98583/1/739996592.pdf>

Bernatchez, P. et Dugas, S. (2014). Évaluation économique des impacts potentiels de l'érosion des côtes du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques : rapport méthodologique (Rapport scientifique final pour Ouranos). Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. 22 p.

Bernatchez, P., Drejza, S. et Dugas, S. (2012) Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des îles de la Madeleine. Juillet 2012, 71 p. et annexes.

Bernatchez, P. Fraser, C. Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S. Morissette, A. (2008) Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques. Rapport de recherche, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, 256 p.

Bernatchez, P., Dugas, S., Fraser, C., Da Silva, L. (2015). Évaluation économique des impacts potentiels de l'érosion des côtes du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis à Ouranos, 45 p. et annexes.

Bonnifait, L. (2005) Développement de courbes submersion-dommages pour l'habitat résidentiel québécois. Mémoire de maîtrise, Institut national de recherche scientifique – Eau, Terre, Environnement, Québec, 74 p.

- Bourque, A. et Simonet, G. (2008). Québec. Dans D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (dir.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada 2007* (p. 171–226). Ottawa, Ontario : Gouvernement du Canada.
- Boyer-Villemaire, U. Savard, J.P., Roy, P. (2016) Évaluation des niveaux d'eau extrêmes causant des dommages de submersion en zone côtière au Québec. Ouranos, Montréal.
- Brisson, G. et Richardson, M. (2009) Perception de l'érosion des berges de la Côte-Nord et perspectives de santé publique. Agence de la santé et des services sociaux de la Côte-Nord, Baie-Comeau, 42 p.
- CIFM (2014) Courte relâche à l'usine Gros-Cap. Consulté le 15 novembre 2015. http://www.cfim.ca/web/station-prototype/accueil/-/pub/9trP/content/7494554-courte-relache-a-l-usine-de-gros-cap?_101_INSTANCE_9trP_redirect=%2F
- Costanza, R., Wilson, M.A., Troy, A., Voinov, A., Liu, S., D'Agostino, J. (2006, July). The Value of New Jersey's Ecosystem Services and Natural Capital. New Jersey Department of Environmental Protection, 167 p.
- GIEC. (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 29 p.
- Han, G., Ma, Z., Chen, N., Thomson, R., et Slangen, A. (2015). Changes in mean relative sea level around Canada in the twentieth and twenty-first centuries. *Atmosphere-Ocean*, 53(5), 452-463.
- Institut de la statistique du Québec (ISQ) (2014a). Population et structure par âge et sexe. Population et démographie. Consulté le 12 mai 2015. <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/structure/index.html>
- Institut de la statistique du Québec (ISQ) (2014b). Produit intérieur brut (PIB) aux prix de base par région administrative, Québec, 2007-2013. Coup d'oeil sur les régions et les MRC. Repéré le 15 mars 2015 à http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/profils/comp_interreg/tableaux/pib_ra_2007-2013.html
- ISQ – Institut de la statistique du Québec. (2015) Rémunération hebdomadaire et horaire des employés selon le sexe, Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine et ensemble du Québec, 2010-2014. Consulté le 11 août 2015 à

http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/profils/profil11/societe/marche_trav/indicat/tra_remuneration11.htm

James, T. S., Henton, J. A., Leonard, L. J., Darlington, A., Forbes, D. L., et Craymer, M. (2014). Relative Sea-level Projections in Canada and the Adjacent Mainland United States. Geological Survey of Canada. Open File, 7737(72), 10-4095.

Ko, J. Y., and S. R Johnston (2007) The Economic Value of Ecosystem Services Provided by the Galveston Bay/Estuary System.

Koohzare, A., Vaníček, P., et Santos, M. (2008). Pattern of recent vertical crustal movements in Canada. *Journal of Geodynamics*, 45(2-3), 133–145.

Leclerc, M., P. Boudreau, N. Roy, Y. Secretan, S. El Adlouni, T. Ouarda, D. Chaumont, I. Falardeau et F. Morneau (2006). Contribution à la recherche d'une solution intégrée au risque d'inondation à Châteauguay. Pour le compte de la Ville de Châteauguay, en collaboration avec le ministère de la Sécurité publique. Rapport de recherche #R841. 280 pages (5 annexes)

LDGIZC-UQAR (Laboratoire de Dynamique et de Gestion intégrée des zones côtières - Université du Québec à Rimouski). (2015) Base de données d'évolution, de classification et d'utilisation des zones côtières du Québec. Données de recherche inédites.

Neumeier, U., Ruest, B., Lambert, A., Bismuth, E., Dumont, D., Jacob, D., Savard, J.P., Joly, S., 2013. Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques. Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, projet X009.1, 244 p.

Quintin, C., Fraser, C., Bernatchez, P. et Jolivet, Y. (2015) Cinq ans après le 6 décembre 2010 : leçons apprises d'une tempête et réflexions sur la résilience côtière d'un littoral en mouvement. 10^{ième} colloque sur les risques naturels au Québec (ACFAS), 28 mai 2015, Rimouski, Québec. Présentation orale.

Roche (2011) Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine (étude en hydraulique maritime), 205 p.

Ropars, Y. (2016) Protection de berge – La Grave. Rapport technique, 37 p.

Séguin-Aubé, I. (2013). Les risques côtiers et leur gestion : perception des communautés et des intervenants. Rapport de l'agence de la santé et des services sociaux de la Côte-Nord. Baie-Comeau, Québec. 16 p.

Statistique Canada (2013). Recensement 2011 – Chiffre de population et des logements. Repéré le 2015/06/19, <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/dp-pd/hltfst/pd-pl/Tables-Tableaux.cfm?LANG=Fra&T=300>

Tecsult (2008) Analyse coûts-avantages de solutions d'adaptation à l'érosion côtière pour la Ville de Sept-Îles. Tecsult inc., Montréal, rapport remis à la Ville de Sept-Îles, 150 p.

Webster, A., Gagnon-Lebrun, F., Desjarlais, C., Nolet, J., Sauvé, C., Uhde, S. (2008) L'évaluation des avantages et des coûts de l'adaptation aux changements climatiques. Rapport d'ÉcoRessources Consultants remis à Ouranos, Montréal, Québec, 66 p.

Xu, Z. et D. Lefavre (2015). Prévion des niveaux d'eau dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en fonction des changements climatiques. Rapport interne au Ministère des Transports du Québec, janvier 2015, 97 p.



ANNEXE A ESTIMATION DES DOMMAGES DE SUBMERSION

Dans le cadre de cette analyse économique, plusieurs calculs et projections ont été réalisés afin de pouvoir déterminer les dommages potentiels liés à la submersion. Cette annexe présente plus en détail la méthodologie utilisée pour calculer les dommages de submersion aux Îles-de-la-Madeleine.

La relation entre les dommages de submersion et la probabilité d'occurrence est illustrée par la courbe dommages-probabilités suivante.

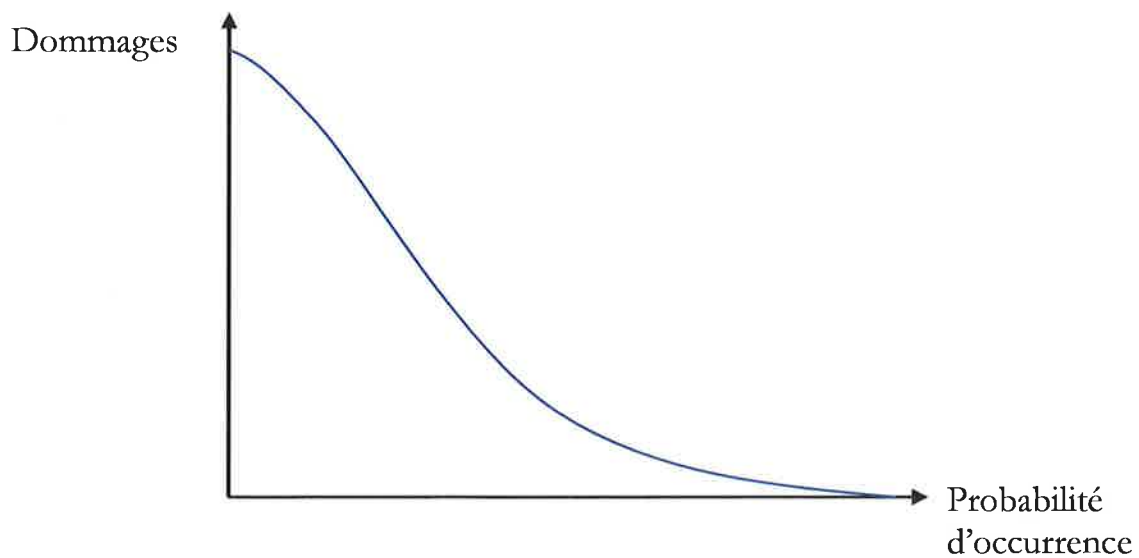


Figure A.1 – Relation entre dommages et probabilités d'occurrence

Cette figure conceptuelle montre simplement que ce sont les événements avec une faible probabilité d'occurrence qui vont générer les dommages les plus élevés, tandis que les événements ayant une grande probabilité d'occurrence vont produire peu ou pas de dommages.

Le risque, nommé dommage annuel moyen (« DAM »), est calculé à partir de cette courbe de dommages-probabilités. Le DAM correspond à l'aire sous la courbe et représente la valeur espérée des dommages annuels dus à la submersion (Figure A.2). Il représente simplement la moyenne des dommages potentiels en fonction de toutes les possibilités de niveaux d'eau extrêmes possibles.

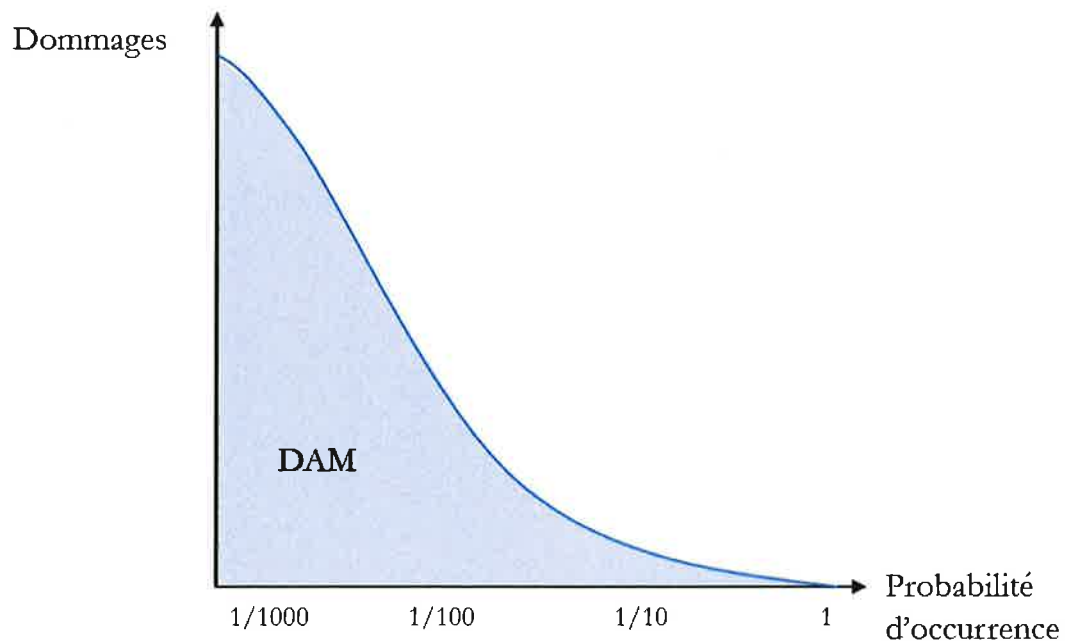


Figure A.2 – Calcul du dommage annuel moyen

Plus formellement, le DAM est égal à l'intégrale de la fonction de dommages par rapport à la probabilité d'occurrence de l'événement :

$$DAM = \int D(P) dP$$

où

DAM = Dommage annuel moyen

D = valeur des dommages

P = probabilité d'occurrence de l'événement

Comme la forme continue de la fonction de dommages n'est pas connue, le DAM est approximé par le calcul numérique de l'aire sous la courbe à l'aide de la méthode d'approximation de Riemann. Concrètement, le DAM a été calculé en effectuant la somme de la multiplication du dommage médian entre deux classes d'événements et de la variation de la probabilité d'occurrence entre ces deux mêmes événements :

$$\begin{aligned} DAM &= \int D(P) dP \cong \sum_{i=1}^N \frac{D(P_i) + D(P_{i+1})}{2} \times (P_i - P_{i+1}) \\ &= \frac{D(P_1) + D(P_2)}{2} \times (P_1 - P_2) + \dots + \frac{D(P_{N-1}) + D(P_N)}{2} \times (P_{N-1} - P_N) \end{aligned}$$

où N = Nombre de classes d'événements étudiés

Dans l'étude de cas des Îles-de-la-Madeleine, les classes d'événements utilisées pour calculer le DAM sont les périodes de retour 2, 5, 10, 20, et 30 (voir Ouranos, 2016).

Effet d'un ouvrage de protection sur le DAM

L'effet d'un ouvrage de protection comme une digue ou l'immunisation des résidences permet d'éliminer les dommages causés par les événements les plus fréquents jusqu'à un niveau limite. Par exemple, une digue peut être conçue pour résister à des niveaux d'eau extrêmes de l'ordre de 100 ans de période de retour. Dans un tel cas, les

dommages évités sont égaux à la superficie sous la courbe représentée par la zone A, alors que le risque résiduel est égal à la zone identifiée par la lettre B.

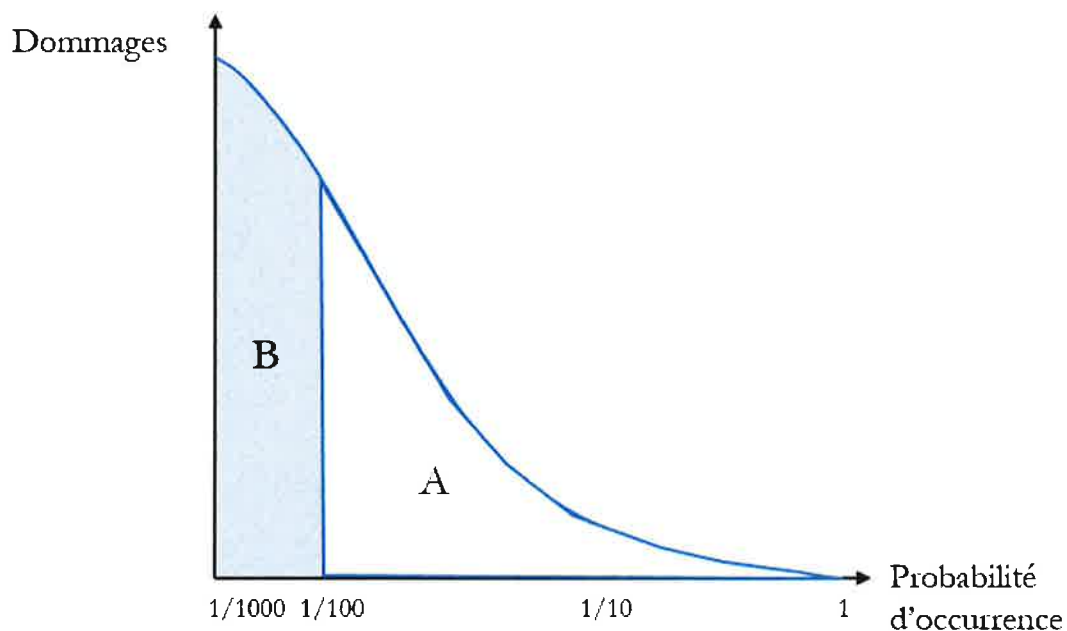


Figure A.3 – Effet d'un ouvrage de protection sur le DAM

Éléments sous-jacents à la courbe de dommages-probabilités

La courbe de dommages-probabilités s'applique à chaque bâtiment individuellement et est construite à partir de trois composantes principales : les courbes de submersion-dommages, les niveaux d'eau extrêmes de même que les autres facteurs aggravant les dommages.

Courbes de submersion-dommages selon le type de bâtiments

La première composante provient d'une série de courbes de submersion-dommages proposées par Bonnifait (2005), qui varient selon le type de bâtiments. Elles permettent de prendre en compte la variabilité des dommages subis aux résidences. En effet, le niveau d'endommagement dépend de la vulnérabilité d'un bâtiment à la submersion qui

elle-même est tributaire de l'élévation du bâtiment et de ses caractéristiques structurelles (le nombre d'étages, la présence d'un sous-sol et l'aménagement de ce dernier). Ainsi, Bonnifait (2005) propose 6 classes de bâtiments, chacun ayant sa propre courbe de submersion-dommages :

- 1) Résidence à un étage avec sous-sol fini
- 2) Résidence à un étage avec sous-sol non fini
- 3) Résidence à un étage sans sous-sol
- 4) Résidence à deux étages avec sous-sol fini
- 5) Résidence à deux étages avec sous-sol non fini
- 6) Résidence à deux étages sans sous-sol

Les dommages sont calculés en proportion de la valeur du bâtiment et dépendent de la hauteur de la submersion (H) relativement à la hauteur du plancher principal ($Z_{R.C.}$). La figure A.4 illustre comment ces éléments sont définis.

R.C. : rez-de-chaussée

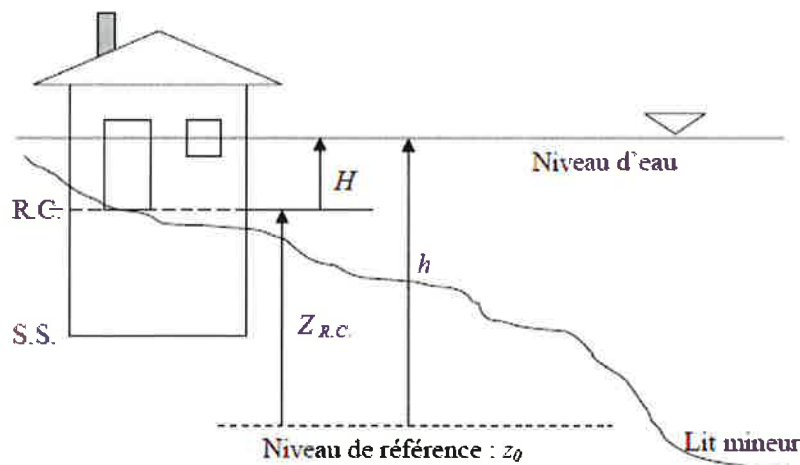
S.S. : sous-sol

H : hauteur de submersion

h : cote de l'inondation

$Z_{R.C.}$: cote du rez-de-chaussée

$$H = h - Z_{R.C.} \text{ (formule unique)}$$



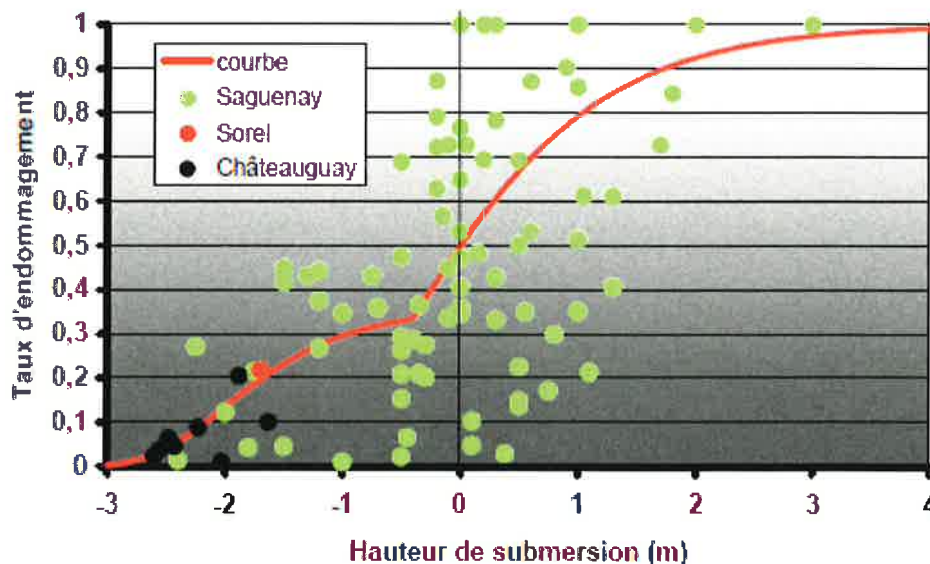
Tiré de Bonnifait, 2005

Figure A.4 – Définition de la hauteur de submersion

Ces courbes ont été développées à partir de données empiriques de dommages en milieu riverain. Leur transfert à des rives maritimes ne devrait pas poser de problème dans la mesure où un facteur d'ajustement est apporté pour tenir compte de l'effet des dommages issus de la projection de débris par les vagues (voir *Autres facteurs de dommages*).

La figure A.5 présente la courbe de dommages pour une résidence à un étage avec sous-sol fini. Des dommages sont observés dès que le niveau de submersion est à moins de 3 mètres sous le niveau du plancher principal. Lorsque la submersion atteint le plancher principal, la courbe suggère que 50 % de la résidence est endommagée.

Les pourcentages d'endommagement sont ensuite appliqués à la valeur foncière des bâtiments dans les zones d'étude pour établir le montant des dommages pour chaque classe d'événement. Cela permet de construire les courbes de dommages-probabilités.



Tiré de Bonnifait, 2005 dans Leclerc et al., 2006

Figure A.5 – Courbe de submersion-dommages pour une résidence à un étage avec sous-sol fini

Ces courbes comprennent exclusivement les dommages subis à la structure du bâtiment, en excluant les dommages aux mobiliers et aux biens se trouvant dans la résidence. Par ailleurs, ces courbes ne couvrent pas non plus les dommages causés au terrain ou aux ouvrages de protection contre l'érosion (Bonnifait, 2005).

Afin d'appliquer les courbes de submersion-dommages au site d'étude, la cote d'élévation du plancher principal de chaque bâtiment à risque a été mesurée en superposant au modèle numérique d'élévation du terrain la hauteur du plancher principal par rapport au terrain environnant. La hauteur du plancher principal par rapport au terrain a été mesurée lors d'une campagne sur le terrain à l'aide d'un distomètre installé sur un trépied. Le niveau de précision de ce type d'instrument est de l'ordre du millimètre. La hauteur entre le terrain et la porte d'entrée principale a été mesurée à partir de la rue soit à une distance variant entre 3 et 10 mètres.

Niveaux d'eau extrêmes

La deuxième composante provient des récurrences de niveaux d'eau extrêmes. Ces niveaux d'eau extrêmes comprennent à la fois le niveau d'eau marégraphique intégrant le niveau d'eau prédit et la surcote de tempête, de même que le *jet de rive* découlant de la projection des vagues sur la côte.

Les classes d'événements utilisées pour calculer le DAM sont les périodes de retour 2, 5, 10, 20 et 30 ans. Ces classes d'événement ont été sélectionnées en fonction de la disponibilité des données de vagues et de niveaux d'eau. Étant donné la courte durée de la série temporelle de données de vagues, l'extrapolation des récurrences ne peut se faire sur une période plus longue que 30 ans.

Autres facteurs aggravant les dommages

Selon Bonnifait (2005), « le niveau d'eau est le facteur le plus significatif, celui qui possède la meilleure adéquation avec les dommages » dans un environnement fluvial. Toutefois, malgré le fait que la hauteur de submersion soit le principal facteur conditionnant les dommages, d'autres facteurs aggravants peuvent moduler les dommages subis aux résidences en milieu côtier. En particulier, la projection de débris, de troncs d'arbres, de pierres et de glace peut produire des dommages liés à l'impact de

ce matériel sur l'enveloppe du bâtiment. Le déferlement des vagues, en entraînant ces débris, peut endommager sévèrement le revêtement extérieur et la structure d'un bâtiment.

Afin de tenir en compte de ce facteur aggravant, l'exposition des bâtiments à la projection a été déterminée pour chacun des bâtiments dans les segments à l'étude. Un dommage supplémentaire a été ajouté à l'estimation des dommages pour chaque classe d'événement si les trois conditions suivantes étaient respectées :

- 1) Une des façades du bâtiment fait face directement à la mer, sans être protégée par un autre bâtiment ou tout obstacle pouvant freiner la projection d'eau ou de débris.
- 2) Le bâtiment est à moins de 15 mètres de distance de la ligne de rivage.
- 3) Le niveau d'eau extrême atteint de l'événement est égal ou supérieur à la hauteur du rez-de-chaussée.

Si ces conditions sont respectées, une prime unique de projection de 10 % de la valeur du bâtiment est appliquée.

La durée de la submersion est également un facteur aggravant aux dommages causés aux résidences. En milieu côtier, la durée de la submersion est généralement limitée à un cycle de marée. Certaines zones situées à une élévation plus basse que le rivage pourraient cependant être aux prises avec une accumulation d'eau qui ne peut s'évacuer lorsque la marée se retire. Dans de tels cas, le coût des dommages peut grimper. Toutefois, dans le cadre de cette analyse, ces coûts n'ont pas été pris en compte puisque la durée des épisodes de submersion n'a pas été modélisée.



ANNEXE C COÛTS DE RELOCALISATION ET D'IMMUNISATION DES BÂTIMENTS

Les estimés de coûts ont été fournis par la firme Héneault et Gosselin. Ces coûts sont représentatif des tarifs s'appliquant dans la région.

Le tableau C.1 présente les coûts de transport et de construction de fondations au mètre linéaire pour des résidences en vinyle et/ou en brique. Les prix au mètre linéaire ont ensuite été multipliés par le périmètre total de chacun des bâtiments à relocaliser ou à immuniser en fonction du revêtement extérieur.

Tableau C.1 Prix au mètre linéaire pour la relocalisation et l'immunisation des bâtiments en fonction du revêtement extérieur

Revêtement extérieur	Relocalisation sur un nouveau terrain	Relocalisation sur le même terrain	Immunisation
Vinyle	1 410 \$	1 345 \$	1 410 \$
Brique et vinyle	1 575 \$	1 510 \$	1 575 \$
Brique	2 135 \$	2 070 \$	2 135 \$

À ces coûts s'ajoutent les coûts de gestion des fils électriques et de câblodistribution, l'aménagement des services dans les nouveaux quartiers (route, aqueduc et égouts) de même que les coûts de démolition des fondations. Les coûts pour la gestion des fils ont

été établis sur la base de cas réels de déménagement de bâtiments dans la région. Les coûts pour la démolition des fondations proviennent du rapport de TecSult (2008) et ont été actualisés en dollars de 2012. Finalement, les coûts d'aménagement des services dans les nouveaux quartiers proviennent des estimations fournies par les autorités municipales. Le tableau C.2 résume chacun des coûts pour la relocalisation sur le même terrain, la relocalisation sur un nouveau terrain, de même que l'immunisation.

Tableau C.2 Coûts des frais afférents à la relocalisation et à l'immunisation

Catégorie de coûts	Relocalisation sur le même terrain	Relocalisation sur un nouveau terrain	Immunisation
Gestion des fils	3 416 \$	22 847 \$	3 416 \$
Démolition de fondations	3 239 \$	3 239 \$	-
Aménagement des services	-	32 553 \$	-
TOTAL	6 655 \$	58 639 \$	3 416 \$



ANNEXE D

VALEUR D'USAGE ET TOURISTIQUE DU SEGMENT LA GRAVE

Afin d'évaluer l'impact économique de la perte du site historique de La Grave de même que l'influence des aménagements côtiers proposés sur la valeur d'usage, l'Équipe de recherche a procédé en quatre étapes :

1. Fixer une règle permettant d'évaluer la baisse de l'attractivité du site et conséquemment de sa valeur économique.

Puisque le site de La Grave ne sera jamais complètement perdu, la perte a été estimée en fonction du nombre de bâtiments touchés par l'érosion. Ainsi, la perte est égale à la proportion de bâtiments perdus sur le nombre total de bâtiments à La Grave. Le site compte 43 bâtiments dont 4 sont considérés comme des bâtiments secondaires. Pour établir la perte proportionnelle, seuls les bâtiments principaux ont été utilisés (39 bâtiments au total). Par exemple, si la perte totale du site de La Grave s'établit à six millions de dollars annuellement, il a été considéré que la perte de la moitié des bâtiments causerait une perte égale à 3 millions de dollars.

2. Calculer le nombre de touristes et de résidents fréquentant le site de La Grave.

Il a été supposé que tous les touristes des Îles-de-la-Madeleine visitent au moins une fois La Grave au cours de leur séjour à l'exception des croisiéristes internationaux, qui restent moins d'une journée sur place. Ce nombre représente 47 885 touristes annuellement.

Il a été supposé que tous les résidents des Îles-de-la-Madeleine vont au moins une fois à la Grave par année. Le nombre de résidents visitant La Grave a donc été fixé au nombre d'adultes qui résidaient aux Îles-de-la-Madeleine lors du recensement de 2011 (10 565 résidents).

3. Calculer la perte économique sur la base de trois composantes

a. La variation des retombées touristiques advenant la perte du site de La Grave.

Cette valeur a été estimée à partir du sondage réalisé sur le site au courant de l'été 2015. Sur les 261 touristes sondés, neuf ont affirmé qu'ils modifieraient la durée de leur séjour passé aux Îles-de-la-Madeleine si La Grave disparaissait. Il a été supposé que la proportion de touristes qui changent leur durée de séjour est représentative des changements de comportements qui seraient observés dans l'ensemble des touristes. Ainsi, les pertes reliées à la baisse des retombées touristiques ont seulement été établies pour 3,4 % de la population de touristes qui modifieraient la durée de leur séjour aux Îles-de-la-Madeleine. Pour cette proportion des touristes, la valeur des retombées perdues annuellement est égale à la moyenne de la baisse du nombre de jours passés aux Îles-de-la-Madeleine si La Grave disparaissait multipliée par les dépenses journalières moyennes (en incluant l'hébergement).

b. La valeur d'usage des touristes qui visitent La Grave.

Cette valeur a été estimée à partir du sondage réalisé sur le site au courant de l'été 2015. La valeur d'usage annuelle est égale à la volonté de payer pour accéder au site multipliée par le nombre de fois que les touristes visitent le site de La Grave en moyenne. Cette opération a été faite indépendamment pour les deux types d'individus dans la population, soit les individus qui modifieraient leur durée de leur séjour si La Grave disparaissait et les individus dont la disparition de La Grave ne changerait pas la durée de leur séjour.

c. La valeur accordée à La Grave pour les résidents des Îles-de-la-Madeleine.

Cette valeur a aussi été estimée à partir du sondage réalisé sur le site au courant de l'été 2015. Elle a été calculée en demandant aux résidents des Îles-de-la-Madeleine leur volonté de payer une contribution volontaire unique pour préserver le site. Cette valeur comprend donc la valeur patrimoniale, la valeur d'existence, la valeur culturelle, de même que la valeur d'usage anticipé du site au courant des prochaines années. Il a été supposé que cette valeur représente la valeur actualisée du site pour les résidents. Par conséquent, la perte de valeur associée à la disparition du site de La Grave pour les résidents n'est pas récurrente d'année en année.

4. Appliquer la modification de valeur en fonction de chacune des options d'adaptation

a. Non-intervention ainsi que l'immunisation et relocalisation stratégique :

Pour la non-intervention, la perte de valeur d'usage et de retombées touristiques s'accroît progressivement à mesure que davantage de bâtiments sont perdus en raison de l'érosion. La perte de valeur pour les résidents est calculée également en proportion du nombre de bâtiments perdus. Toutefois, pour les résidents, la valeur d'usage n'est pas annuelle, mais globale. La perte est donc progressive en fonction du nombre de bâtiments perdus.

b. Pour les autres options :

Pour les touristes, la variation de la valeur d'usage est calculée selon la variation moyenne du nombre de jours passés à La Grave multipliée par la volonté de payer pour avoir accès à La Grave pendant une journée en fonction des différents aménagements.

Pour les résidents, la variation de valeur du site de La Grave est égale au pourcentage de variation du nombre de visites à la Grave pendant la période estivale multiplié par la volonté de payer une contribution volontaire en fonction des différents aménagements. Il est à noter que pour ces autres options, la perte économique calculée est sous-estimée, car l'effet de la variation du nombre d'heures passées à La Grave en fonction des différents aménagements n'a pas été capté. Il va sans dire que la perte économique calculée pour ces autres

options représente une borne minimale de l'impact de la mise en œuvre de ces autres options.

Les tableaux suivants résument les principaux paramètres ayant servi à estimer les composantes des impacts décrits plus haut. Les résultats de ces estimations se trouvent aux tableaux D.4 et D.5

Tableau D.1 – Calcul des pertes de retombées touristiques et de valeur d'usage en situation de non-intervention

Touristes	Δ jours = 0	Δ jours > 0
Variation du nombre de nuitées Îles	0	-35
Dépenses hors hébergement	67,89 \$	48,33 \$
Dépenses hébergement	88,57 \$	71,97 \$
Nombre de fois visites à La Grave par voyage	6	36
Volonté de payer	4,86 \$	3,89 \$
Nombre de jours passés aux îles	16,34	48,00
N	252	9
Perte retombées économiques par touriste	0,00 \$	146,22 \$
Perte de valeur d'usage par touriste	29,20 \$	32,89 \$

Tableau D.2 – Calcul de la variation de la valeur d'usage pour les touristes pour chaque option

Variations pour les touristes	
Variation nombre de visites à La Grave si double plage	0,09
Variation nombre de visites à La Grave si mur de béton	-0,39
Variation valeur d'usage si double plage par personne	0,44 \$
Variation valeur d'usage si mur de béton par personne	-1,87 \$
N	261

Tableau D.3 – Calcul de la variation de la valeur d'usage pour les résidents pour chaque option

Résidents des Îles-de-la-Madeleine	
Volonté de payer	73,47\$
Variation nombre de visites à La Grave si double plage	0,25
Variation nombre de visites à La Grave si mur de béton	-1,08
Nombre visite période estivale	30,61
Gain par personne double plage	0,59 \$
Perte par personne mur de béton	-2,60 \$
N	85

Tableau D.4 – Variation des retombées touristiques en fonction des options d'adaptation pour le segment de La Grave

Options d'adaptation	Proportion des bâtiments perdus	Variation des retombées touristiques en dollars de 2012 actualisés à 4 %
Non-intervention	36 %	(30 006 713 \$)
Recharge de plage	5 %	(1 035 522 \$)
Enrochement	5 %	(1 035 522 \$)
Riprap	5 %	(1 035 522 \$)
Immunisation combinée à la relocalisation stratégique	36 %	(30 006 713 \$)

Tableau D.5 – Variation de la valeur d'usage en fonction des options d'adaptation pour le segment de La Grave

Options d'adaptation	Variation de la valeur d'usage en dollars de 2012 actualisés à 4 %	
	Résidents	Touristes
Non-intervention	(167 248 \$)	(6 776 732 \$)
Recharge de plage	(34 237 \$)	172 805 \$
Enrochement	(64 205 \$)	(1 975 502 \$)
Riprap	(64 205 \$)	(1 975 502 \$)
Immunisation combinée à la relocalisation stratégique	(167 248 \$)	(6 776 732 \$)



ANNEXE F
COÛTS ANNUELS DES DIFFÉRENTES OPTIONS
POUR LA PÉRIODE 2015-2064 POUR LE
SECTEUR LA GRAVE

Option de non-intervention

Année	Érosion	Submersion	Dommages infrastructures	Coûts des mesures d'adaptation	Impacts économiques	Impacts sociaux	Somme des coûts
2015	(241 172 \$)	(74 778 \$)	(485 \$)	(32 226 \$)	(358 797 \$)	(176 694 \$)	(884 153 \$)
2016	(1 925 \$)	(71 902 \$)	(466 \$)	0 \$	(344 997 \$)	(77 914 \$)	(497 204 \$)
2017	(1 855 \$)	(69 136 \$)	(448 \$)	0 \$	(331 728 \$)	(74 918 \$)	(478 085 \$)
2018	(1 786 \$)	(66 477 \$)	(431 \$)	0 \$	(318 969 \$)	(72 036 \$)	(459 700 \$)
2019	(1 721 \$)	(63 921 \$)	(415 \$)	0 \$	(306 701 \$)	(69 266 \$)	(442 023 \$)
2020	(146 423 \$)	(59 204 \$)	(399 \$)	(15 174 \$)	(442 357 \$)	(139 216 \$)	(802 773 \$)
2021	(127 219 \$)	(55 389 \$)	(383 \$)	(12 798 \$)	(567 125 \$)	(165 882 \$)	(928 797 \$)
2022	(103 715 \$)	(51 421 \$)	(369 \$)	(14 111 \$)	(681 640 \$)	(190 290 \$)	(1 041 546 \$)
2023	(1 251 \$)	(49 444 \$)	(354 \$)	0 \$	(655 424 \$)	(148 021 \$)	(854 493 \$)
2024	(1 211 \$)	(47 542 \$)	(341 \$)	0 \$	(630 215 \$)	(142 328 \$)	(821 636 \$)
2025	(1 169 \$)	(45 713 \$)	(328 \$)	0 \$	(605 976 \$)	(136 854 \$)	(790 040 \$)
2026	(1 126 \$)	(43 955 \$)	(315 \$)	0 \$	(582 669 \$)	(131 590 \$)	(759 656 \$)
2027	(1 085 \$)	(42 265 \$)	(303 \$)	0 \$	(560 259 \$)	(126 529 \$)	(730 440 \$)
2028	(93 345 \$)	(39 722 \$)	(291 \$)	(16 145 \$)	(754 195 \$)	(227 781 \$)	(1 131 478 \$)
2029	(912 \$)	(38 194 \$)	(280 \$)	0 \$	(725 187 \$)	(163 777 \$)	(928 350 \$)
2030	(878 \$)	(36 725 \$)	(269 \$)	0 \$	(697 295 \$)	(157 478 \$)	(892 645 \$)
2031	(133 534 \$)	(31 359 \$)	(259 \$)	(26 918 \$)	(862 041 \$)	(245 759 \$)	(1 299 870 \$)
2032	(703 \$)	(30 153 \$)	(249 \$)	0 \$	(828 885 \$)	(187 196 \$)	(1 047 186 \$)
2033	(677 \$)	(28 993 \$)	(239 \$)	0 \$	(797 005 \$)	(179 996 \$)	(1 006 911 \$)
2034	(653 \$)	(27 878 \$)	(230 \$)	0 \$	(766 351 \$)	(173 073 \$)	(968 186 \$)
2035	(630 \$)	(44 282 \$)	(664 \$)	0 \$	(736 876 \$)	(166 416 \$)	(948 869 \$)
2036	(608 \$)	(42 579 \$)	(639 \$)	0 \$	(708 535 \$)	(160 016 \$)	(912 376 \$)
2037	(586 \$)	(40 941 \$)	(614 \$)	0 \$	(681 283 \$)	(153 861 \$)	(877 286 \$)
2038	(61 451 \$)	(38 635 \$)	(590 \$)	(10 250 \$)	(800 654 \$)	(219 633 \$)	(1 131 213 \$)
2039	(451 \$)	(37 149 \$)	(568 \$)	0 \$	(769 859 \$)	(173 865 \$)	(981 892 \$)
2040	(435 \$)	(35 720 \$)	(546 \$)	0 \$	(740 249 \$)	(167 178 \$)	(944 129 \$)
2041	(420 \$)	(34 346 \$)	(525 \$)	0 \$	(711 778 \$)	(160 748 \$)	(907 817 \$)
2042	(405 \$)	(33 025 \$)	(505 \$)	0 \$	(684 402 \$)	(154 566 \$)	(872 902 \$)
2043	(38 607 \$)	(31 084 \$)	(485 \$)	(5 886 \$)	(717 904 \$)	(178 083 \$)	(972 050 \$)
2044	(11 771 \$)	(29 707 \$)	(467 \$)	(2 423 \$)	(747 817 \$)	(184 225 \$)	(976 410 \$)
2045	(317 \$)	(28 564 \$)	(449 \$)	0 \$	(719 055 \$)	(162 392 \$)	(910 777 \$)
2046	(39 875 \$)	(23 362 \$)	(431 \$)	(6 289 \$)	(744 583 \$)	(182 337 \$)	(996 878 \$)
2047	(254 \$)	(22 464 \$)	(415 \$)	0 \$	(715 945 \$)	(161 690 \$)	(900 768 \$)
2048	(245 \$)	(21 600 \$)	(399 \$)	0 \$	(688 409 \$)	(155 471 \$)	(866 123 \$)
2049	(236 \$)	(20 769 \$)	(383 \$)	0 \$	(661 932 \$)	(149 491 \$)	(832 812 \$)
2050	(228 \$)	(19 970 \$)	(369 \$)	0 \$	(636 473 \$)	(143 741 \$)	(800 781 \$)
2051	(220 \$)	(19 202 \$)	(355 \$)	0 \$	(611 993 \$)	(138 213 \$)	(769 983 \$)
2052	(213 \$)	(18 464 \$)	(341 \$)	0 \$	(588 455 \$)	(132 897 \$)	(740 369 \$)
2053	(205 \$)	(17 754 \$)	(328 \$)	0 \$	(565 822 \$)	(127 786 \$)	(711 894 \$)
2054	(198 \$)	(17 071 \$)	(315 \$)	0 \$	(544 060 \$)	(122 871 \$)	(684 514 \$)
2055	(191 \$)	(24 912 \$)	(1 414 \$)	0 \$	(523 134 \$)	(118 145 \$)	(667 796 \$)
2056	(184 \$)	(23 954 \$)	(1 360 \$)	0 \$	(503 014 \$)	(113 601 \$)	(642 112 \$)
2057	(177 \$)	(23 032 \$)	(1 308 \$)	0 \$	(483 667 \$)	(109 232 \$)	(617 416 \$)
2058	(171 \$)	(22 147 \$)	(1 257 \$)	0 \$	(465 065 \$)	(105 030 \$)	(593 670 \$)
2059	(165 \$)	(21 295 \$)	(1 209 \$)	0 \$	(447 177 \$)	(100 991 \$)	(570 836 \$)
2060	(159 \$)	(20 476 \$)	(1 162 \$)	0 \$	(429 978 \$)	(97 107 \$)	(548 882 \$)
2061	(153 \$)	(19 688 \$)	(1 118 \$)	0 \$	(413 441 \$)	(93 372 \$)	(527 771 \$)
2062	(147 \$)	(18 931 \$)	(1 075 \$)	0 \$	(397 539 \$)	(89 780 \$)	(507 473 \$)
2063	(142 \$)	(18 203 \$)	(1 033 \$)	0 \$	(382 249 \$)	(86 327 \$)	(487 955 \$)
2064	(137 \$)	(17 503 \$)	(994 \$)	0 \$	(367 547 \$)	(83 007 \$)	(469 188 \$)
TOTAL	(1 021 338 \$)	(1 761 000 \$)	(28 170 \$)	(142 221 \$)	(30 006 713 \$)	(7 178 671 \$)	(40 138 113 \$)

Recharge de plage en gravier

Année	Érosion	Submersion	Dommages infrastructures	Coûts des mesures d'adaptation	Impacts économiques	Impacts sociaux	Somme des coûts
2015	(241 172 \$)	(18 094 \$)	(485 \$)	0 \$	(358 797 \$)	(120 837 \$)	(739 386 \$)
2016	(1 925 \$)	(17 399 \$)	(466 \$)	(252 404 \$)	(344 997 \$)	(77 914 \$)	(695 105 \$)
2017	(1 855 \$)	(16 729 \$)	(448 \$)	(80 899 \$)	(331 728 \$)	(74 918 \$)	(506 577 \$)
2018	0 \$	(16 086 \$)	0 \$	(635 241 \$)	0 \$	24 152 \$	(627 176 \$)
2019	0 \$	(15 467 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	17 868 \$	2 400 \$
2020	0 \$	(14 872 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	17 180 \$	2 308 \$
2021	0 \$	(14 300 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	16 520 \$	2 219 \$
2022	0 \$	(13 750 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	15 884 \$	2 134 \$
2023	0 \$	(13 221 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	15 273 \$	2 052 \$
2024	0 \$	(12 713 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	14 686 \$	1 973 \$
2025	0 \$	(12 224 \$)	0 \$	(270 329 \$)	0 \$	14 121 \$	(268 432 \$)
2026	0 \$	(11 754 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	13 578 \$	1 824 \$
2027	0 \$	(11 302 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	13 056 \$	1 754 \$
2028	0 \$	(10 867 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	12 554 \$	1 687 \$
2029	0 \$	(10 449 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	12 071 \$	1 622 \$
2030	0 \$	(10 047 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	11 606 \$	1 559 \$
2031	0 \$	(9 661 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	11 160 \$	1 499 \$
2032	0 \$	(9 289 \$)	0 \$	(82 171 \$)	0 \$	10 731 \$	(80 730 \$)
2033	0 \$	(8 932 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	10 318 \$	1 386 \$
2034	0 \$	(8 588 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	9 921 \$	1 333 \$
2035	0 \$	(11 031 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	9 540 \$	(1 491 \$)
2036	0 \$	(10 606 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	9 173 \$	(1 434 \$)
2037	0 \$	(10 198 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	8 820 \$	(1 378 \$)
2038	0 \$	(9 806 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	8 481 \$	(1 325 \$)
2039	0 \$	(9 429 \$)	0 \$	(62 443 \$)	0 \$	8 155 \$	(63 718 \$)
2040	0 \$	(9 066 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	7 841 \$	(1 225 \$)
2041	0 \$	(8 718 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	7 539 \$	(1 178 \$)
2042	0 \$	(8 382 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	7 249 \$	(1 133 \$)
2043	0 \$	(8 060 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	6 971 \$	(1 089 \$)
2044	0 \$	(7 750 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	6 702 \$	(1 048 \$)
2045	0 \$	(7 452 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	6 445 \$	(1 007 \$)
2046	0 \$	(7 165 \$)	0 \$	(47 452 \$)	0 \$	6 197 \$	(48 420 \$)
2047	0 \$	(6 890 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	5 958 \$	(931 \$)
2048	0 \$	(6 625 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	5 729 \$	(895 \$)
2049	0 \$	(6 370 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	5 509 \$	(861 \$)
2050	0 \$	(6 125 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	5 297 \$	(828 \$)
2051	0 \$	(5 889 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	5 093 \$	(796 \$)
2052	0 \$	(5 663 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	4 897 \$	(765 \$)
2053	0 \$	(5 445 \$)	0 \$	(36 060 \$)	0 \$	4 709 \$	(36 795 \$)
2054	0 \$	(5 236 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	4 528 \$	(708 \$)
2055	0 \$	(6 282 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	4 354 \$	(1 929 \$)
2056	0 \$	(6 041 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	4 186 \$	(1 854 \$)
2057	0 \$	(5 808 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	4 025 \$	(1 783 \$)
2058	0 \$	(5 585 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	3 870 \$	(1 714 \$)
2059	0 \$	(5 370 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	3 722 \$	(1 649 \$)
2060	0 \$	(5 164 \$)	0 \$	(27 402 \$)	0 \$	3 578 \$	(28 987 \$)
2061	0 \$	(4 965 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	3 441 \$	(1 524 \$)
2062	0 \$	(4 774 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	3 309 \$	(1 466 \$)
2063	0 \$	(4 590 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	3 181 \$	(1 409 \$)
2064	0 \$	(4 414 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	3 059 \$	(1 355 \$)
TOTAL	(244 952 \$)	(464 646 \$)	(1 400 \$)	(1 494 401 \$)	(1 035 522 \$)	138 569 \$	(3 102 352 \$)

Enrochement

Année	Érosion	Submersion	Dommages infrastructures	Coûts des mesures d'adaptation	Impacts économiques	Impacts sociaux	Somme des coûts
2015	(241 172 \$)	(18 094 \$)	(485 \$)	0 \$	(358 797 \$)	(120 837 \$)	(739 386 \$)
2016	(1 925 \$)	(17 399 \$)	(466 \$)	(252 404 \$)	(344 997 \$)	(77 914 \$)	(695 105 \$)
2017	(1 855 \$)	(16 729 \$)	(448 \$)	(80 899 \$)	(331 728 \$)	(74 918 \$)	(506 577 \$)
2018	0 \$	(16 086 \$)	0 \$	(978 052 \$)	0 \$	(103 981 \$)	(1 098 120 \$)
2019	0 \$	(15 467 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(76 522 \$)	(91 989 \$)
2020	0 \$	(14 872 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(73 579 \$)	(88 451 \$)
2021	0 \$	(14 300 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(70 749 \$)	(85 049 \$)
2022	0 \$	(13 750 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(68 028 \$)	(81 778 \$)
2023	0 \$	(13 221 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(65 411 \$)	(78 633 \$)
2024	0 \$	(12 713 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(62 895 \$)	(75 608 \$)
2025	0 \$	(12 224 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(60 476 \$)	(72 700 \$)
2026	0 \$	(11 754 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(58 150 \$)	(69 904 \$)
2027	0 \$	(11 302 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(55 914 \$)	(67 215 \$)
2028	0 \$	(10 867 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(53 763 \$)	(64 630 \$)
2029	0 \$	(10 449 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(51 695 \$)	(62 144 \$)
2030	0 \$	(10 047 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(49 707 \$)	(59 754 \$)
2031	0 \$	(9 661 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(47 795 \$)	(57 456 \$)
2032	0 \$	(9 289 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(45 957 \$)	(55 246 \$)
2033	0 \$	(8 932 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(44 189 \$)	(53 121 \$)
2034	0 \$	(8 588 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(42 490 \$)	(51 078 \$)
2035	0 \$	(8 259 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(40 856 \$)	(49 115 \$)
2036	0 \$	(7 944 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(39 284 \$)	(47 240 \$)
2037	0 \$	(7 643 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(37 773 \$)	(45 416 \$)
2038	0 \$	(7 355 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(36 320 \$)	(43 745 \$)
2039	0 \$	(7 080 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(34 924 \$)	(42 124 \$)
2040	0 \$	(6 818 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(33 580 \$)	(40 542 \$)
2041	0 \$	(6 569 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(32 289 \$)	(39 000 \$)
2042	0 \$	(6 332 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(31 047 \$)	(37 509 \$)
2043	0 \$	(6 106 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(29 853 \$)	(36 067 \$)
2044	0 \$	(5 891 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(28 705 \$)	(34 676 \$)
2045	0 \$	(5 687 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(27 601 \$)	(33 334 \$)
2046	0 \$	(5 493 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(26 539 \$)	(32 041 \$)
2047	0 \$	(5 309 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(25 518 \$)	(30 797 \$)
2048	0 \$	(5 135 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(24 537 \$)	(29 604 \$)
2049	0 \$	(4 970 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(23 593 \$)	(28 463 \$)
2050	0 \$	(4 814 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(22 686 \$)	(27 370 \$)
2051	0 \$	(4 667 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(21 813 \$)	(26 327 \$)
2052	0 \$	(4 528 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(20 974 \$)	(25 332 \$)
2053	0 \$	(4 397 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(20 167 \$)	(24 384 \$)
2054	0 \$	(4 273 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(19 392 \$)	(23 482 \$)
2055	0 \$	(4 156 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(18 646 \$)	(22 622 \$)
2056	0 \$	(4 045 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(17 929 \$)	(21 802 \$)
2057	0 \$	(3 940 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(17 239 \$)	(21 029 \$)
2058	0 \$	(3 841 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(16 576 \$)	(20 300 \$)
2059	0 \$	(3 747 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(15 939 \$)	(19 613 \$)
2060	0 \$	(3 659 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(15 326 \$)	(18 967 \$)
2061	0 \$	(3 576 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(14 736 \$)	(18 360 \$)
2062	0 \$	(3 498 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(14 169 \$)	(17 791 \$)
2063	0 \$	(3 425 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(13 624 \$)	(17 250 \$)
2064	0 \$	(3 357 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(13 100 \$)	(16 737 \$)
TOTAL	(244 952 \$)	(464 646 \$)	(1 400 \$)	(1 311 355 \$)	(1 035 522 \$)	(2 039 707 \$)	(5 097 581 \$)

Riprap

Année	Érosion	Submersion	Dommmages infrastructures	Coûts des mesures d'adaptation	Impacts économiques	Impacts sociaux	Somme des coûts
2015	(241 172 \$)	(18 094 \$)	(485 \$)	0 \$	(358 797 \$)	(120 837 \$)	(739 386 \$)
2016	(1 925 \$)	(17 399 \$)	(466 \$)	(252 404 \$)	(344 997 \$)	(77 914 \$)	(695 105 \$)
2017	(1 855 \$)	(16 729 \$)	(448 \$)	(80 899 \$)	(331 728 \$)	(74 918 \$)	(506 577 \$)
2018	0 \$	(16 086 \$)	0 \$	(493 251 \$)	0 \$	(103 981 \$)	(613 318 \$)
2019	0 \$	(15 467 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(76 522 \$)	(91 989 \$)
2020	0 \$	(14 872 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(73 579 \$)	(88 451 \$)
2021	0 \$	(14 300 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(70 749 \$)	(85 049 \$)
2022	0 \$	(13 750 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(68 028 \$)	(81 778 \$)
2023	0 \$	(13 221 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(65 411 \$)	(78 633 \$)
2024	0 \$	(12 713 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(62 895 \$)	(75 608 \$)
2025	0 \$	(12 224 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(60 476 \$)	(72 700 \$)
2026	0 \$	(11 754 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(58 150 \$)	(69 904 \$)
2027	0 \$	(11 302 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(55 914 \$)	(67 215 \$)
2028	0 \$	(10 867 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(53 763 \$)	(64 630 \$)
2029	0 \$	(10 449 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(51 695 \$)	(62 144 \$)
2030	0 \$	(10 047 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(49 707 \$)	(59 754 \$)
2031	0 \$	(9 661 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(47 795 \$)	(57 456 \$)
2032	0 \$	(9 289 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(45 957 \$)	(55 246 \$)
2033	0 \$	(8 932 \$)	0 \$	(103 507 \$)	0 \$	(44 189 \$)	(156 628 \$)
2034	0 \$	(8 588 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(42 490 \$)	(51 078 \$)
2035	0 \$	(11 031 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(40 856 \$)	(51 886 \$)
2036	0 \$	(10 606 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(39 284 \$)	(49 891 \$)
2037	0 \$	(10 198 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(37 773 \$)	(47 972 \$)
2038	0 \$	(9 806 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(36 320 \$)	(46 127 \$)
2039	0 \$	(9 429 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(34 924 \$)	(44 353 \$)
2040	0 \$	(9 066 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(33 580 \$)	(42 647 \$)
2041	0 \$	(8 718 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(32 289 \$)	(41 006 \$)
2042	0 \$	(8 382 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(31 047 \$)	(39 429 \$)
2043	0 \$	(8 060 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(29 853 \$)	(37 913 \$)
2044	0 \$	(7 750 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(28 705 \$)	(36 455 \$)
2045	0 \$	(7 452 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(27 601 \$)	(35 052 \$)
2046	0 \$	(7 165 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(26 539 \$)	(33 704 \$)
2047	0 \$	(6 890 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(25 518 \$)	(32 408 \$)
2048	0 \$	(6 625 \$)	0 \$	(28 737 \$)	0 \$	(24 537 \$)	(59 898 \$)
2049	0 \$	(6 370 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(23 593 \$)	(29 963 \$)
2050	0 \$	(6 125 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(22 686 \$)	(28 811 \$)
2051	0 \$	(5 889 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(21 813 \$)	(27 702 \$)
2052	0 \$	(5 663 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(20 974 \$)	(26 637 \$)
2053	0 \$	(5 445 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(20 167 \$)	(25 613 \$)
2054	0 \$	(5 236 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(19 392 \$)	(24 627 \$)
2055	0 \$	(6 282 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(18 646 \$)	(24 928 \$)
2056	0 \$	(6 041 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(17 929 \$)	(23 969 \$)
2057	0 \$	(5 808 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(17 239 \$)	(23 048 \$)
2058	0 \$	(5 585 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(16 576 \$)	(22 161 \$)
2059	0 \$	(5 370 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(15 939 \$)	(21 309 \$)
2060	0 \$	(5 164 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(15 326 \$)	(20 489 \$)
2061	0 \$	(4 965 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(14 736 \$)	(19 701 \$)
2062	0 \$	(4 774 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(14 169 \$)	(18 943 \$)
2063	0 \$	(4 590 \$)	0 \$	(11 967 \$)	0 \$	(13 624 \$)	(30 182 \$)
2064	0 \$	(4 414 \$)	0 \$	0 \$	0 \$	(13 100 \$)	(17 514 \$)
TOTAL	(244 952 \$)	(464 646 \$)	(1 400 \$)	(970 765 \$)	(1 035 522 \$)	(2 039 707 \$)	(4 756 991 \$)

Immunitation et relocalisation stratégique

Année	Érosion	Submersion	Dommmages infrastructures	Coûts des mesures d'adaptation	Impacts économiques	Impacts sociaux	Somme des coûts
2015	(241 172 \$)	(21 474 \$)	(485 \$)	(1 131 549 \$)	(358 797 \$)	(176 694 \$)	(1 930 172 \$)
2016	(1 925 \$)	(20 648 \$)	(466 \$)	0 \$	(344 997 \$)	(77 914 \$)	(445 951 \$)
2017	(1 855 \$)	(19 854 \$)	(448 \$)	0 \$	(331 728 \$)	(74 918 \$)	(428 803 \$)
2018	(1 786 \$)	(19 091 \$)	(431 \$)	0 \$	(318 969 \$)	(72 036 \$)	(412 313 \$)
2019	(1 721 \$)	(18 356 \$)	(415 \$)	0 \$	(306 701 \$)	(69 266 \$)	(396 459 \$)
2020	(146 423 \$)	(15 392 \$)	(399 \$)	(113 693 \$)	(442 357 \$)	(139 216 \$)	(857 481 \$)
2021	(127 219 \$)	(13 263 \$)	(383 \$)	(102 623 \$)	(567 125 \$)	(165 882 \$)	(976 495 \$)
2022	(103 715 \$)	(10 915 \$)	(369 \$)	(105 116 \$)	(681 640 \$)	(190 290 \$)	(1 092 045 \$)
2023	(1 251 \$)	(10 495 \$)	(354 \$)	0 \$	(655 424 \$)	(148 021 \$)	(815 545 \$)
2024	(1 211 \$)	(10 091 \$)	(341 \$)	0 \$	(630 215 \$)	(142 328 \$)	(784 186 \$)
2025	(1 169 \$)	(9 703 \$)	(328 \$)	0 \$	(605 976 \$)	(136 854 \$)	(754 030 \$)
2026	(1 126 \$)	(9 330 \$)	(315 \$)	0 \$	(582 669 \$)	(131 590 \$)	(725 031 \$)
2027	(1 085 \$)	(8 971 \$)	(303 \$)	0 \$	(560 259 \$)	(126 529 \$)	(697 147 \$)
2028	(93 345 \$)	(7 710 \$)	(291 \$)	(142 398 \$)	(754 195 \$)	(227 781 \$)	(1 225 719 \$)
2029	(912 \$)	(7 413 \$)	(280 \$)	0 \$	(725 187 \$)	(163 777 \$)	(897 568 \$)
2030	(878 \$)	(7 128 \$)	(269 \$)	0 \$	(697 295 \$)	(157 478 \$)	(863 048 \$)
2031	(133 534 \$)	(6 600 \$)	(259 \$)	(156 755 \$)	(862 041 \$)	(245 759 \$)	(1 404 948 \$)
2032	(703 \$)	(6 347 \$)	(249 \$)	0 \$	(828 885 \$)	(187 196 \$)	(1 023 380 \$)
2033	(677 \$)	(6 102 \$)	(239 \$)	0 \$	(797 005 \$)	(179 996 \$)	(984 020 \$)
2034	(653 \$)	(5 868 \$)	(230 \$)	0 \$	(766 351 \$)	(173 073 \$)	(946 175 \$)
2035	(630 \$)	(7 397 \$)	(664 \$)	(18 963 \$)	(736 876 \$)	(166 416 \$)	(930 947 \$)
2036	(608 \$)	(7 113 \$)	(639 \$)	0 \$	(708 535 \$)	(160 016 \$)	(876 910 \$)
2037	(586 \$)	(6 839 \$)	(614 \$)	0 \$	(681 283 \$)	(153 861 \$)	(843 184 \$)
2038	(61 451 \$)	(5 844 \$)	(590 \$)	(95 626 \$)	(800 654 \$)	(219 633 \$)	(1 183 798 \$)
2039	(451 \$)	(5 619 \$)	(568 \$)	0 \$	(769 859 \$)	(173 865 \$)	(950 363 \$)
2040	(435 \$)	(5 403 \$)	(546 \$)	0 \$	(740 249 \$)	(167 178 \$)	(913 812 \$)
2041	(420 \$)	(5 195 \$)	(525 \$)	0 \$	(711 778 \$)	(160 748 \$)	(878 667 \$)
2042	(405 \$)	(4 996 \$)	(505 \$)	0 \$	(684 402 \$)	(154 566 \$)	(844 873 \$)
2043	(38 607 \$)	(4 133 \$)	(485 \$)	(38 592 \$)	(717 904 \$)	(178 083 \$)	(977 804 \$)
2044	(11 771 \$)	(3 974 \$)	(467 \$)	(32 126 \$)	(747 817 \$)	(184 225 \$)	(980 380 \$)
2045	(317 \$)	(3 821 \$)	(449 \$)	0 \$	(719 055 \$)	(162 392 \$)	(886 033 \$)
2046	(39 875 \$)	(3 674 \$)	(431 \$)	(36 821 \$)	(744 583 \$)	(182 337 \$)	(1 007 721 \$)
2047	(254 \$)	(3 533 \$)	(415 \$)	0 \$	(715 945 \$)	(161 690 \$)	(881 837 \$)
2048	(245 \$)	(3 397 \$)	(399 \$)	0 \$	(688 409 \$)	(155 471 \$)	(847 920 \$)
2049	(236 \$)	(3 266 \$)	(383 \$)	0 \$	(661 932 \$)	(149 491 \$)	(815 308 \$)
2050	(228 \$)	(3 141 \$)	(369 \$)	0 \$	(636 473 \$)	(143 741 \$)	(783 951 \$)
2051	(220 \$)	(3 020 \$)	(355 \$)	0 \$	(611 993 \$)	(138 213 \$)	(753 800 \$)
2052	(212 \$)	(2 904 \$)	(341 \$)	0 \$	(588 455 \$)	(132 897 \$)	(724 809 \$)
2053	(205 \$)	(2 792 \$)	(328 \$)	0 \$	(565 822 \$)	(127 786 \$)	(696 932 \$)
2054	(197 \$)	(2 685 \$)	(315 \$)	0 \$	(544 060 \$)	(122 871 \$)	(670 128 \$)
2055	(190 \$)	(2 268 \$)	(1 414 \$)	(47 098 \$)	(523 134 \$)	(118 145 \$)	(692 249 \$)
2056	(184 \$)	(2 180 \$)	(1 360 \$)	0 \$	(503 014 \$)	(113 601 \$)	(620 338 \$)
2057	(177 \$)	(2 097 \$)	(1 308 \$)	0 \$	(483 667 \$)	(109 232 \$)	(596 480 \$)
2058	(171 \$)	(2 016 \$)	(1 257 \$)	0 \$	(465 065 \$)	(105 030 \$)	(573 539 \$)
2059	(164 \$)	(1 938 \$)	(1 209 \$)	0 \$	(447 177 \$)	(100 991 \$)	(551 480 \$)
2060	(158 \$)	(1 864 \$)	(1 162 \$)	0 \$	(429 978 \$)	(97 107 \$)	(530 269 \$)
2061	(153 \$)	(1 792 \$)	(1 118 \$)	0 \$	(413 441 \$)	(93 372 \$)	(509 875 \$)
2062	(147 \$)	(1 723 \$)	(1 075 \$)	0 \$	(397 539 \$)	(89 780 \$)	(490 265 \$)
2063	(142 \$)	(1 657 \$)	(1 033 \$)	0 \$	(382 249 \$)	(86 327 \$)	(471 409 \$)
2064	(137 \$)	(1 593 \$)	(994 \$)	0 \$	(367 547 \$)	(83 007 \$)	(453 278 \$)
TOTAL	(1 021 334 \$)	(342 628 \$)	(28 170 \$)	(2 021 360 \$)	(30 006 713 \$)	(7 178 671 \$)	(40 598 876 \$)



FQM

INGÉNIERIE ET
INFRASTRUCTURES



Les Îles-de-la-Madeleine
Municipalité

Annexe 11 : La Grave – Recharge de plage, Îles-de-la-Madeleine, Québec

Yann Ropars, ing. M.Sc., mars 2018

La Grave - Recharge de plage

Îles de la Madeleine, Québec



RAPPORT TECHNIQUE FINAL

Par

Yann ROPARS, ing., M.Sc.

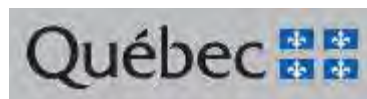


CONSULTANTS ROPARS INC
3643, Chemin Saint-Louis
Québec (Québec) G1W 1T2
yann_ropars@videotron.ca

Mars 2018

Pour

Ministère de la Sécurité publique



TABLES DES MATIÈRES

TABLES DES MATIÈRES	i
Liste des figures	i
1 Introduction	1
2 Données de base	3
2.1 Vagues	3
2.2 Niveaux d'eau.....	5
2.3 Séries chronologiques synchrones.....	7
2.4 Données topographiques	8
3 Recharge de plage	10
3.1 Dimensionnement d'une recharge de plage	10
3.2 Recherche de matériaux disponibles	12
3.3 Remontée des vagues sur une plage	12
3.3.1 Notions théoriques.....	12
3.3.2 Pentes de plages.....	13
3.3.3 Remontée des vagues sur une plage	15
3.4 Profils d'une plage rechargée	20
3.5 Urgence de l'intervention.....	21
4 Projets de recharge de plage.....	22
4.1 Recharge de plage complète.....	22
4.2 Recharge de plage partielle	22
5 Coûts.....	24
5.1 Coûts du projet de protection complète.....	24
5.2 Coûts du projet de protection partielle	24
6 Conclusion et recommandations	25
6.1 Conclusion.....	25
6.2 Recommandations	25

LISTE DES FIGURES

Figure 1.2	Localisation du secteur de La Grave à Havre-Aubert (Carte marine 4957)	2
Figure 2.1	Rose des vents de la station NARR 275-166 (1979-2012 – Année complète)	3

Figure 2.2	Rose des vagues au large de Havre-Aubert (1979-2012 – Année complète)	4
Figure 2.3	Rose des vagues réfractées près de La Grave (1979-2012 – Année complète)	4
Figure 2.4	Fréquence de dépassement des hauteurs de vagues à Havre-Aubert (au large et réfractées) – 1979-2012 – Année complète.....	5
Figure 2.5	Fréquence de dépassement des niveaux d'eau à Havre-Aubert – 1979-2011	6
Figure 2.6	Relation entre les hauteurs de vagues au large et les niveaux d'eau à La Grave - Havre-Aubert – 1979-2011	7
Figure 2.7	Relation entre les hauteurs de vagues réfractées et les niveaux d'eau à La Grave - Havre-Aubert – 1979-2011	8
Figure 2.8	Localisation des transects et points de calcul de la réfraction des vagues	9
Figure 3.1	Relation entre le paramètre « A » et le diamètre médian du matériel de recharge....	10
Figure 3.2	Évolution d'un profil de plage de galet (CIRIA – figure 145 page 245)	11
Figure 3.4	Configuration de plage et définition de pentes	14
Figure 3.5	Remontée R_{max} des vagues sur une plage – Transect LG5 – Mase-1979.....	15
Figure 3.6	Remontée $R_{2\%}$ des vagues sur une plage – Transect LG5 – Mase-1979.....	16
Figure 3.7	Remontée R_{max} des vagues sur une plage – Transect LG5 – Battjes-1971-ajustée..	16
Figure 3.8	Remontée $R_{2\%}$ des vagues sur une plage – Transect LG5 – Stockdon-2006.....	17
Figure 3.9	Remontée $R_{2\%}$ des vagues sur une plage – Transect LG5 – Ruggiero-2001	17
Figure 3.10	Résultats de remontée des vagues sur la plage de La Grave	18
Figure 3.11	Résultats de remontée des vagues sur le transect LG3 de la plage de La Grave	19
Figure 3.12	Résultats de remontée des vagues sur le transect LG5 de la plage de La Grave	19
Figure 3.14	Coupe-type de rechargement de plage – Transect LG3	20
Figure 3.15	Coupe-type de rechargement de plage – Transect LG6	20
Figure 4.1	Vue en plan du projet de recharge complète de la plage de La Grave	22
Figure 4.5	Vue en plan du projet de recharge partielle de la plage de La Grave	23
Figure A.1	Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG1	26
Figure A.2	Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG2	26
Figure A.3	Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG3	27
Figure A.4	Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG4	27
Figure A.5	Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG5	27
Figure A.6	Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG6	28
Figure A.7	Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG7	28
Figure A.8	Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG8	28

1 Introduction

Le site de La Grave est situé dans la municipalité de Havre-Aubert au sud des Îles de la Madeleine dans le golfe du Saint-Laurent (figure 1.1).

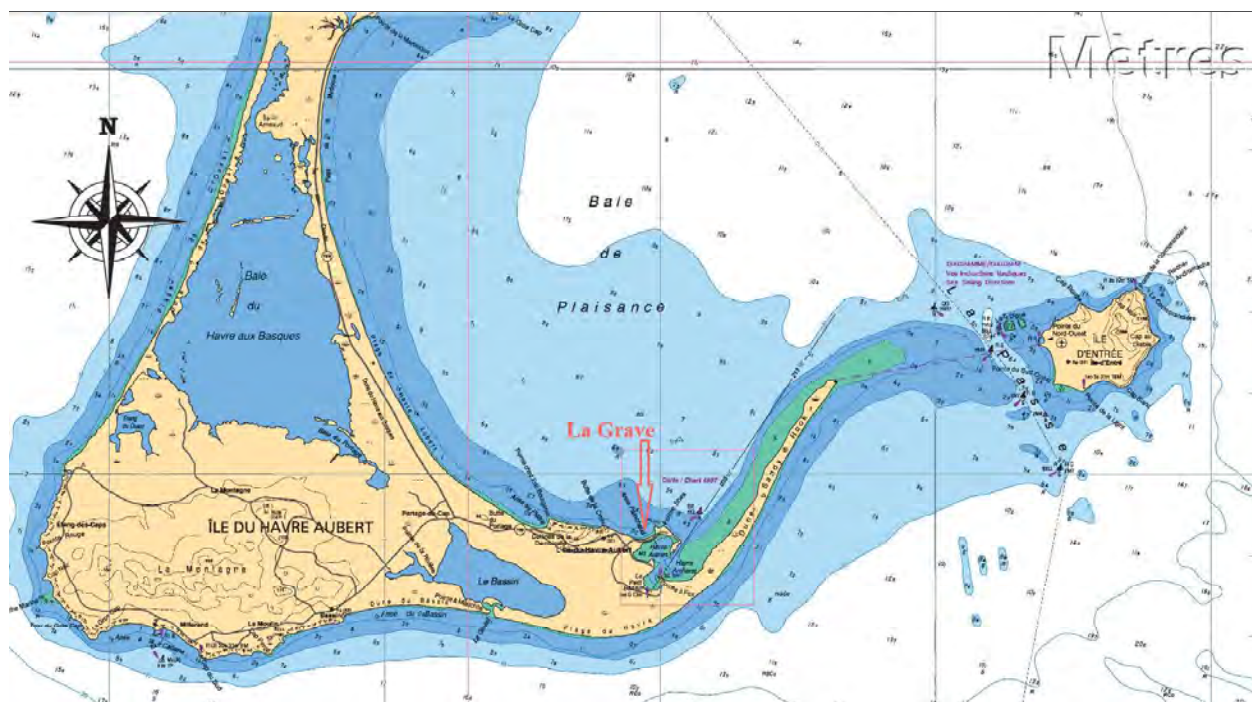


Figure 1.1 Localisation de Havre-Aubert aux Îles de la Madeleine (Carte marine 4951)

Les berges de La Grave (figure 1.2) sont affectées par l'érosion et la submersion depuis des années et plusieurs tempêtes ont déjà endommagé la rive et les infrastructures de l'Anse Painchaud.

Une intervention de protection de la plage de La Grave est envisagée sous la forme d'une recharge de plage à l'aide de matériaux granulaires, de façon éviter que les dommages ne s'étendent à l'infrastructure routière et aux maisons qui se trouvent à proximité de la berge.

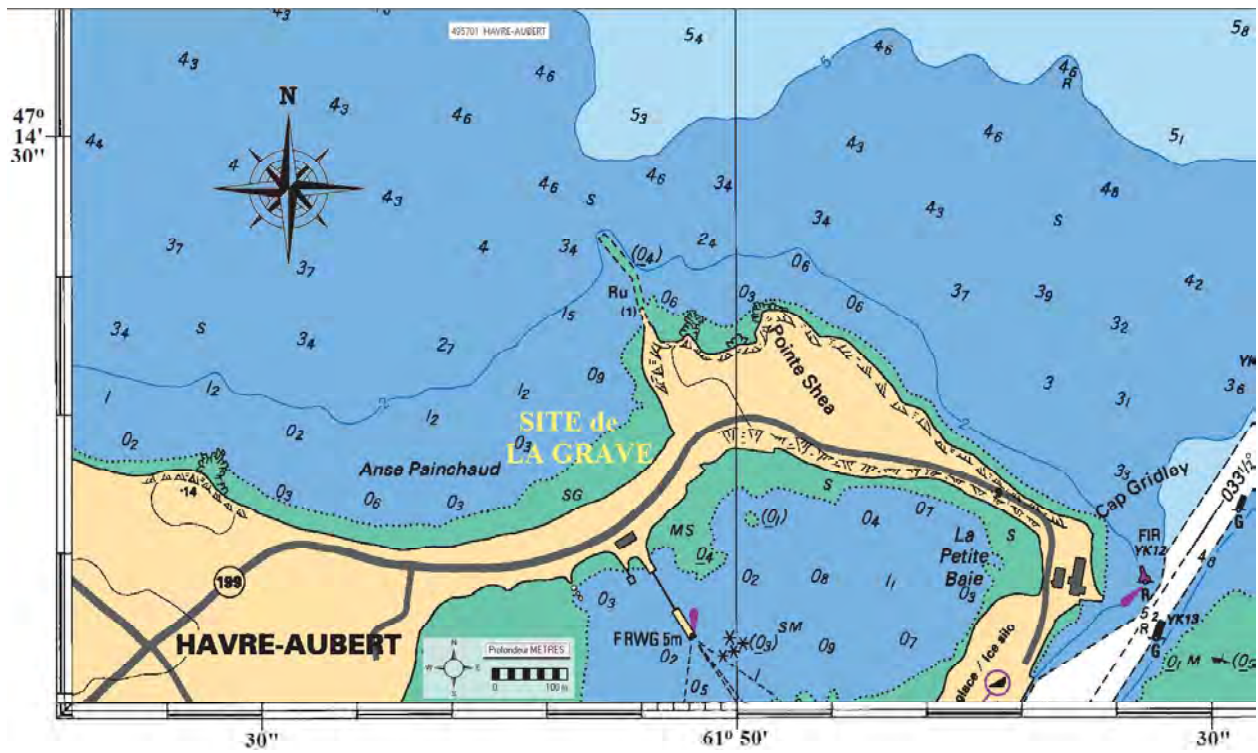


Figure 1.2 Localisation du secteur de La Grave à Havre-Aubert (Carte marine 4957)

2 Données de base

2.1 Vagues

Les données de vagues ont été produites par le modèle GENER, à partir des données de vent de la station météorologique virtuelle NARR 275-166 (1979 à 2012) et des fetchs effectifs calculés pour un point (47° 14,00' N / 61° 24,00' W) situé au large de Cap-aux-Meules.

La figure 2.1 illustre la rose des vents de la station météorologique virtuelle (1979 à 2012).

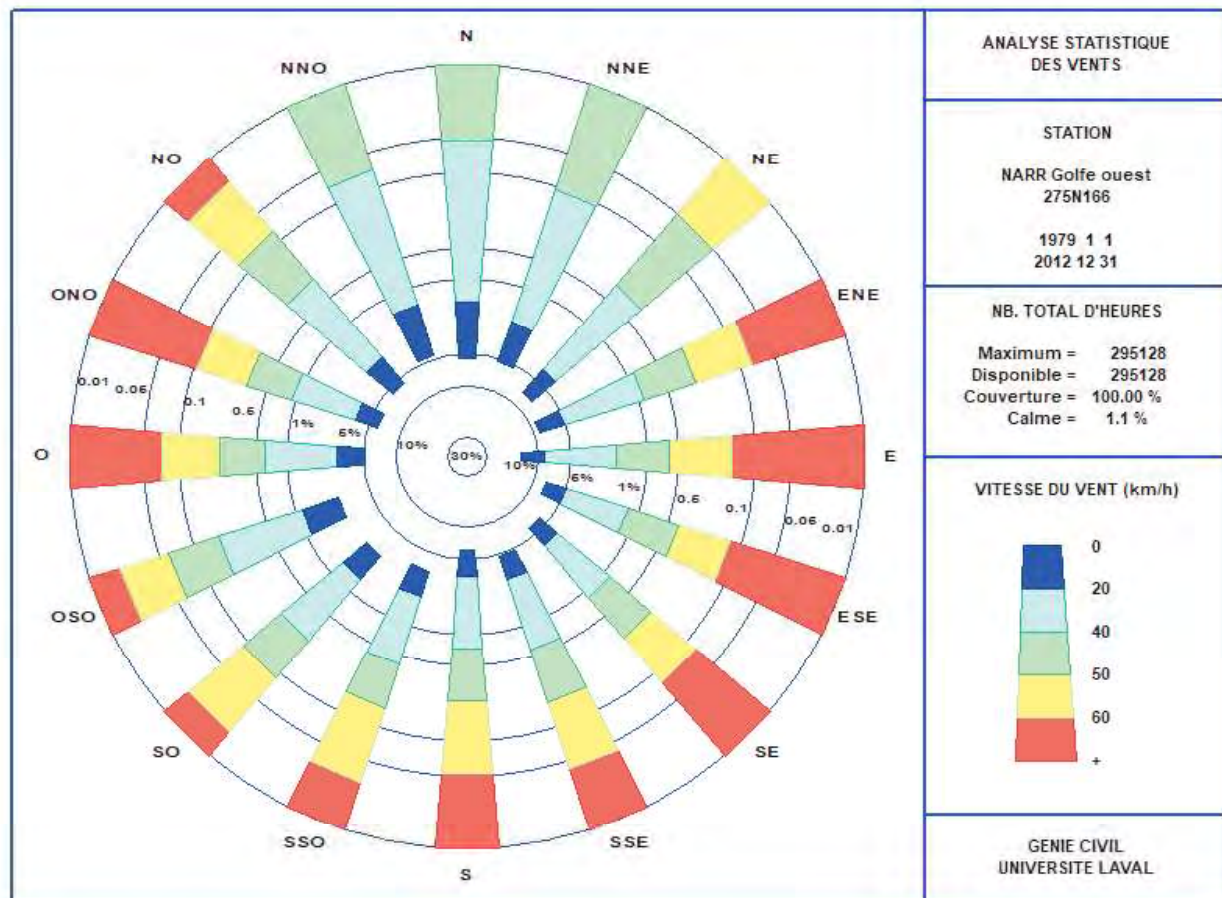


Figure 2.1 Rose des vents de la station NARR 275-166 (1979-2012 – Année complète)

La figure 2.2 illustre la rose des vagues calculées au large de Havre-Aubert pour l'année complète.

Une analyse sommaire de la réfraction des vagues vers la plage de Havre-Aubert a été faite. La figure 2.3 illustre la rose des vagues réfractées près de La Grave.

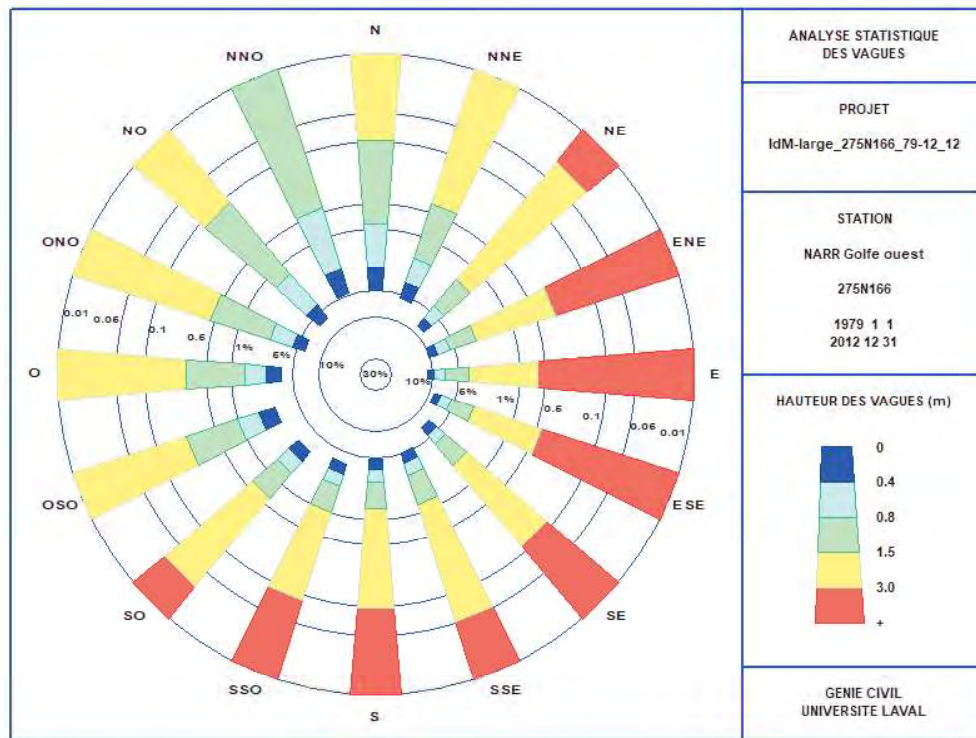


Figure 2.2 Rose des vagues au large de Havre-Aubert (1979-2012 – Année complète)

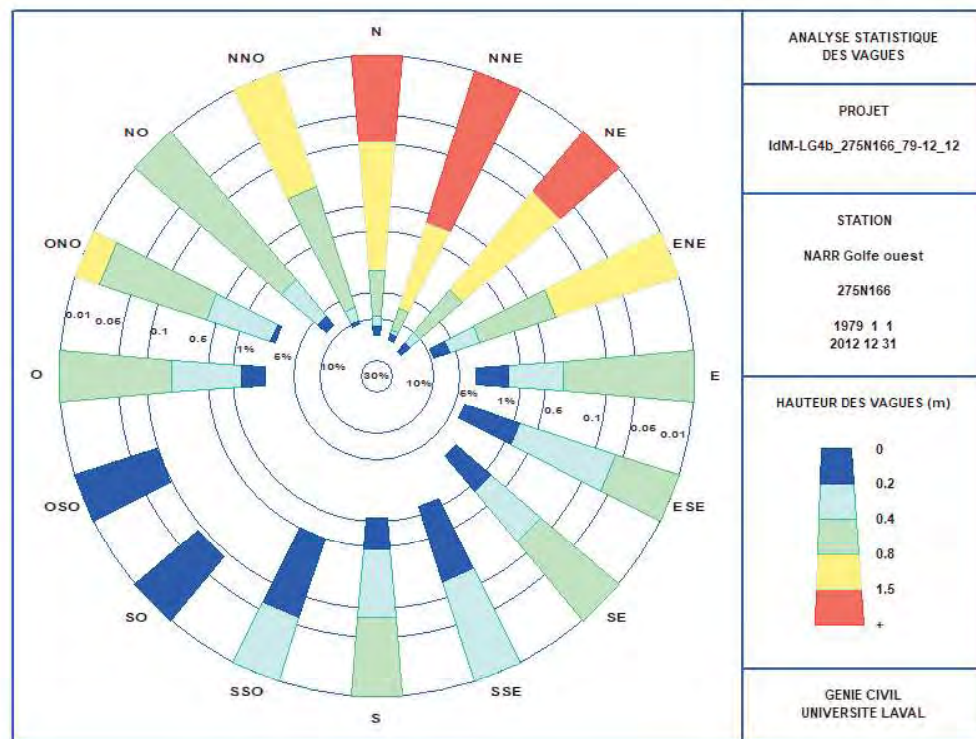


Figure 2.3 Rose des vagues réfractées près de La Grave (1979-2012 – Année complète)

La figure 2.4 illustre la fréquence de dépassement des hauteurs de vagues au large et réfractées pour l'année complète. Pour une période de retour de 50 ans, les hauteurs significatives des vagues extrêmes calculées passent de 5,3 m au large à 2,8 m réfractées (sans considérer le déferlement éventuel).

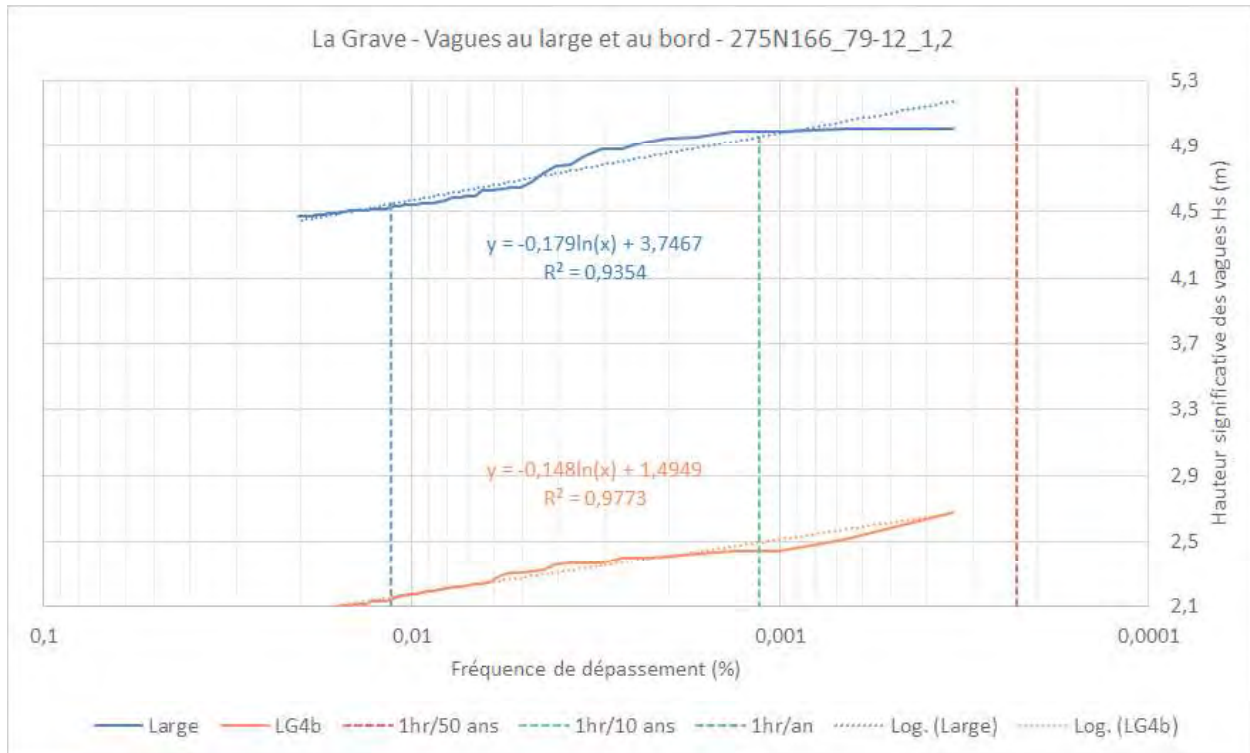


Figure 2.4 Fréquence de dépassement des hauteurs de vagues à Havre-Aubert (au large et réfractées) – 1979-2012 – Année complète

2.2 Niveaux d'eau

En l'absence de données de niveaux d'eau enregistrés sur une assez longue période dans la région de Havre-Aubert, c'est la série temporelle de niveaux d'eau modélisée pour Havre-Aubert par l'ISMER¹ (1979 à 2011) qui a été retenue pour définir les niveaux d'eau près de la plage de La Grave.

¹ Xu, Z. & Lefavre, D., "Prévision des niveaux d'eau dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en fonction des changements climatiques », Rapport X011.1 réalisé par l'ISMER / UQAR pour le compte du Ministère des Transports du Québec, Janvier 2015

La différence entre le Zéro des cartes marines (ZC) et le zéro géodésique (Niveau moyen des mers NMM-CGVD28) est de 0,619 m (SHC – 2015). Le ZC est en-dessous du NMM à Havre-Aubert.

La figure 2.5 illustre la courbe de fréquence de dépassement des niveaux d'eau hauts pour la station virtuelle 1964 / Havre-Aubert. Selon cette information, les niveaux d'eau suivants devraient être considérés dans le dimensionnement des infrastructures côtières (en considérant ou non l'influence sur les niveaux d'eau des changements climatiques et de l'affaissement isostatique dans la région de Havre-Aubert, soit 1,54 mm/an vers le bas²) :

- Période de retour de 1 an : +1,46 m NMM
- Période de retour de 10 ans : +1.93 m NMM
- Période de retour de 50 ans : +2,26 m NMM (sans influence des changements climatiques)
- Période de retour de 50 ans : +2,79 m NMM (avec influence des changements climatiques et du relèvement isostatique)

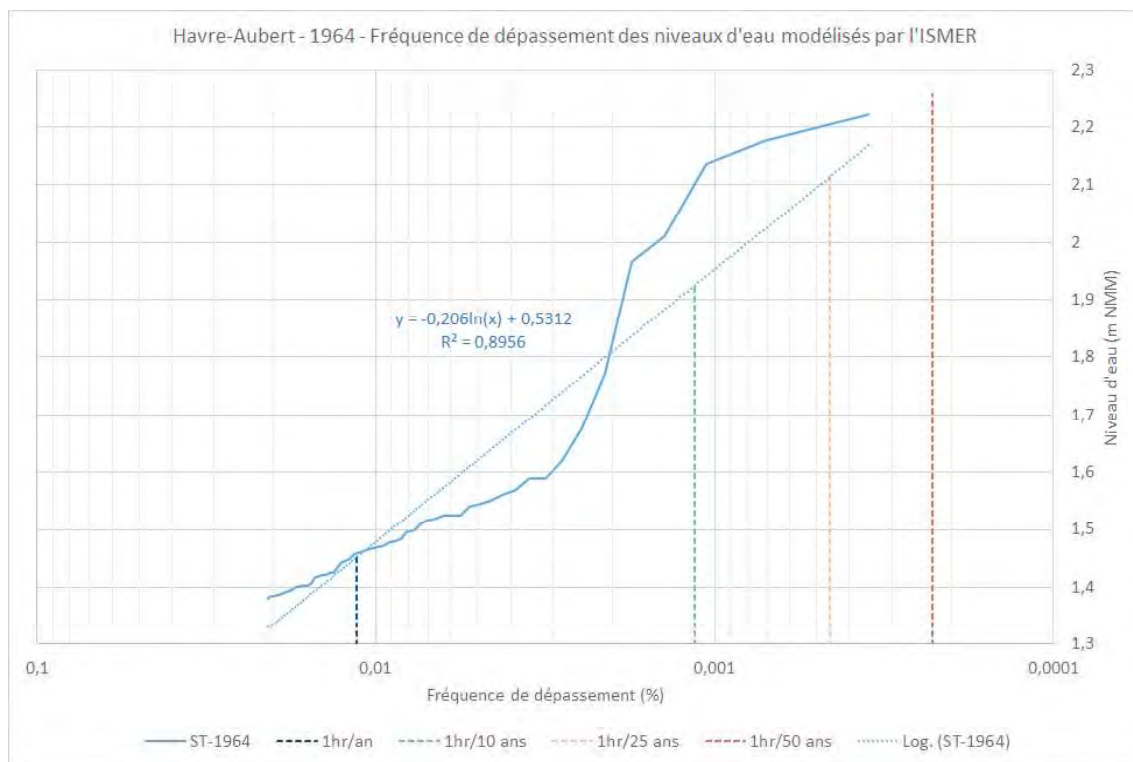


Figure 2.5 Fréquence de dépassement des niveaux d'eau à Havre-Aubert – 1979-2011

² <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/trx.php>

2.3 Séries chronologiques synchrones

Dans le cadre du dimensionnement de la recharge de plage, le calcul de la remontée des vagues sur une plage a été fait heure par heure. Dans le but de fournir les événements critiques de remontée des vagues sur la plage, deux séries chronologiques synchrones de hauteurs significatives de vagues (au large puis réfractées) et de niveaux d'eau ont été définies pour la plage de La Grave entre 1979 et 2011 à partir des informations décrites ci-dessus. Pour rester dans des paramètres pour lesquels la remontée des vagues peut influencer le dimensionnement de la recharge de plage, seuls les événements pour lesquels la hauteur de vague était supérieure à 0,10 m et le niveau d'eau était supérieur au Niveau moyen des mers (NMM-CGVD28) ont été sélectionnés pour les calculs.

Les figures 2.6 et 2.7 illustrent les relations obtenues entre les hauteurs significatives des vagues (au large et réfractées) et les niveaux d'eau synchrones, classés par ordre décroissant de la somme de Hs et du niveau d'eau.

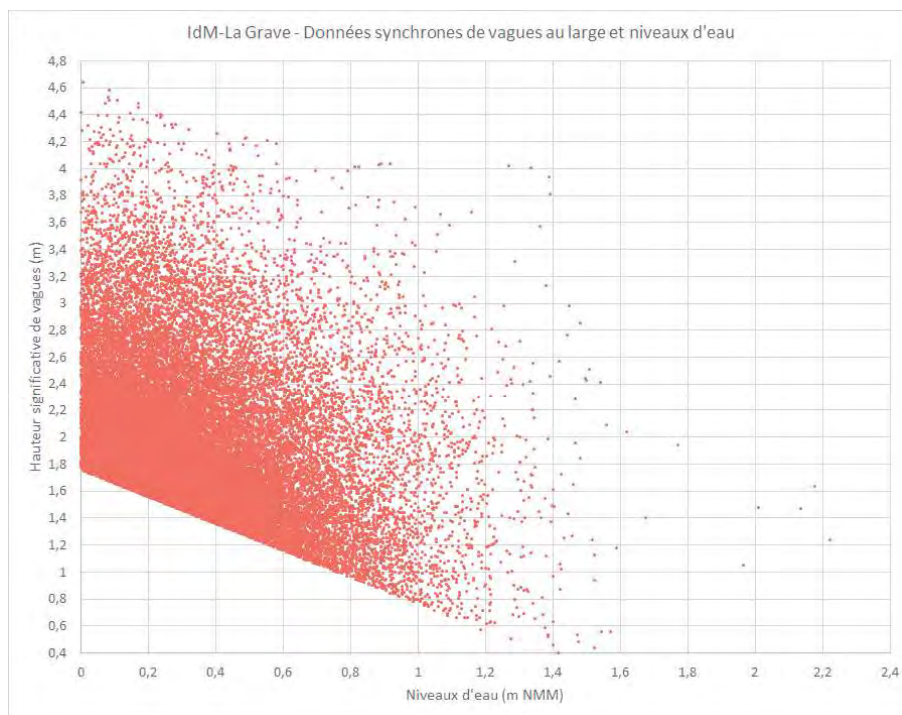


Figure 2.6 Relation entre les hauteurs de vagues au large et les niveaux d'eau à La Grave - Havre-Aubert – 1979-2011

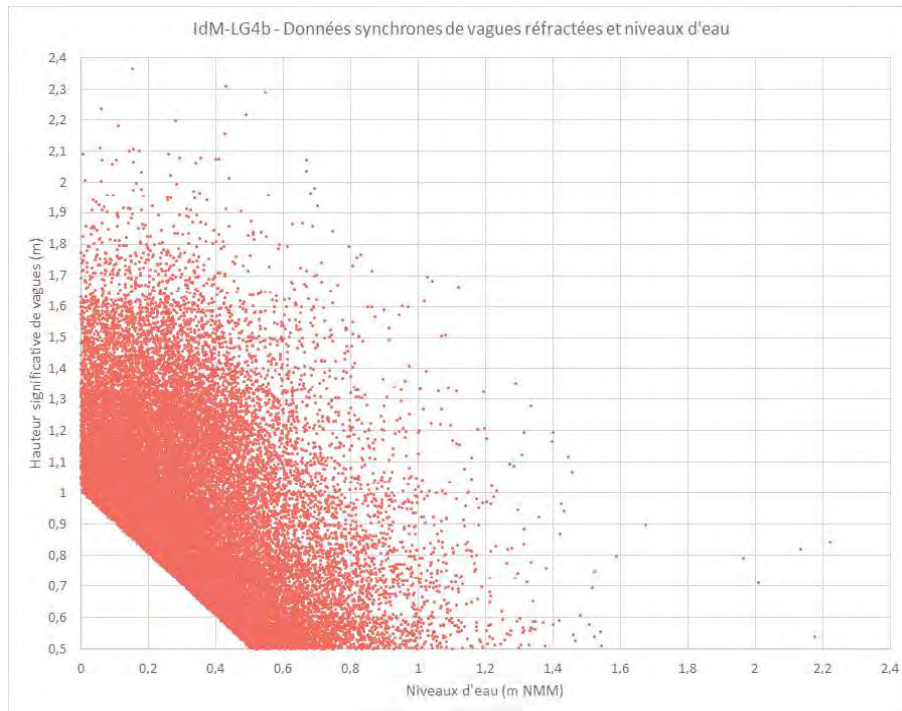


Figure 2.7 Relation entre les hauteurs de vagues réfractées et les niveaux d'eau à La Grave - Havre-Aubert – 1979-2011

2.4 Données topographiques

Les données topographiques et bathymétriques ont été extraites sous formes de transects perpendiculaires au rivage des relevés LIDAR effectués pour le compte du MSP en 2017 et des informations bathymétriques disponibles. La figure 2.8 présente la localisation de ces transects sur un fond de plan tiré du modèle de terrain de Lasalle[NHC-2011.

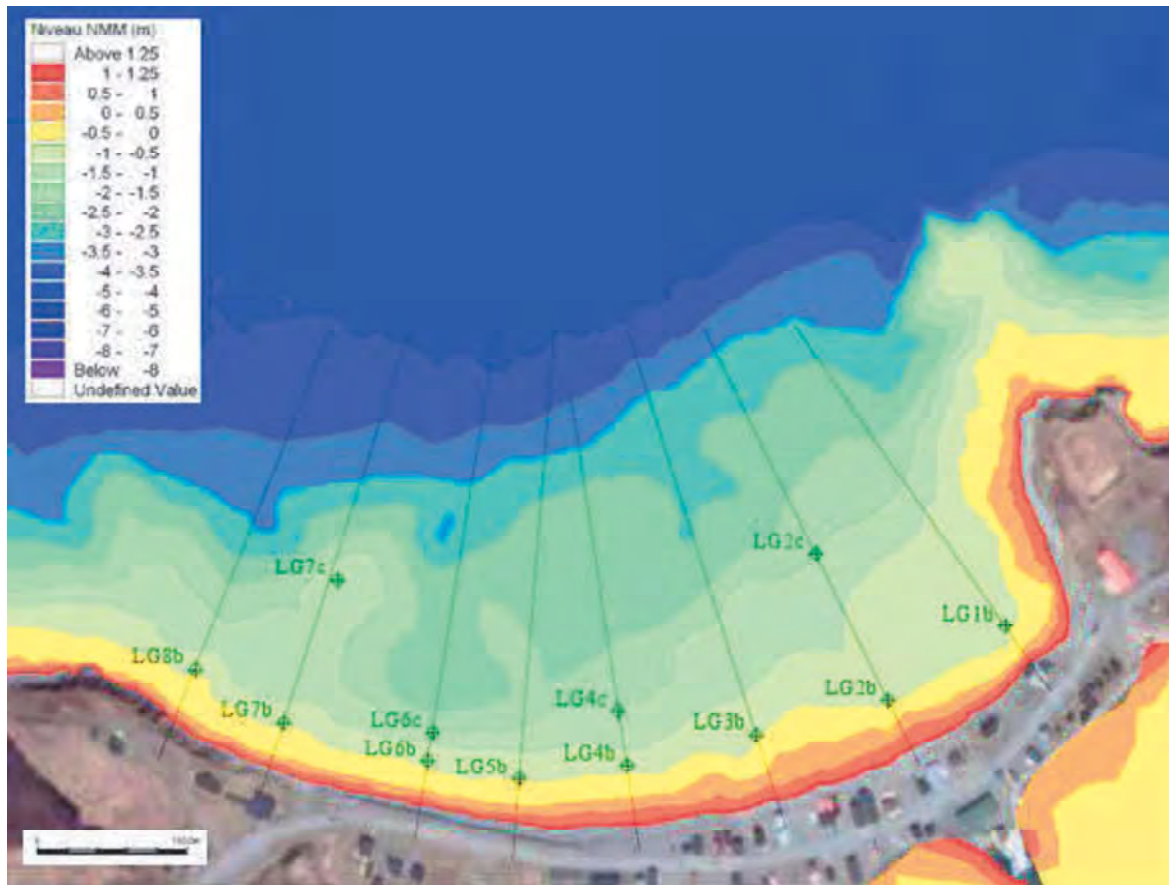


Figure 2.8 Localisation des transects et points de calcul de la réfraction des vagues

3 Recharge de plage

3.1 Dimensionnement d'une recharge de plage

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 granulaire 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. Cette équation est la suivante :

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

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 3.1 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.

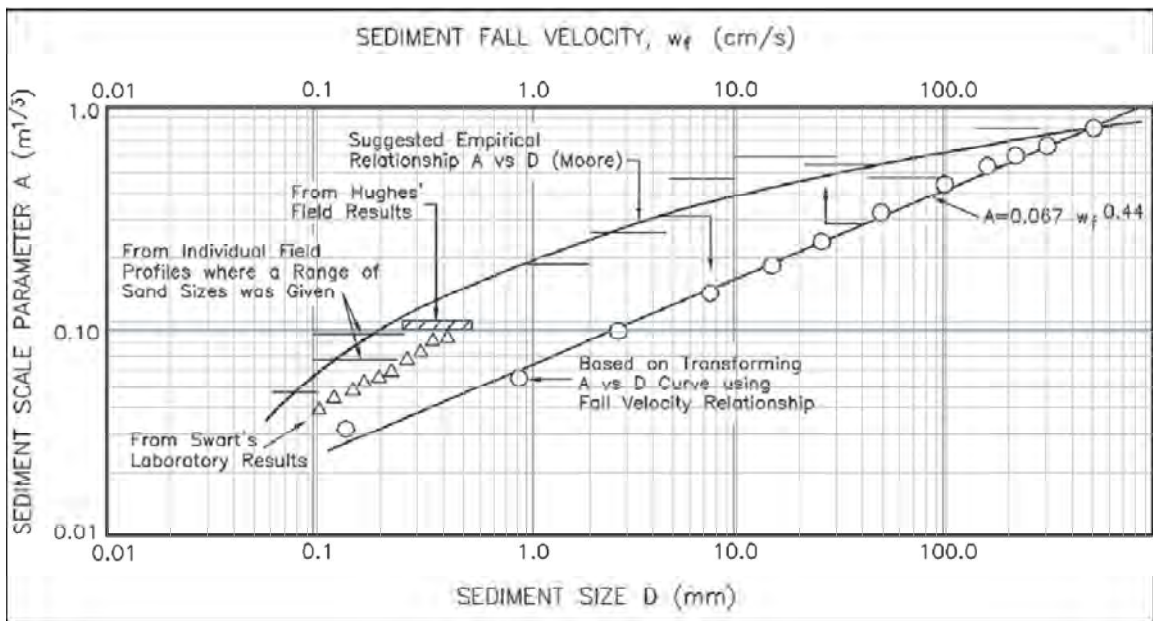


Figure III-3-17. Variation of sediment scale parameter A with sediment size D and fall velocity w_f (Dean 1987b)

Figure 3.1 Relation entre le paramètre « A » et le diamètre médian du matériel de recharge

Le CIRIA³ 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 l'exposition des plages des Îles de la Madeleine 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 d'un 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 illustrée à la figure 3.2 était de 1V: 5H. Ce modèle a cependant l'inconvénient de ne pas tenir compte de la marée qui tend à régulariser le profil de la plage.

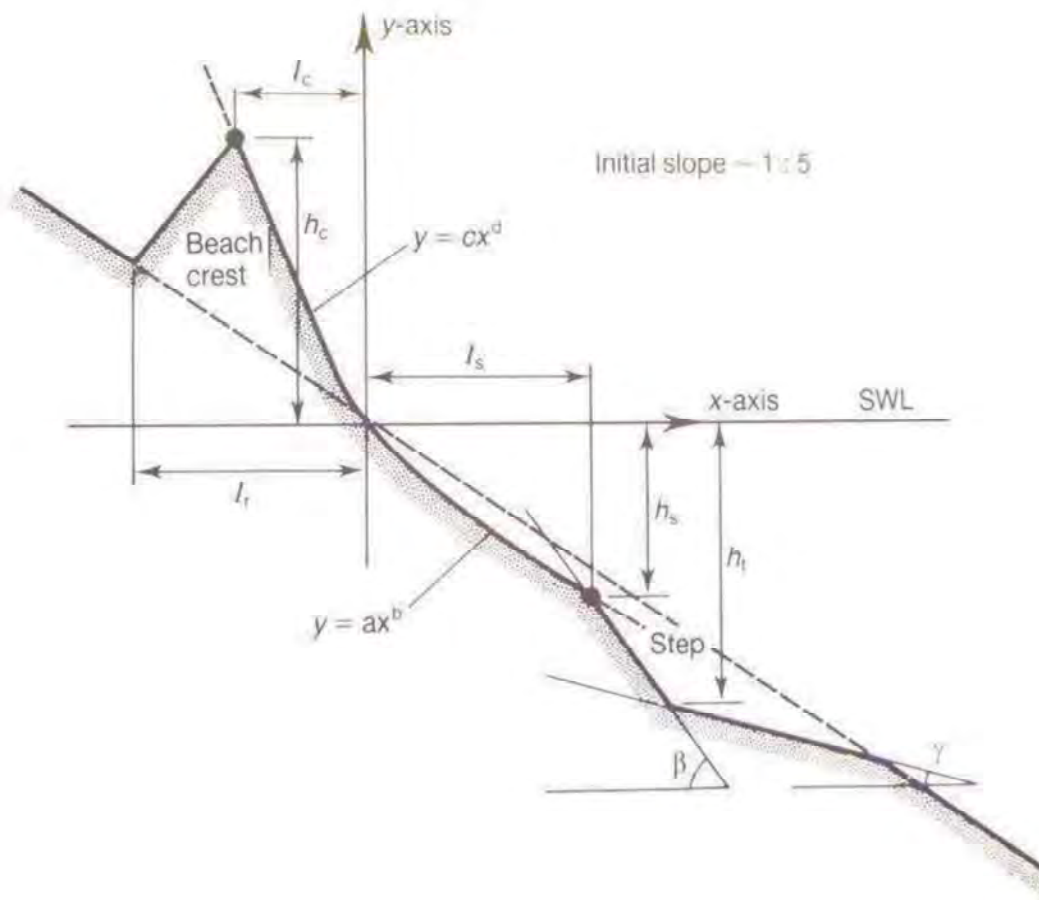


Figure 3.2 Évolution d'un profil de plage de galet (CIRIA – figure 145 page 245)

³. Construction Industry Research and Information Association – Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, 1991.

Des modélisations hydro-sédimentaires effectuées en 2017 par Lasalle|NHC pour le concept final de la recharge de plage de Percé montrent que la recharge proposée devrait se déformer en construisant une crête de plage similaire à celle de la figure 3.2.

3.2 Recherche de matériaux disponibles

Aucune recherche de matériaux granulaires susceptibles de convenir pour un projet de recharge de la plage de La Grave à Havre-Aubert n'a été faite dans la région. Il faudrait rechercher ces matériaux sur les Îles, mais également dans les provinces voisines (transport par barges) avant de se lancer dans la finalisation du concept de recharge de plage. Des analyses granulométriques seront requises concernant les sources de matériaux potentielles.

Pour les sédiments de recharge de plage de Havre-Aubert, l'hypothèse d'un diamètre médian D_{50} de l'ordre de 15 mm a été posée pour les calculs. Le matériel de recharge serait essentiellement un gravier avec du sable.

3.3 Remontée des vagues sur une plage

3.3.1 Notions théoriques

En l'absence de mesures faites sur place, la remontée des vagues sur la plage de La Grave à Havre-Aubert peut être calculée à l'aide de plusieurs équations paramétriques (CEM⁴ et autres références) :

Mase-1989 : équation II-4-28 du C.E.M. pour le R_{\max} et équation II-4-29 du CEM pour le $R_{2\%}$. Ce calcul s'effectue avec les caractéristiques des vagues réfractées.

$$R_{\max} = 2,32 * H_0 * \xi_0^{0,77}$$

$$R_{2\%} = 1,86 * H_0 * \xi_0^{0,71}$$

Battjes-1971 ajustée selon Didier & al.-2016. Ce calcul s'effectue avec les caractéristiques des vagues au large.

$$R_{\max} = 1,91 * H_{m0} * \xi_0 + 0,22$$

Stockdon & al.-2006 – formulation générale pour plages réfléchives et dissipatives. Ce calcul s'effectue avec les caractéristiques des vagues au large.

$$R_{2\%} = 1,1 * (0,35 * \beta * (H_0 * L_0)^{1/2} + 1/2 * (H_0 * L_0 * (0,563 * \beta^2 + 0,004))^{1/2})$$

⁴ Coastal Engineering Manual

Ruggiero & al.-2001 - Ce calcul s'effectue avec les caractéristiques des vagues au large.

$$R_{2\%} = 0,27 * (\tan\beta * H_{s0} * L_0)^{0,5}$$

Les séries temporelles synchrones de niveaux d'eau et de hauteurs des vagues (au large et réfractées) ont été utilisées pour définir les événements qui affecteraient la recharge de plage, les vagues étant issues de la modélisation faite à partir des vents des réanalyses NARR (275-166) et les niveaux d'eau étant issus de la modélisation faite par l'ISMER à Havre-Aubert.

La remontée des vagues sur la plage de La Grave a été calculée en fonction des caractéristiques des combinaisons les plus défavorables de niveau d'eau et de hauteur de vagues (réfractées ou au large) et en fonction de différentes pentes de plage.

3.3.2 Pentés de plages

En nature, les plages peuvent avoir des configurations extrêmement variées et il existe de très nombreuses manières de définir la pente d'une plage. La littérature est relativement peu explicite sur la ou les pentes de plage qui devraient être considérées dans les équations.

La figure 3.4⁵ illustre quelques types de pentes que l'on peut retrouver le long des rivages du Québec. Le point D_{high} de la figure 3.4 correspondrait au point de remontée maximale des vagues alors que le point S correspondrait à la ligne du rivage / début de la végétation. Le bas de plage (*hinge line*) correspondrait à la limite inférieure de la zone de mobilité des sédiments de haut de plage (souvent marquée par un point d'inflexion du profil de plage et un changement de nature du substrat sur les plages du Québec) et la limite inférieure de l'estran (extrémité du côté du large de la plate-forme littorale / *platform edge*) correspond en général à la limite de marée basse.

Comme le point D_{high} est l'information qui est recherchée à travers les calculs de remontée des vagues sur un rivage, il faut s'en remettre à un critère topographique vraisemblable pour trouver la pente « β_{fs} » (« fs » pour « *foreshore* ») aussi nommée « pente du littoral ». En général, on définit le point D_{high} comme le sommet de la première barrière morphologique au-dessus de la plage.

Pour normaliser le choix du point « S » qui correspondrait à la limite de la végétation terrestre, c'est l'élévation correspondant au niveau d'eau de 2 ans de période de retour qui a été retenue dans le cadre de ce projet.

⁵ Didier, D. & al., "Wave runup estimations on platform-beaches for coastal flood hazards", Nat Hazards – DOI 10.1007/s11069-016-2399-5, May 2016

Pour normaliser le choix de la limite basse de la plate-forme littorale, c'est l'élévation correspondant à la moyenne des élévations du niveau d'eau à laquelle on soustrait 2 écart-type (σ) qui a été retenue. Ce choix a été validé sur les battures de Sainte-Luce / Sainte-Flavie.

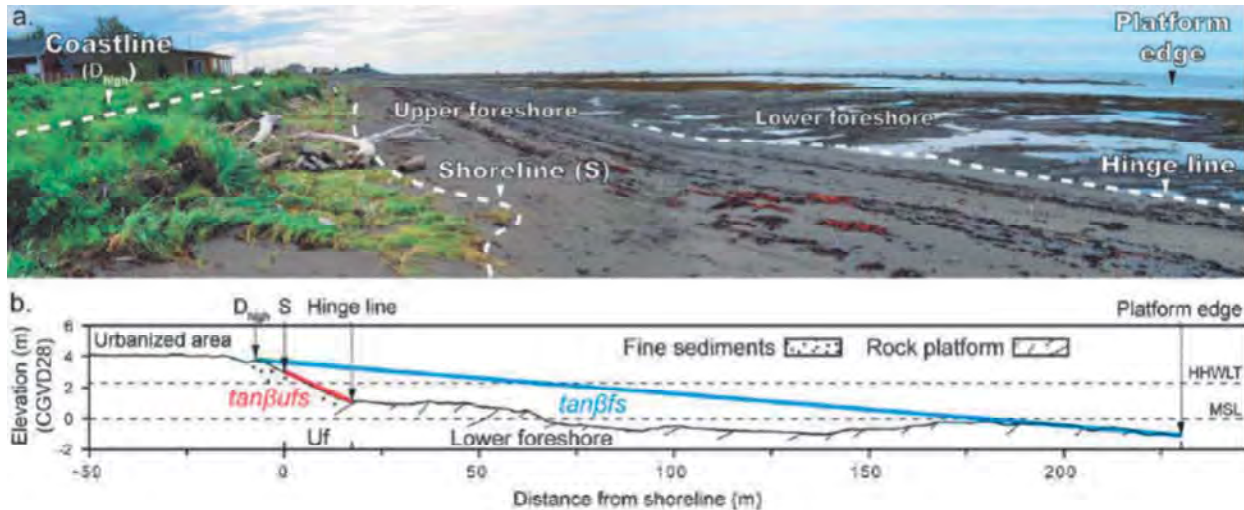


Figure 3.4 Configuration de plage et définition de pentes

Dans le secteur de Havre-Aubert, la moyenne des niveaux d'eau est de +0,07 m NMM, l'écart-type σ est de 0,32 m et les élévations Moy+2* σ et Moy-2* σ sont de +0,71 m NMM et -0,56 m NMM. Le zéro des cartes marines se trouve à l'élévation -0,62 m NMM.

En plus des deux types de pentes illustrées sur la figure 3.4, deux autres types de pentes a été considérées, soit quatre types de pente en tout :

- la pente « β_{ufs} » (upper-foreshore),
- la pente « β_{fs} » (foreshore),
- la pente « DZ » entre le point « D_{high} » et l'extrémité de la batture proximale de La Grave qui est en moyenne à l'élévation -0,24 m NMM (Moy- σ) et
- la pente « SZ » entre le point « S » et l'extrémité de la batture proximale à l'élévation -0,24 m NMM.

Pour le transect LG5, les pentes sont de :

- « β_{ufs} » 8,04%
- « β_{fs} » 8,40%
- « DZ » 11,04%

- « SZ » 5,99%

3.3.3 Remontée des vagues sur une plage

Les figures 3.5 à 3.9 présentent les résultats des calculs de la remontée R_{max} et $R_{2\%}$ sur la plage de La Grave au transect LG5 selon les pentes considérées (DZ, SZ, β_{fs} et β_{ufs}) et selon la théorie de remontée des vagues retenue (Mase-1979 utilisant les vagues réfractées / Stockdon-2006, Ruggiero-2001 et Battjes-1971-ajustée utilisant les vagues au large). Les résultats sont tous présentés sous forme d'**élévation atteinte par les vagues en tenant compte du niveau d'eau** et non simplement en termes de remontée absolue des vagues.

Ces figures permettent de constater la variabilité des résultats obtenus avec les différentes pentes (β_{ufs} , β_{fs} , DZ et SZ) et avec les différentes équations proposées par la littérature. La pente DZ donne systématiquement des résultats de remontée des vagues plus importants que ceux obtenus avec les autres pentes et la pente SZ donne systématiquement des résultats de remontée des vagues significativement inférieurs à ceux obtenus avec les autres pentes. Pour une même équation, la remontée des vagues est en général d'autant plus grande que la pente est forte.

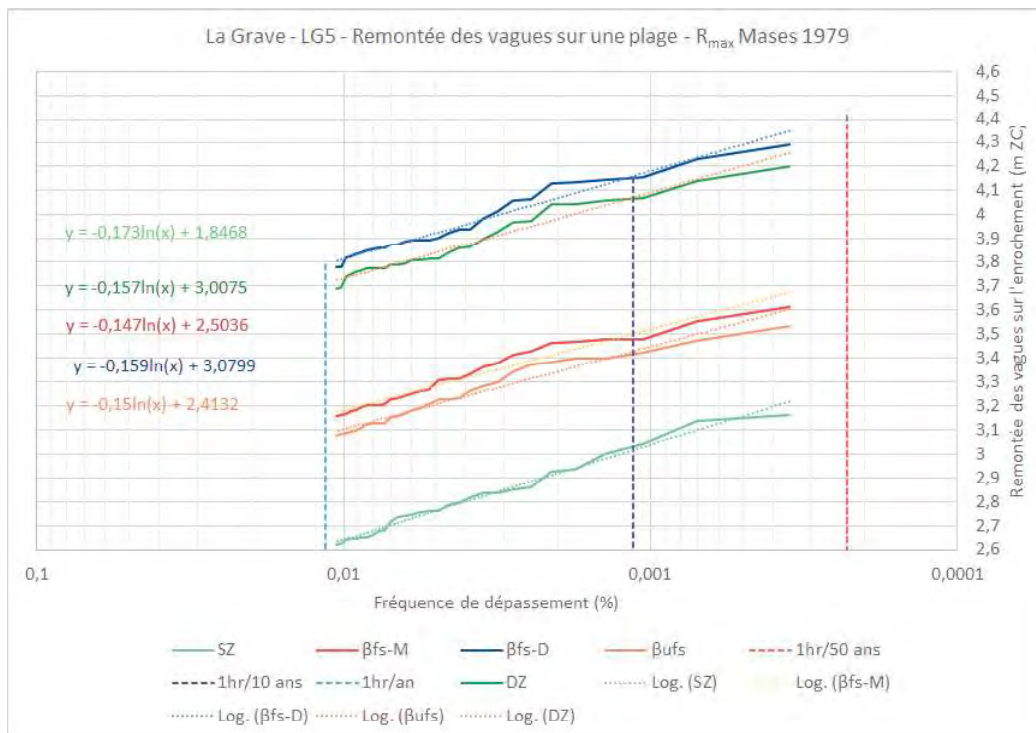


Figure 3.5 Remontée R_{max} des vagues sur une plage – Transect LG5 – Mase-1979

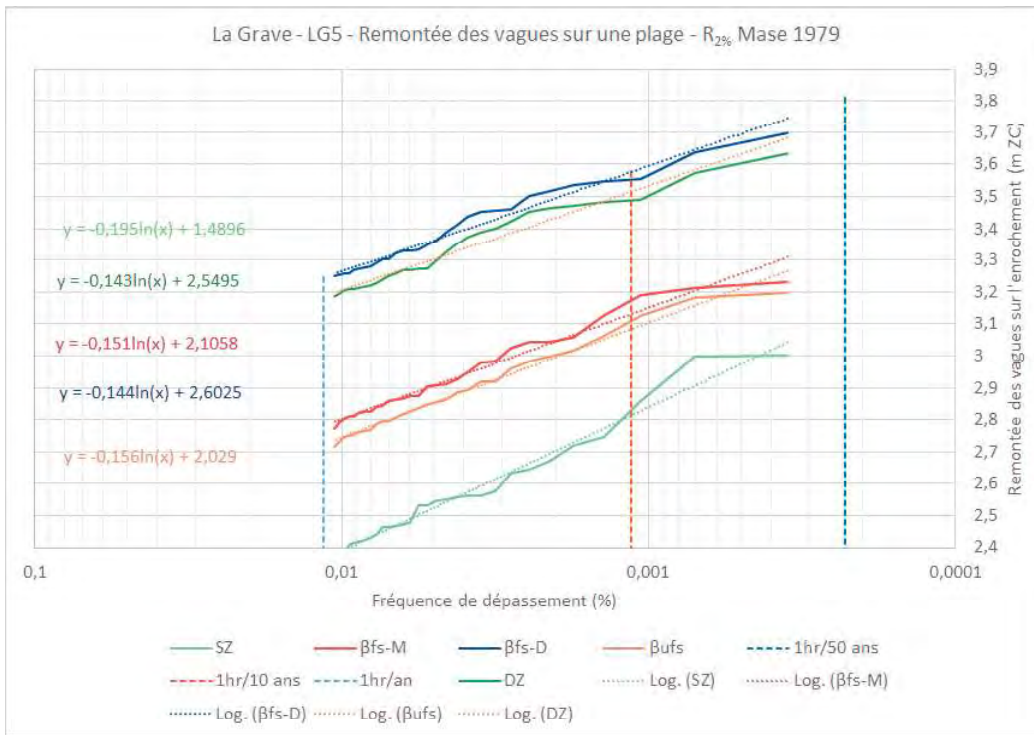


Figure 3.6 Remontée $R_{2\%}$ des vagues sur une plage – Transect LG5 – Mase-1979

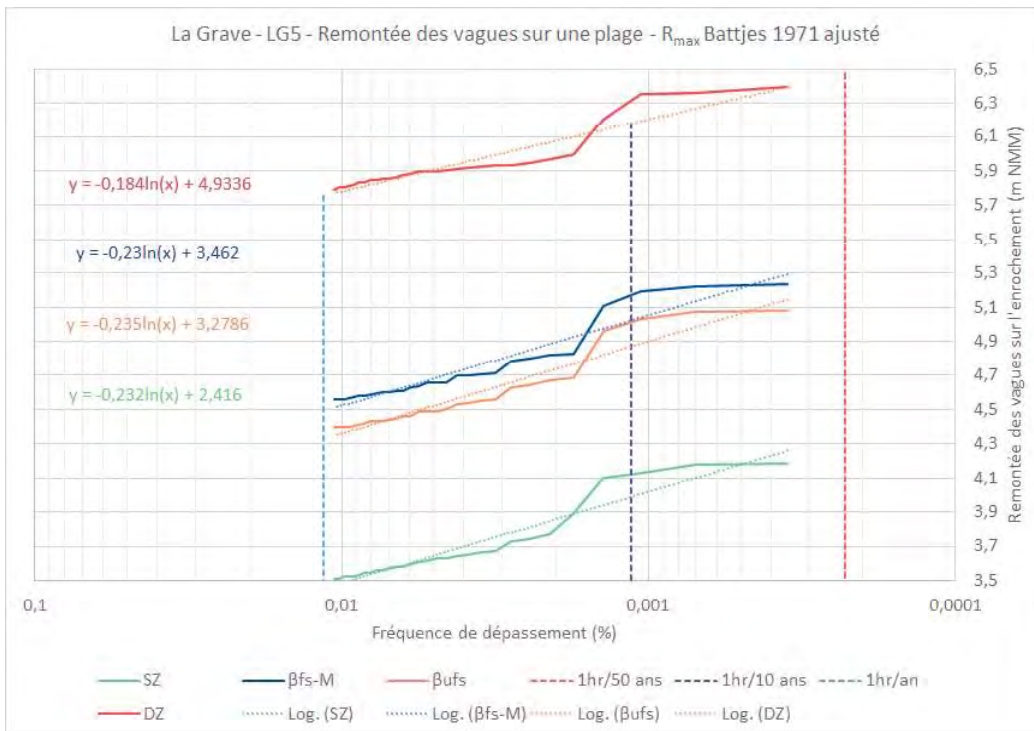


Figure 3.7 Remontée R_{max} des vagues sur une plage – Transect LG5 – Battjes-1971-ajustée

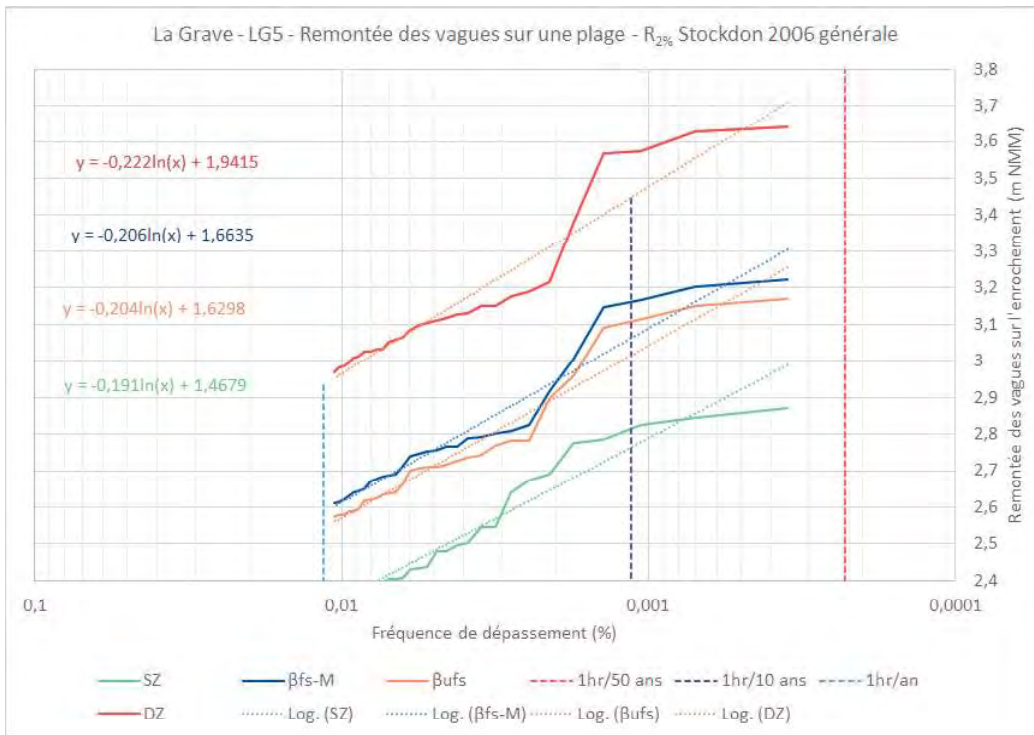


Figure 3.8 Remontée $R_{2\%}$ des vagues sur une plage – Transect LG5 – Stockdon-2006

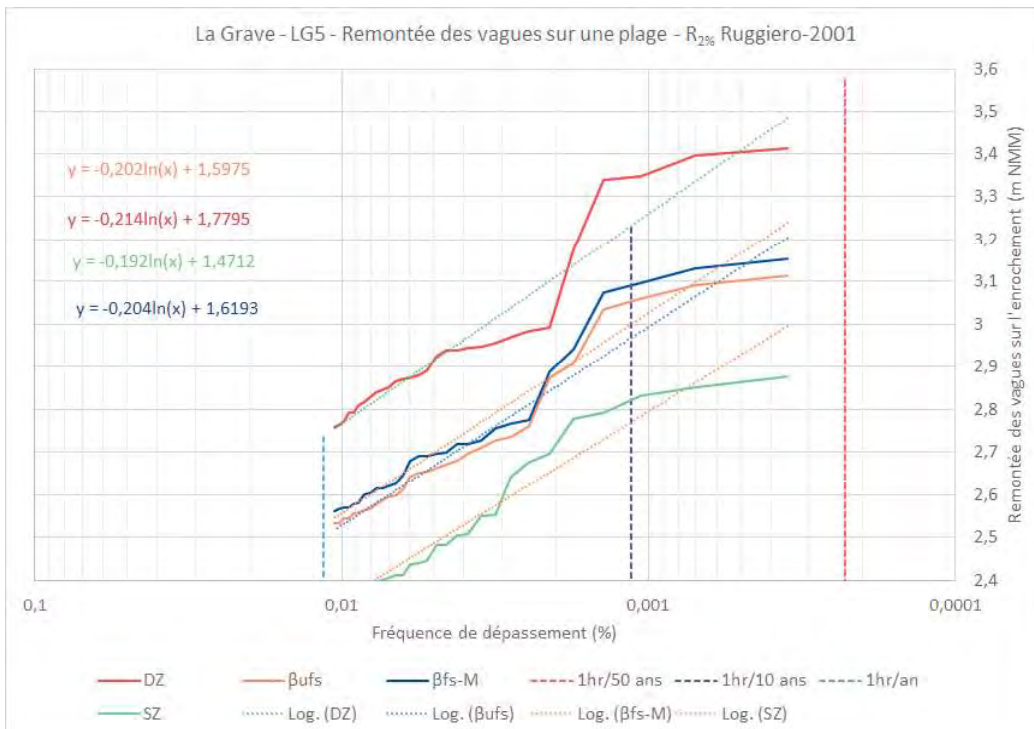


Figure 3.9 Remontée $R_{2\%}$ des vagues sur une plage – Transect LG5 – Ruggiero-2001

La figure 3.10 présente l'ensemble des résultats sous la forme des extrapolations (correspondant à une période de retour de 50 ans) de la régression logarithmique issue des différents calculs de remontée des vagues sur la plage de La Grave en fonction de la pente et de l'équation retenue.

L'équation de Battjes ajusté donne des résultats qui se démarquent significativement des résultats obtenus avec les autres équations. Les résultats donnés par cette équation ont été écartés comme étant peu réalistes dans le contexte de La Grave.

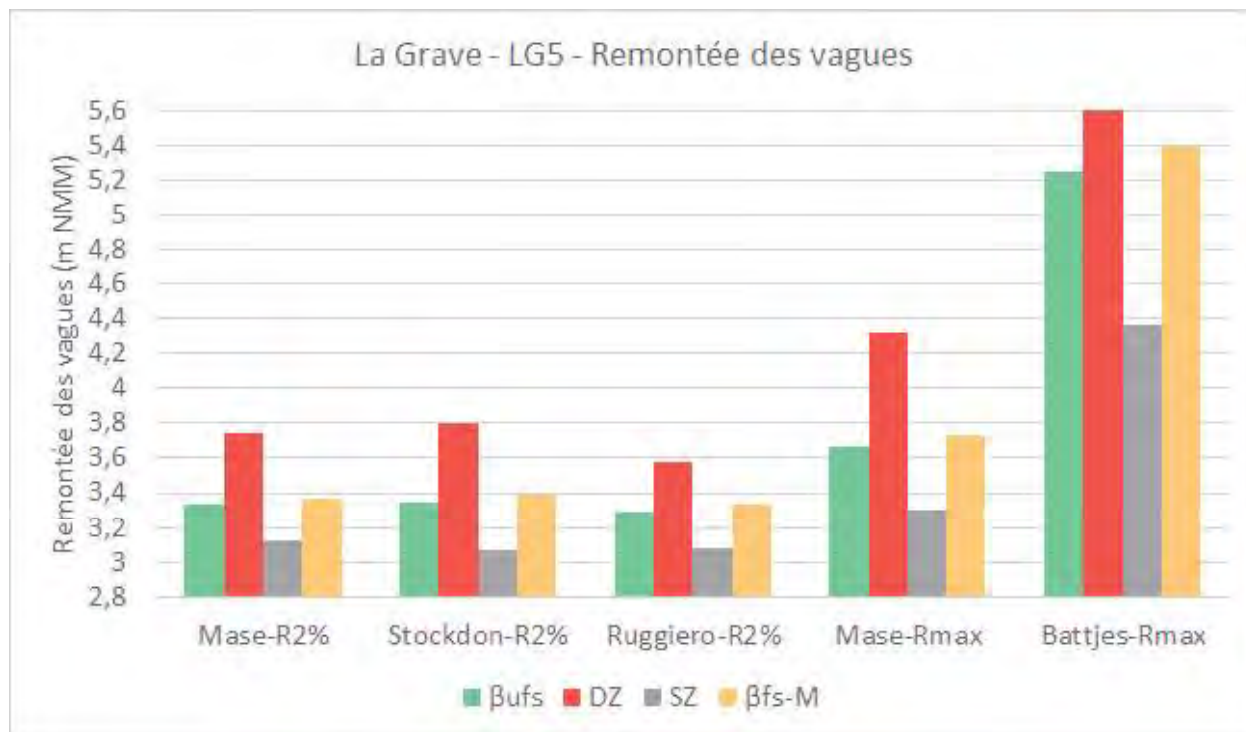


Figure 3.10 Résultats de remontée des vagues sur la plage de La Grave

Le tableau 3.1 indique les résultats obtenus pour R_{max} (Mase,1979) et $R_{2\%}$ (moyenne des résultats des trois autres équations).

Tableau 3.1 Remontée des vagues selon la pente et le type de remontée (Période de retour de 50 ans)

Pente	$R_{2\%}$	R_{max}
βufs	+3,32 NMM	+3,67 NMM
DZ	+3,71 NMM	+4,32 NMM
SZ	+3,09 NMM	+3,30 NMM
βfs	+3,36 NMM	+3,74 NMM

Ces résultats ont été comparés aux coupes de la plage au droit des transects LG3 (figure 3.11) et LG5 (figure 3.12). Ces figures indiquent que l'élévation de remontée $R_{2\%}$ la plus plausible est de +3,4 m NMM et que l'élévation de remontée R_{max} la plus plausible est de +3,7 m NMM. L'historique de cette plage indique que des vagues ont franchi le cordon littoral de la partie orientale de La Grave (transects LG1 à LG4).

La recommandation d'élévation de la crête de la recharge sera de prendre la moyenne des élévations obtenues pour $R_{2\%}$, soit l'élévation **+3,4 m NMM**. Par contre, cette élévation devra probablement être revue à la hausse lors des recharges de plage récurrentes à cause de la remontée des niveaux d'eau due aux changements climatiques en cours.

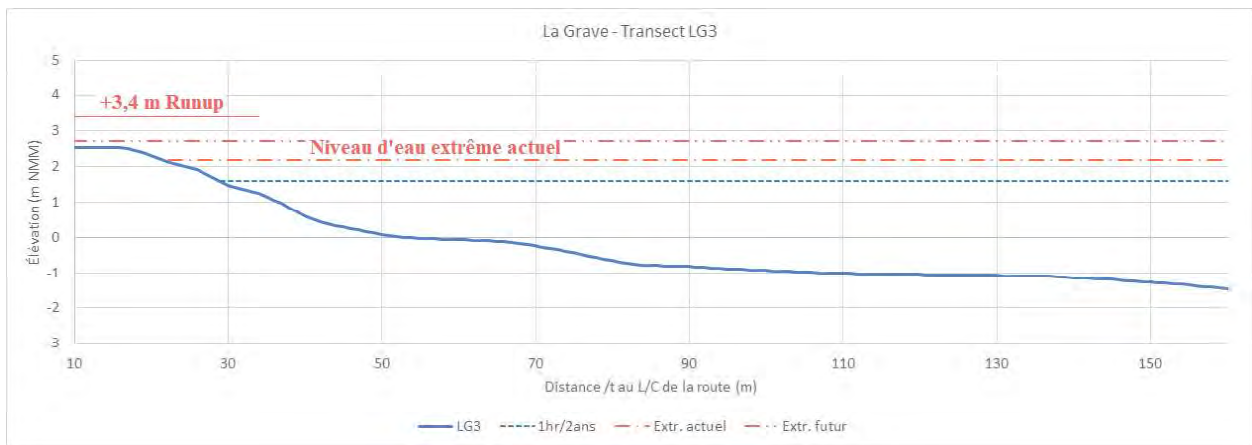


Figure 3.11 Résultats de remontée des vagues sur le transect LG3 de la plage de La Grave

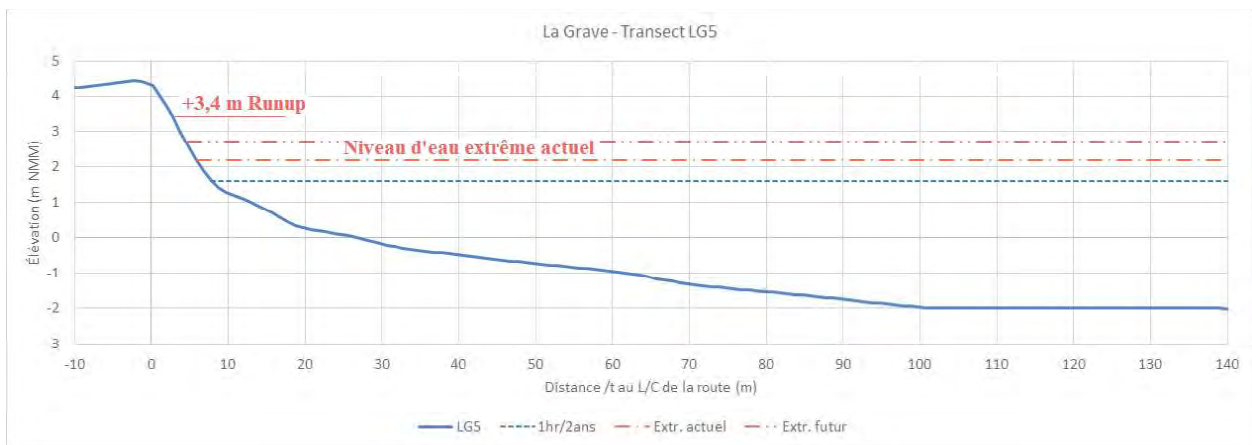


Figure 3.12 Résultats de remontée des vagues sur le transect LG5 de la plage de La Grave

3.4 Profils d'une plage rechargée

En fonction des paramètres présentés dans les chapitres précédents, les figures 3.14 et 3.15 illustrent les coupes-type d'une recharge de la plage de La Grave aux transects LG3 et LG6. L'ensemble des transects se retrouvent à l'annexe A.

Le D_{50} du matériel de recharge a été pris égal à 15 mm pour établir la pente d'équilibre de la plage à long terme et définir la géométrie du profil équivalent de la recharge de construction (égalité des superficies de recharge).

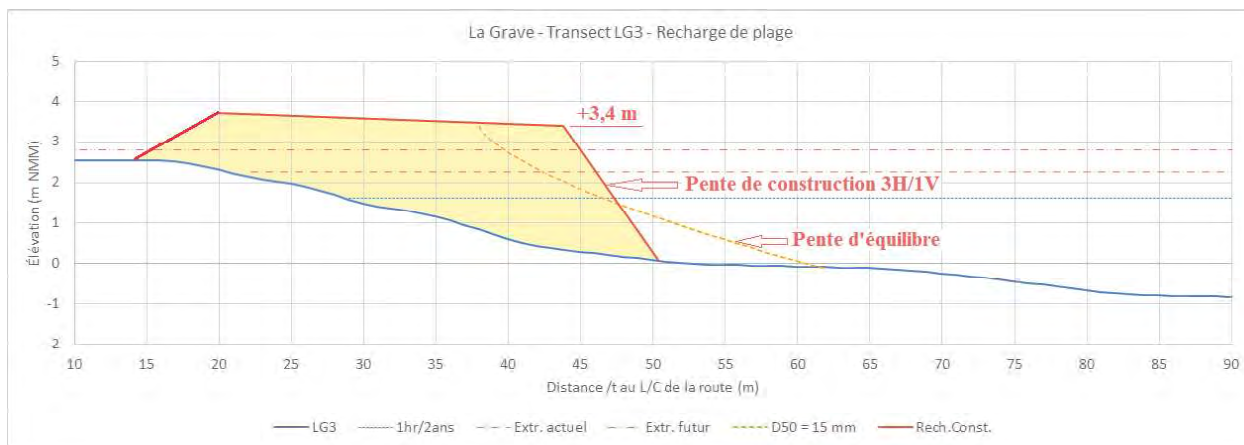


Figure 3.14 Coupe-type de rechargement de plage – Transect LG3

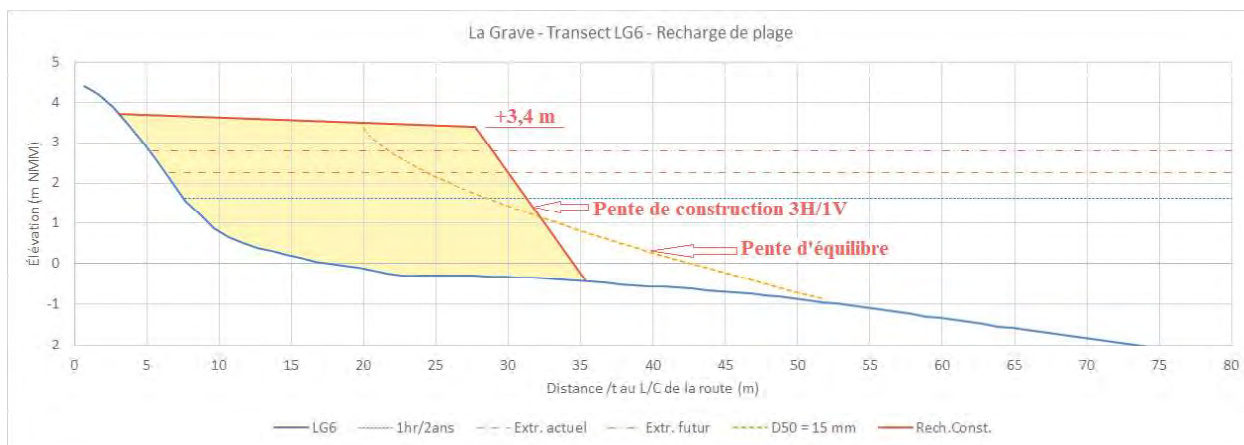


Figure 3.15 Coupe-type de rechargement de plage – Transect LG6

L'élévation de la crête de la recharge de plage a été prise égale à +3,4 m NMM, la pente externe de la recharge de construction a été prise égale à 3H/1V et la pente de la partie supérieure de la recharge a été prise égale à environ 7%.

On constate sur la figure 3.14 que la recharge de plage de la partie orientale de La Grave constitue en quelque sorte une reconstruction du cordon littoral avec rehaussement significatif de l'élévation de ce cordon pour tenir compte de la remontée des vagues sur la plage. Étant donné les niveaux d'eau extrêmes prévus dans quelques décennies, il serait préférable d'évaluer le rehaussement de l'ensemble du cordon littoral (route, fondations des maisons, etc.) et non seulement de la plage.

Située dans la partie occidentale de La Grave, la figure 3.15 présente un cas plus classique de recharge de plage appuyée sur une falaise littorale. La divergence entre la pente d'équilibre de la plage rechargée et la pente de la falaise est une indication claire de l'instabilité de cette falaise face aux phénomènes d'érosion.

3.5 Urgence de l'intervention

Avec un niveau d'eau extrême actuel de +2,26 m NMM et des élévations maximales du terrain de l'ordre de +2,3 m NMM pour des transects LG1 et LG2, le cordon littoral de La Grave est particulièrement vulnérable aux épisodes de submersion. C'est encore plus préoccupant lorsque ces niveaux d'eau hauts se produisent en présence de vagues. Les calculs de remontée des vagues sur la plage indiquent que la disparition des glaces va faire en sorte que le cordon littoral sera bientôt franchi en moyenne plusieurs heures par année. Si rien n'est fait, cette situation va provoquer des dommages aux infrastructures présentes sur le cordon littoral, sans parler des événements exceptionnels qui pourraient provoquer des dommages catastrophiques. Entre autres, le maintien de la circulation sur la route exigera des réparations très régulières.

Il serait donc important de rapidement envisager des travaux de renforcement du cordon littoral et de réhabilitation des infrastructures qui s'y trouvent.

4 Projets de recharge de plage

4.1 Recharge de plage complète

Le projet de recharge complète de plage proposé pour le secteur La Grave à Havre-Aubert (figure 4.1) doit prendre en compte plusieurs particularités du site (en particulier sa grande vulnérabilité à la submersion) et a été pensé en fonction d'une protection optimale de l'ensemble de cette zone, soit la plage et la falaise en érosion.

Le projet s'étendrait sur près de 690 m de long et prévoirait la mise en place de **53 000 m³ de matériel granulaire** ayant un D_{50} de 15 mm.

La superficie d'empiètement du projet de construction de la recharge complète serait d'environ 17 500 m².

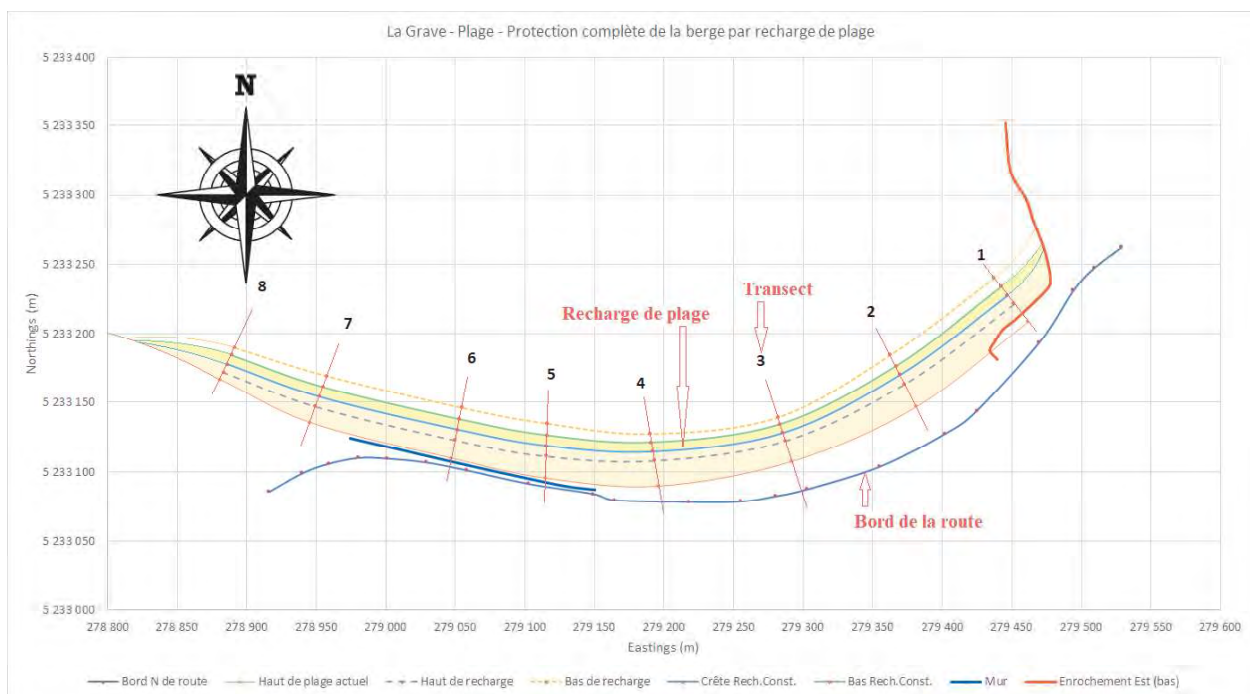


Figure 4.1 Vue en plan du projet de recharge complète de la plage de La Grave

Les coupes du projet de recharge se trouvent rassemblées à l'annexe A.

4.2 Recharge de plage partielle

La figure 4.2 présente la vue en plan de la recharge de plage partielle qui pourrait être envisagée comme solution minimale. Ce projet se concentre sur la plage de La Grave. Il ne protège que

partiellement la moitié du mur qui a été construit suite aux dommages provoqués par l'érosion sur la route.

Le projet s'étend sur près de 440 m de long et prévoit la mise en place de **35 000 m³ de matériel granulaire** ayant un D₅₀ de 15 mm.

La superficie d'empiètement du projet de construction de la recharge partielle serait d'environ 11 500 m².

Une différence importante dans le cas du projet de recharge partielle est le fait que les recharges récurrentes seront plus fréquentes et plus importantes que dans le cas du projet de recharge complète. Cet impact est d'autant plus grand que le matériel granulaire risque de provenir d'une source externe aux Îles, ce qui implique des coûts de mobilisation non-négligeables.

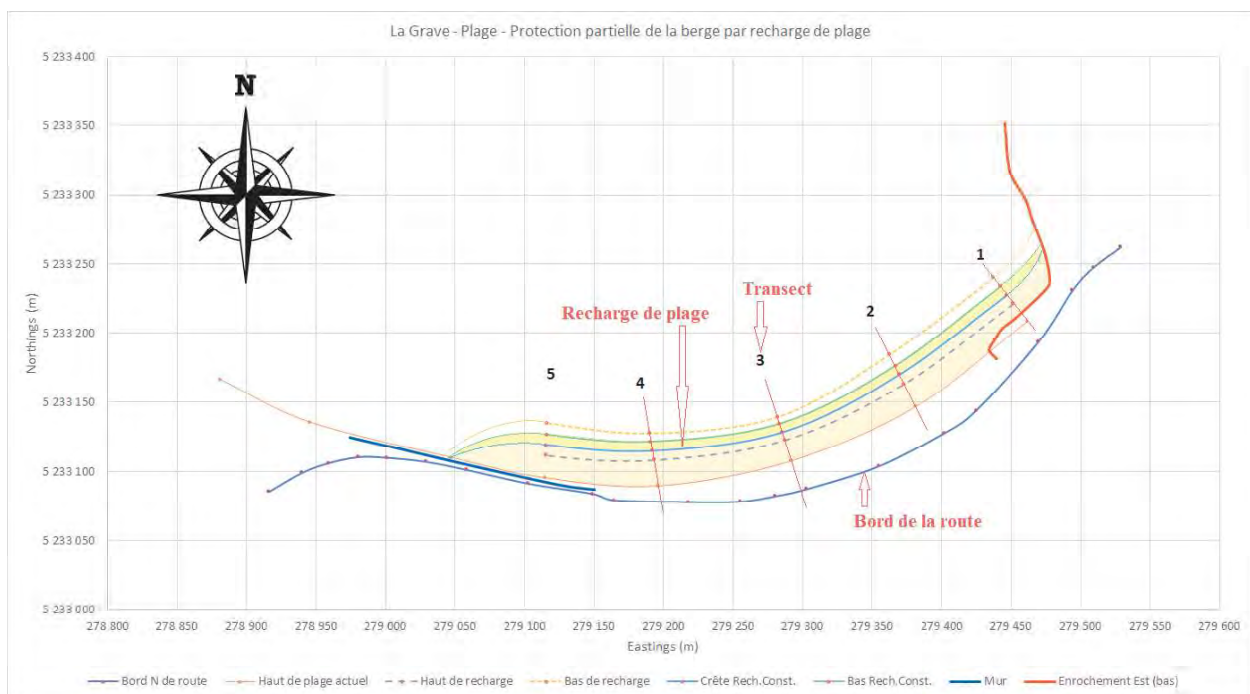


Figure 4.5 Vue en plan du projet de recharge partielle de la plage de La Grave

5 Coûts

5.1 Coûts du projet de protection complète

Le tableau 5.1 présente les coûts estimatifs de la construction du projet de recharge complète de la plage de La Grave. À ces coûts s'ajoutent les études (ingénierie finale, études environnementales), la surveillance des travaux incluant les relevés et les laboratoires.

Tableau 5.1 Coûts estimatifs du projet de recharge complète de la plage de La Grave

Poste	Quantités	Prix unitaire	Coût (\$)
Organisation de chantier	1	12%	636 000
Matériel granulaire	53 000 m ³	100	5 300 000
Contingences	1	20%	1 184 000
Total			7 120 000

5.2 Coûts du projet de protection partielle

Le tableau 5.2 présente les coûts estimatifs de la construction du projet de recharge de la plage de La Grave. À ces coûts s'ajoutent les études (ingénierie finale, études environnementales), la surveillance des travaux incluant les relevés et les laboratoires.

Tableau 5.2 Coûts estimatifs du projet de recharge partielle de la plage de La Grave

Poste	Quantités	Prix unitaire	Coût (\$)
Organisation de chantier	1	12%	420 000
Matériel granulaire	35 000 m ³	100	3 500 000
Contingences	1	20%	784 000
Total			4 704 000

6 Conclusion et recommandations

6.1 Conclusion

Un projet de recharge de la plage de La Grave aux Îles de la Madeleine a été conçu à partir des données de vagues et de niveaux d'eau modélisés pour ce secteur des Îles. Plusieurs méthodologies de calcul de la remontée des vagues sur une plage ont été utilisées pour définir l'élévation optimale de la crête de cette recharge de plage.

Ces calculs ont mis en relief l'extrême vulnérabilité du cordon littoral de La Grave face aux épisodes de surcotes accompagnés de vagues. Ces calculs indiquent que le cordon littoral actuel sera bientôt submergé plusieurs heures par année en moyenne avec la disparition des glaces due aux changements climatiques en cours.

Compte tenu de cette vulnérabilité, le projet de recharge recommandé consisterait à protéger environ 690 m de rivage de l'Anse Painchaud. Les calculs de remontée des vagues ont montré que la crête de la recharge de plage devait être significativement plus élevée que celle du cordon littoral actuel qui constitue La Grave pour être en mesure de protéger cette zone.

6.2 Recommandations

L'extrême vulnérabilité de ce secteur à la submersion lors d'épisodes de surcotes accompagnés de vagues indique que l'intervention de protection de ce secteur devrait être faite sans trop tarder. L'intensité de la submersion calculée dans le cadre de ce rapport indique la possibilité de dommages importants à la route et aux maisons de La Grave, sans parler des risques pour les usagers des lieux.

Il est également recommandé de retenir le projet de recharge complète du secteur, les matériaux granulaires risquant de provenir de l'extérieur des Îles et les coûts de mobilisation étant dans ce cas importants. Un projet de recharge partiel impliquera des recharges récurrentes plus fréquentes.



Yann Ropars, ing., M. Sc.
Consultants Ropars Inc.
yann_ropars@videotron.ca
Téléphone : (418) 998-6224

ANNEXE A

COUPES-TYPE DE RECHARGE DE PLAGE

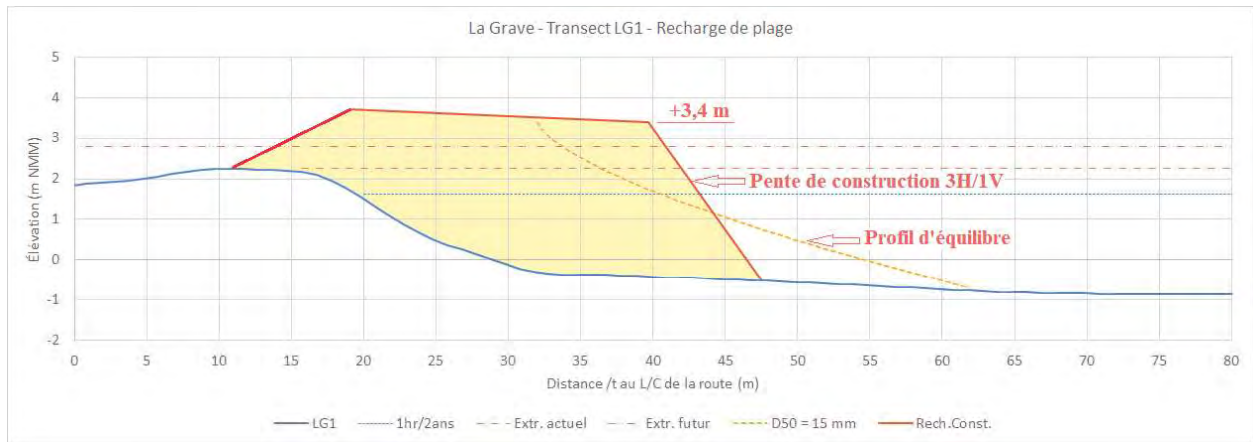


Figure A.1 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG1

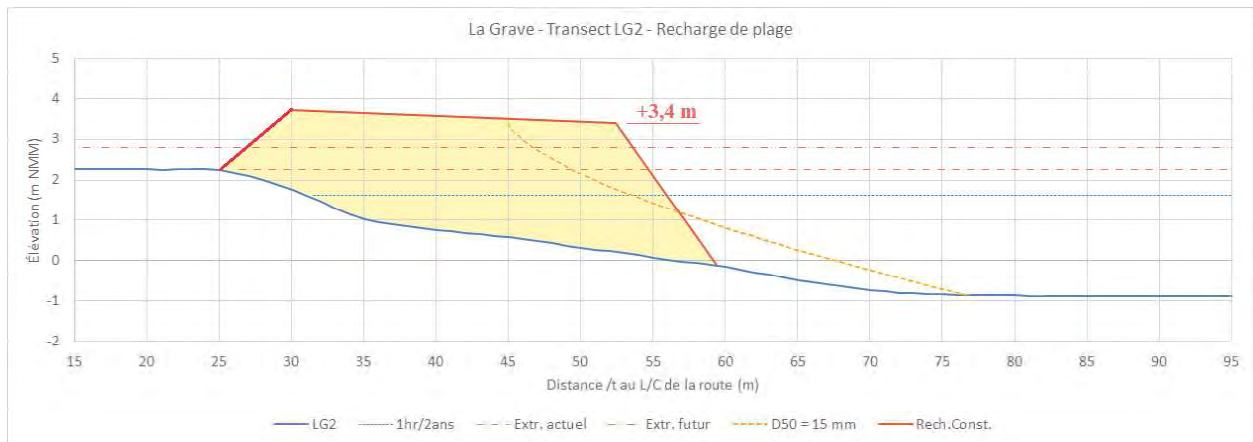


Figure A.2 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG2

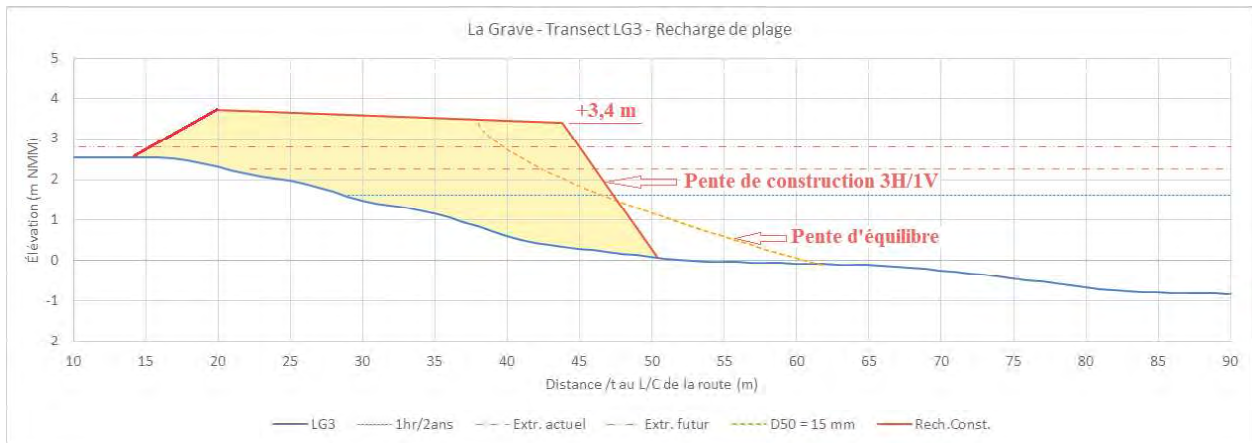


Figure A.3 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG3



Figure A.4 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG4



Figure A.5 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG5

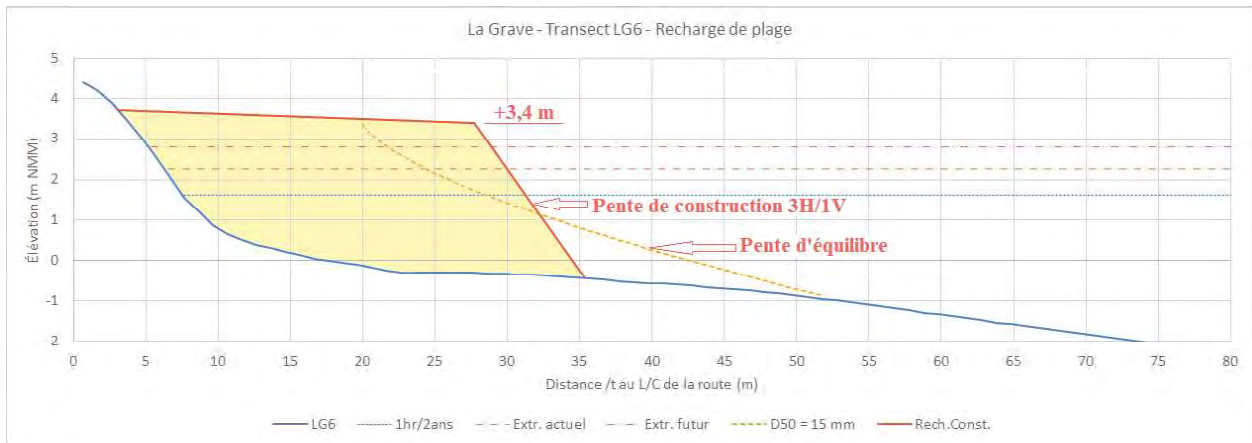


Figure A.6 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG6



Figure A.7 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG7



Figure A.8 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG8



FQM

INGÉNIERIE ET
INFRASTRUCTURES



Les Îles-de-la-Madeleine
Municipalité

**Annexe 12 : Rencontre d'information publique – Projet
de recharge de plage, secteur La Grave, Îles-de-la-
Madeleine**

Ministère de la Sécurité publique, 4 juin 2018



Ministère
de la Sécurité
publique



Rencontre d'information publique
Projet de recharge de plage
Secteur – La Grave
Îles-de-la-Madeleine

ENSEMBLE  
on fait avancer le Québec

Québec 

Cadre pour la prévention de sinistres



Historique

- 2001 – Adoption de la Loi sur la sécurité civile qui permet au gouvernement de financier de la « prévention ».
- En novembre 2006, le gouvernement du Québec a adopté le Cadre de prévention des principaux risques naturels :
 - a pris fin le 31 mars 2013;
 - a permis le financement de travaux d'appréciation et de traitement des risques en prévention pour les aléas érosion côtière, glissement de terrain et inondation.

Cadre pour la prévention de sinistres



Historique (suite)

- Adoption du *Cadre pour la prévention de sinistres* par le gouvernement du Québec le 19 juin 2013.
- Vise à poursuivre les efforts des sept dernières années réalisés en prévention des risques érosion côtière, inondation et glissement de terrain et d'élargir sa portée :
 - à la submersion côtière;
 - au tremblement de terre;
 - à certains aléas nordiques;
 - aux feux de forêt;
 - aux risques industriels (matières dangereuses).
- Investissements totaux qui pourraient atteindre 96,4 M\$ d'ici le 31 mars 2020 (43,4 M\$ en appréciation du risque / 49,5 M\$ en traitement du risque / 3,5 M\$ en communication des risques).

Cadre pour la prévention de sinistres



Historique (suite)

- Budget 2017-2018
 - Le gouvernement annonce une bonification du Cadre pour la prévention de sinistres de 45 M\$ sur 5 ans pour la mise en œuvre de solutions pour réduire les risques associés à l'érosion et à la submersion côtières.

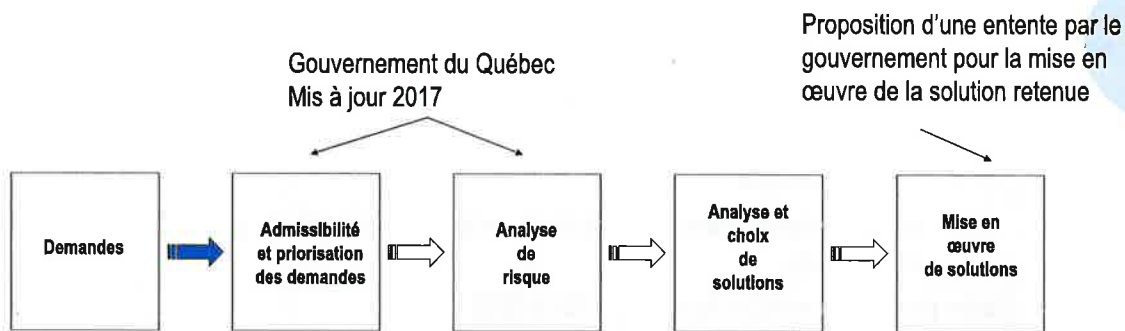
Cadre pour la prévention de sinistres



Historique (suite)

- Cadre de prévention des principaux risques naturels 2006-2012
 - analyse de risque – plan directeur;
 - analyse de solutions réalisée par Roche et CRI en 2011 :
 - solution recommandée pour secteur La Grave : recharge de plage avec buté.
 - aucune mise en œuvre de solution, coûts jugés trop élevés par la municipalité.
- Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2020
 - bonification du CPS au budget 2017-2018 : 45 M\$ pour la mise en œuvre de solutions en érosion et submersion côtières;
 - mise à jour des recommandations de l'analyse de solutions pour La Grave;
 - proposition du projet de mise en œuvre de la solution recommandée pour La Grave.

Processus d'analyse et de traitement des demandes en prévention



Réalisé en 2011 – mis à jour 2017 (recommandation des experts)

Admissibilité à un soutien gouvernemental



- Le projet peut faire l'objet d'un soutien financier par le biais du Cadre pour la prévention de sinistres s'il répond aux exigences prévues aux Paramètres de l'octroi d'une aide financière visant le traitement des risques :
 - analyse de risque réalisée par le gouvernement;
 - adoption d'un règlement pour contrôler l'aménagement du territoire par la municipalité;
 - les biens exposés sont « essentiels » (résidences principales, biens essentiels d'une entreprise ou d'une municipalité);
 - avoir réalisé une analyse de solutions.

Identification de la solution à mettre en œuvre



- Éléments à prendre en compte pour apprécier l'importance d'un aléa et identifier les solutions potentielles :
 - l'intensité;
 - la probabilité d'occurrence ou de récurrence;
 - la localisation spatiale du phénomène et étendue possible de ses effets;
 - la vitesse d'évolution du ou des phénomènes;
 - la durée de l'impact et la prévisibilité;
 - le potentiel destructif;
 - la possibilité de maîtrise ou de contrôle du phénomène.

Éléments exposés



- Éléments à prendre en compte pour apprécier le niveau de vulnérabilité des éléments exposés :
 - la nature (commerce);
 - les facteurs physiques;
 - les facteurs sociaux;
 - les facteurs économiques;
 - les facteurs environnementaux.

Critères de sélection de la solution d'atténuation du risque



- À la suite d'une analyse de solutions, la sélection de la solution qui sera proposée pour la mise en œuvre repose notamment sur les critères suivants :
 - équité;
 - rapport coûts/avantages;
 - potentiel de réduction du risque et continuité des effets;
 - autorité de juridiction et conformité aux lois et règlements;
 - effets sur l'économie;
 - acceptabilité politique et réaction du public et des groupes du milieu;
 - effets sur l'environnement.
- Rappelons que la mise en œuvre de la solution est sous la responsabilité de l'autorité municipale.

Présentation du projet de La Grave



- Le choix de la solution a été retenu à la suite de plusieurs analyses et de recommandations d'expert dans le domaine.
- Les informations disponibles indiquent en particulier une grande vulnérabilité de ce site commercial et l'importance de son maintien du point de vue économique et patrimonial.

Présentation du projet de La Grave



- Plus précisément, le choix du projet de recharge de plage repose sur les paramètres suivants :
 - la connaissance scientifique et les compétences en génie côtier;
 - l'effet de la solution sur la protection des personnes et des biens à court et long terme;
 - l'acceptabilité sociale de la solution (construction d'un ouvrage vs déplacement des bâtiments sur un autre site);
 - le rapport coûts/avantages;
 - la résilience de la solution aux incertitudes entourant les effets des changements climatiques (niveaux d'eau, tempêtes, etc.);
 - l'harmonisation du projet dans le milieu (cordon littoral);
 - les effets sur l'environnement;
 - l'urgence d'intervenir.

Mise en œuvre de la solution retenue

Calendrier des étapes à venir



Actuellement la réalisation du projet d'ici mars 2020

- Prolongement du Cadre pour la prévention de sinistres possible jusqu'en 2022
 - prolongement de l'entente au besoin
- Préparation du projet – appels d'offres de service professionnels (2018-2019)
 - préparation des plans et devis (2018-2019)
 - recherche de matériaux (2018)
 - analyses complémentaires requises (au besoin)
 - etc.
- Démarche pour obtenir les autorisations nécessaires dont celles environnementale (2018-2019) (peut prendre jusqu'à 24 mois)
- Réalisation des travaux (2019-2020 et plus)



Rechargement de plage en matériaux grossiers
Solution recommandée pour l'atténuation du risque lié à l'érosion et
la submersion côtière – État de la situation et aspects techniques

Vulnérabilité des infrastructures



Vulnérabilité des infrastructures



Vulnérabilité des infrastructures



Vulnérabilité des infrastructures



Nature des sédiments de plage



Sable en surface

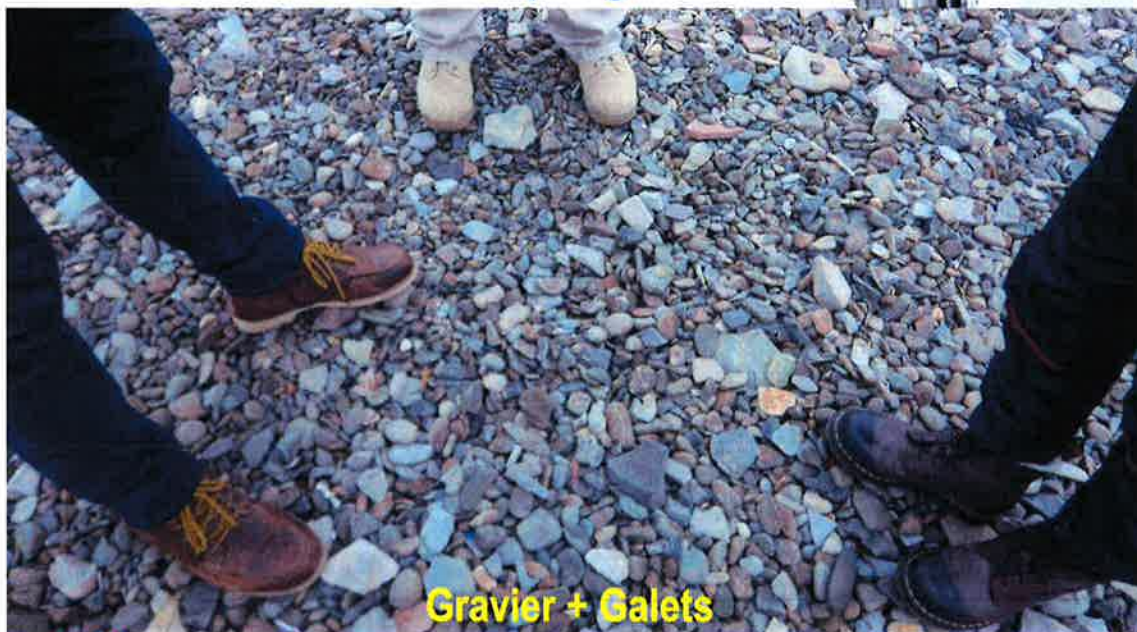
Nature des sédiments de plage



Nature des sédiments de plage

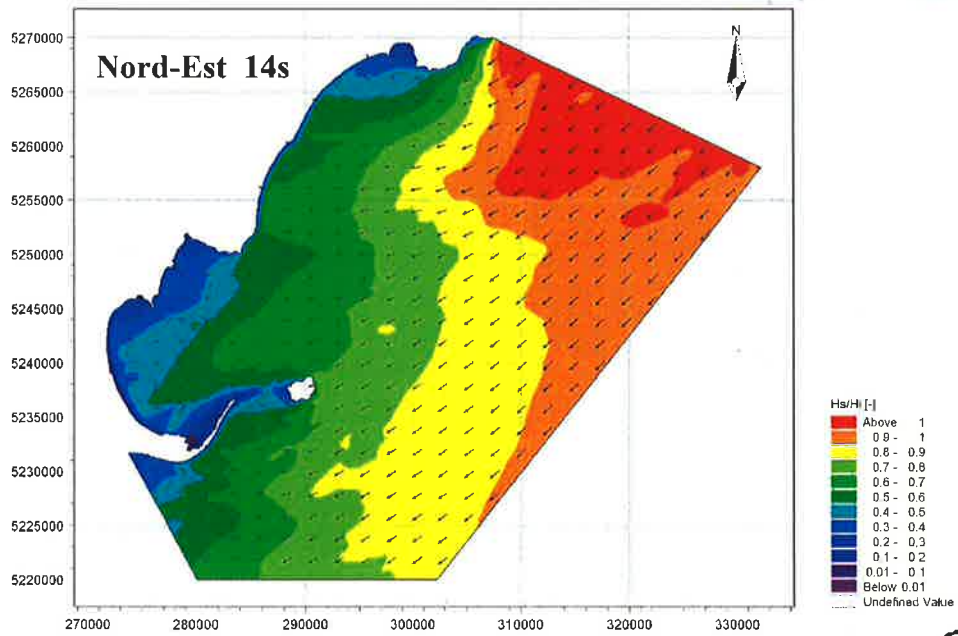


Nature des sédiments de plage

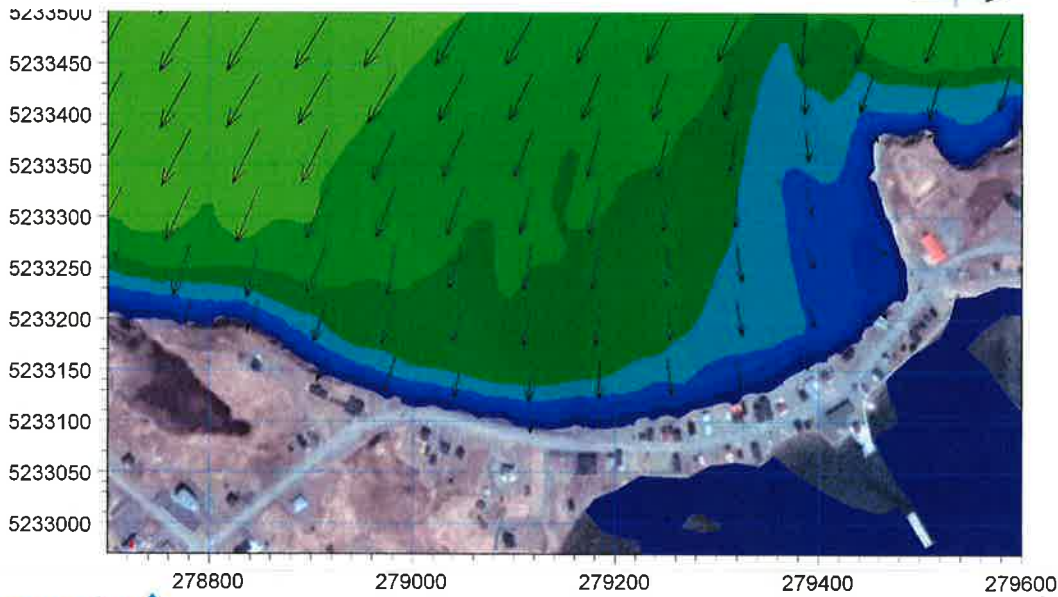


Gravier + Galets

Tempêtes importantes



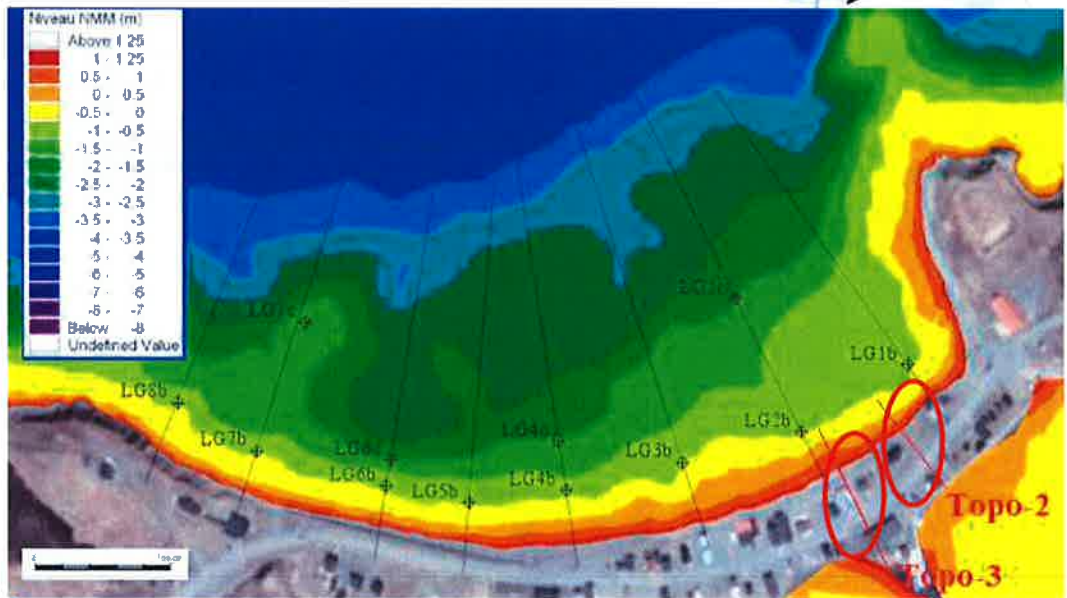
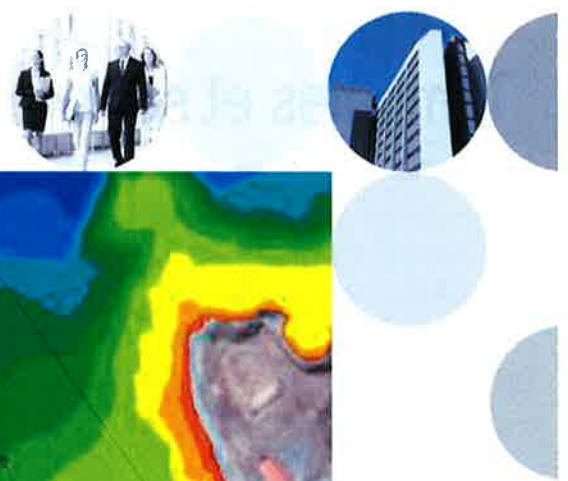
Tempêtes et mouvement des sédiments



Tempêtes et sédiments



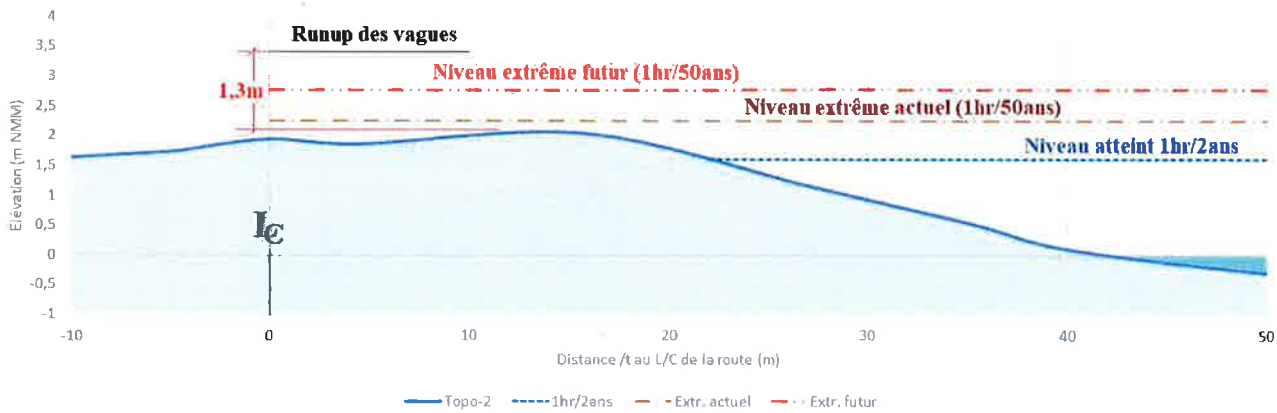
Niveaux d'eau



Niveaux d'eau (Topo-2)



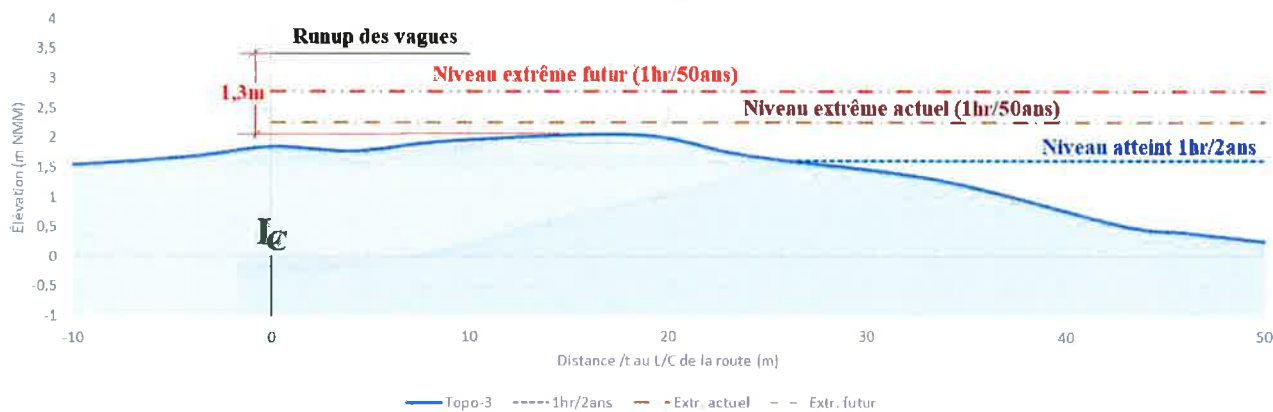
La Grave - Transect Topo-2



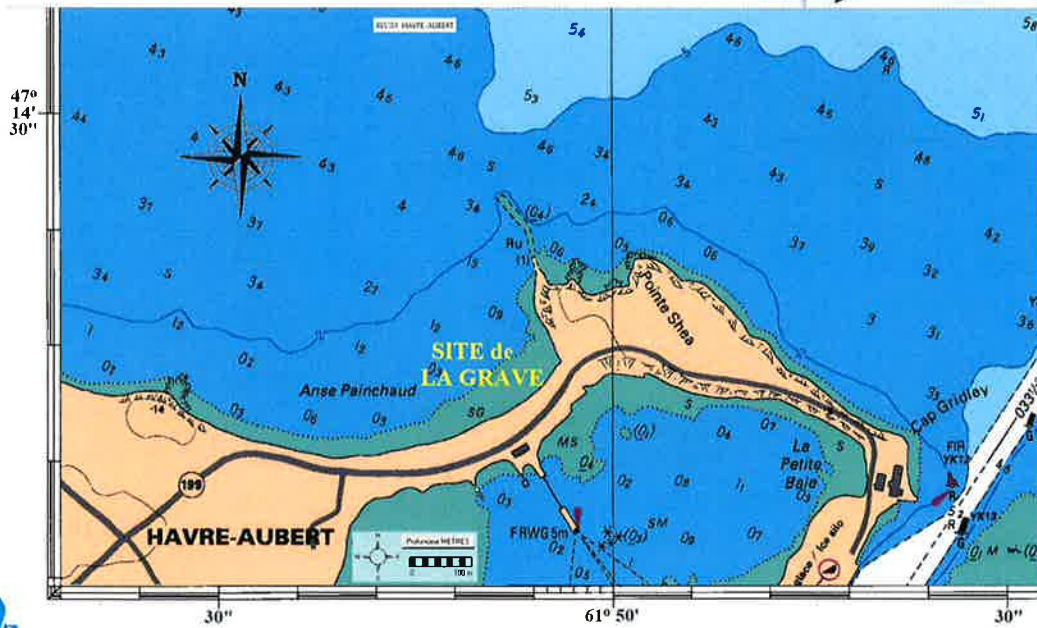
Niveaux d'eau (Topo-3)



La Grave - Transect Topo-3



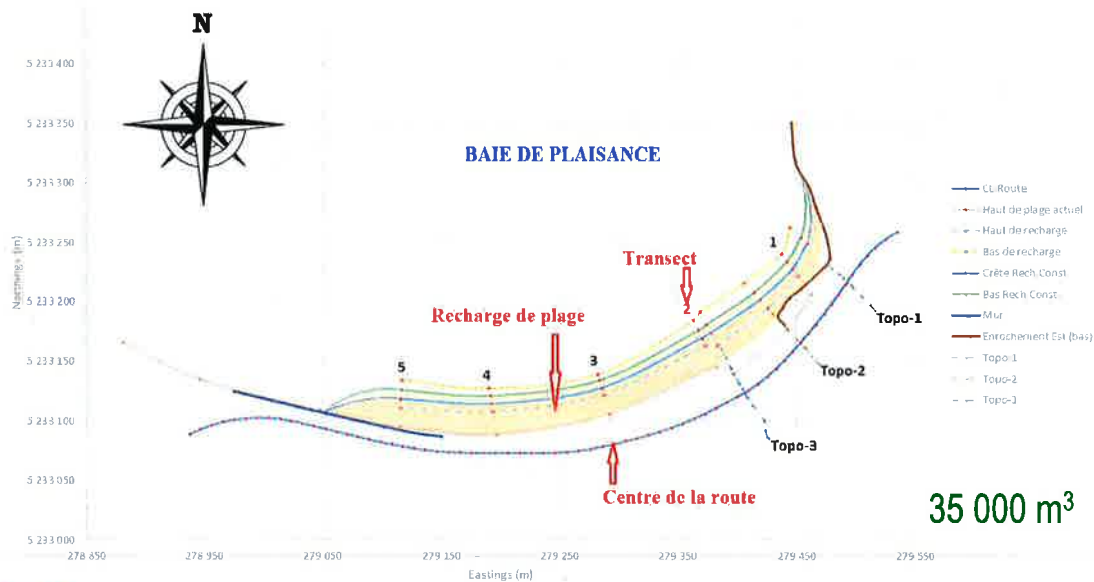
Projet de protection de La Grave



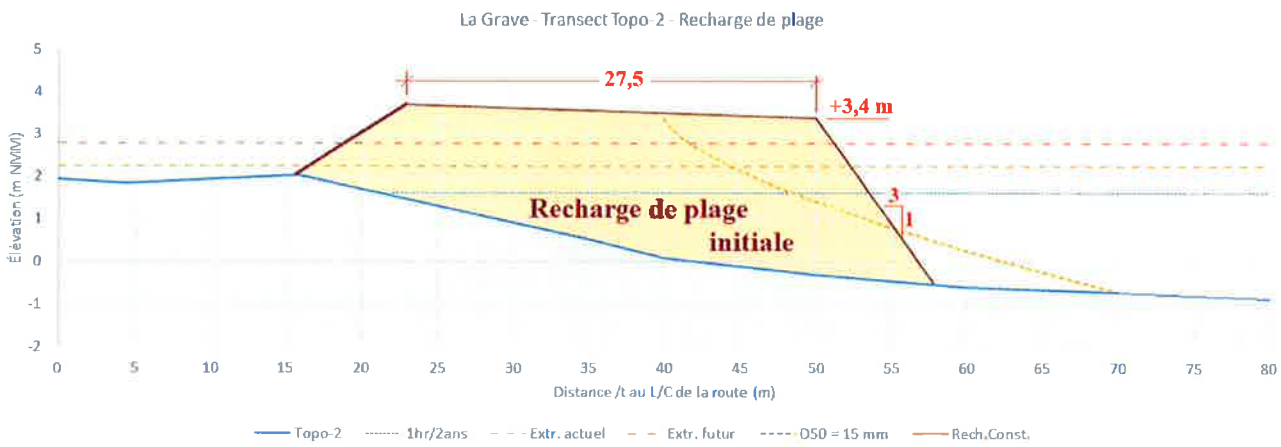
Projet de protection de La Grave



La Grave - Plage - Protection partielle de la berge par recharge de plage



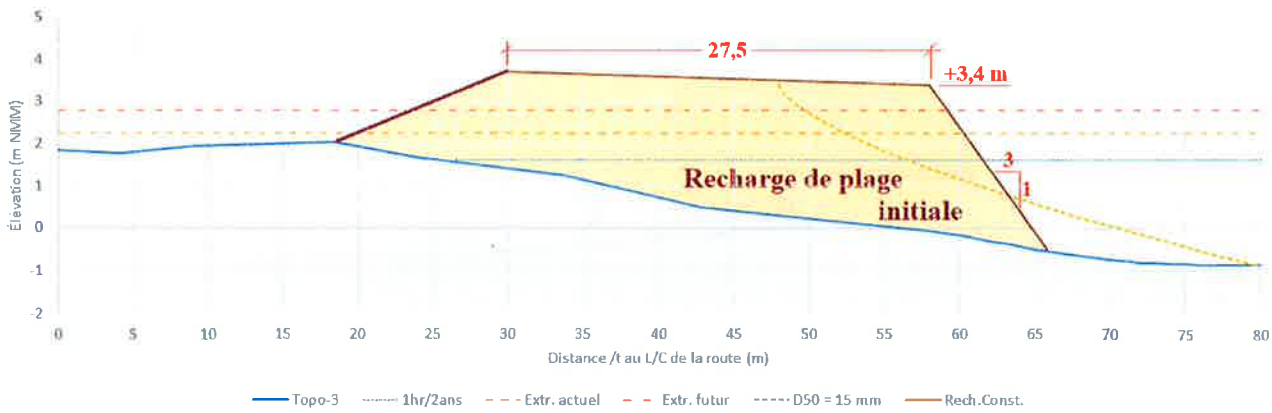
Projet de protection de La Grave



Projet de protection de La Grave



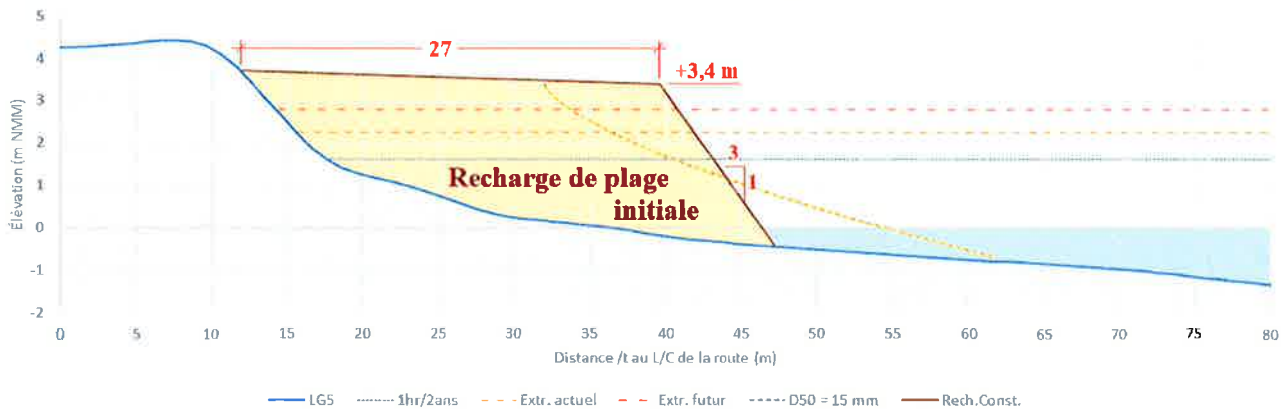
La Grave - Transect Topo 3 - Recharge de plage



Projet de protection de La Grave



La Grave - Transect LG5 - Recharge de plage



Projet de protection de La Grave

- Questions ?

