

FORMULAIRE

Avis de projet

PRÉAMBULE

La section II du chapitre IV de la [Loi sur la qualité de l'environnement \(LQE\)](#) oblige toute personne ou tout groupe à suivre la [procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement \(PEEIE\)](#) et à obtenir une autorisation du gouvernement avant d'entreprendre un projet visé par l'annexe I du [Règlement relatif à l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement de certains projets](#) dans le Québec méridional.

Ainsi, quiconque a l'intention de réaliser un projet visé à l'un des articles 31.1 ou 31.1.1 de la LQE doit déposer un avis écrit au ministre de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques en remplissant le formulaire « Avis de projet » et en y décrivant la nature générale du projet. Cet avis permet au ministre de s'assurer que le projet est effectivement assujéti à la PEEIE et, le cas échéant, de préparer une directive indiquant la nature, la portée et l'étendue de l'étude d'impact que son initiateur doit préparer.

Le formulaire « Avis de projet » sert à décrire les caractéristiques générales du projet. Il doit être rempli d'une façon claire et concise et se limiter aux éléments pertinents à la bonne compréhension du projet, de ses impacts et des enjeux appréhendés. L'avis de projet sera publié au registre des évaluations environnementales prévu à l'article 118.5.0.1 de la LQE (www.ree.environnement.gouv.qc.ca).

Sur la base de l'avis de projet et de la directive, toute personne, tout groupe ou toute municipalité pourra faire part au ministre, lors d'une période de consultation publique de 30 jours, de ses observations sur les enjeux que l'étude d'impact devrait aborder. Le ministre, selon l'article 31.3.1 de la LQE, transmettra ensuite à l'initiateur du projet les observations et les enjeux soulevés dont la pertinence justifie qu'on les prenne en compte dans l'étude d'impact du projet.

Conformément aux articles 115.5 à 115.12 de la LQE, le demandeur de toute autorisation accordée en vertu de cette loi doit, comme condition de délivrance, produire la « Déclaration du demandeur ou du titulaire d'une autorisation délivrée en vertu de la Loi sur la qualité de l'environnement (chapitre Q-2) » accompagnée des autres documents exigés par le ministre. Le guide explicatif et les formulaires qui y sont associés sont disponibles dans notre site Web à l'adresse électronique suivante : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/lqe/index.htm>.

Le formulaire « Avis de projet » doit être accompagné du paiement prévu dans le cadre du système de tarification des demandes d'autorisations environnementales. Ce paiement doit être fait à l'ordre du ministre des Finances. Le détail des tarifs applicables est disponible sur notre site Web, à la section « Évaluations environnementales ». Notez que le Ministère ne traitera pas la demande tant que ce paiement n'aura pas été reçu. L'avis de projet doit être transmis en douze (12) copies papier et en une copie électronique à la Direction générale de l'évaluation environnementale et stratégique :

Ministère de l'Environnement et
de la Lutte contre les changements climatiques
Direction générale de l'évaluation environnementale et stratégique
Édifice Marie-Guyart, 6^e étage
675, boul. René-Lévesque Est, boîte 83
Québec (Québec) G1R 5V7
Téléphone : 418 521-3933
Internet : www.environnement.gouv.qc.ca

Notez que si votre projet est soumis à la [Directive sur la gestion des projets majeurs d'infrastructure publique](#), prise en vertu de la Loi sur les infrastructures publiques (chapitre I-8.3), l'autorisation d'élaborer le dossier d'affaires de ce projet doit avoir été obtenue du Conseil des ministres avant que le formulaire « Avis de projet » ne soit déposé.

Par ailleurs, en vertu de l'[Entente de collaboration Canada-Québec en matière d'évaluation environnementale](#) conclue en mai 2004 et renouvelée en 2010, le Ministère transmettra une copie de l'avis de projet à l'Agence canadienne d'évaluation environnementale qui déterminera si le projet est également assujéti à la Loi canadienne sur l'évaluation environnementale. Le cas échéant, le projet fera l'objet d'une évaluation environnementale coopérative et l'avis de projet sera inscrit au registre public prévu par la Loi canadienne sur l'évaluation environnementale. L'initiateur du projet sera avisé par lettre seulement si son projet fait l'objet d'une évaluation environnementale coopérative.

Enfin, selon la nature du projet et le lieu où sa réalisation est prévue, le Ministère pourrait devoir consulter une ou des communautés autochtones au cours de l'évaluation environnementale. Le cas échéant, l'avis de projet déposé par l'initiateur sera transmis à une ou des communautés autochtones afin d'amorcer la consultation. Si son projet fait l'objet d'une consultation des communautés autochtones, l'initiateur en sera avisé.

1. IDENTIFICATION ET COORDONNÉES DU DEMANDEUR

1.1 Identification de l'initiateur de projet	
Nom : Municipalité des Îles-de-la-Madeleine	
Adresse civique : 460 chemin Principal, Cap-aux-Meules, G4T 1A1	
Adresse postale (si différente de l'adresse civique) :	
Nom et fonction du ou des signataire(s) autorisé(s) à présenter la demande : Caroline Richard, directrice des services techniques	
Numéro de téléphone : 418 986-3100	Numéro de téléphone (autre) : -
Courrier électronique : crichard@muniles.ca	
1.2 Numéro de l'entreprise	
Numéro de l'entreprise du Québec (NEQ) : 8831854961	
1.3 Résolution du conseil municipal	
Si le demandeur est une municipalité, l'avis de projet contient la résolution du conseil municipal dûment certifiée autorisant le(s) signataire(s) de la demande à la présenter au ministre. Ajoutez une copie de la résolution municipale à l'annexe I.	
1.4 Identification du consultant mandaté par l'initiateur de projet (s'il y a lieu)	
Nom :	
Adresse civique :	
Adresse postale (si différente de l'adresse civique) :	
Numéro de téléphone : -	Numéro de téléphone (autre) : -
Courrier électronique : @ .	
Description du mandat :	

2. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

2.1 Titre du projet
Projet de ... (construction/agrandissement/aménagement/etc.) de ... (installation/équipement/usine/etc.) sur le territoire de ... (municipalité/MRC/TNO) Projet de recharge de plage – Secteur de La Grave – Municipalité des Îles-de-la-Madeleine
2.2 Article d'assujettissement du Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement de certains projets
Dans le but de vérifier l'assujettissement de votre projet, indiquez, selon vous, à quel article du Règlement relatif à l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement de certains projets votre projet est assujéti et pourquoi (atteinte du seuil par exemple). Le projet de rechargement de plage de La Grave est assujéti à l'item 2 TRAVAUX DANS DES MILIEUX HUMIDES ET HYDRIQUES alinéa 1 : <i>1° 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;</i> Selon les données disponibles, le projet de recharge de plage complète du secteur de La Grave s'étend sur près de 690 m de long et prévoit un empiètement de l'ordre de 17 500 m², ce qui explique l'assujettissement du projet au Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement de certains projets.

2.3 Description sommaire du projet et des variantes de réalisation

Décrivez sommairement le projet (longueur, largeur, quantité, volume, superficie, etc.) et pour chacune de ses phases (aménagement, construction et exploitation et, le cas échéant, fermeture), décrire sommairement les principales caractéristiques associées à chacune des variantes du projet, incluant les activités, aménagements et travaux prévus (déboisement, expropriation, dynamitage, remblayage, etc.).

Selon les informations disponibles dans les études réalisées sur la problématique d'érosion côtière du secteur, le projet de recharge complète de la plage de La Grave s'étend sur près de 690 m de longueur et prévoit la mise en place d'environ 53 000 m³ de matériaux granulaires ayant un diamètre médian (d_{50}) de 15 mm. La superficie d'empiètement du projet de construction de la recharge complète de la plage serait d'environ 17 500 m².

Les travaux à venir sur le terrain seront réalisés en deux principales phases, dont la première qui implique la recherche et l'importation des matériaux granulaires qui seront utilisés pour la recharge et la seconde, qui implique la réalisation des travaux de recharge de plage par remblayage sur le site de La Grave.

Les travaux prévus sont illustrés sommairement dans le rapport technique élaboré par Consultants Ropars inc. qui est annexé à la présente.

Si pertinent, ajoutez à l'annexe II tous les documents permettant de mieux cerner les caractéristiques du projet (plan, croquis, vue en coupe, etc.).

Une première étude hydraulique maritime complétée en 2011 par Roche, en collaboration avec Groupe Lasalle et Consultants Ropars concernant l'analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance aux Îles-de-la-Madeleine a permis de déterminer les options possibles pour la protection contre l'érosion pour plusieurs secteurs concernés sur le territoire des Îles-de-la-Madeleine. Des solutions possibles ont été proposées pour le secteur de La Grave.

Une seconde étude, complétée en 2018 par les Consultants Ropars, a permis d'étudier plus spécifiquement le secteur de La Grave et d'évaluer deux solutions adaptées à ce site. Les deux options analysées consistent à une recharge complète de la plage et à une recharge partielle de la plage. La première des deux options mentionnées est celle recommandée par Consultants Ropars dans son rapport.

Les deux rapports sont disponibles en format numérique.

2.4 Objectifs et justification du projet

Mentionnez les principaux objectifs poursuivis et faire ressortir les raisons motivant la réalisation du projet.

Dans le cadre du projet de recherche Évaluation économique des répercussions des changements climatiques et analyse coûts-avantages des options d'adaptation qui visait l'étude des régions côtières du Québec et de provinces atlantiques, une étude a été réalisée par Ouranos en collaboration avec le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) pour étudier les secteurs touchés au Québec.

Les principaux objectifs de cette 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 cette étude, l'analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière aux Îles-de-la-Madeleine préparée par Ouranos a permis d'évaluer que la non-intervention pour le segment de La Grave 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.

Le site de La Grave, en plus de sa haute valeur historique et patrimoniale, constitue un élément phare de l'offre touristique et d'une sphère économique qui génère des retombées de plus de 50 M\$ annuellement dans l'archipel.

C'est pour cette raison que la Commission permanente sur l'érosion des berges formée par la Communauté maritime et qui regroupe plusieurs partenaires du milieu et différents ministères a déterminé que ce secteur devait être la priorité numéro 1 de la liste qui identifie les zones les plus vulnérables aux phénomènes d'érosion et de submersion.

L'objectif de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine est donc de sécuriser le secteur et en assurer sa pérennité malgré sa vulnérabilité. En effet, selon l'analyse coûts-avantages réalisée pour les zones côtières des Îles-de-la-Madeleine, toutes les options d'adaptation, à l'exception de l'immunisation et de la relocalisation stratégique, permettent de préserver intégralement la majeure partie du segment La Grave.

À cet égard, l'étude indique que 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 permet d'accroître la valeur d'usage du littoral.

2.5 Activités connexes

Résumez, s'il y a lieu, les activités connexes projetées (exemple : aménagement de chemins d'accès, concassage, mise en place de batardeaux, détournement de cours d'eau) et tout autre projet susceptible d'influencer la conception du projet proposé.

Aucun aménagement connexe n'est prévu au projet sur le site de La Grave. La principale activité autre que les travaux de recharge de plage consiste à la recherche, au chargement et au transport des matériaux granulaires qui seront utilisés pour effectuer la recharge. À ce jour, selon les données disponibles, il est probable que ces matériaux soient importés aux Îles-de-la-Madeleine, mais ceci demeure à confirmer dans les étapes de conception préliminaire à venir.

3. LOCALISATION DU PROJET ET SON CALENDRIER DE RÉALISATION

3.1 Identification et localisation du projet et de ses activités

Nom de la municipalité ou du territoire non organisé (TNO) où est situé le projet (indiquer si plusieurs municipalités ou TNO sont touchés par le projet) :

Municipalité des Îles-de-la-Madeleine

Nom de la ou des municipalité(s) régionale(s) de comté (MRC) où est situé le projet : Communauté maritime des Îles-de-la-Madeleine

Précisez l'affectation territoriale indiquée dans le(s) schéma(s) d'aménagement de la ou des MRC ou de la ou des communauté(s) métropolitaine(s) (zonage) : Affectation rurale, zonage résidentiel (RC1)

Coordonnées géographiques en degrés décimaux du point central du projet (pour les projets linéaires, fournir les coordonnées du point de début et de fin du projet) :

Point central ou début du projet : Latitude : 47.236743 Longitude : -61.839560

Point de fin du projet (si applicable) : Latitude : 47.238111 Longitude : -61.834423

3.2 Description du site visé par le projet

Décrivez les principales composantes des milieux physique, biologique et humain susceptibles d'être affectées par le projet en axant la description sur les éléments considérés comme ayant une importance scientifique, sociale, culturelle, économique, historique, archéologique ou esthétique (composantes valorisées de l'environnement). Indiquer, s'il y a lieu, le statut de propriété des terrains où la réalisation du projet est prévue, ainsi que les principales particularités du site : zonage, espace disponible, milieux sensibles, humides ou hydriques, compatibilité avec les usages actuels, disponibilité des services, topographie, présence de bâtiments, etc.

Berceau du peuplement des Îles et de l'industrie de la pêche, La Grave s'étend le long d'une grève formée de sable et de gravier alluvionnaire. Ce site classé patrimonial depuis 1983 est un ensemble de bâtiments et de structures reliés à l'activité traditionnelle de la pêche est couvert par un règlement municipal relatif aux PIIA (Plans d'implantation et d'intégration architecturale) depuis 1994. Ce site contient 33 bâtiments aux volumes et aux matériaux similaires. Ces constructions en bois, érigées au cours des XIX^e et XX^e siècles, occupent un isthme en forme d'hameçon de quelques mètres de largeur reliant la Pointe Shea et le Cap Gridley en bordure du golfe du Saint-Laurent. La construction de nouveaux bâtiments est limitée aux implantations historiques identifiées sur un plan préparé par les assureurs dans les années 1950 à l'époque où le site de pêche a atteint son apogée.

Le site de La Grave présente aussi un intérêt pour sa valeur paysagère liée à sa configuration naturelle peu commune qui influe sur son utilisation historique. Le site patrimonial se présente comme un isthme, soit un étroit ruban de sable couvert de galets et de gravier. Cet isthme unit deux étendues terrestres le village de Havre-Aubert à l'est et les falaises de la Pointe Shea et du Cap Gridley à l'ouest, en plus d'être bordé par deux étendues d'eau, le havre Amherst au sud et l'anse Painchaud au nord. La configuration de l'isthme en fait un port de pêche naturel idéal fréquenté depuis le XVI^e siècle. L'isthme est traversé par la route nationale 199 (chemin de La Grave), et, de chaque côté, des lots de petites dimensions accueillent des constructions modestes et rapprochées les unes des autres. Il en résulte un paysage unique au Québec.

La Grave présente en outre aussi un intérêt pour sa valeur archéologique. Depuis le XVI^e siècle, La Grave a connu trois grandes périodes d'occupation, d'abord comme lieu d'escale pour les navigateurs, puis comme lieu de transformation de poisson et enfin comme lieu à vocation touristique. Les deux premières périodes ont laissé relativement peu de témoins bâtis, mais elles auraient laissé des témoins importants enfouis dans les sols. Les sols en place ayant à ce jour été peu perturbés offriraient donc un important potentiel archéologique.

Dans le cadre du projet de recharge de plage, les principaux milieux affectés seront les milieux physiques et biologiques composés du littoral et du milieu marin. Le rehaussement de la plage aura également un impact sur l'esthétique du site, mais celui-ci sera léger puisque les matériaux granulaires qui seront importés sur le site seront de même nature que ceux actuellement en place. L'ouvrage à construire sera pleinement compatible avec les usages actuels du site.

L'ouvrage aménagé n'aura pas d'impact sur les éléments culturels ou historiques puisque les structures érigées sur le port naturel de La Grave ne seront aucunement touchées par les travaux. Pour ce qui concerne l'archéologie, le potentiel du site est reconnu et ne sera pas affecté par les travaux qui consistent à la recharge de matériaux granulaires et qu'aucuns travaux d'excavation n'y sont prévus.

Les terrains concernés par les travaux sont tous de propriété privée et le site est principalement constitué de bâtiments commerciaux saisonniers. L'ensemble des bâtiments sont desservis par les services publics d'aqueduc et d'égout, donc les infrastructures souterraines principales sont situées dans l'emprise de la route nationale qui traverse La Grave.

3.3 Calendrier de réalisation

Fournissez le calendrier de réalisation (période prévue et durée estimée pour chacune des étapes du projet) en tenant compte du temps requis pour la préparation de l'étude d'impact et le déroulement de la procédure.

Les principales étapes envisagées dans le cadre du projet de recharge de plage de La Grave sont les suivantes :

- Appel d'offres pour les services professionnels spécialisés en environnement : août 2019
- Étude d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement et demandes d'autorisations

- environnementales : septembre 2019 à septembre 2020
- Appel d'offres relevé topographique et bathymétrique = août-septembre 2019
- Relevé topographique et bathymétrique : automne 2019
- Appel d'offres étude hydraulique et établissement du concept préliminaire : automne 2019
- Étude hydraulique et établissement du concept préliminaire : hiver 2020
- Appel d'offres services professionnels en ingénierie pour conception définitive, plans et devis et surveillance : hiver-printemps 2020
- Conception définitive et plans et devis : printemps et été 2020
- Réalisation des travaux : automne 2020

3.4 Plan de localisation

Ajoutez à l'annexe III une carte topographique ou cadastrale de localisation du projet ainsi que, s'il y a lieu, un plan de localisation des travaux ou des activités à une échelle adéquate indiquant notamment les infrastructures en place par rapport au site des travaux.

Un plan de localisation démontrant les services municipaux ainsi que le cadastre et le zonage est disponible à l'annexe 3.

4. ACTIVITÉS D'INFORMATION ET DE CONSULTATION DU PUBLIC ET DES COMMUNAUTÉS AUTOCHTONES¹

4.1 Activités d'information et de consultation réalisées

Le cas échéant, mentionnez les modalités relatives aux activités d'information et de consultation du public réalisées dans le cadre de la conception du projet (méthodes utilisées, nombre de participants et milieux représentés), dont celles réalisées auprès des communautés autochtones concernées, de même que les préoccupations soulevées et leur prise en compte dans la conception du projet.

Une séance d'information publique a été tenue le 4 juin 2018 au Centre multifonctionnel de L'Île-du-Havre-Aubert par la Municipalité avec les représentants du ministère de la Sécurité publique (MSP) afin de présenter le projet de protection du site de La Grave et d'expliquer la solution retenue.

Le but principal de la réunion était d'informer la population qu'un projet de protection du site serait réalisé puisqu'un protocole d'entente avait été signé avec le MSP. Cette rencontre visait aussi à expliquer la solution retenue et à répondre aux questions des citoyens.

4.2 Activités d'information et de consultation envisagées au cours de la réalisation de l'étude d'impact sur l'environnement

Mentionnez les modalités relatives aux activités d'information et de consultation du public prévues au cours de la réalisation de l'étude d'impact sur l'environnement, dont celles envisagées auprès des communautés autochtones concernées.

Aucune communauté autochtone n'est concernée par ce projet.

Pour ce qui concerne les activités à venir d'information et de consultation du public, la Municipalité s'assurera de tenir des séances aux moments stratégiques lorsque des informations nouvelles seront disponibles pour diffusion à la population.

La prochaine séance est prévue à la fin de l'été ou au début de l'automne avant que les activités de relevés et de caractérisation sur le site débutent. À ce moment, la Municipalité prévoit d'informer la population des grandes étapes à venir ainsi que de l'échéancier prévu.

L'étape suivante consistera à présenter le concept retenu au cours de l'étape concernant l'étude hydraulique et la conception préliminaire. À ce moment, il sera possible pour la Municipalité d'informer les citoyens et les commerçants concernés de l'envergure des travaux et des principaux impacts sur le terrain et sur l'environnement.

Ultérieurement, lorsque le concept sera retenu et accepté par la population et les différents ministères impliqués et que les plans et devis seront suffisamment avancés pour présenter une évaluation de coûts réaliste, une nouvelle rencontre publique pourra avoir lieu afin d'expliquer aux Madelinots l'impact

¹ Pour de plus amples renseignements sur la démarche et les méthodes qui peuvent être employées afin d'informer et de consulter le public avant ou dès le dépôt de l'avis de projet, l'initiateur du projet est invité à consulter le guide « L'information et la consultation du public dans le cadre de la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement : guide à l'intention de l'initiateur de projet », disponible sur le site Web du Ministère à l'adresse électronique suivante :

<http://www.environnement.gouv.qc.ca/evaluations/documents/guide-initiateur-projet.pdf>

financier du projet. À ce moment, une révision de l'échéancier et une explication du déroulement des travaux seront également présentés aux citoyens.

À noter également que le conseil municipal s'est engagé auprès des citoyens à mettre en place un comité de liaison qui aura comme mandat de faire les liens entre la population, la Municipalité et les professionnels impliqués. Tout au long du projet ce comité sera maintenu jusqu'à la conclusion du projet et au-delà s'il s'avère pertinent de le faire.

5. DESCRIPTION DES PRINCIPAUX ENJEUX² ET IMPACTS ANTICIPÉS DU PROJET SUR LE MILIEU RÉCEPTEUR

5.1 Description des principaux enjeux du projet

Pour les phases d'aménagement, de construction et d'exploitation et, le cas échéant, de fermeture du projet, décrivez sommairement quels sont les principaux enjeux du projet.

Un enjeu principal sera d'arriver à réaliser le projet sans trop perturber les activités économiques, culturelles et récréatives omniprésentes sur le site tout en s'assurant de pouvoir opérer dans des conditions météorologiques optimales et sécuritaires. En effet, la réalisation des travaux étant prévue sur le littoral et en partie dans le milieu marin, il sera requis d'effectuer les travaux au moment opportun de façon à ne pas perturber la faune et la flore aquatiques tout en s'assurant d'éviter les phénomènes météorologiques qui pourraient complexifier les travaux et avoir un impact sur la sécurité des travailleurs.

5.2 Description des principaux impacts anticipés du projet sur le milieu récepteur

Pour les phases d'aménagement, de construction et d'exploitation et, le cas échéant, de fermeture du projet, décrivez sommairement quels sont les impacts anticipés sur le milieu récepteur (physique, biologique et humain).

Le dépôt d'environ 53 000 m³ de gravier et galets sur la rive et dans le littoral aura assurément un impact la topographie et le profil de la côte ainsi que sur les écosystèmes marins. Ces impacts seront à définir dans les études environnementales à venir.

Au niveau humain, les travaux permettront d'installer un sentiment de sécurité chez les citoyens, les commerçants et les organismes qui occupent le site historique.

6. ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE

6.1 Émission de gaz à effet de serre

Mentionnez si le projet est susceptible d'entraîner l'émission de gaz à effet de serre et, si oui, lesquels. Décrire sommairement les principales sources d'émissions projetées selon les différentes phases de réalisation du projet.

Les sources d'émission de gaz à effet de serre sont lors de la réalisation des travaux alors que de la machinerie sera utilisée pour le transport de matériaux de même que pour leur mise en œuvre.


7. AUTRES RENSEIGNEMENTS PERTINENTS

7.1 Autres renseignements pertinents

Inscrivez tout autre renseignement jugé nécessaire à une meilleure compréhension du projet.

² **Enjeu** : Préoccupation majeure pour le gouvernement, la communauté scientifique ou la population, y compris les communautés autochtones concernées, et dont l'analyse pourrait influencer la décision du gouvernement quant à l'autorisation ou non d'un projet.

8. DÉCLARATION ET SIGNATURE

8.1 Déclaration et signature
<p>Je déclare que :</p> <ul style="list-style-type: none">1° les documents et renseignements fournis dans cet avis de projet sont exacts au meilleur de ma connaissance;2° les documents et renseignements fournis dans cet avis de projet ne contiennent aucun renseignement personnel en vertu de la section 1 du Chapitre III de la Loi sur l'accès aux documents des organismes publics et sur la protection des renseignements personnels. <p>Toute fausse déclaration peut entraîner des sanctions en vertu de la LQE. Tous renseignements fournis feront partie intégrante de la demande et seront publiés au Registre des évaluations environnementales en vertu de l'article 118.5.0.1 de la LQE.</p>
Prénom et nom
Caroline Richard
Signature

Date
03 septembre 2019

Annexe I
Résolution du conseil municipal

Si pertinent, insérez ci-dessous la résolution du conseil municipal dûment certifiée autorisant le(s) signataire(s) de la demande à la présenter au ministre.



EXTRAIT du procès-verbal de la séance ordinaire du conseil de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine tenue le 9 juillet 2019, à la mairie.

R1907-1445

Dépôt d'un avis de projet au MELCC – Travaux de protection des berges – Secteur de La Grave

CONSIDÉRANT QUE l'érosion des berges est devenue un enjeu majeur pour la communauté des Îles-de-la-Madeleine;

CONSIDÉRANT QUE le site historique de La Grave a été retenu comme une priorité par la Commission permanente sur l'érosion des berges et le conseil municipal en raison de son importance patrimoniale, historique culturelle et économique;

CONSIDÉRANT QUE le 20 mars 2018, la Municipalité signait avec le ministère de la Sécurité publique (MSP) une entente de financement prévoyant des travaux de protection du secteur de La Grave au coût de 5 400 000 \$ incluant une aide financière gouvernementale de 4 005 513 \$;

CONSIDÉRANT QUE l'engagement de la Municipalité quant à la réalisation des travaux de protection des berges en vertu de l'entente signée avec le MSP;

CONSIDÉRANT QUE dans le cadre de ces travaux, il y a lieu de déposer un avis de projet au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC);

EN CONSÉQUENCE,

sur une proposition de M. Benoit Arseneau,
appuyée par M. Jean-Philippe Déraspe,
il est résolu à l'unanimité des conseillers présents

que le conseil autorise la directrice des services techniques et des réseaux publics, Caroline Richard, à déposer un avis de projet auprès du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) relativement aux travaux de protection des berges prévus dans le secteur de La Grave.

VRAIE COPIE CERTIFIÉE
Aux Îles-de-la-Madeleine
Ce 15 juillet 2019

Jean-Yves Lebreux, greffier

Annexe II
Caractéristiques du projet

Si pertinent, insérez ci-dessous les documents permettant de mieux cerner les caractéristiques du projet (plan, croquis, vue en coupe, etc.).















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).

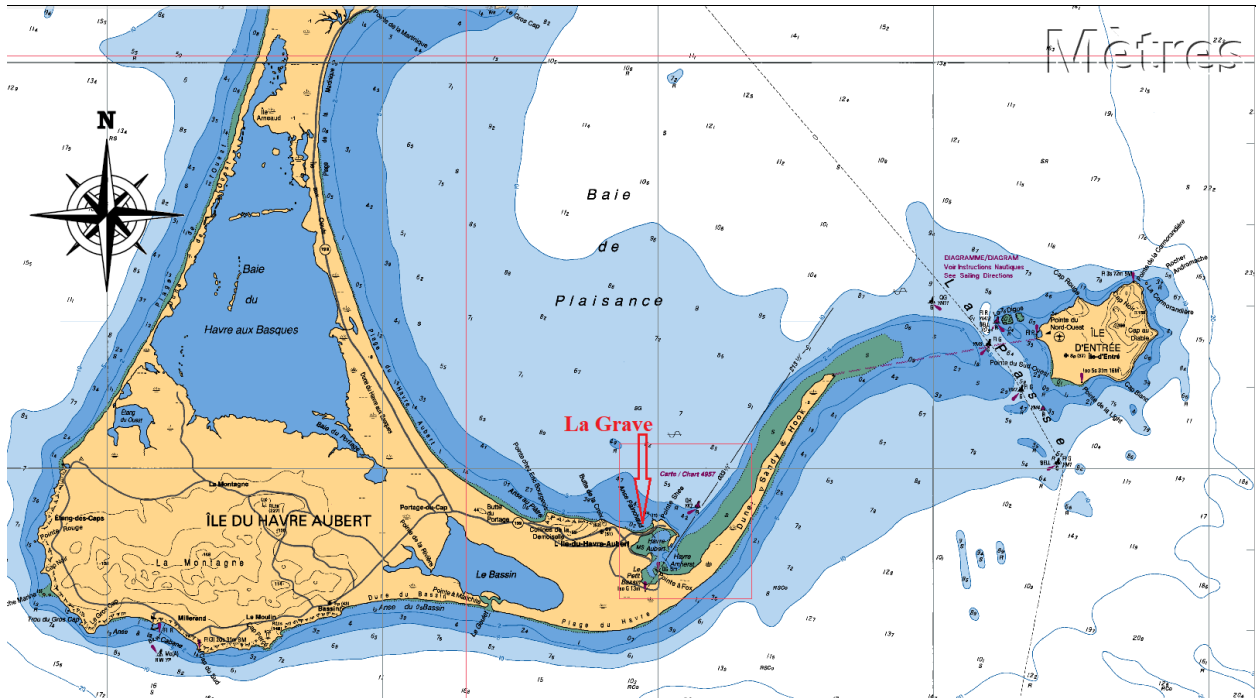


Figure 1.1 Localisation de Havre-Aubert aux Îles de la Madeleine (Carte marine 4951)

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.

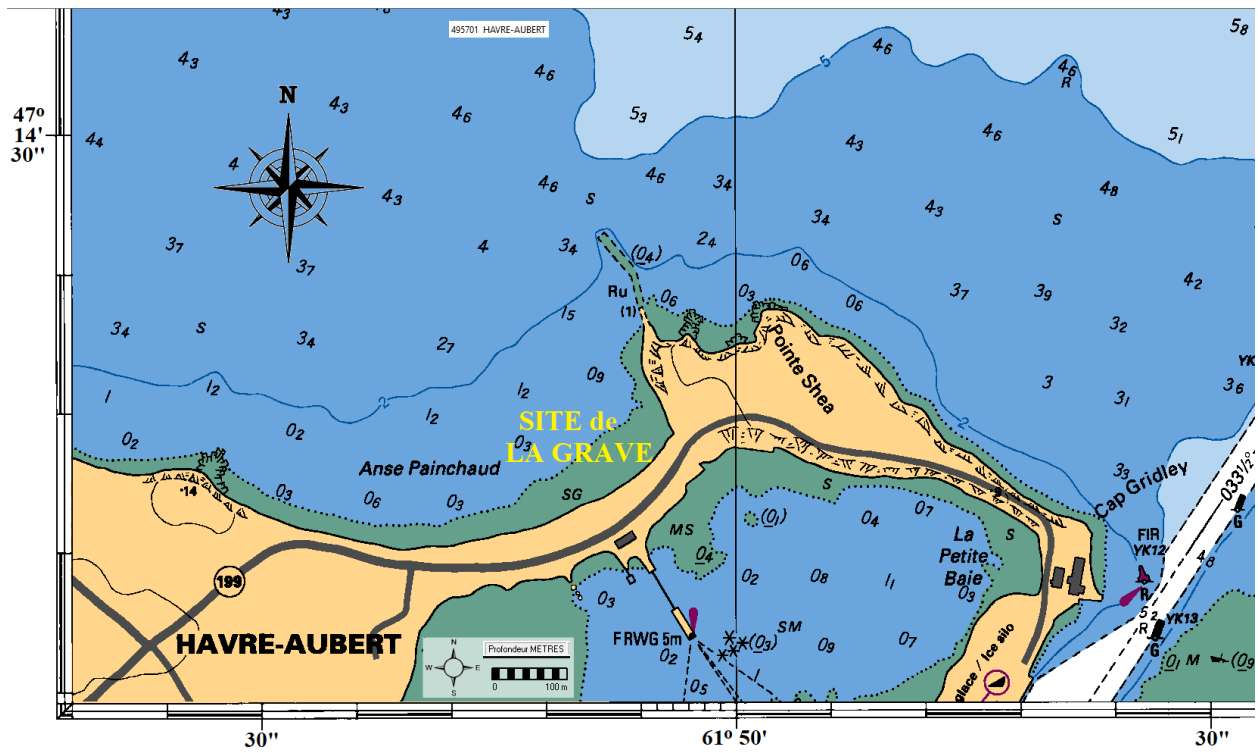


Figure 1.2 Localisation du secteur de La Grave à Havre-Aubert (Carte marine 4957)

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).

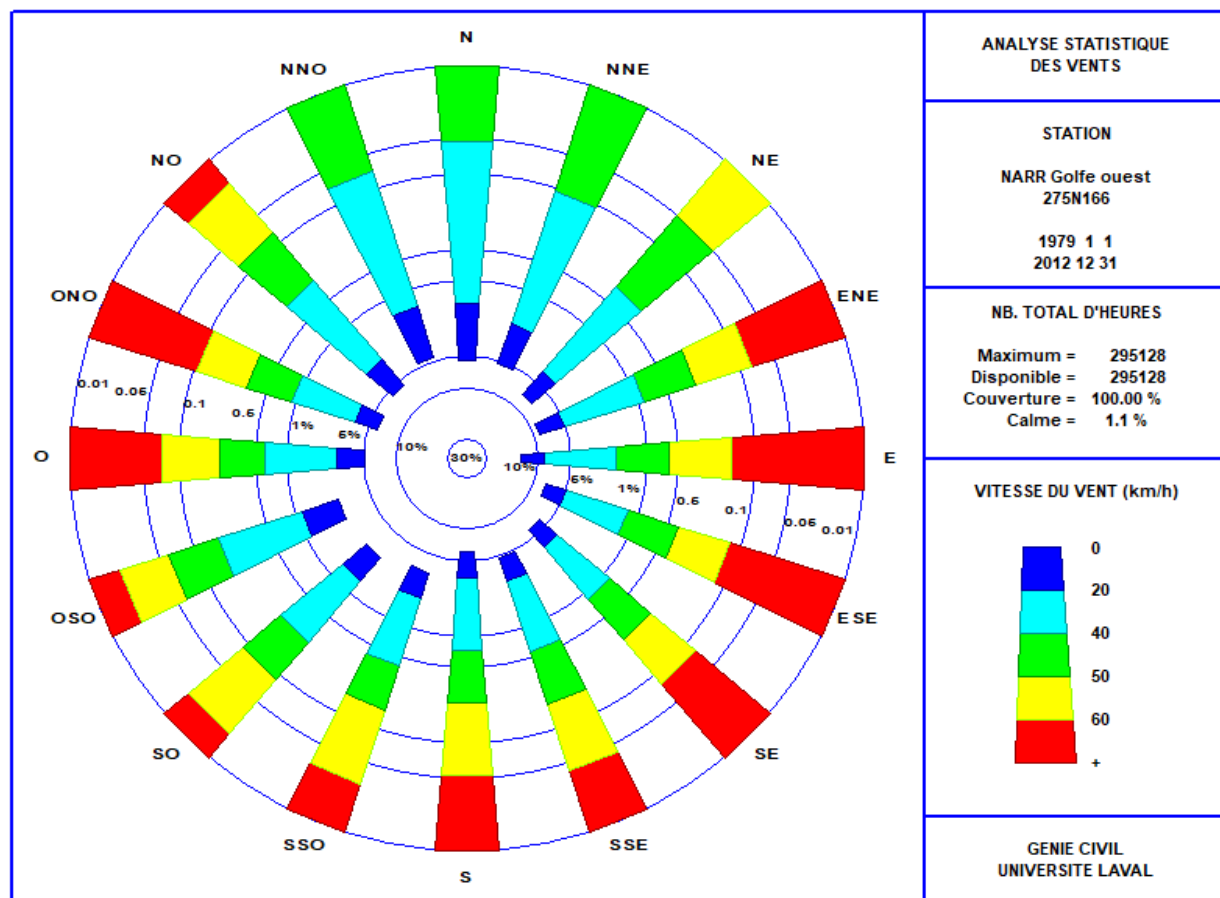


Figure 2.1 Rose des vents de la station NARR 275-166 (1979-2012 – Année complète)

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.

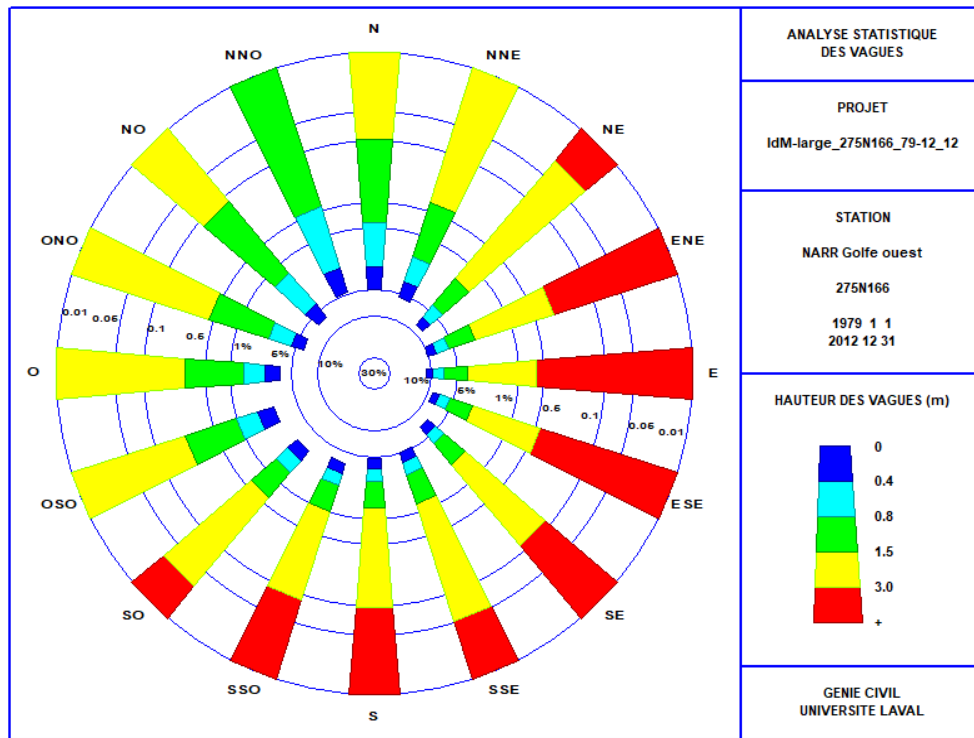


Figure 2.2 Rose des vagues au large de Havre-Aubert (1979-2012 – Année complète)

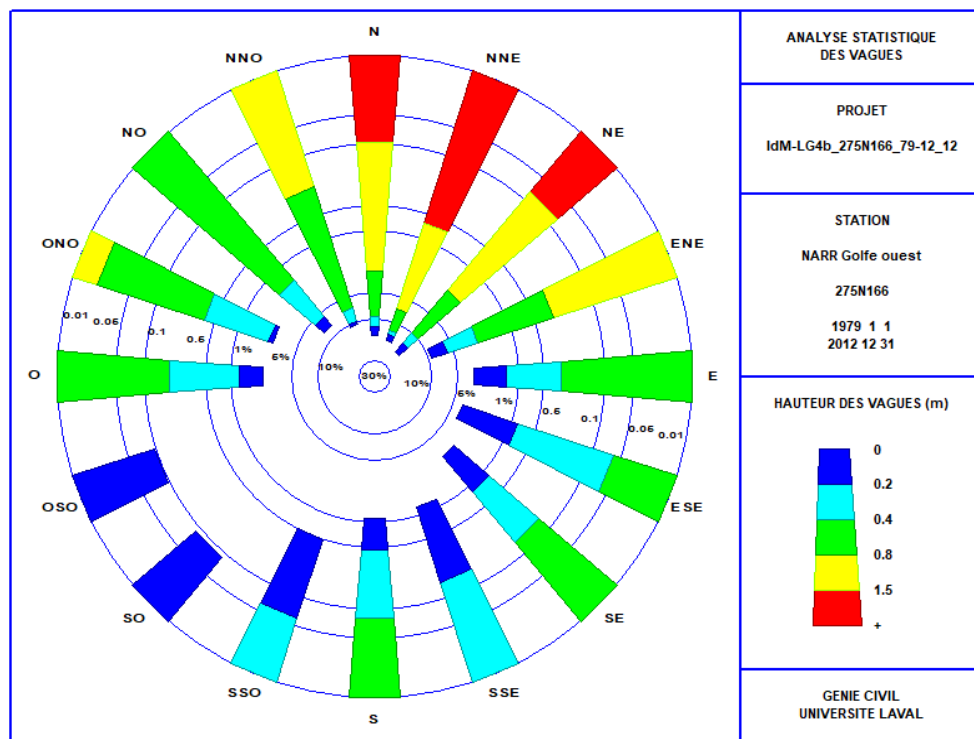


Figure 2.3 Rose des vagues réfractées près de La Grave (1979-2012 – Année complète)

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).

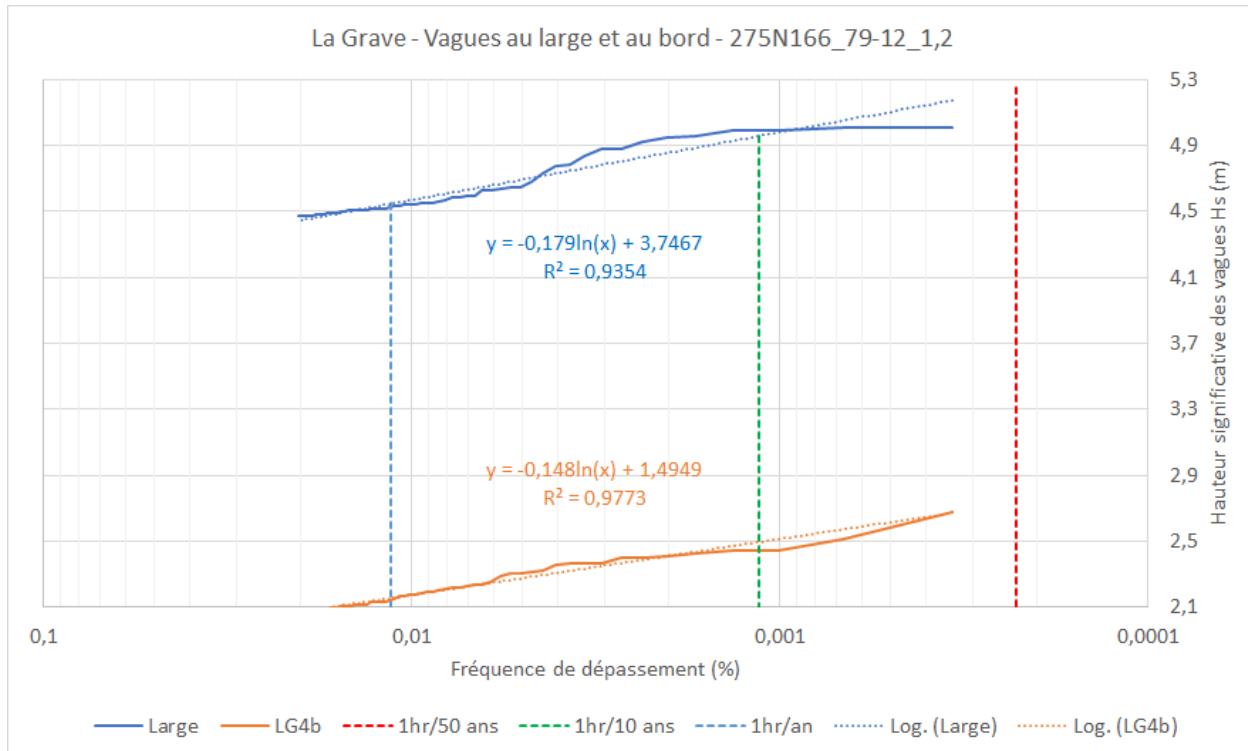


Figure 2.4 Fréquence de dépassement des hauteurs de vagues à Havre-Aubert (au large et réfractées) – 1979-2012 – Année complète

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. & Lefaiivre, 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)

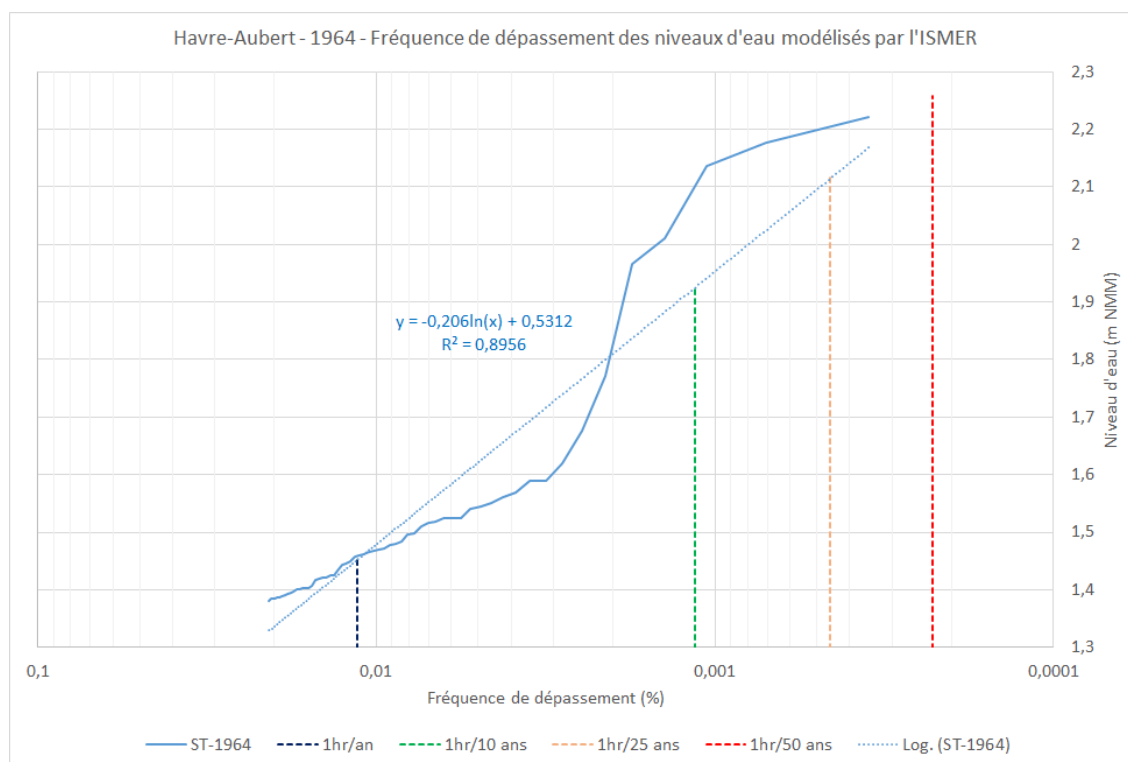


Figure 2.5 Fréquence de dépassement des niveaux d'eau à Havre-Aubert – 1979-2011

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.

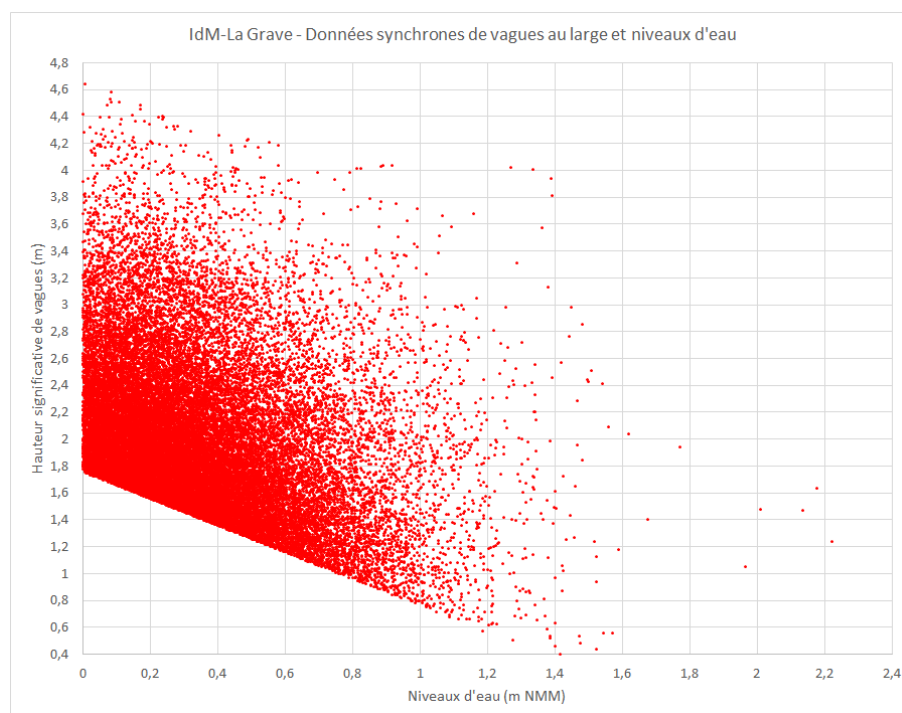


Figure 2.6 Relation entre les hauteurs de vagues au large et les niveaux d'eau à La Grave - Havre-Aubert – 1979-2011

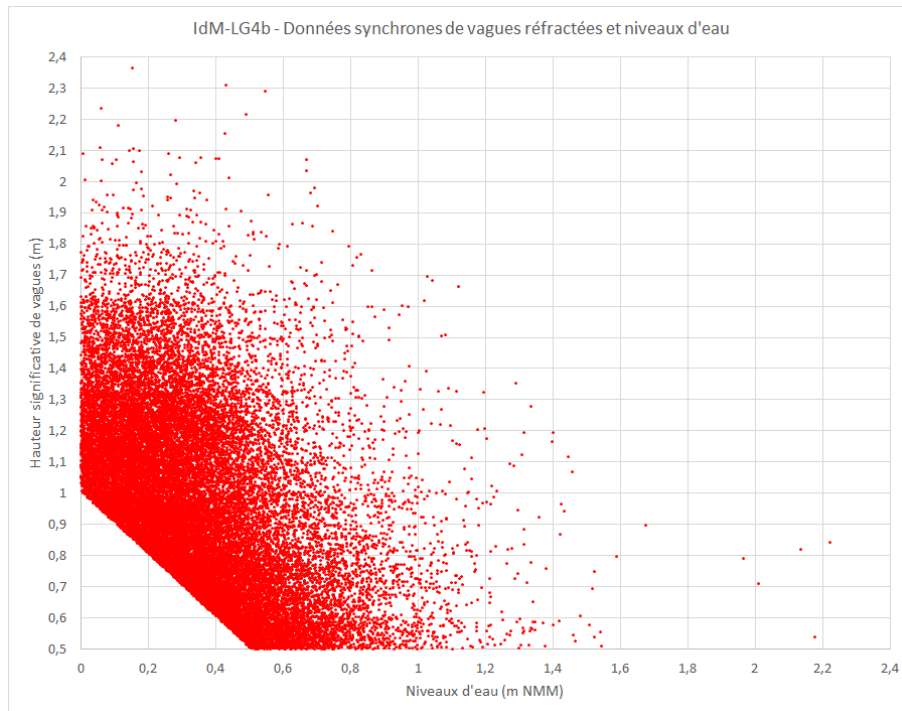


Figure 2.7 Relation entre les hauteurs de vagues réfractées et les niveaux d'eau à La Grave - Havre-Aubert – 1979-2011

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.

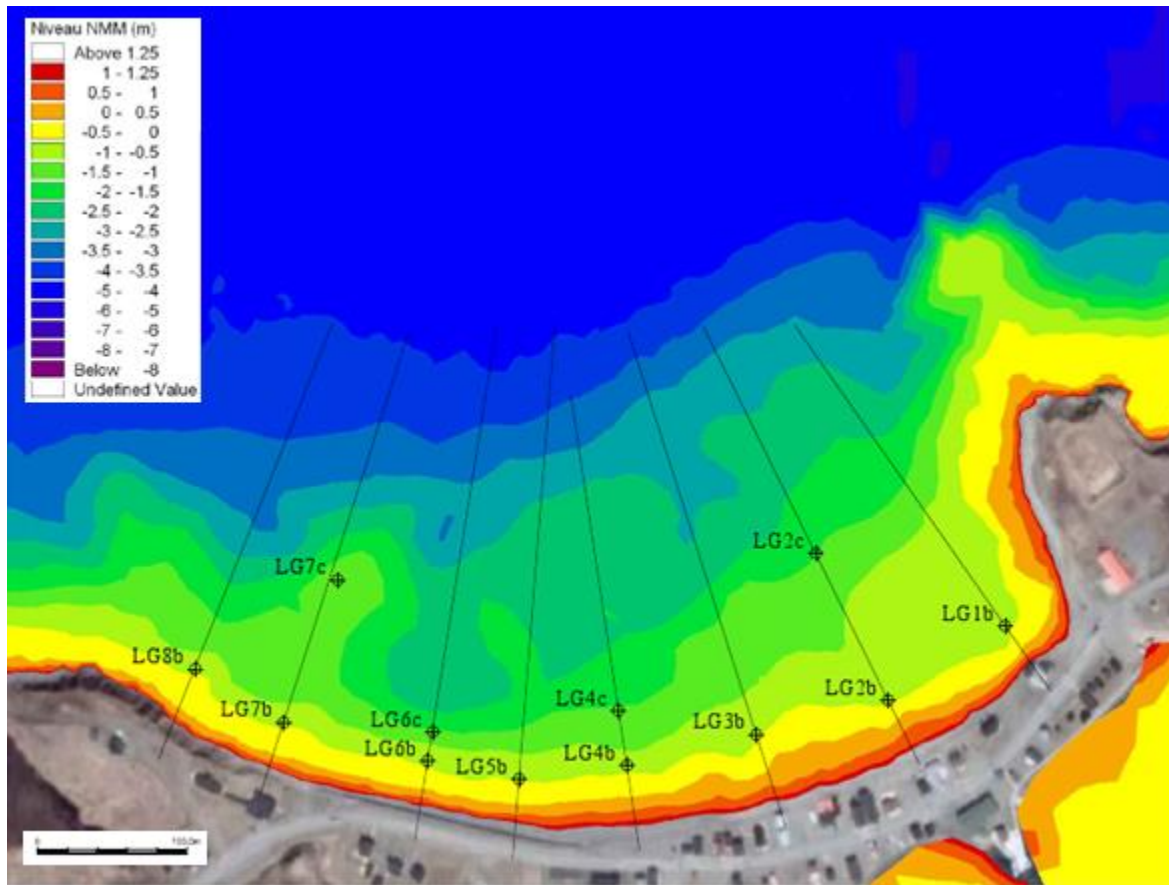


Figure 2.8 Localisation des transects et points de calcul de la réfraction des vagues

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.

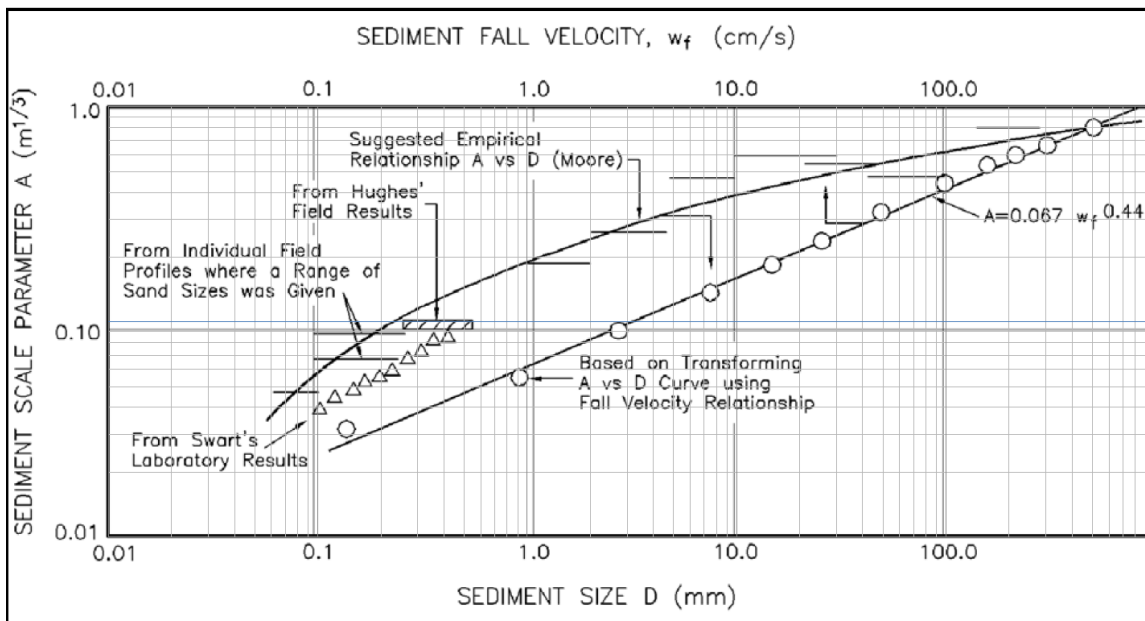


Figure III-3-17. Variation of sediment scale parameter A with sediment size D and fall velocity w_f (Dean 1987b)

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.

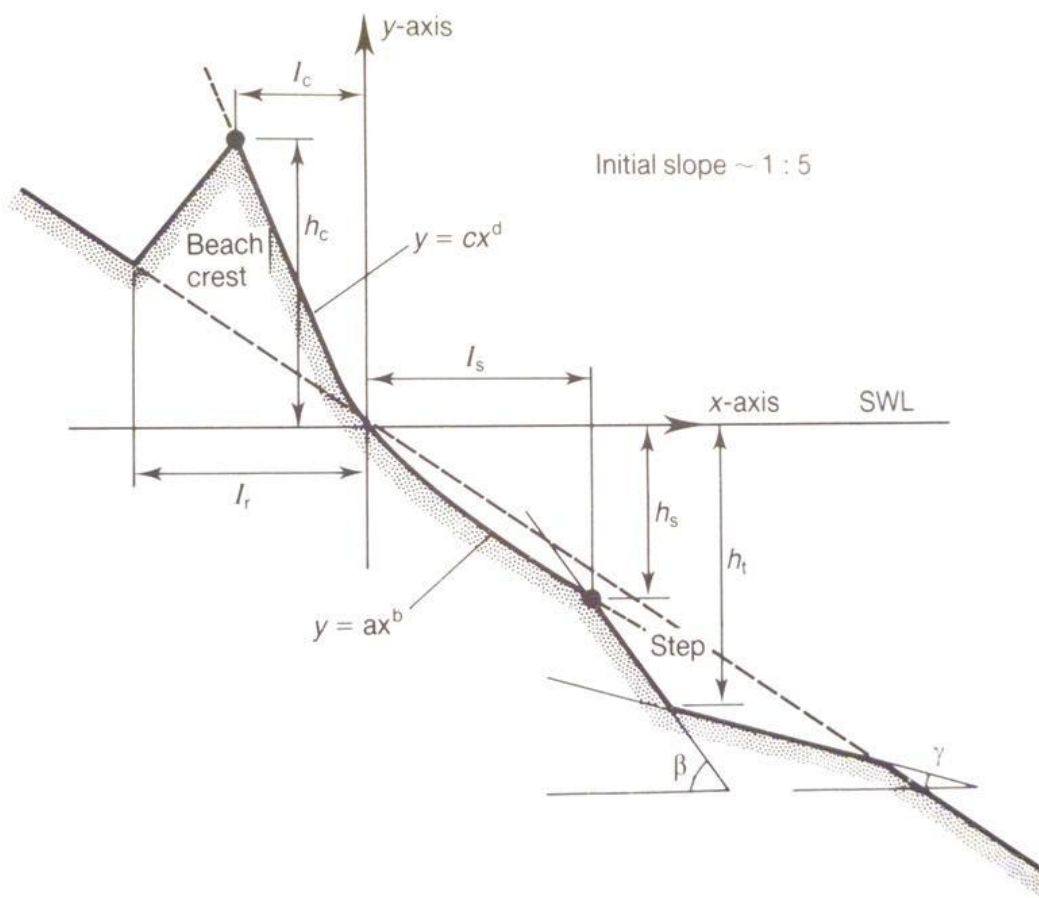


Figure 3.2 Évolution d'un profil de plage de galet (CIRIA – figure 145 page 245)

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.

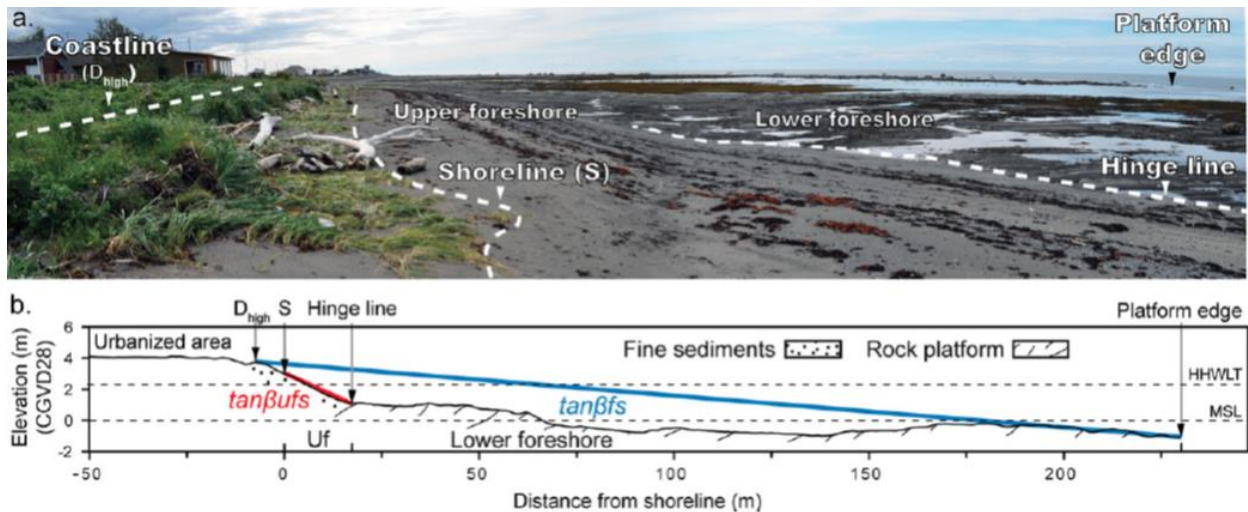


Figure 3.4 Configuration de plage et définition de pentes

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 $\text{Moy}+2*\sigma$ et $\text{Moy}-2*\sigma$ 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 ($\text{Moy}-\sigma$) 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.

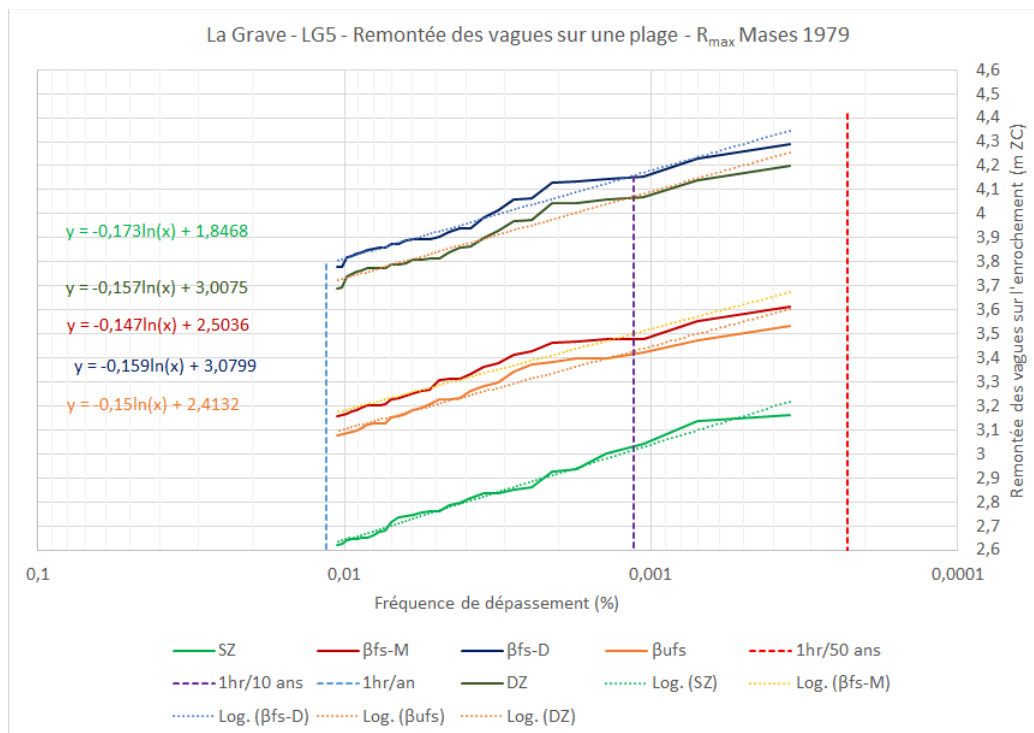


Figure 3.5 Remontée R_{max} des vagues sur une plage – Transect LG5 – Mase-1979

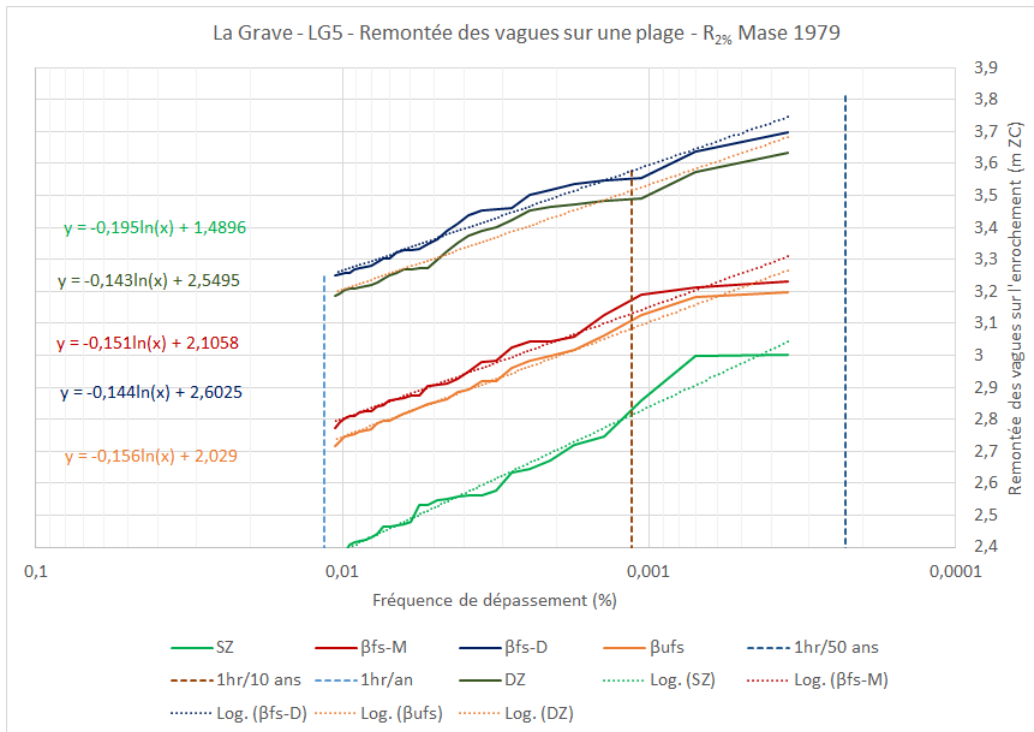


Figure 3.6 Remontée $R_{2\%}$ des vagues sur une plage – Transect LG5 – Mase-1979

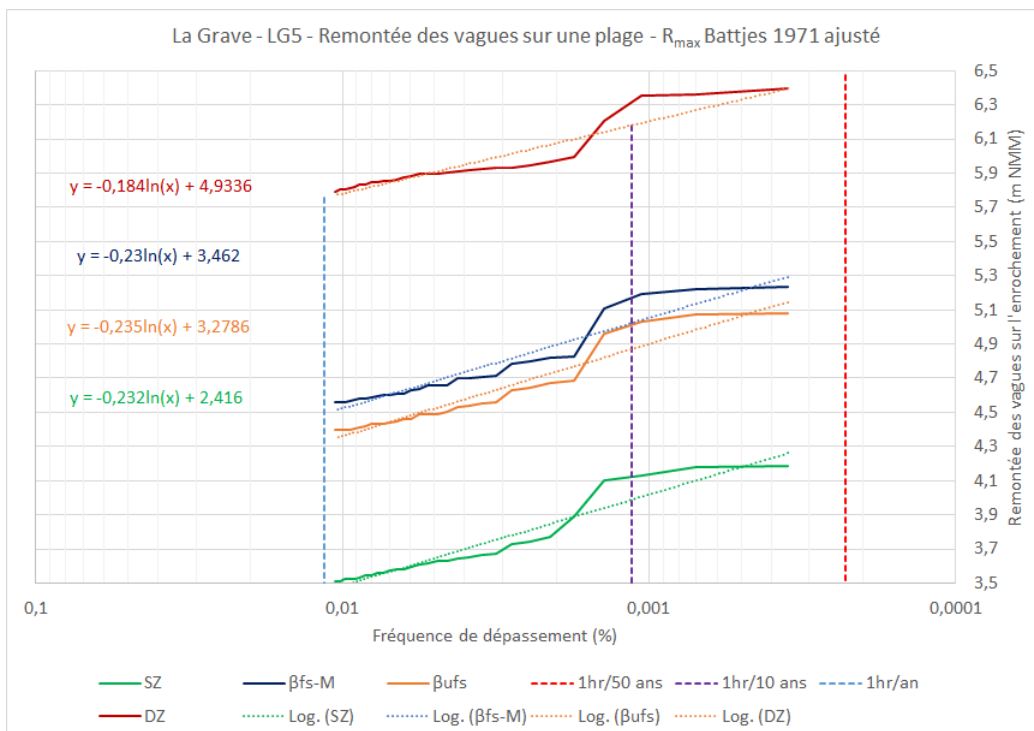


Figure 3.7 Remontée R_{max} des vagues sur une plage – Transect LG5 – Battjes-1971-ajustée

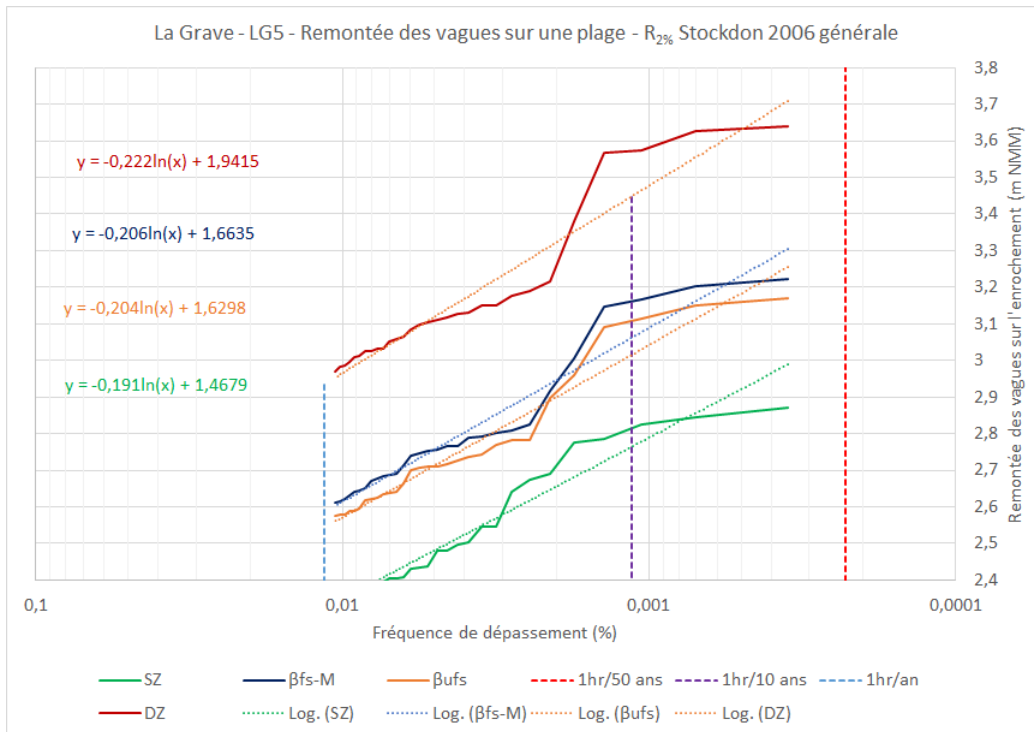


Figure 3.8 Remontée $R_{2\%}$ des vagues sur une plage – Transect LG5 – Stockdon-2006

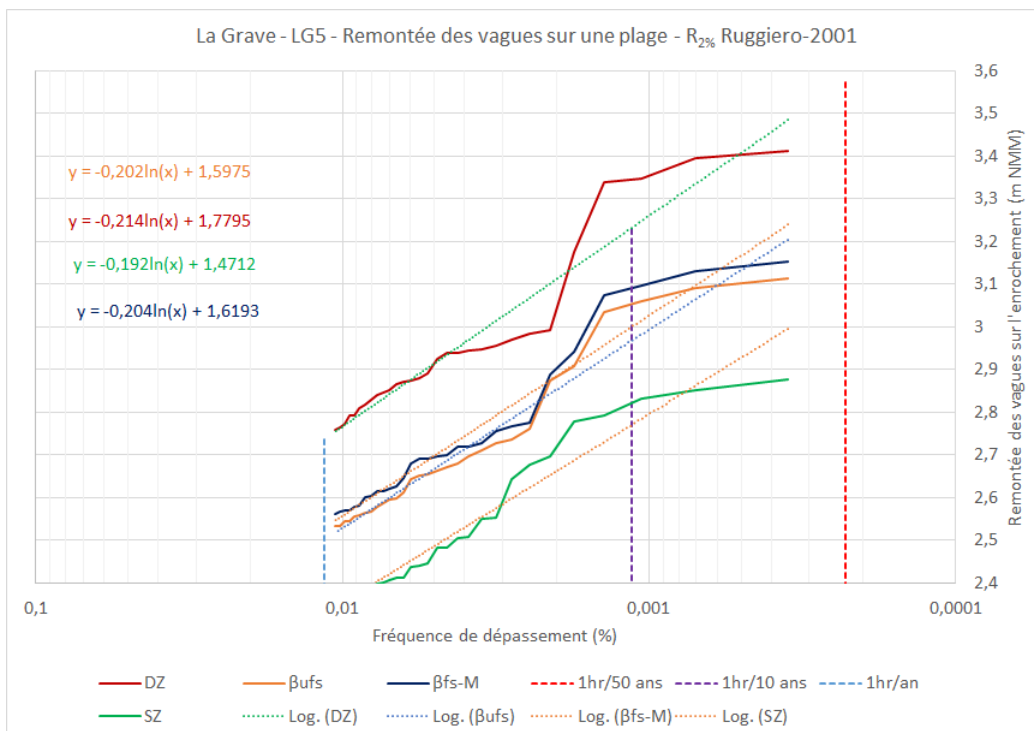


Figure 3.9 Remontée $R_{2\%}$ des vagues sur une plage – Transect LG5 – Ruggiero-2001

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.

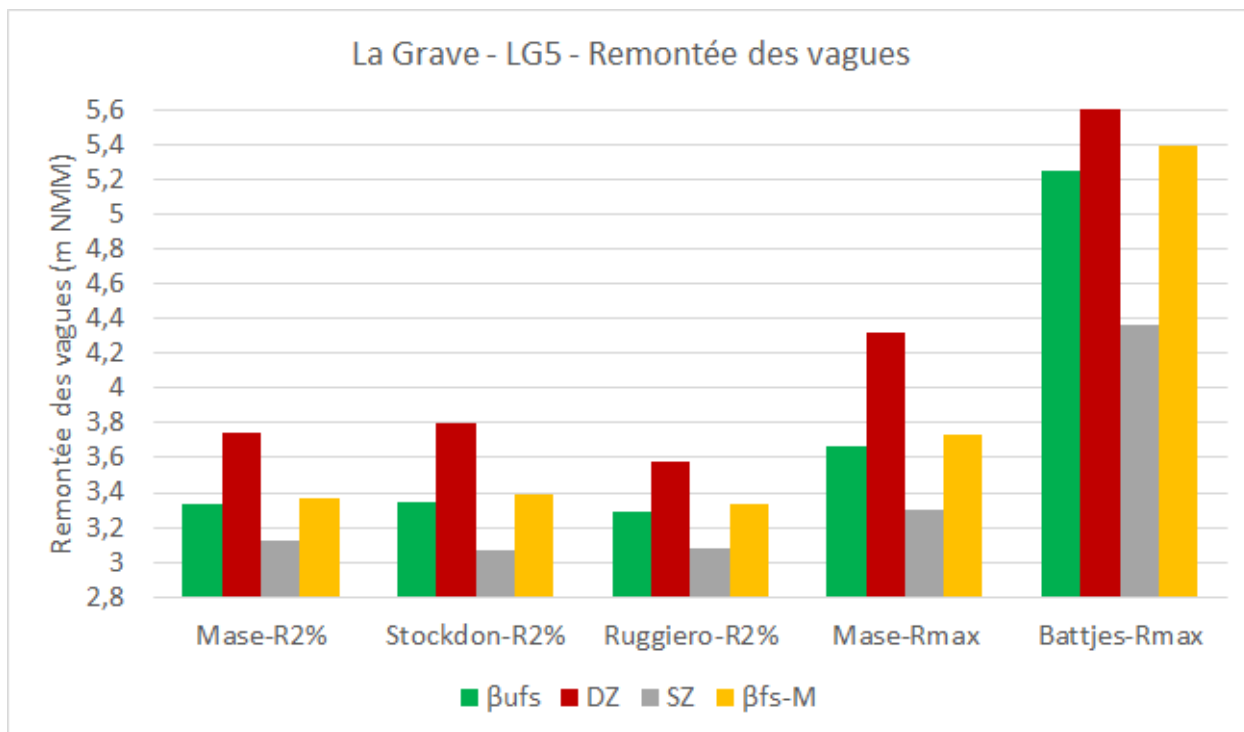


Figure 3.10 Résultats de remontée des vagues sur la plage de La Grave

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}
β_{ufs}	+3,32 NMM	+3,67 NMM
DZ	+3,71 NMM	+4,32 NMM
SZ	+3,09 NMM	+3,30 NMM
β_{fs}	+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.

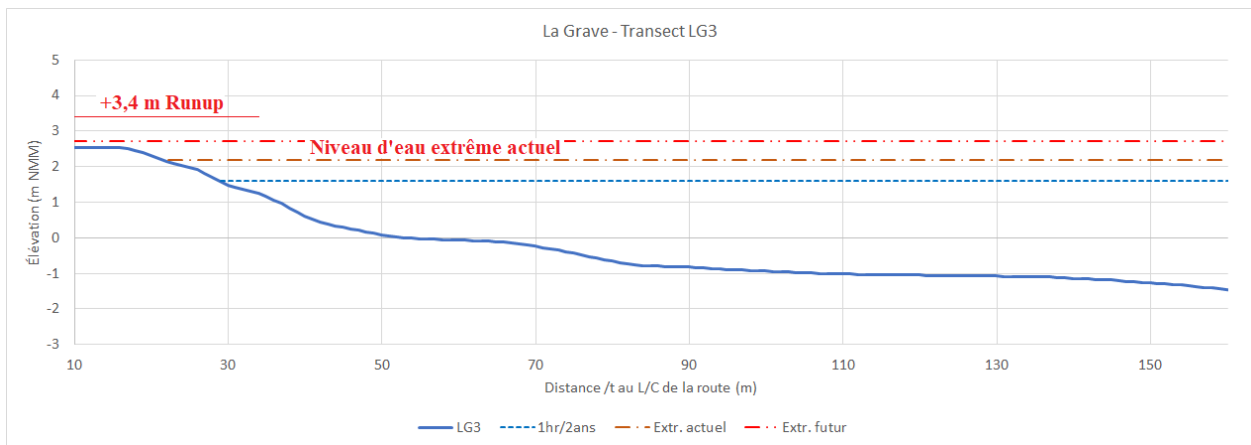


Figure 3.11 Résultats de remontée des vagues sur le transect LG3 de la plage de La Grave

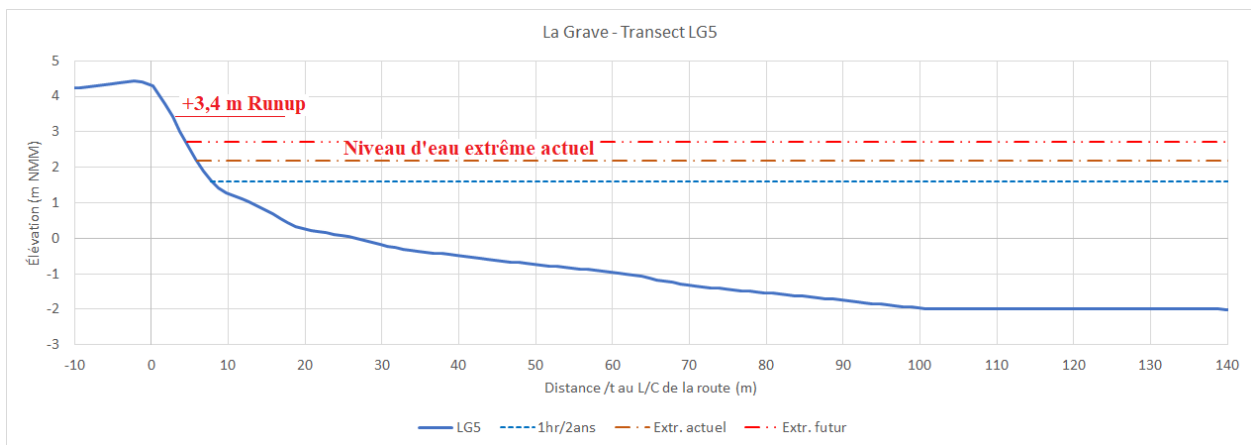


Figure 3.12 Résultats de remontée des vagues sur le transect LG5 de la plage de La Grave

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).

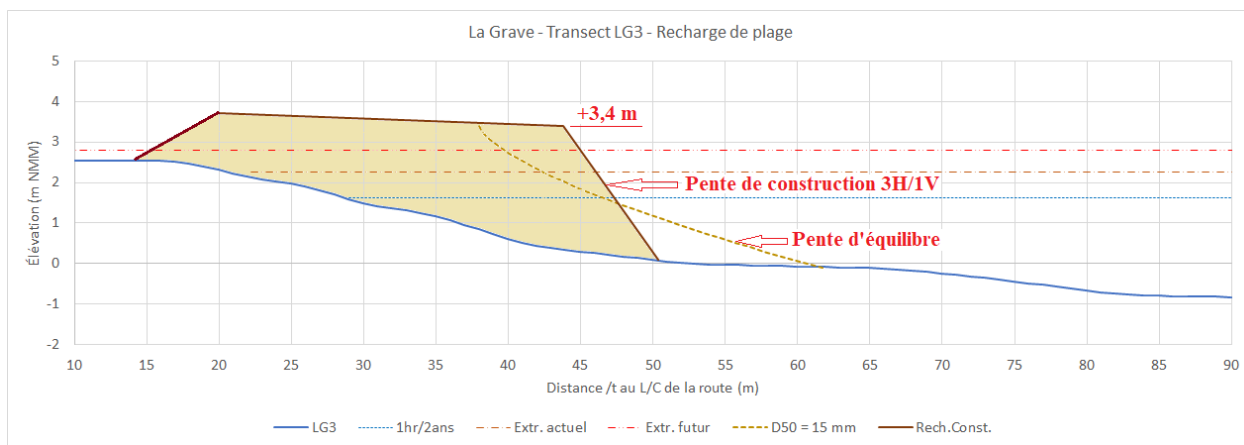


Figure 3.14 Coupe-type de rechargement de plage – Transect LG3

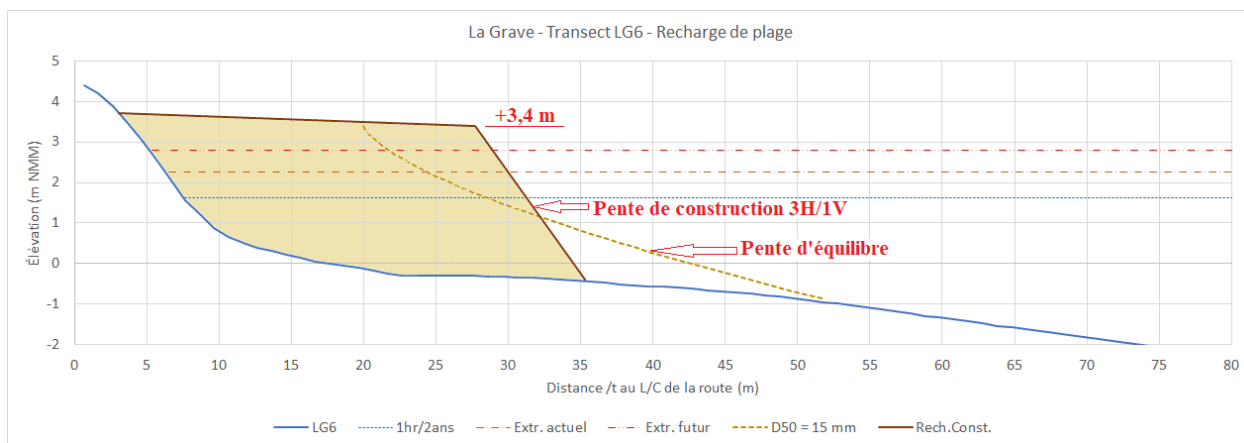


Figure 3.15 Coupe-type de rechargement de plage – Transect LG6

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 D₅₀ de 15 mm.

La superficie d'empiètement du projet de construction de la recharge complète serait d'environ 17 500 m².

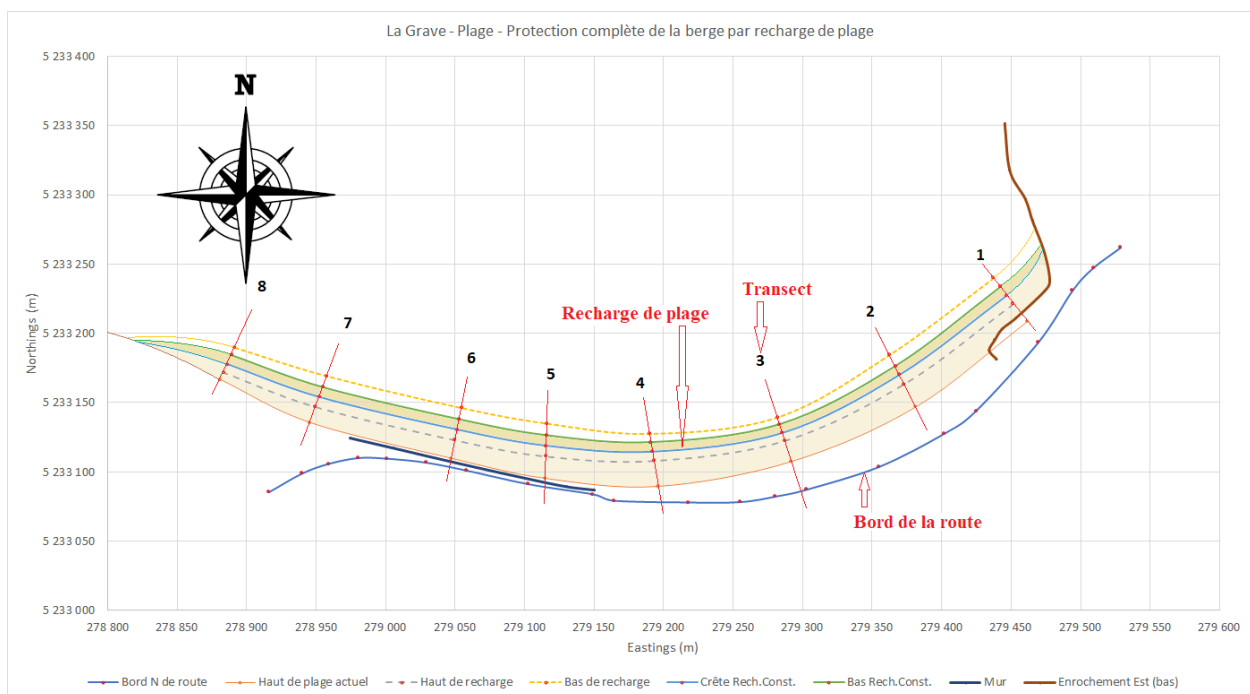


Figure 4.1 Vue en plan du projet de recharge complète de la plage de La Grave

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.

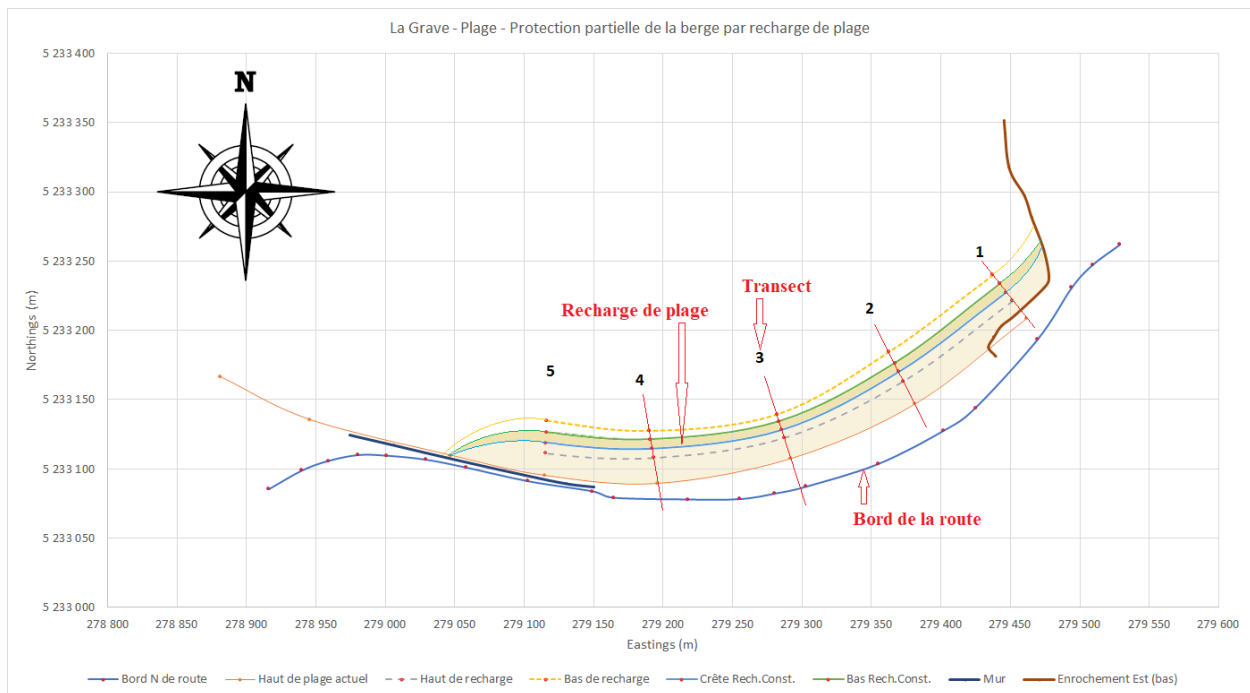


Figure 4.5 Vue en plan du projet de recharge partielle de la plage de La Grave

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

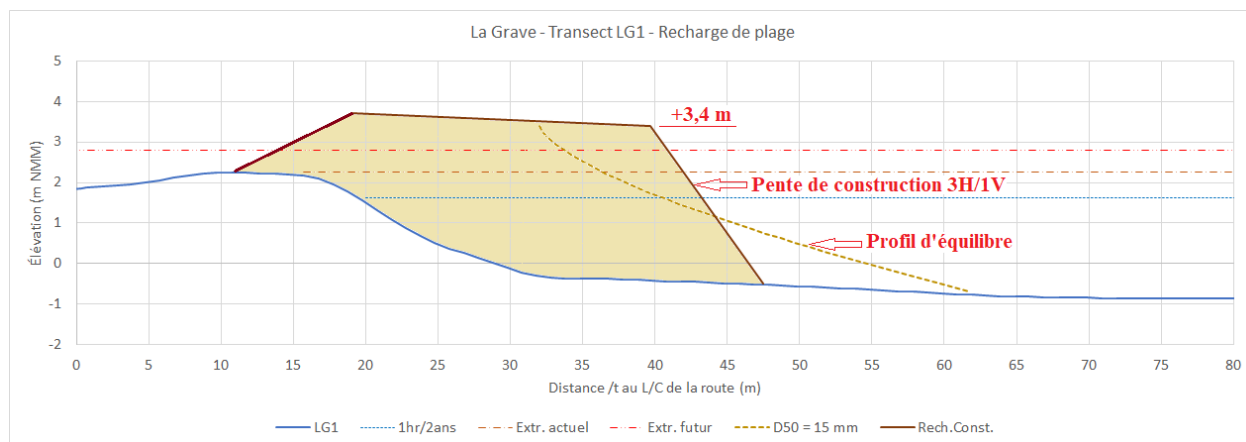


Figure A.1 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG1

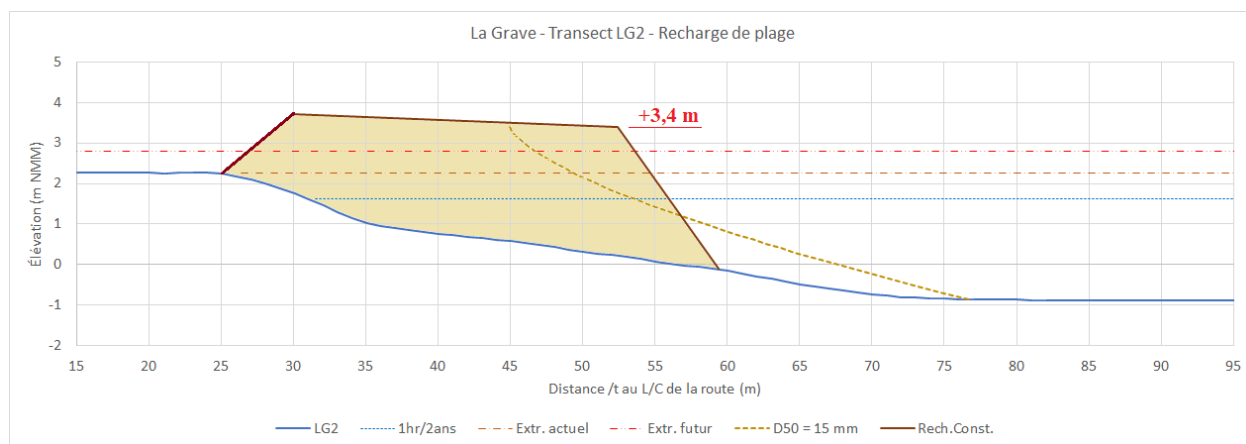


Figure A.2 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG2

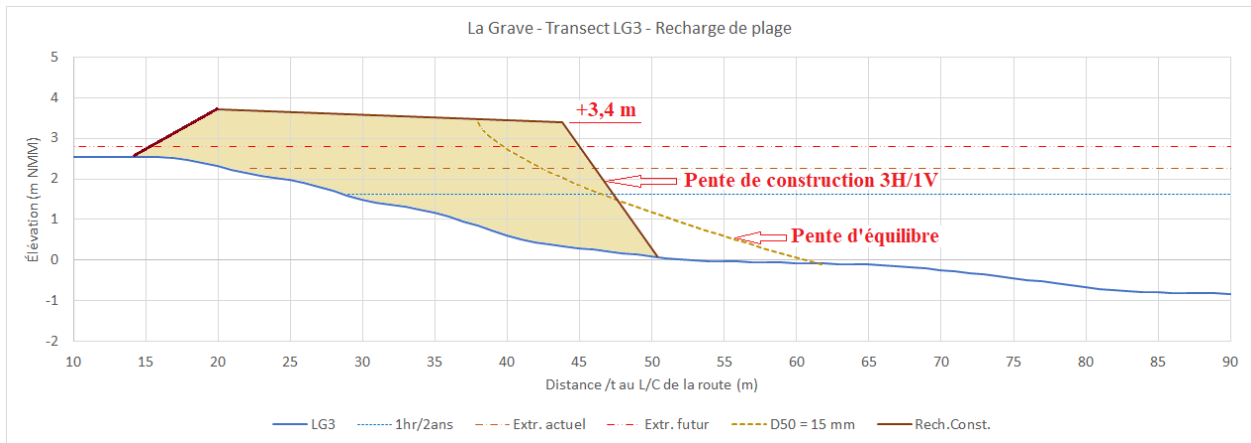


Figure A.3 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG3

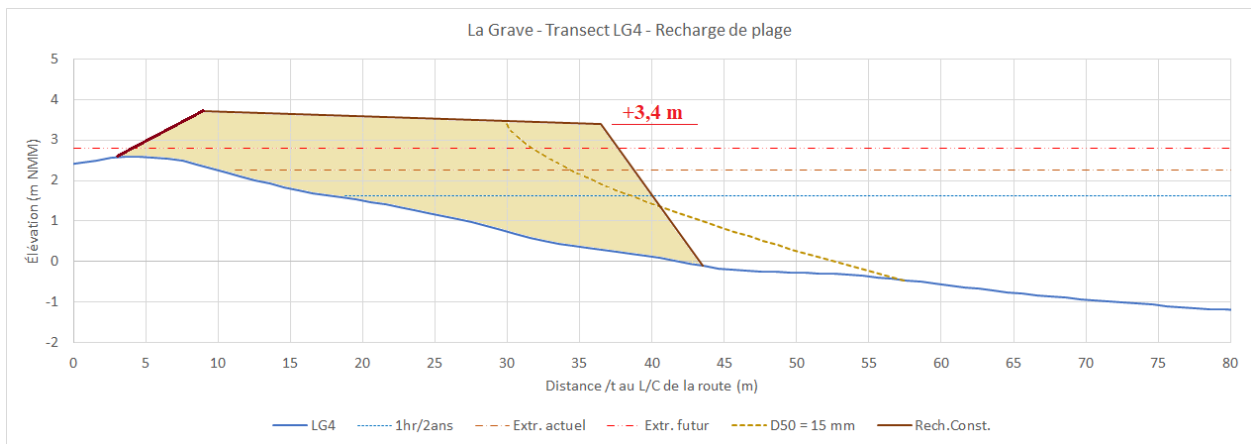


Figure A.4 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG4

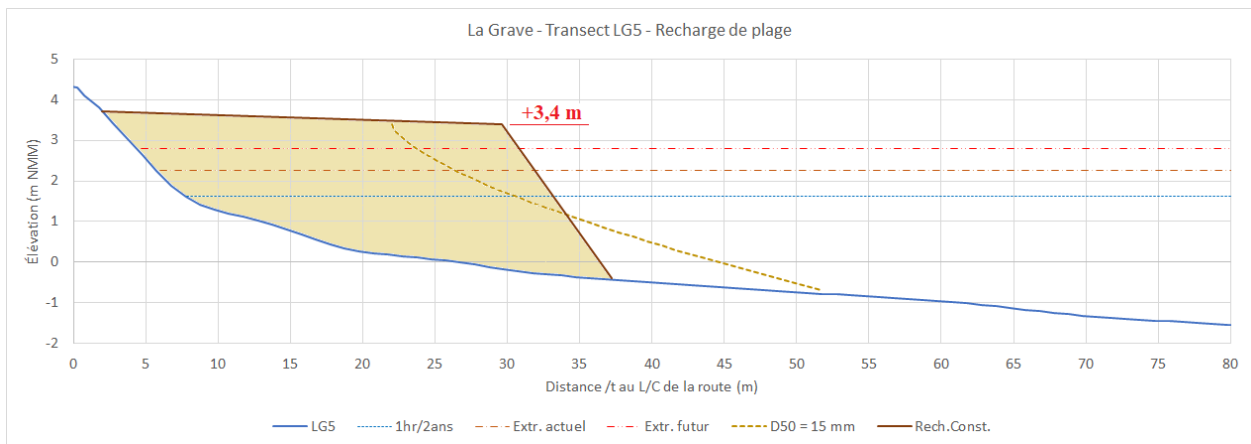


Figure A.5 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG5

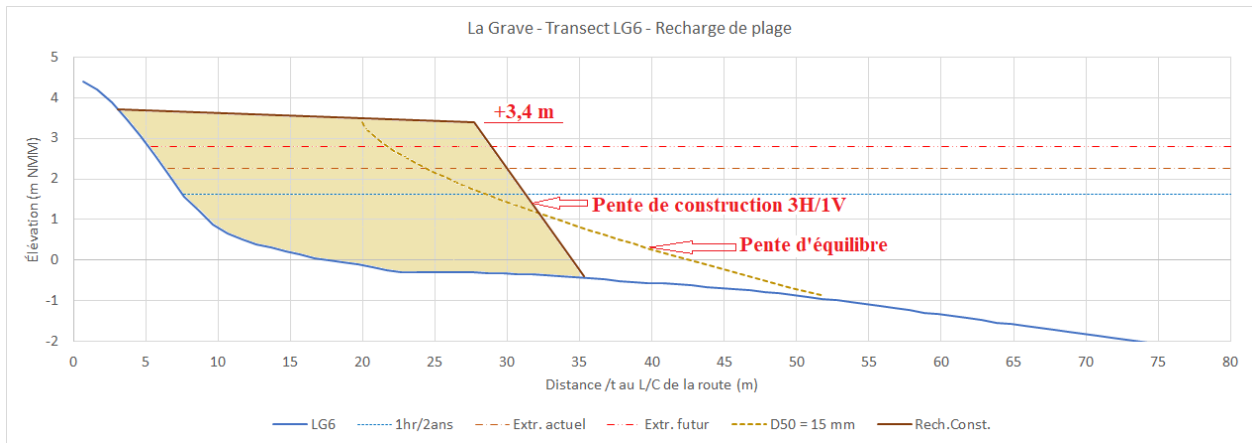


Figure A.6 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG6

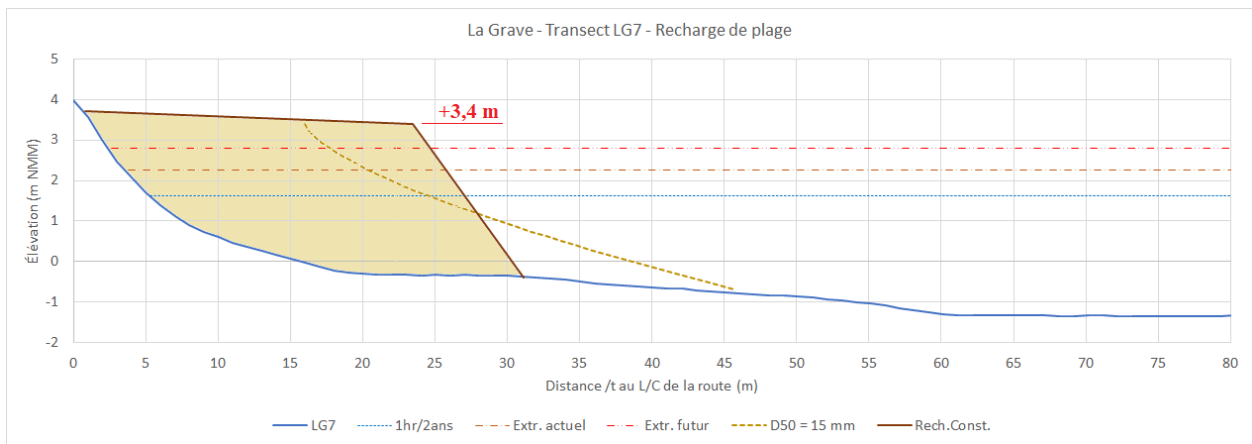


Figure A.7 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG7

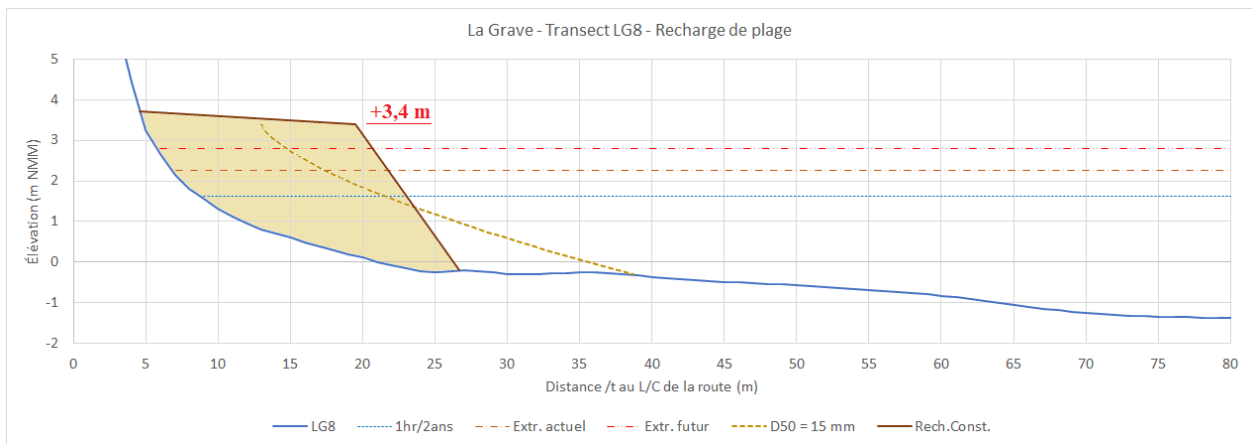
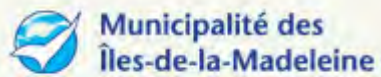


Figure A.8 Coupe de la recharge de plage proposée au transect LG8



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

N/Réf. : 61933

Rapport final

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

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 renaturalisation 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

de sédiments en transit dans le secteur sont largement insuffisantes pour être retenues par l'exutoire des étangs aérés et alimenter la plage.

Du côté nord de l'exutoire, il est intéressant de noter la présence d'une sorte de plage en tout-venant qui présente une certaine efficacité à protéger temporairement la promenade. En fait, il s'agit d'enrochements locaux placés par la Municipalité vers 1995 pour protéger la promenade le long des étangs aérés. Ces enrochements se sont dégradés avec le temps.

Du côté sud de l'exutoire, de l'enrochement a été récemment placé pour tenter de protéger la promenade, mais cette protection est sous-dimensionnée et n'arrêtera pas vraiment la destruction de la promenade par les vagues de tempête. Les matériaux en érosion le long de la promenade sont des sables et graviers avec quelques pierres rondes.

Secteur de Gros-Cap

Le secteur de Gros-Cap est une succession de caps en érosion et de plages dont une seule (au niveau de la Garderie) présente une dimension significative.

Non seulement les caps de grès sont en érosion dans tout le secteur, mais la dune littorale est elle aussi visiblement en érosion dans ce secteur. Un peu d'enrochement a été mis en place par endroits pour tenter de ralentir le recul de la dune, sans grand succès, la dimension de cet enrochement n'ayant pas de rapport avec l'ampleur des phénomènes d'érosion en cause et en particulier avec les très hauts niveaux d'eau observés ces dernières années.

Secteur de la plage du chemin des chalets

La plage du chemin des chalets est située entre deux secteurs de caps en érosion. Une dune littorale sépare la Baie de plaisance au sud d'un secteur de marécage au nord. La mise en place des chalets dans ce secteur s'est effectuée en détruisant la majeure partie de la dune qui existait à cet endroit, le but étant de « dégager » la vue des propriétaires des chalets vers la mer. Les seuls chalets ou maisons qui sont encore protégés par cette dune à l'extrémité ouest de la plage sont à quelques mois de perdre cette protection.

Plusieurs chalets sont actuellement tellement avancés dans la baie que l'eau passe sous le chalet ou contourne les enrochements de fortune qui ont été installés pour tenter de protéger le chalet.

Secteur de la Pointe de la Martinique

La Pointe de la Martinique est un secteur de falaises de grès en érosion sévère. De nombreux propriétaires riverains sont intervenus pour tenter de protéger leur terrain. Des enrochements ont été placés ou déversés au pied de la falaise avec un succès variable. Les propriétaires qui ne sont pas intervenus perdent rapidement du terrain, au point que la falaise n'est plus qu'à quelques mètres de certaines habitations.

La plupart des enrochements de protection en place ne sont pas installés de façon efficace et durable : le pied de ces enrochements est rarement stabilisé et la crête de plusieurs enrochements est visiblement trop basse pour éviter le franchissement par les vagues de tempêtes.

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

Protection en enrochements

La protection de la berge à l'aide d'enrochements est un type de protection qui n'a pas vraiment été mis en œuvre dans le secteur des étangs aérés. Les essais de protection de la promenade le long des étangs aérés ne peuvent pas être considérés comme tels.

Une vérification de l'élévation optimale de la crête de l'enrochement a été faite ; l'élévation +3,2 m NMM a été retenue pour la crête de l'enrochement, ce qui est inférieur à l'élévation de la promenade adjacente. L'optimisation de cette élévation de la protection de la rive passerait par des essais de franchissement en canal à houle, seul moyen de tenir compte de la configuration réelle des fonds marins devant ces ouvrages de protection. Ces essais en canal à houle sont recommandés lors de la phase de conception finale des ouvrages si cette solution est retenue.

Une vérification de la grosseur des enrochements requis en fonction des conditions de vagues a aussi été faite et a permis de préconiser un poids des unités de carapace de 1 à 2 tonnes.

Rechargement de plage au moyen de sable

De façon préliminaire, la partie supérieure de la plage a été placée à l'élévation +2,2 m NMM et la partie horizontale 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.

Il faudrait envisager placer plus de 800 m³/m de sable sur une largeur minimale de 200 m de plage et viser un sable ayant un diamètre caractéristique de l'ordre de 0,3 mm (au lieu des 0,25 mm du sable actuellement dans cette zone). Il s'agit donc de 160 000 m³ de sable plus grossier que le sable actuellement en place. Mais, même avec ce volume et ce diamètre, 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. Il faudrait ajouter des épis de protection aux extrémités de la zone de recharge afin d'éviter une fuite latérale trop rapide des sédiments et 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 coûts.

Rechargement de plage avec butée de pied

La seule façon d'envisager un rechargement de plage devant les étangs aérés est de concevoir ce rechargement combiné à une butée de pied pour assurer la stabilité de la plage dans le sens perpendiculaire à la côte.

De façon à tenter de minimiser les dommages à la butée de pied de la « plage suspendue », 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 la détruisent pas rapidement. Par contre, plus on place cette butée dans une profondeur

Érosion côtière baie de Plaisance

d'eau importante, moins elle est efficace pour réduire la hauteur des vagues et plus il faut mettre du sable pour construire la plage suspendue.

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.

L'autre méthode de réalisation d'une butée de pied de plage serait l'utilisation de géotubes remplis de sable. Cette méthode a l'avantage d'utiliser du géotextile et du sable (disponible sur place alors que la pierre devrait être importée). Par contre, elle pose des défis logistiques et de sérieux risques en termes de durabilité. Des expériences de mise en place de géotubes au Mexique indiquent une fragilité potentielle par rapport aux contraintes induites par les vagues. L'expérience de 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. Enfin, il reste l'inconnue que représentent les glaces dans le processus de dégradation des géotubes. Une protection des géotubes contre ces divers aléas doit être mise en place (géotextile renforcé ou matelas de béton articulé, par exemple).

Du rechargement de plage ne peut donc raisonnablement s'envisager dans le cas du secteur des étangs aérés qu'en parallèle avec une protection (en enrochement ou géotubes) du bas de plage (butée de pied de plage) parce que la géométrie de la plage et en particulier sa pente n'est pas propice à une stabilité d'un rechargement en sable sans cette protection.

Il s'agirait d'un projet tout à fait non traditionnel, ce genre d'intervention étant plutôt pensée en fonction de la protection d'un secteur nettement plus étendu en longueur et requérant en général moins de sable de recharge par unité de longueur.

Rechargement de plage avec matériaux grossiers

Du rechargement de plage avec de la pierre tout-venant de carrière des Îles ou avec des galets, du gravier ou du sable et gravier pourrait être plus intéressant que du rechargement avec du sable dans le secteur des étangs aérés, à cause de la pente d'équilibre de la plage qui serait nettement plus raide que celle d'un sable. Il y a cependant un problème de durabilité de ce rechargement qui devrait idéalement provenir des Îles de la Madeleine. Les matériaux en provenance des Îles étant très sensibles à la dégradation due aux contraintes hydrodynamiques et à celles de gel/dégel, il est recommandé de bien documenter d'année en année des travaux temporaires éventuels de protection des étangs aérés pour obtenir une idée de la vitesse de dégradation de ces matériaux locaux. Ces matériaux auraient l'avantage d'alimenter les plages adjacentes en sédiments à travers leur processus de dégradation. Une étude de disponibilité de pierre de type « rip-rap » devra également être réalisée.

Selon les calculs, la crête de la plage devrait se trouver à l'élévation +2,3 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. Des essais en canal à houle permettraient d'optimiser cette géométrie.

La grosseur de la pierre de type « rip-rap » à mettre en place se situerait entre 50 et 1 500 kg (300 à 950 mm de diamètre équivalent), la granulométrie des matériaux devant être régulière entre ces deux limites.

Ce concept de protection de berge s'apparente davantage 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 a été de placer 25% 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.

La largeur de la crête de la protection en matériaux grossiers serait de 20 à 22 m, selon les calculs préliminaires. Des études complémentaires sur la qualité des matériaux et des essais en canal à houle en phase de concept final permettraient d'optimiser le projet, et possiblement de réduire la largeur de la crête à 10 à 15 m.

Un concept de plage de galets réalisé à l'aide de galets importés (matériaux de bonne qualité ayant une durabilité nettement améliorée par rapport aux matériaux locaux) permettrait de mettre en place nettement moins de matériaux et impliquerait probablement une diminution des coûts de ce type de projet par rapport au projet décrit ci-dessus utilisant des matériaux locaux. Par contre, des matériaux plus résistants n'alimenteraient pas en sédiments les plages adjacentes de façon aussi efficace que des matériaux locaux.

Dans tous les cas (matériaux locaux ou importés), des essais en modèle réduit seront recommandés pour finaliser la géométrie d'éventuelles plages de galets à mettre en place pour protéger la côte.

De nombreux exemples de telles « plages » naturelles existent au Canada (Île du Cap-Breton, Gaspésie, Baie Georgienne, Vancouver, etc.) et dans le monde (Oregon, Chili, Nouvelle-Zélande, Hawaï, etc.). On trouve également un exemple d'une plage de galets aux Îles-de-la-Madeleine, derrière le Château Madelinot.

Rechargement de plage avec épis

Du rechargement de plage avec épis sans butée de bas de plage ne semble pas être une avenue envisageable. La raison principale en est le non-respect de la pente d'équilibre de la plage, qui aurait comme conséquence que le sable de recharge placé entre les épis fuirait par l'extrémité la plus au large de ces épis.

De plus, la trop faible quantité de sable qui semble circuler devant la plage des étangs aérés et l'attaque généralement frontale des vagues, qui semble induire plus de circulation des sédiments de

la côte vers le large que de circulation parallèle à la côte de ces sédiments, tendent à montrer le peu d'intérêt de cette solution. L'exutoire actuel des étangs aérés, qui ne retient pas vraiment de sable, ni d'un côté, ni de l'autre des enrochements, tend à clairement démontrer ce comportement.

Construction d'un brise-lames submersible au large

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

Un brise-lames complètement submersible, dont la crête se trouverait au maximum au zéro des cartes marines, 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 alors tout à fait inefficace pour arrêter l'action érosive des vagues. De plus, un tel brise-lames se trouverait à une distance entre 100 et 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.

Il faudrait envisager des brise-lames partiellement submersibles, c'est-à-dire avec une crête au niveau moyen de l'eau ou à +1 m NMM. Ces brise-lames seraient visibles une grande partie du temps et seraient fortement sollicités par les vagues et surtout les glaces. Cette option n'a donc pas été retenue.

Déplacement d'infrastructures

Le déplacement ou le déménagement des bassins des étangs aérés semble a priori difficile à envisager, surtout à cause des coûts très importants que cette relocalisation impliquerait.

Solution recommandée pour le secteur des étangs aérés

Les solutions les plus évidentes en matière de protection contre l'érosion dans le secteur des étangs aérés 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). La solution en enrochement serait du type « permanent » (35 ans de vie utile sans intervention majeure) alors que la solution en rip-rap extrait des carrières des îles de la Madeleine serait une solution nécessitant des rechargements réguliers. L'inconvénient principal de la solution en enrochement est la dégradation de la plage en avant de l'enrochement alors que la solution en rip-rap local entretiendrait et améliorerait la plage (et les plages adjacentes) à travers le processus de dégradation des pierres constituant le rip-rap. 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 de rechargement de la plage à l'aide de sable ne semble être viable qu'à deux conditions difficiles à remplir :

- la découverte d'une source importante de sable plus grossier que le sable actuellement en place (produits du dragage de l'entrée de la lagune de Grande-Entrée ?),

- la mise en place d'une butée de pied de plage (en enrochements ou en géotubes) et d'épis transversaux.

Intervention à court terme

Étant donné que plusieurs mois s'écouleront avant que la solution de protection contre l'érosion à long terme ne puisse être mise en place, il est recommandé d'intervenir dès que possible avec une solution d'urgence pour maintenir la protection minimale offerte par la promenade au pied des étangs.

La protection de berge recommandée en urgence serait réalisée à l'aide de matériaux rocheux provenant de carrières locales. Cette protection se rapprocherait d'un concept de « plage de galets ». Un exemple de ce genre de plage se trouve immédiatement au nord de l'exutoire des étangs aérés. Cette plage protège la berge au nord de l'exutoire de façon marginale à cause de son élévation de crête trop basse, mais elle évite à cette partie du rivage de se retrouver dans l'état de dégradation qu'on constate du côté sud de l'exutoire.

La granulométrie des matériaux de cette plage serait celle d'un tout-venant de carrière, soit de 0 à 500 mm de diamètre, selon une répartition relativement régulière du fuseau entre ces deux limites. Un matériau constitué essentiellement de sable ne serait pas adéquat, sa durabilité étant beaucoup trop faible dans les conditions d'agitation qui prévalent à cet endroit.

Le secteur de côte à protéger de façon temporaire fait environ 150 m de longueur. Il faudrait prévoir environ 3 000 m³ de pierre de 0 à 500 mm pour réaliser la protection temporaire.

Protection de la berge – Secteur de Gros-Cap

Les mécanismes d'érosion probables des falaises de Gros-Cap sont apparentés à ceux décrits pour les étangs aérés, soit une baisse des apports en sédiments en provenance des falaises de Cap-aux-Meules, une hausse relative des niveaux d'eau et une augmentation de l'énergie des vagues au niveau de la côte suite à la disparition des glaces.

De plus, il est possible que des phénomènes de gélifraction, le déboisement, la construction domiciliaire et les phénomènes anthropiques associés (accélération du ruissellement sur des surfaces plus étanches, piétinement, installation d'escaliers, etc.) aient accéléré la dégradation des faces verticales des falaises.

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

- Protection en enrochements ;
- Consolidation des falaises avec du béton ;
- 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 ;

Érosion côtière baie de Plaisance

- Construction d'un brise-lames submersible au large ;
- Déplacement d'infrastructures.

Protection en enrochements

La protection de la berge à l'aide d'enrochements est un type de protection qui a déjà été mis en œuvre dans le secteur.

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. Selon cette analyse, l'élévation +3,3 m NMM a été retenue pour la crête d'un enrochement dans le secteur de Gros-Cap.

La grosseur des enrochements requis serait 1 à 2 tonnes.

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. Par contre, la mise en place de la pierre-filtre et de la pierre de carapace réduirait à 3 m la largeur restante de la voie d'accès pour d'éventuels futurs travaux de réparations de ces enrochements, ce qui est insuffisant. Comme l'empiètement marginal nécessaire au maintien d'une voie d'accès permanente de 6 m de large après les travaux serait important (au moins 25 % de plus d'empiètement) et que les travaux de réparations ne seraient théoriquement requis que dans plusieurs dizaines d'années, il est recommandé de concevoir cette solution avec le minimum d'empiètement sur le milieu marin, la contrepartie étant un surcroît de travail pour accéder à cet enrochement en cas de réparation.

Consolidation des falaises avec du béton

La protection du pied des falaises à l'aide de béton devrait atteindre une élévation supérieure à celle de l'enrochement, étant donné l'étanchéité du béton et le fort coefficient de réflexion des vagues sur une telle protection, qui causerait une remontée des vagues légèrement plus forte et une érosion en pied du mur plus intense.

L'ancrage du mur dans le roc des falaises de Gros-Cap n'étant pas viable (roc trop friable et trop sensible à l'eau et aux cycles de gel/dégel), le mur de béton devra être autostable en simple appui sur la falaise.

Pour ce qui est de la fondation du mur, une excavation sera requise au pied de la falaise pour ancrer convenablement le pied du mur de béton. Une profondeur minimale de 1,2 m a été considérée de façon préliminaire, mais cette profondeur devrait être confirmée par une étude géologique incluant la vitesse à laquelle se détériorerait le roc au pied du mur de béton. Ceci ne constitue pas une solution recommandable, à cause des difficultés de réalisation (dans l'eau et exposé aux tempêtes) et des coûts reliés à ces difficultés.

Rechargement de plage au moyen de sable

Dans le cas des falaises de Gros-Cap, le profil d'une plage en équilibre est loin de celui du fond naturel actuel. La distance entre le profil théorique et les profils mesurés peut dépasser plusieurs mètres par endroits.

Dans le cas de la plage de la Garderie, le profil d'équilibre de la plage est un peu moins loin de celui du fond naturel que dans le cas des falaises, mais les deux profils ne se croisent qu'à 650 m de la rive.

La situation est semblable à celle des étangs aérés, c'est-à-dire qu'il faudrait envisager de mettre en place plus de 800 m³/m de sable de 0,30 mm de diamètre pour recharger la plage, et ce à la condition d'être en mesure de retenir ce sable devant la plage sans l'aide d'une butée de pied. La largeur à recharger est d'au moins 350 m devant la plage de la Garderie, ce qui correspond à un volume de 210 000 m³ de sable plus grossier que le sable en place uniquement pour la plage de la Garderie. À ces quantités de sable s'ajouteraient les épis de protection aux extrémités de la zone de recharge afin d'éviter une fuite latérale trop rapide des sédiments et des épis intermédiaires. Une fuite du sable vers le large est à craindre dans cette solution. Les recharges récurrentes après la première recharge seraient probablement moins importantes, mais les quantités resteraient significatives en termes de coûts.

Rechargement de plage avec butée de pied

La même problématique que pour les étangs aérés se pose :

- la seule façon d'envisager un rechargement de plage devant la Garderie est de concevoir ce rechargement combiné à une butée de pied et des épis transversaux pour assurer la stabilité de la plage dans le sens perpendiculaire et parallèle à la côte;
- le positionnement de la butée pose le même problème d'efficacité vs la vulnérabilité aux vagues, aux glaces et à d'éventuels objets flottants.

Pour garder le caractère esthétique d'une plage dans ce secteur, il serait requis de placer la crête de la berme de protection de pied de plage au moins à -1,0 m NMM, sinon à -1,5 m NMM. Ce choix implique de placer environ 450 m³/m de sable de rechargement sur une largeur minimale de 350 m de plage. En plus des protections en pied de plage et sur les côtés de la recharge, on parle donc de 115 000 m³ de sable requis pour recharger une première fois cette plage suspendue.

La butée 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, ou bien de géotubes renforcés. Les épis transversaux pourraient être constitués de pierre de 50 à 1500 kg. Ces pierres proviendraient de l'extérieur des îles.

Rechargement de plage avec matériaux grossiers

L'analyse est semblable à celle du secteur des étangs aérés. Un rechargement de haut de plage en tout-venant de carrière des îles, en galets, en gravier ou en sable et gravier pourrait être intéressant pour le secteur de la plage de la Garderie à Gros-Cap, à cause de la présence du haut de plage. Il y a un problème de durabilité de ce rechargement qui devrait idéalement provenir des îles de la

Madeleine. Les matériaux en provenance des Îles sont très sensibles à la dégradation avec le temps. Une étude de disponibilité de pierre de type « rip-rap » devra également être réalisée.

Avec une vague déferlante de 1,35 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 sur la plage de la Garderie devrait avoir un poids compris entre 20 et 600 kg (230 à 700 mm de diamètre équivalent), la granulométrie du matériel devant être régulière entre ces deux limites. Étant donné la présence de la plage, pour des raisons esthétiques et d'accès sur la plage, il faudrait envisager recouvrir cette pierre grossière à l'aide de sable au début de chaque saison estivale.

La pierre de rip-rap locale serait mise en place selon une géométrie relativement facile à obtenir pour l'entrepreneur avec des pousseurs (pente 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. Pour conserver l'aspect récréatif de cette plage, il serait recommandé que procéder à l'épandage de sable sur les matériaux grossiers à chaque début de saison touristique. Ce sable serait emporté par les tempêtes d'automne et devrait être remplacé l'été suivant.

L'hypothèse de récurrence des rechargements en matériaux grossiers est de remplacer un quart de la quantité initiale tous les 15 ans. L'hypothèse de récurrence des rechargements en sable est de placer la moitié de la quantité initiale tous les ans. Des études spécifiques quant à la durabilité de la pierre utilisée et du sable devraient être entreprises pour confirmer ces hypothèses si cette solution est sérieusement envisagée.

Une percée devra être réservée dans cette protection au droit du ruisseau pour laisser l'eau s'écouler vers la mer. Par contre, cette percée laissera l'eau pénétrer en arrière de la protection lors des épisodes de très hauts niveaux d'eau.

Une solution utilisant des galets importés aurait l'avantage de requérir nettement moins de matériaux, mais l'inconvénient de ne pas alimenter les plages adjacentes en sédiments. Les quantités de matériaux requis dans un noyau en galets de bonne qualité pourraient être significativement moins importantes que pour un noyau en rip-rap local, mais des essais en modèle réduit seraient requis pour optimiser la géométrie.

Rechargement de plage avec épis

Comme pour le secteur des étangs aérés, du rechargement de plage avec épis ne semble pas être une avenue envisageable, et ce pour les mêmes raisons.

Construction d'un brise-lames submersible au large

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

Comme pour le secteur des étangs aérés, 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.

Érosion côtière baie de Plaisance

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.

Cette option n'a pas été retenue.

Déplacement d'infrastructures

Le déplacement ou le déménagement de certaines résidences et de certaines infrastructures urbaines (route, services) devrait également être envisagé, surtout dans le cas où ces infrastructures sont tellement avancées sur la plage ou sur le bord de la falaise qu'elles augmentent significativement le coût d'une solution globale. L'analyse indique que le déplacement d'infrastructures ne serait pas requis à moyen terme si un certain nombre d'interventions de protection de berge localisées peuvent être entreprises dans les prochaines années (acceptabilité environnementale et disponibilité des budgets).

Solution recommandée pour le secteur de Gros-Cap

Les solutions les plus évidentes en matière de protection contre l'érosion des falaises dans le secteur de Gros-Cap sont les mêmes que pour le secteur des étangs aérés, soit la protection à l'aide d'un **enrochement linéaire** ou la solution de **rechargement avec des matériaux grossiers** (rip-rap local ou galets importés). La solution en enrochement serait du type « permanent » (35 ans de vie utile sans interventions majeures) alors que la solution en rip-rap extrait des carrières des Îles-de-la-Madeleine serait une solution nécessitant des rechargements réguliers. L'inconvénient principal de la solution en enrochement est la dégradation de la plage en avant de l'enrochement alors que la solution en rip-rap entretiendrait et améliorerait les plages adjacentes à travers le processus de dégradation des pierres constituant le rip-rap. 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. Ces solutions devraient être modulées en fonction de l'importance et de la précarité des infrastructures à protéger (en particulier la route), le retrait ou l'absence d'intervention pouvant être des solutions nettement plus économiques à long terme que la protection à certains endroits où les infrastructures sont soit minimales, soit suffisamment distantes du rivage.

Pour le secteur de la plage de la Garderie, la solution du **rechargement du haut de plage à l'aide de matériaux grossiers** (rip-rap local ou galets importés recouverts de sable pour la saison estivale) serait probablement la solution à privilégier. Le rechargement de la plage à l'aide de sable n'a pas été retenu parce qu'il ne semble être viable qu'à deux conditions difficiles à remplir :

- la découverte d'une source importante de sable plus grossier que le sable actuellement en place (produits du dragage de l'entrée de la lagune de Grande-Entrée ?),
- la mise en place d'une butée de pied de plage (en enrochements ou en géotubes renforcés).

Protection de la berge – Secteur de la plage du chemin des Chalets

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 mentionnés pour les secteurs précédents sont également impliqués dans les problèmes relevés dans le secteur du chemin des Chalets. D'après l'information bathymétrique disponible, la pente de la plage est très forte pour une plage de sable et, d'après les informations bathymétriques disponibles, une dépression (canal) longerait le pied de cette plage. Il se peut donc qu'un important transport de sable se produise parallèlement à la côte devant la plage, ce qui expliquerait encore mieux les problématiques d'érosion de cette plage.

Un phénomène spécifique à ce secteur est la dégradation de la dune littorale qui a accompagné le développement domiciliaire le long de la plage. Ce phénomène n'est pas la cause de l'érosion, mais l'a significativement accéléré en retirant du système le tampon que constituait cette réserve de sédiments.

Avec le rehaussement des niveaux d'eau appréhendé, il s'agit du secteur le plus à risque des cinq secteurs à l'étude à cause de la faible élévation de la zone (risques importants de submersion) et de l'étendue de la zone à protéger pour contrecarrer ce phénomène d'érosion.

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

- Protection en enrochements ;
- Rechargement de plage au moyen de sable ;
- Géotubes en haut de plage ;
- Déplacement d'infrastructures.

Protection en enrochements

La protection de la berge à l'aide d'enrochements s'est révélée une très mauvaise solution sur la plage du chemin des Chalets. En plus des problèmes d'accélération de l'érosion de la plage au large de l'enrochement qui y sont associés, cette solution ne correspondrait pas du tout à la vocation récréotouristique du secteur.

Rechargement de plage au moyen de sable

Le rechargement de la plage du chemin des Chalets semble pouvoir être envisagé. Il impliquerait cependant des quantités de sable non négligeables, de l'ordre de 300 m³/m, qu'il faudrait placer sur l'ensemble de la plage, y compris le secteur est, soit environ 900 m de long, ceci représente une quantité d'environ 270 000 m³. Mais le principal problème à résoudre avant de se lancer dans ce genre d'intervention est la présence de ce canal au pied de la plage et de l'important transit littoral associé, ce qu'illustrent très bien les cartes de courants littoraux lors des tempêtes. Il est certain que du rechargement de plage à cet endroit ne pourra se concevoir qu'en ajoutant des épis transversaux (distants d'au plus 200 m) qui limiteraient les mouvements vers le sud-ouest du sable. Ces épis augmenteraient le coût de cette solution qui reste une solution nécessitant un entretien régulier à travers des recharges.

Géotubes en haut de plage

Un concept populaire consiste à placer des géotubes en haut de plage pour lui permettre de résister à des événements exceptionnels. Ce concept est pratiquement impossible à mettre en œuvre dans le cas de la plage du chemin des Chalets dans le contexte actuel de son utilisation (route, chalets). Pour être efficace, ce système exige :

- une stabilité minimale de la plage : ceci est loin d'être acquis, compte tenu de la pente actuelle de la plage (qui s'éloigne beaucoup d'une pente d'équilibre), de l'élévation atteinte par l'eau lors des événements de hauts niveaux d'eau et de la tendance à la hausse du niveau d'eau moyen aux Îles de la Madeleine,
- un espace minimal pour déployer les géotubes sans qu'ils soient constamment sollicités par les vagues de tempête : la présence des chalets empêche cette condition d'être remplie et on peut se demander si le déplacement des chalets (pour laisser place aux géotubes) n'enlèverait pas tout intérêt à cette solution.

Déplacement d'infrastructures

Le déplacement ou le déménagement des résidences et des infrastructures urbaines (route, services) devrait certainement être envisagé dans le cas de la plage du chemin des Chalets, surtout que nombre de ces infrastructures se retrouvent tellement avancées sur la plage qu'elles interdisent toute solution globale. Si la dune littorale est laissée à son état naturel sans rechargement, l'ensemble des chalets devrait être déplacé, y compris ceux situés du côté nord de la route que les vagues de tempête ont déjà commencé à atteindre.

Le déménagement des chalets devrait s'accompagner de l'enlèvement des enrochements placés par les résidents, enrochements qui pourraient éventuellement être repositionnés à l'extrémité sud-ouest de la plage pour tenter de protéger le reliquat de dune littorale qui s'y trouve encore.

Un programme de plantation d'élyme des sables sur une dune restaurée à l'aide d'un minimum de sable importé devrait être envisagé de façon à favoriser la rétention des sables éoliens et la stabilisation de la dune. Le contrôle de la circulation des piétons et véhicules devrait accompagner cet effort de restauration de la dune littorale.

Solution recommandée pour le secteur de la plage du chemin des Chalets

La solution la plus évidente en matière de protection contre l'érosion de la plage du chemin des Chalets est le **déménagement de l'ensemble des chalets, si possible accompagné du rechargement du haut de la plage (environ 20 000 m³)**. Cette solution du déménagement et du rechargement devrait s'accompagner d'un programme de restauration de la dune littorale (plantation, contrôle de la circulation).

Une coordination de la solution retenue pour la plage avec celle retenue pour la Pointe de la Martinique (voir prochain chapitre) devra être faite, sous peine de minimiser les bénéfices des solutions sélectionnées pour chacun des secteurs.

Protection de la berge – Secteur de la Pointe de la Martinique

Les mécanismes d'érosion reliés à la hausse des niveaux d'eau et à l'augmentation de l'énergie des vagues au niveau du pied de la falaise mentionnés pour les secteurs précédents sont également impliqués dans les problèmes relevés dans le secteur de la Pointe de la Martinique. La largeur des plages a diminué de façon remarquable entre la photo aérienne de 1963 et celle de 2010.

Les moyens de protection de la berge qui ont été considérés sont les mêmes que pour le secteur de Gros-Cap, soit :

- Protection en enrochements ;
- Consolidation des falaises avec du béton ;
- 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 dans des commentaires semblables à ceux des autres secteurs :

Protection en enrochements

La protection de la berge à l'aide d'enrochements est un type de protection qui a déjà été mis en œuvre dans le secteur.

Les calculs préliminaires indiquent que la pierre de carapace devrait peser 1 à 2 tonnes, et que l'élévation de la crête de l'ouvrage devrait être +3,2m NMM. L'optimisation de cette élévation de la protection de la rive passerait par des essais de franchissement en canal à houle, seul moyen de tenir compte de la configuration réelle des fonds marins devant ces ouvrages de protection. Ces essais en canal à houle sont recommandés lors de la phase de conception finale des ouvrages si cette solution est retenue.

Consolidation des falaises avec du béton

Mêmes commentaires que pour le secteur de Gros-Cap.

Rechargement de plage au moyen de sable

Il faudrait envisager plus de 700 m³/m de sable pour recharger la plage (à condition d'être en mesure de retenir ce sable devant la pointe). 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 $700 \text{ m}^3/\text{m}$ de sable de rechargement sur une largeur minimale de 900 m de la pointe, on parle de $630\,000 \text{ m}^3$ de sable plus grossier que le sable en place à installer devant la pointe de la Martinique.

Rechargement de plage avec butée de pied

Mêmes commentaires que pour les autres secteurs. Le choix d'une butée en rip-rap placée au niveau 0 m NMM implique de placer environ $170 \text{ m}^3/\text{m}$ de sable de rechargement sur une largeur minimale de 80 m de plage. En plus des protections en pied de plage et sur les côtés de la recharge, on parle donc de $155\,000 \text{ m}^3$ de sable requis pour recharger une première fois cette plage suspendue. Des épis régulièrement espacés devraient être installés le long du rivage pour contrer le transit littoral important dans ce secteur qui viderait rapidement la zone de son sable si cette précaution n'était pas prise.

L'utilisation de géotubes serait également possible en pied de plage, 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, à cause de la pente d'équilibre de la plage qui serait nettement plus raide que celle d'un sable.

La pierre de rip-rap locale 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.

La crête du rechargement en matériaux grossiers devrait se trouver à l'élévation +2,3 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. Du rechargement périodique serait requis (hypothèse de récurrence des rechargements : un quart de la quantité initiale tous les 15 ans).

Une solution utilisant des galets importés aurait l'avantage de requérir nettement moins de matériaux, mais l'inconvénient de ne pas alimenter les plages adjacentes en sédiments. Les quantités de matériaux requis dans un noyau en galets de bonne qualité pourraient être significativement moins importantes que pour un noyau en rip-rap local, mais des essais en modèle réduit seraient requis pour en optimiser la géométrie.

Rechargement de plage avec épis

Mêmes commentaires que pour les autres secteurs. Cette solution n'est pas recommandable (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 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 reliés 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 (influence 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 GROS CAP

Solution 1 – Enrochement (1975 m.l.)		15 680 000 \$	
Solution 2 – Rechargement de la plage avec matériaux grossiers (1975 m.l.)	Coût initial :	12 909 000 \$	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>6 697 000 \$</u>	
	Coût total :	19 606 000 \$	
Solution 3 – Rechargement de la plage avec butée de pied (350 m.l.; plage de la Garderie seulement)	Coût initial :	11 167 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 7-8 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans). À valider par des études complémentaires, y inclus modélisation physique.
	Rechargements périodiques :	<u>6 323 000 \$</u>	
	Coût total :	17 490 000 \$	

SECTEUR DE LA PLAGE DU CHEMIN DES CHALETS

Solution 1 – Déménagement des chalets		(à déterminer)	Nécessiterait une étude spécifique
Complément solution 1 – Rechargement de haut de plage		726 000 \$	Pourrait nécessiter des rechargements récurrents pour éviter le recul de la plage (non comptabilisés dans le coût du projet)
Solution 2 – Rechargement de la plage en sable (900 m.l.), avec épis (7 x 150 m)	Coût initial :	16 870 000 \$	Des rechargements périodiques sont requis, soit 25% du volume initial à tous les 7-8 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans). À valider par des études complémentaires, y inclus modélisation physique.
	Rechargements périodiques :	<u>8 710 000 \$</u>	
	Coût total :	25 580 000 \$	

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 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 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 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.

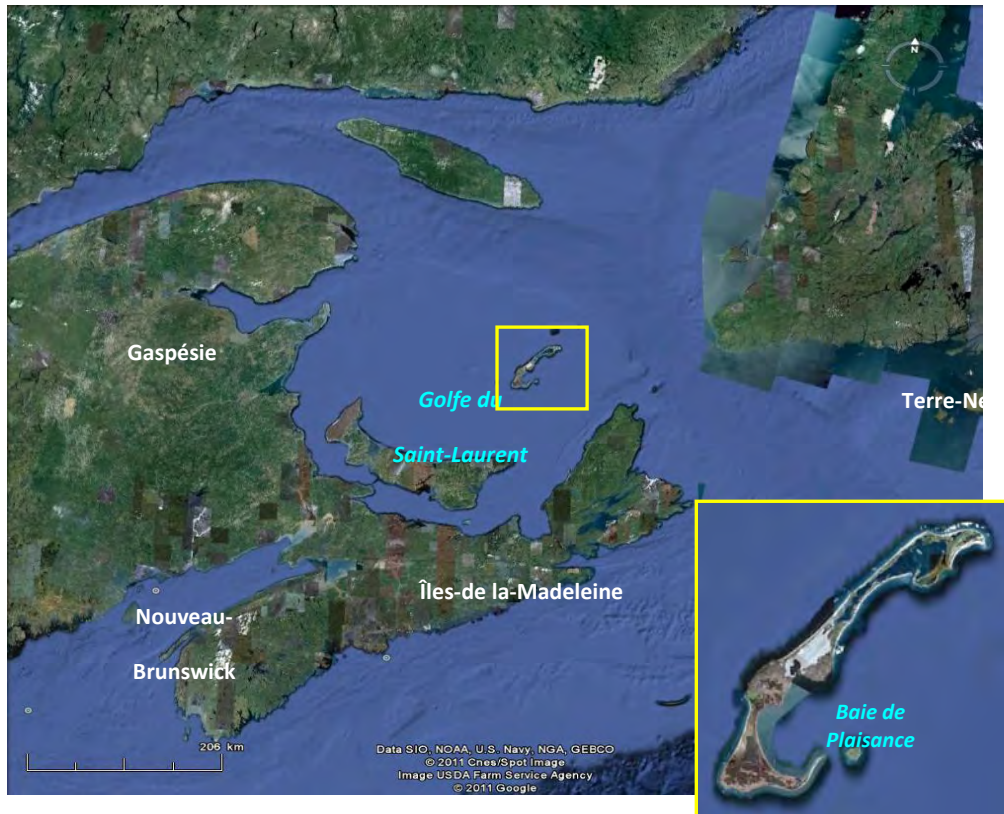


Figure 1.1 – Les Îles de la Madeleine



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.

Du côté nord de l'exutoire, il est intéressant de noter la présence d'une sorte de plage en tout-venant qui présente une certaine efficacité à protéger temporairement la promenade. En fait, il s'agit d'enrochements locaux placés par la Municipalité vers 1995 pour protéger la promenade le long des étangs aérés. Ces enrochements se sont dégradés avec le temps. Il était évident lors de la visite de janvier 2011 que cette « plage » n'avait pas les dimensions requises pour éviter tous les franchissements de vagues lors des tempêtes accompagnées de très hauts niveaux d'eau.

Du côté sud de l'exutoire, de l'enrochement a été récemment placé pour tenter de protéger la promenade, mais cette protection est largement sous-dimensionnée et n'arrêtera pas vraiment la destruction de la promenade par les vagues de tempête. Les matériaux en érosion le long de la promenade sont des sables et graviers avec quelques pierres rondes.



Figure 2.1 Secteur des étangs aérés vu en regardant vers le sud



Figure 2.2 Secteur des étangs aérés vu en regardant vers le nord



Figure 2.3 Secteur des étangs aérés – Plage de part et d'autre de l'exutoire (vue vers l'ouest)



Figure 2.4 Secteur des étangs aérés – Érosion le long de la promenade



Figure 2.5 Secteur des étangs aérés – Plage en tout-venant au nord de l'exutoire



Figure 2.6 Secteur des étangs aérés – Vue rapprochée de l'érosion le long de la promenade



Figure 2.7 Érosion de la promenade le long des étangs aérés et effet du franchissement des vagues

2.2.2 Secteur de Gros-Cap

Le secteur de Gros-Cap est une succession de caps en érosion et de plages dont une seule (au niveau de la Garderie) présente une dimension significative.

Non seulement les caps de grès sont en érosion dans tout le secteur, mais la dune littorale est elle aussi visiblement en érosion dans ce secteur. Le piétinement de la dune ne suffit pas à expliquer le recul de la côte. Un peu d'enrochements a été mis en place par endroits pour tenter de ralentir le recul de la dune, sans grand succès, la dimension de cet enrochement n'ayant pas de rapport avec l'ampleur des phénomènes d'érosion en cause et en particulier avec les très hauts niveaux d'eau observés ces dernières années.



Figure 2.8 Secteur du Gros-Cap – Alternance de microplages et de falaises en érosion



Figure 2.9 Secteur du Gros-Cap – Plage de la garderie



Figure 2.10 Secteur du Gros-Cap – Plage de la garderie avec sa protection partielle



Figure 2.11 Secteur du Gros-Cap – Érosion des falaises



Figure 2.12 Secteur du Gros-Cap – Protection récente d'une falaise en érosion



Figure 2.13 Secteur du Gros-Cap – Falaise en sable et gravier induré



Figure 2.14 Secteur du Gros-Cap – Falaise en sable induré lité

2.2.3 Secteur du chemin des Chalets

La plage du chemin des Chalets est située entre deux secteurs de caps en érosion. Une dune littorale sépare la Baie de plaisance au sud d'un secteur de marécage au nord. La mise en place des chalets dans ce secteur s'est effectuée en détruisant la majeure partie de la dune qui existait à cet endroit, le but étant de « dégager » la vue des propriétaires des chalets vers la mer. Les seuls chalets ou maisons qui sont encore protégés par cette dune à l'extrémité ouest de la plage sont à quelques mois de perdre cette protection.

Plusieurs chalets sont actuellement tellement avancés dans la baie que l'eau passe sous le chalet ou contourne les enrochements de fortune qui ont été installés pour tenter de protéger le chalet. La visite s'est effectuée en plusieurs temps, dont une visite pendant la marée haute du 27 janvier en fin d'après-midi avec des vents soutenus du secteur est et quelques bonnes vagues qui franchissaient sans difficulté les enrochements présents.



Figure 2.15 Secteur du chemin des Chalets– Vue d'ensemble de la plage et des chalets



Figure 2.16 Secteur du chemin des Chalets– Tempête du 27 janvier 2011



Figure 2.17 Secteur du chemin des Chalets– Tempête du 27 janvier 2011 – Franchissement par les vagues des protections en enrochement



Figure 2.18 Chalets du secteur du chemin des Chalets– Tempête du 27 janvier 2011



Figure 2.19 Chalets du secteur du chemin des Chalets– Tempête du 27 janvier 2011 – Les dommages constatés sur la galerie du chalet datent de tempêtes précédentes



Figure 2.20 Secteur du chemin des Chalets– Tempête du 27 janvier 2011



Figure 2.21 Secteur du chemin des Chalets– Érosion de la dune littorale à l'ouest de la plage



Figure 2.22 Secteur du chemin des Chalets– Recul du rivage



Figure 2.23 Chalet du secteur du chemin des Chalets autour duquel la dune littorale a complètement disparu, le chalet se retrouvant « en mer »

2.2.4 Secteur de la Pointe de la Martinique

La Pointe de la Martinique est un secteur de falaises de grès en érosion sévère. De nombreux propriétaires riverains sont intervenus pour tenter de protéger leur terrain. Des enrochements ont été placés ou déversés au pied de la falaise avec un succès variable. Les propriétaires qui ne sont pas intervenus perdent rapidement du terrain, au point que la falaise n'est plus qu'à quelques mètres de certaines habitations.

La plupart des enrochements de protection en place ne sont pas installés de façon efficace et durable : le pied de ces enrochements est rarement stabilisé et la crête de plusieurs enrochements est visiblement trop basse pour éviter le franchissement par les vagues de tempêtes.

La présence de ces zones d'enrochement ne semble pas provoquer « d'effets de bout » affectant les terrains adjacents. Il se peut que ce soit dû au fait que ces enrochements ont été mis en place très récemment et que les effets de bout dans ce contexte de falaises prennent quelques années pour se développer.



Figure 2.24 Pointe de la Martinique – Falaises en érosion



Figure 2.25 Pointe de la Martinique – Érosion de la falaise à proximité d'une maison



Figure 2.26 Pointe de la Martinique – Érosion de la falaise



Figure 2.27 Pointe de la Martinique – Protection ponctuelle du bas de la falaise



Figure 2.28 Pointe de la Martinique – Protection en enrochement relativement efficace



Figure 2.29 Pointe de la Martinique – Protection en enrochement inefficace (franchissement par les vagues et érosion du talus derrière l'enrochement)



Figure 2.30 Pointe de la Martinique – Protection en enrochement dont le pied est instable (directement posé sur la roche sans butée)



Figure 2.31 Pointe de la Martinique – Zone non protégée entre deux zones protégées



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 dégarnis 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.



Figure 2.41 Secteur de l'hôpital – Falaises en érosion



Figure 2.42 Secteur de l'hôpital – Érosion par effondrement vertical (cheminée)

Les falaises en érosion dans ce secteur de l'hôpital devraient être une source de sédiments pour les secteurs des étangs aérés et de Gros-Cap, un peu plus au sud. Il est cependant évident que cette source de sédiments n'est pas suffisante pour permettre au secteur de Gros-Cap d'être en équilibre du point de vue de l'érosion côtière, les plages ne se développant pas assez pour protéger les falaises de l'érosion.

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

2.2.6.2 Secteur de la route 199 au niveau de la Martinique

Le secteur de la route 199 au niveau de la Martinique a progressivement été complètement enroché. Cet enrochement n'empêche pas la route de se faire inonder de façon régulière lors des tempêtes de nord-est. Le fait que de plus en plus d'ouvrages de protection de berge aient été installés autour de la Pointe de la Martinique n'est peut-être pas sans rapport avec le déficit en sédiments que l'on constate au niveau de la route 199, mais il est peu probable que cet élément explique à lui seul l'érosion du secteur au sud de la Pointe de la Martinique.



Figure 2.43 Fin du secteur de la Pointe de la Martinique et début des enrochements le long de la 199

2.2.6.3 Secteur de Havre-aux-Maisons

Le secteur de la Dune du Sud à l'est de l'aéroport de Havre-aux-Maisons est intéressant dans le cadre de cette étude parce que ce secteur est affecté par les tempêtes du secteur est, comme la Baie de Plaisance, et qu'un épi est en place et retient une partie du transit littoral. La dérive littorale dans ce secteur est principalement dirigée vers le nord et l'épi réussit à retenir une quantité non négligeable de sédiments qui constituent la plage au sud de l'épi. On constate en contrepartie que la plage au nord de l'épi est en érosion significative (décalage d'environ 60 mètres entre la plage au sud et la plage au nord de l'épi) et que la présence de cet épi n'empêche pas le haut de plage au sud de l'épi de se faire attaquer par les vagues de tempête.

Le succès mitigé de cet épi à retarder l'érosion d'une partie de la côte tient essentiellement à la présence d'une source importante de sédiments provenant de l'érosion des caps au sud de la plage, mais même cette source importante de sédiments n'est pas suffisante pour contrer tous les effets de l'érosion.

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine



Figure 2.44 Épi de la dune du sud à l'est de l'aéroport



Figure 2.45 Érosion du haut de berge au sud de l'épi de la dune du sud

2.2.6.4 Secteur de Pointe-aux-Loups

Le secteur de Pointe-aux-Loups est très différent du secteur de la Baie de Plaisance surtout à cause de son orientation. Ce sont les vagues du secteur ouest qui affectent cette zone alors que ce sont les

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

tempêtes du secteur est qui affectent les rivages de la Baie de Plaisance. Par contre, le MTQ a fait plusieurs interventions dans le secteur de Pointe-aux-Loups pour tenter de sauver la route 199. Ainsi, de l'enrochement a été placé le long du rivage et du rechargement de plage a été fait à l'aide de sable et gravier. De plus, des épis isolés ont été testés.

Aucune de ces interventions ne semble avoir donné de résultats à long terme. Les épis et les enrochements sont encore en place par endroits, mais n'ont pas réussi à protéger la route et surtout pas à renforcer la plage. Les rechargements à l'aide de sable et gravier se font très rapidement éroder à la moindre tempête du secteur ouest.



Figure 2.46 Rechargement de plage au nord de Pointe-aux-Loups



Figure 2.47 Fissure d'érosion dans le rechargement de plage au nord de Pointe-aux-Loups



Figure 2.48 Épi et enrochement au nord de Pointe-aux-Loups

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.

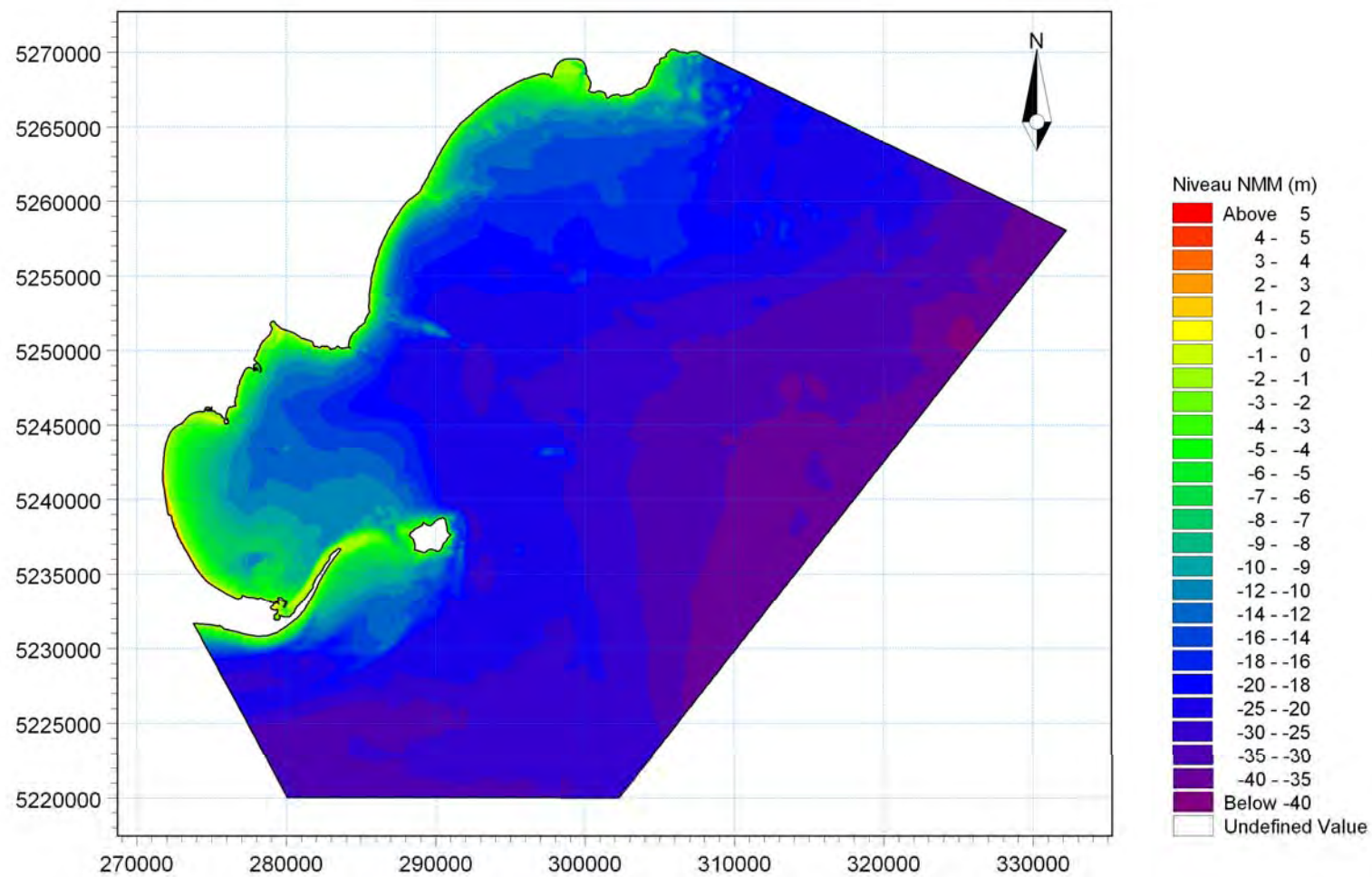


Figure 3.1 : Bathymétrie numérique dans la zone d'étude globale

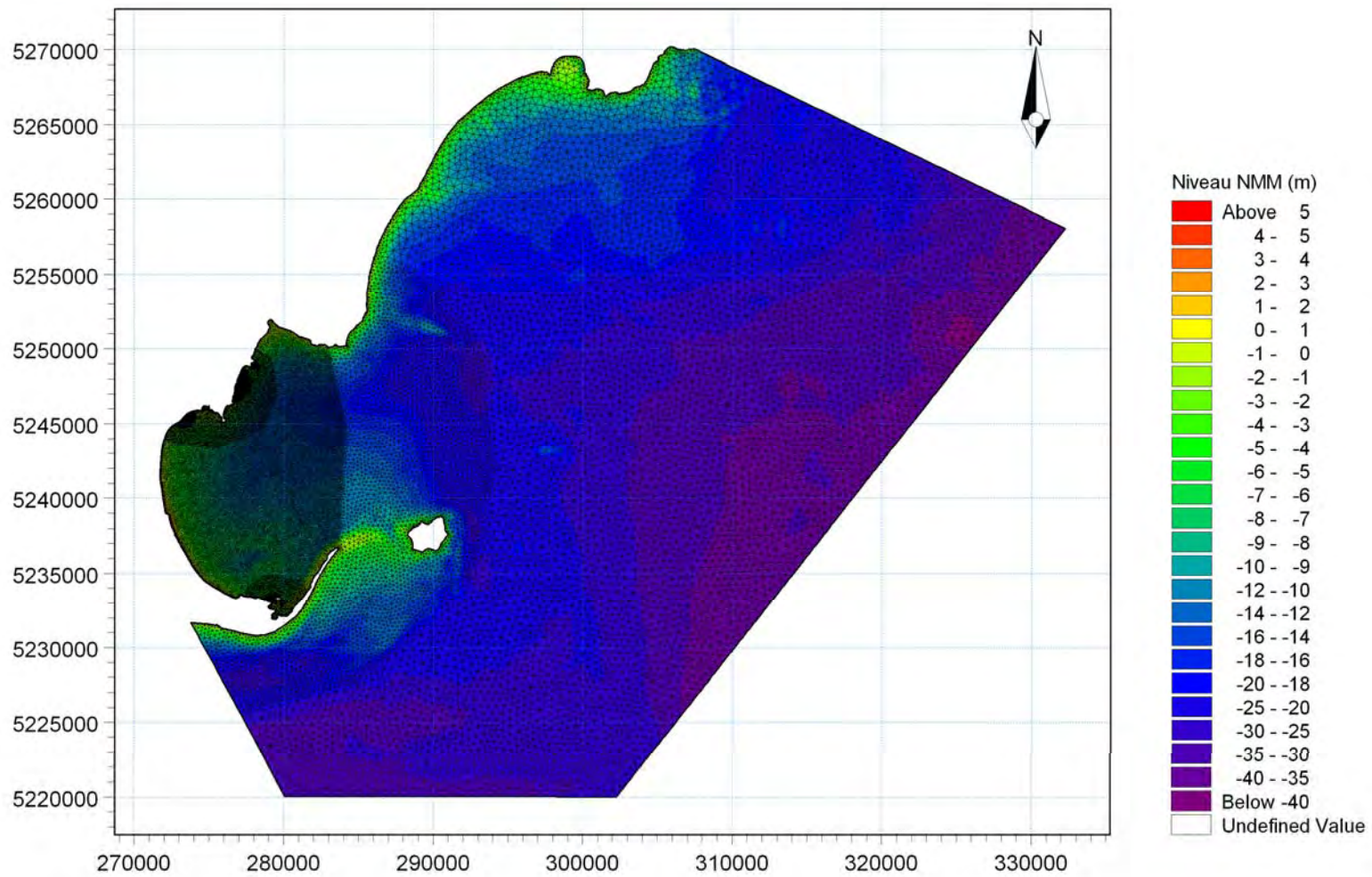


Figure 3.2 : Densité du maillage dans la zone d'ensemble

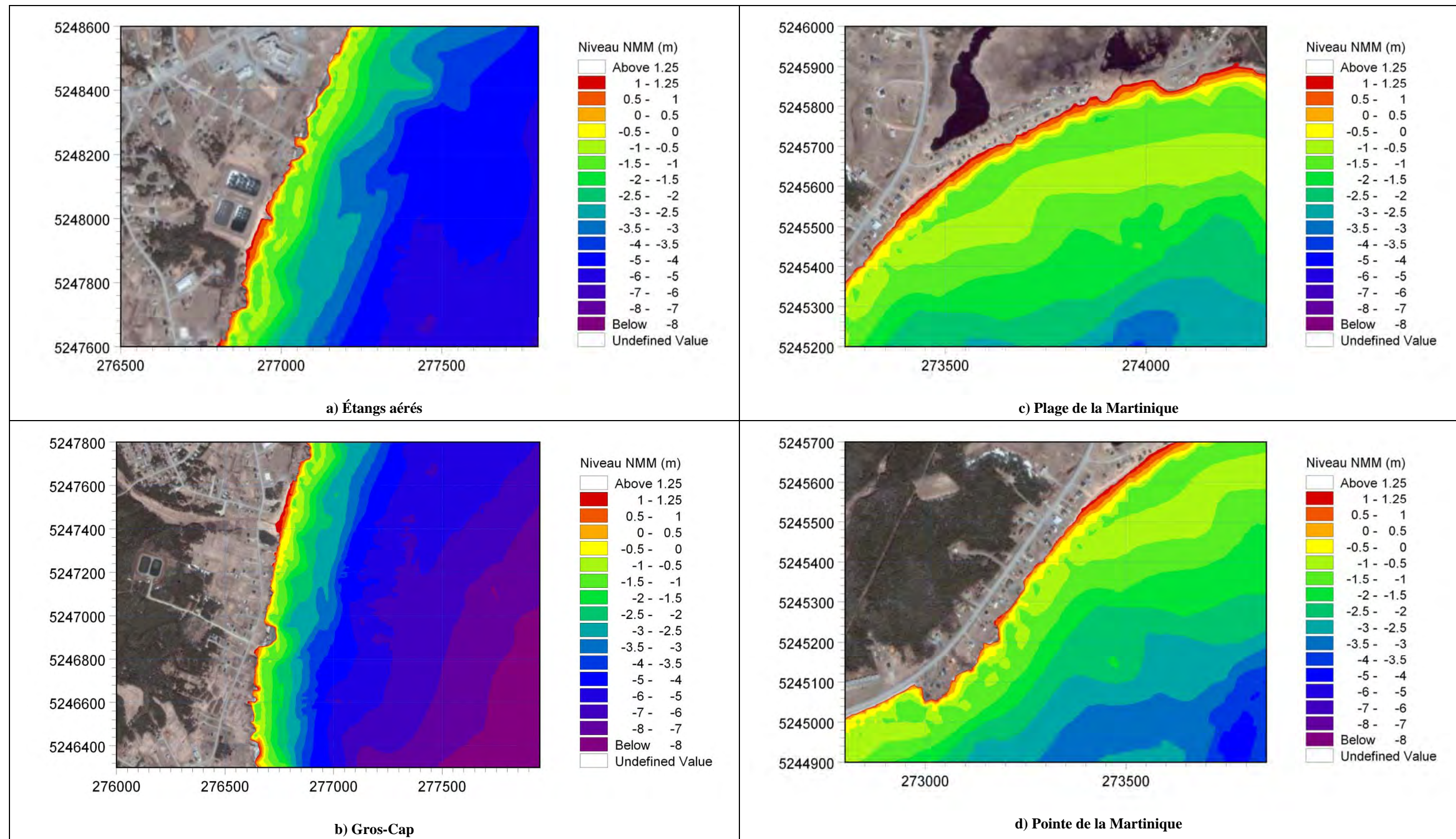


Figure 3.3 : Bathymétrie numérique dans les secteurs d'intérêt

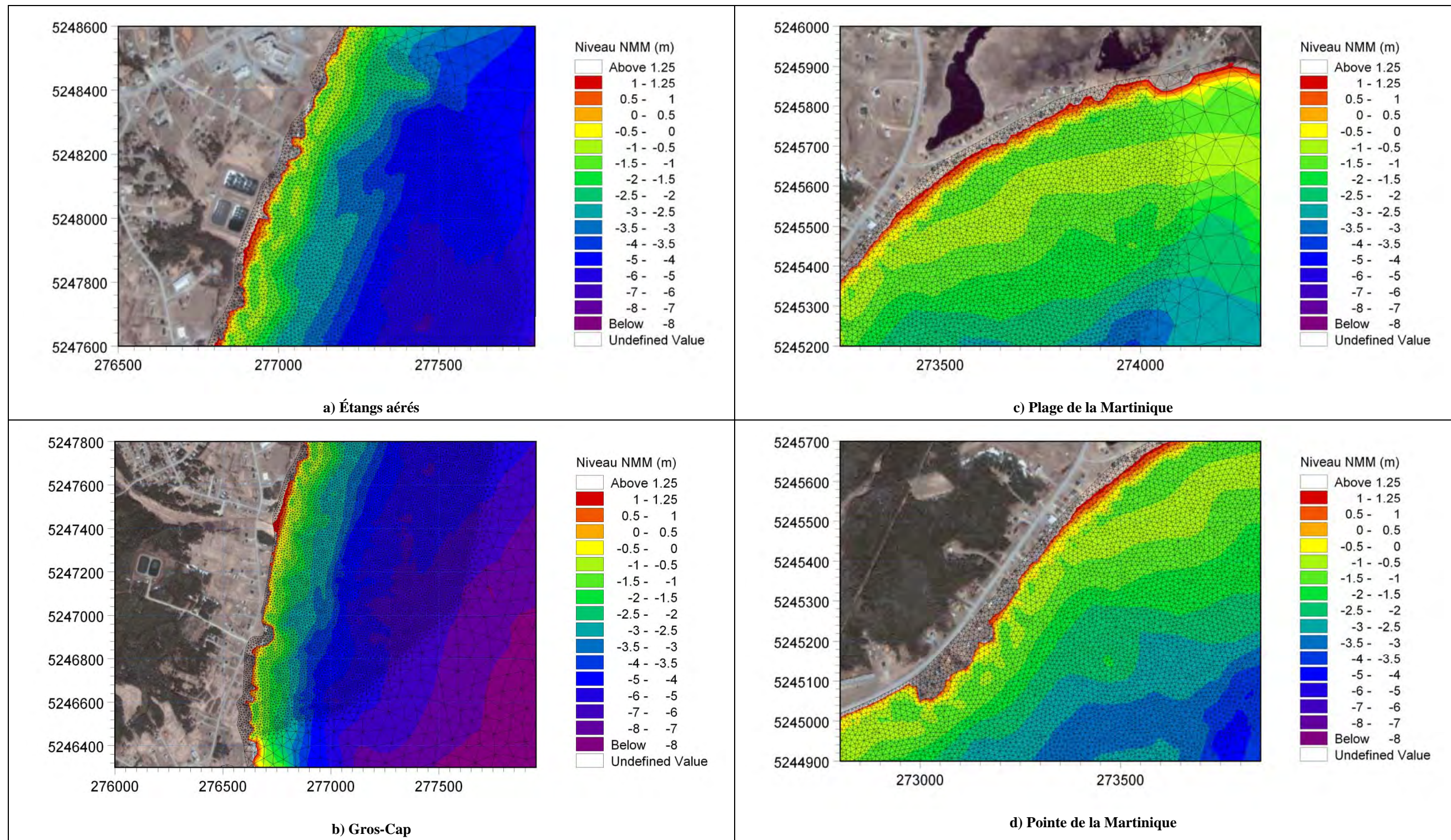


Figure 3.4 : Densité du maillage dans les secteurs d'intérêt

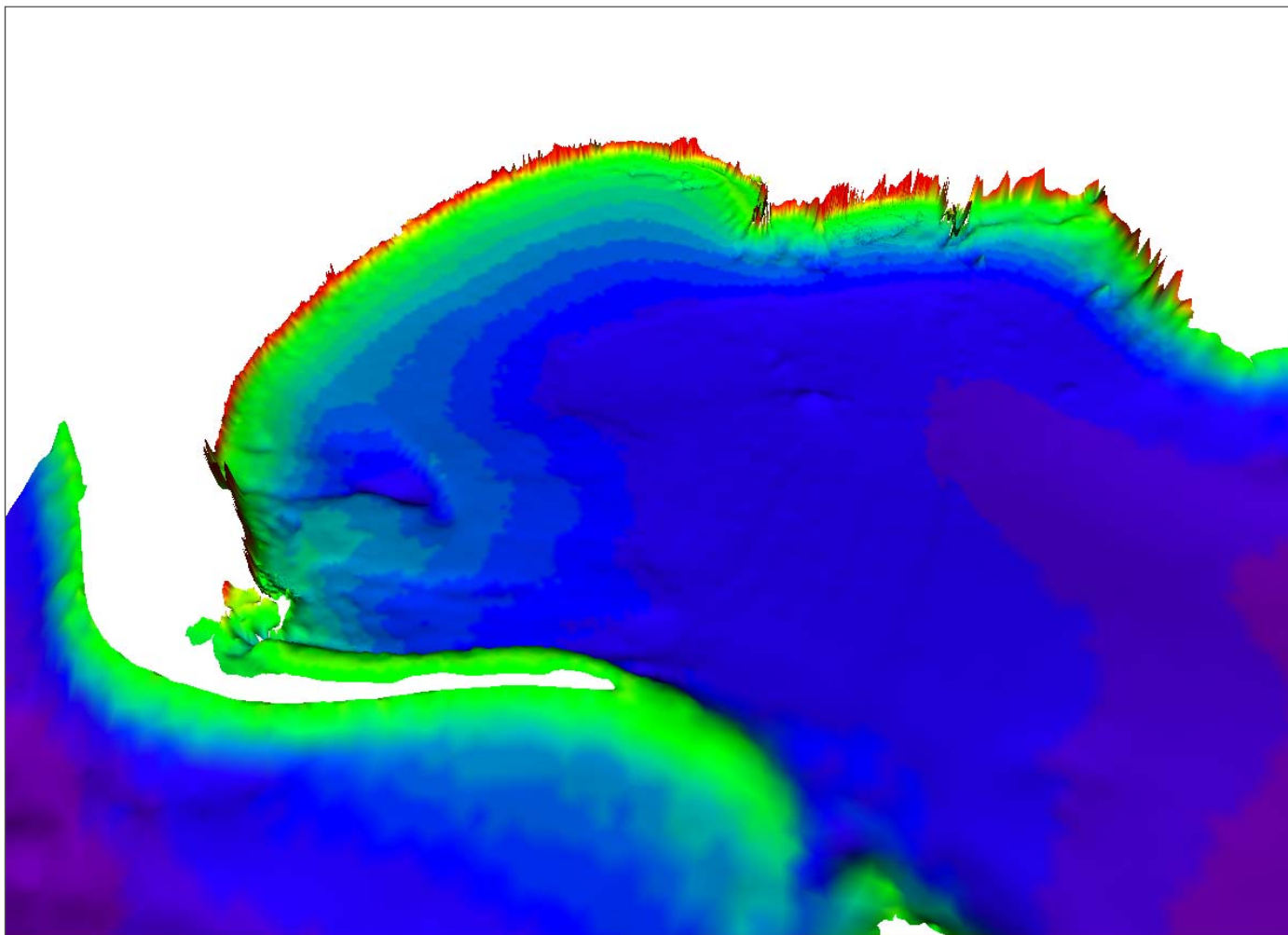


Figure 3.5 : Vue tridimensionnelle de la bathymétrie de la Baie de Plaisance

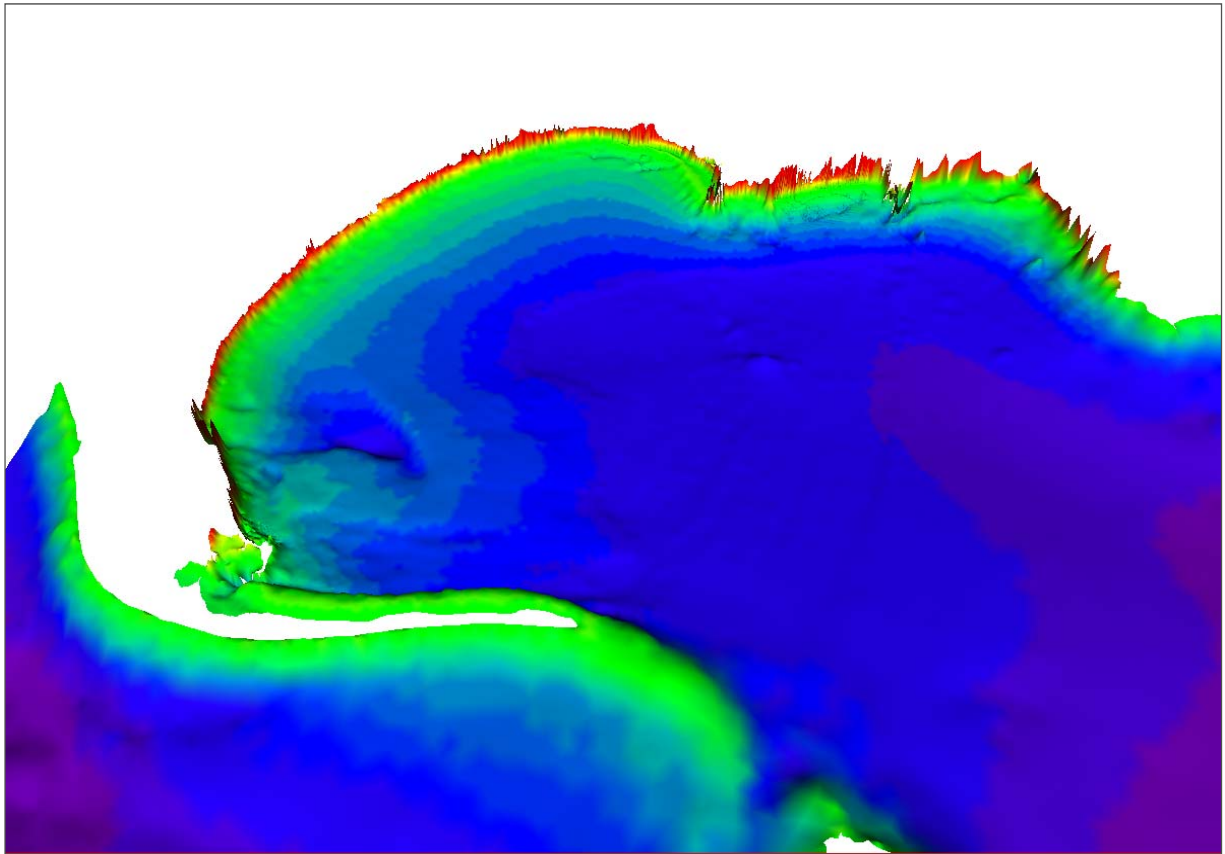


Figure 3.6 : Vue tridimensionnelle de la bathymétrie de la Baie de Plaisance

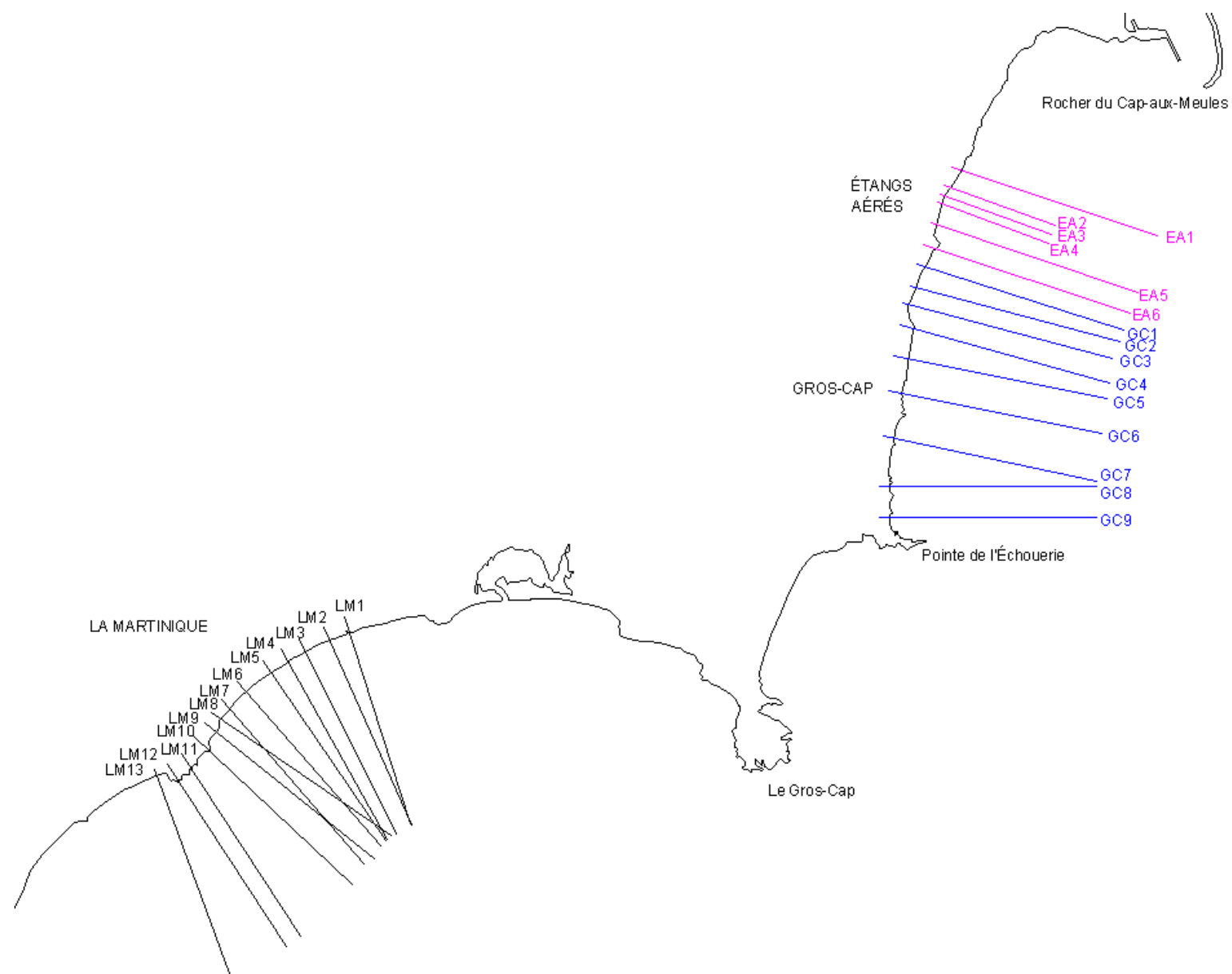
3.5 Transects

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).

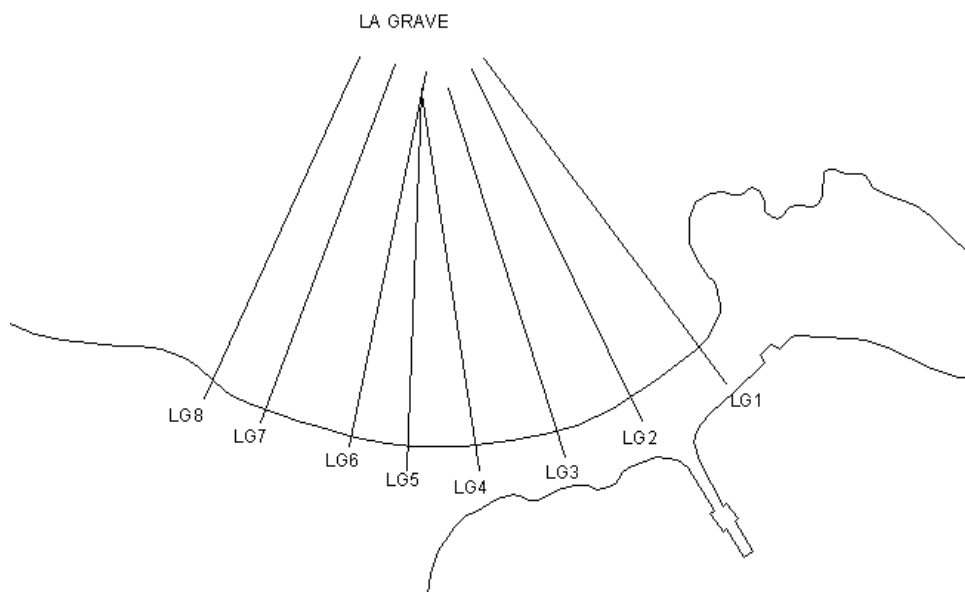
Les figures 3.7 et 3.8 et les tableaux qui les accompagnent présentent la position des transects de chacun des secteurs. La distance couverte par les relevés topographiques et bathymétriques le long de chaque transect est également indiquée. Cette information permet de cibler les tronçons de transects 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	277852.56	5247404.74	0 - 70 m	70 - 265 m	> 265 m
GC1	276772.64	5247649.11	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 - 285 m	> 285 m
GC5	276659.94	5247188.61	277738.58	5246972.88	0 - 100 m	100 - 315 m	> 315 m
GC6	276629.94	5247011.61	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	5244769.68	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	273115.96	5245265.70	273870.00	5244590.00	0 - 110 m	110 - 545 m	> 545 m
LM11	273058.00	5245176.00	273640.00	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.

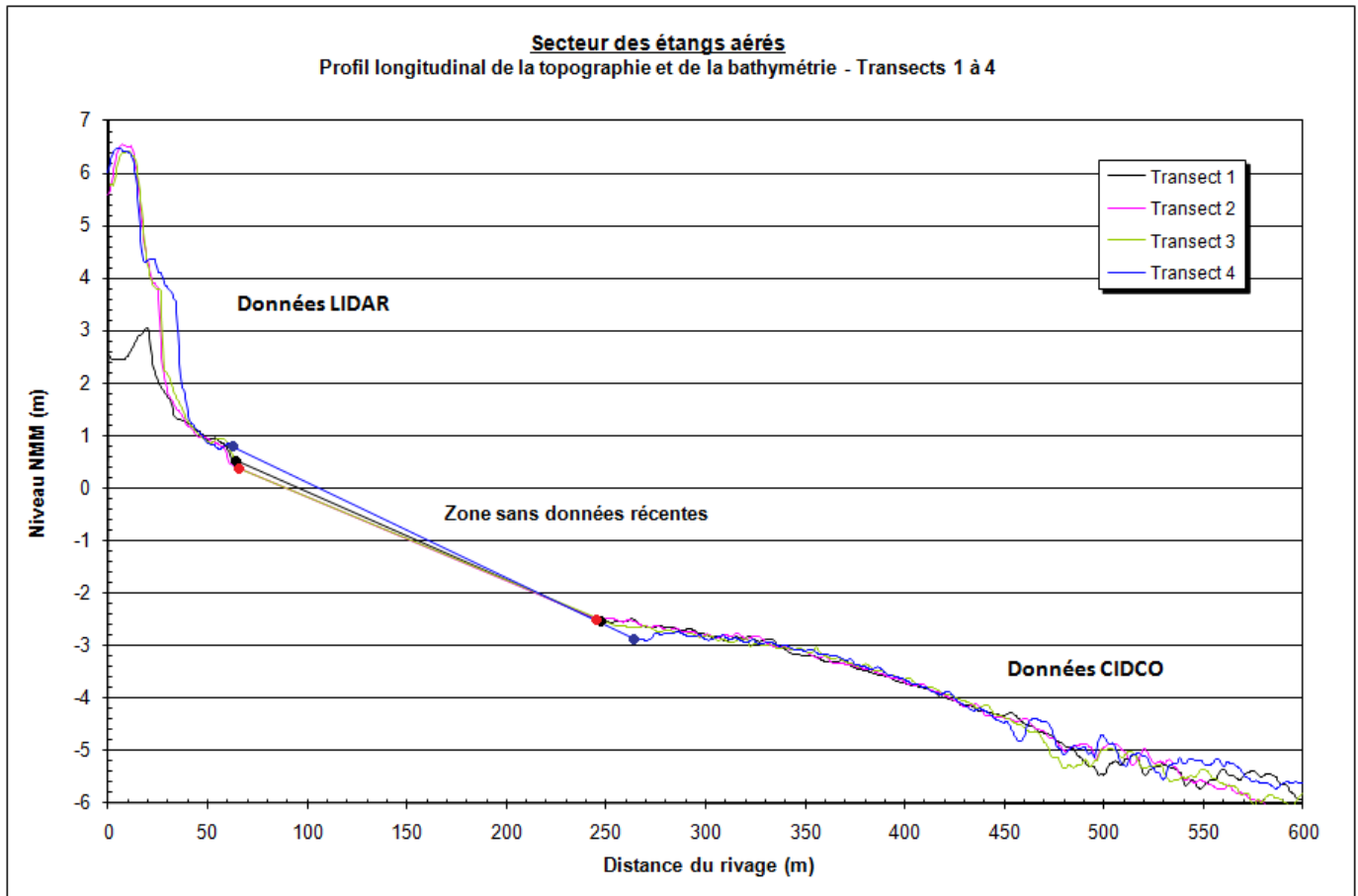


Figure 3.9 Exemples de transects, secteur des étangs aérés

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 éparses et relativement anciennes du SHC.

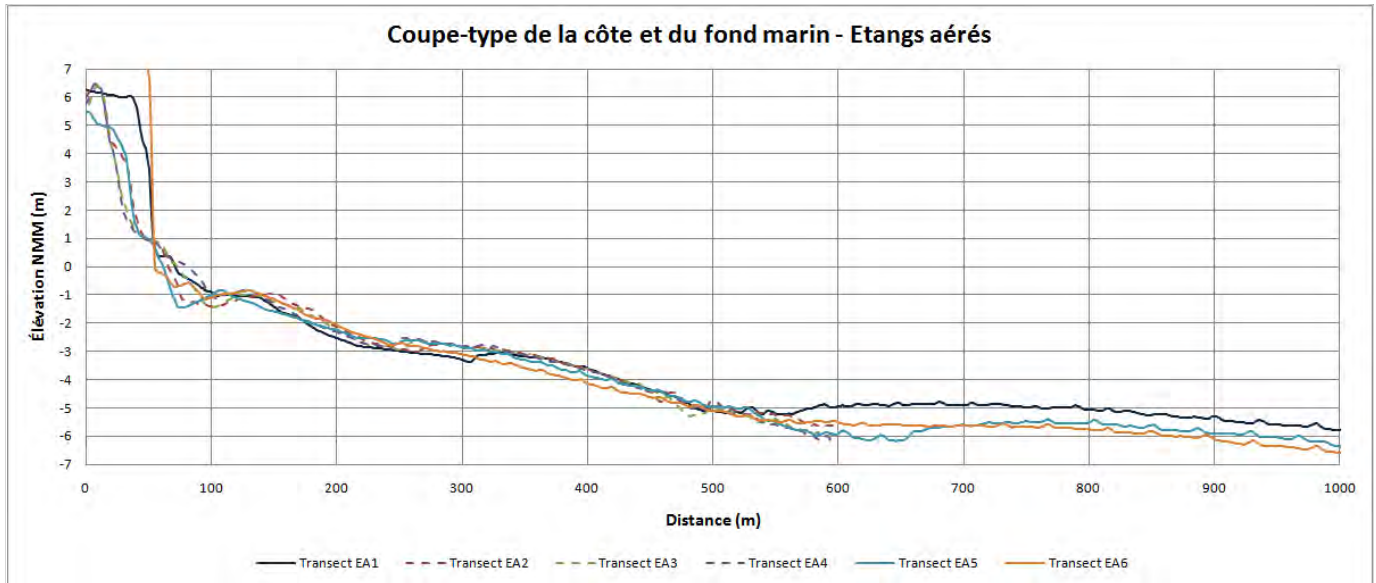


Figure 3.10 Coupe type de la côte et du fond marin – Étangs aérés

3.5.3 Secteur de Gros-Cap

Le secteur de Gros-Cap a été décrit par huit transects (GC1 à GC9, excluant GC3).

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 6 m sous le niveau moyen des mers (NMM). De la côte à 500 m du rivage, la pente moyenne du fond marin est de 1,1 %, mais dans les 60 premiers mètres à partir du rivage, plusieurs transects présentent une dépression.

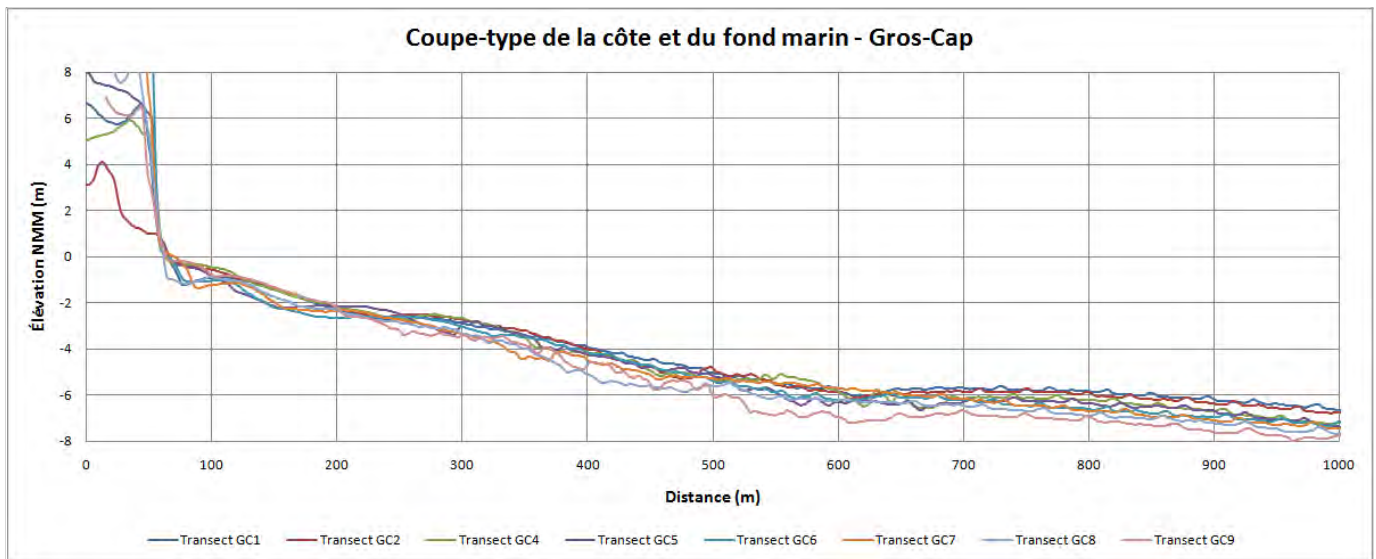


Figure 3.11 Coupe type de la côte et du fond marin – Gros-Cap

3.5.4 Secteur de la plage du chemin des Chalets

Le secteur de la plage du chemin des Chalets a été décrit par cinq transects (LM1 à LM5).

La bathymétrie de ce secteur se caractérise par une zone de fond probablement rocheux à 550 m de la rive à une profondeur de 3 à 4 m sous le NMM. De 550 à 150 m du rivage, le fond monte avec une pente moyenne de 0,6 %.

À 150 m de la rive, on observe sur tous les profils une dépression d'environ 0,7 m de profondeur qui induit une pente de plage de 7 % dans la zone de marnage.

Tel que mentionné précédemment, cette représentation des fonds est toutefois à prendre avec précaution, car elle provient des données éparées et relativement anciennes du SHC.

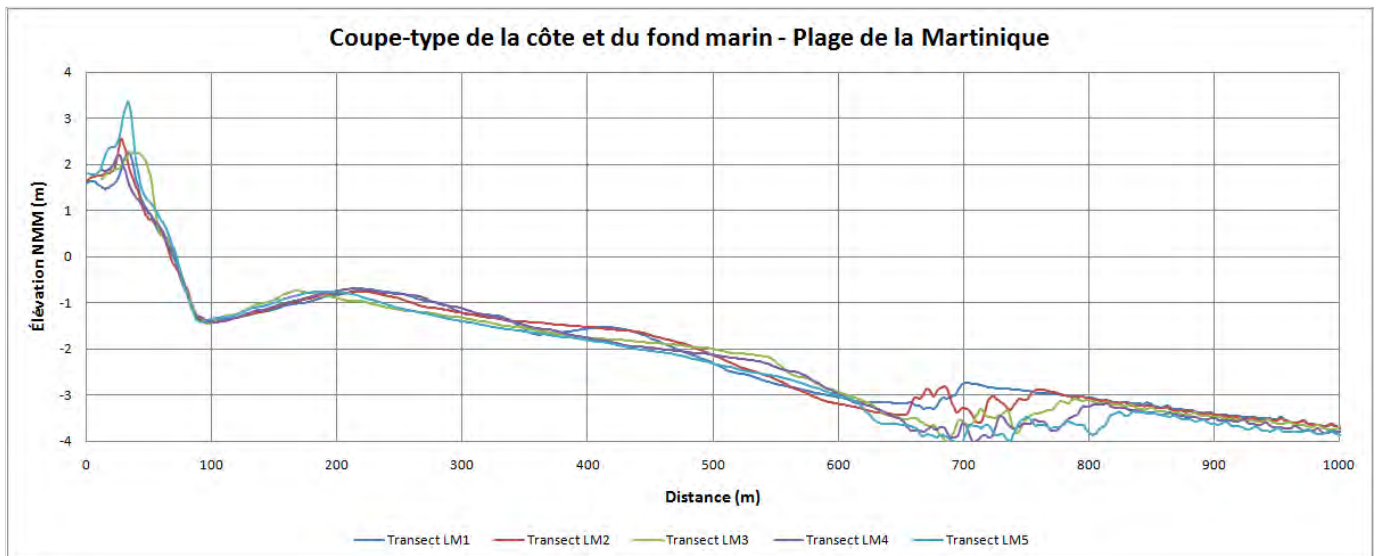


Figure 3.12 Coupe type de la côte et du fond marin – Plage du chemin des Chalets

3.5.5 Secteur de la Pointe de la Martinique

Le secteur de la Pointe de la Martinique a été décrit par sept transects (LM6 à LM12).

La bathymétrie de ce secteur se caractérise par une zone relativement horizontale autour de 4 m sous le NMM (et probablement rocheuse) du fond marin à plus de 650 m de la rive. De 550 m à 420 m de la rive se trouve une autre zone relativement horizontale autour de 3 m sous le NMM. Ensuite, le fond marin présente une pente moyenne de 0,6 % jusqu'au pied de la falaise en érosion.

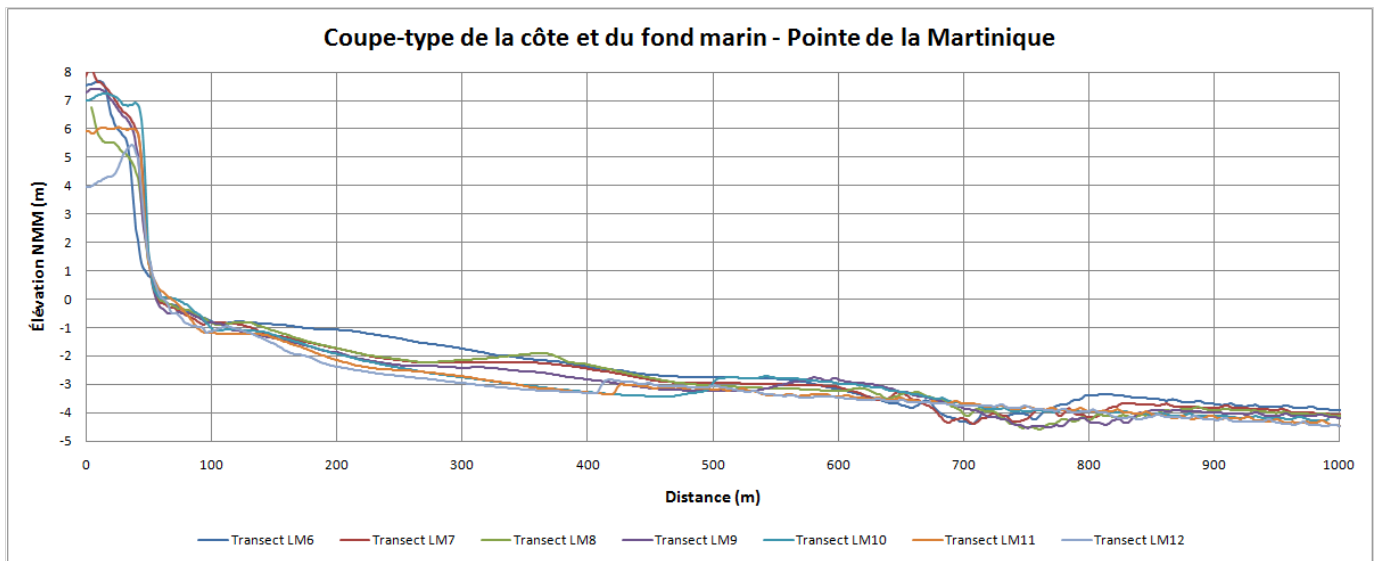


Figure 3.13 Coupe type de la côte et du fond marin – Pointe de la Martinique

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.

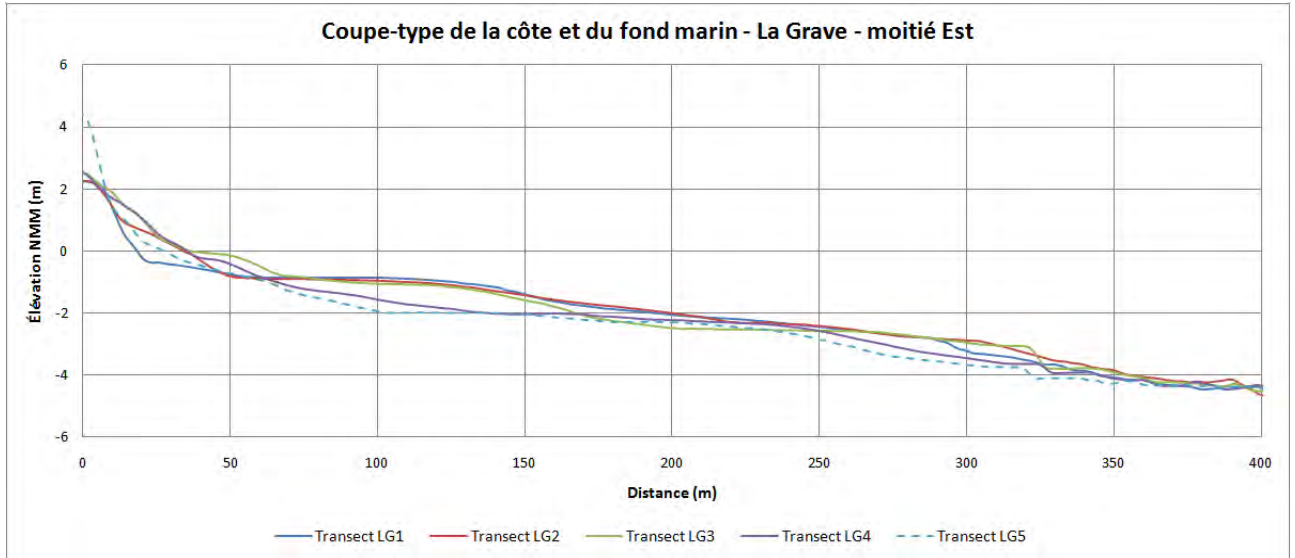


Figure 3.14 Coupe type de la côte et du fond marin – La Grave secteur Est

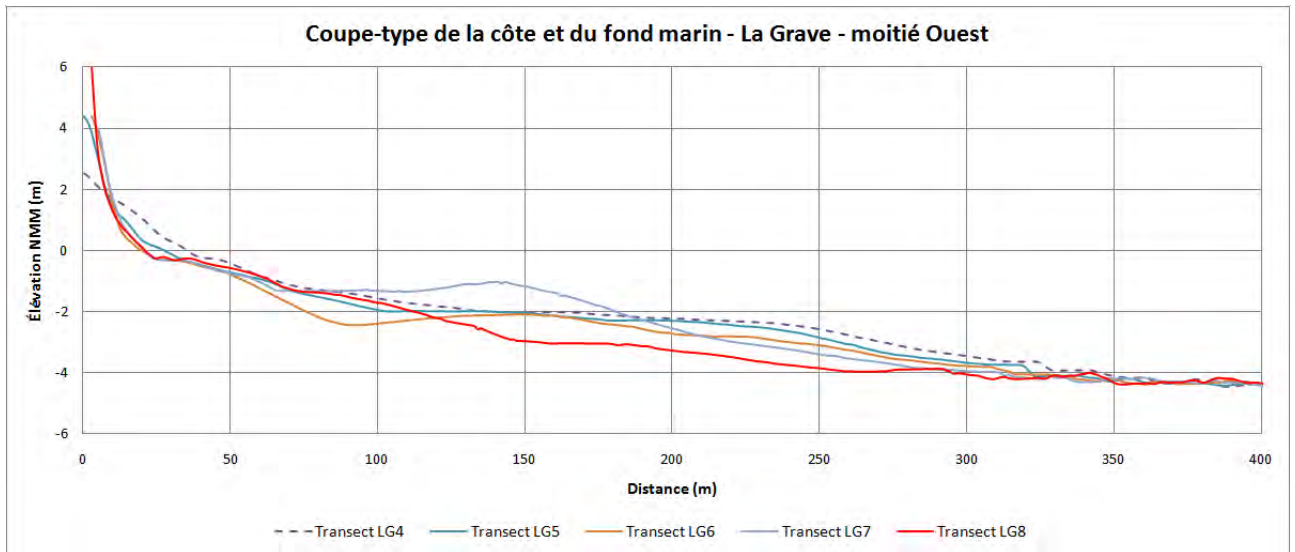


Figure 3.15 Coupe type de la côte et du fond marin – La Grave secteur Ouest

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) :

Tableau 4.1 Données du SHC à Cap-aux-Meules (m ZC)

Localité	Cap-aux-Meules		
Port de référence	Pictou		
Carte marine no	4950,51		
Type de marées	Mixte semi-diurne		
Marnage	Marée moyenne	0,7 m	
	Grande marée	1,1 m	
Hauteur	Pleine mer supérieure	Marée moyenne	1,0 m
		Grande marée	1,2 m
	Basse mer inférieure	Marée moyenne	0,3 m
		Grande marée	0,1 m
Extrêmes enregistrés	Extrême de pleine mer	2,4 m	
	Extrême de basse mer	-0,5 m	
Niveau moyen de l'eau	0,7 m		

Pour évaluer la probabilité de dépassement des niveaux d'eau exceptionnellement hauts qui pourraient affecter les côtes de la baie de Plaisance en termes d'érosion, il faut disposer de données de niveaux d'eau à long terme ou de résultats de modélisation. Les données de niveaux d'eau à long terme sont disponibles pour le port de Cap-aux-Meules qui se situe raisonnablement près des zones à l'étude pour qu'il soit possible d'utiliser directement cette information dans le cadre de cette étude. Des relevés de niveaux d'eau ont été faits depuis 1964 par la GDSI² au port de Cap-aux-Meules. Cette information sera utilisée pour interpréter les niveaux d'eau dans la zone à l'étude.

4.3 Niveaux d'eau enregistrés à Cap-aux-Meules

Les données de niveaux d'eau du SHC³ (GDSI) pour la station de Cap-aux-Meules (# 1970) sont disponibles aux heures entre 1964 et 1988. Des données aux quinze minutes sont disponibles à Cap-aux-Meules entre 1995 et 2001. Enfin, depuis 2007, les niveaux d'eau sont disponibles toutes les trois minutes à Cap-aux-Meules.

Pour obtenir une série homogène de données et établir des statistiques de dépassement de niveaux d'eau, une analyse des données horaires disponibles de 1964 à 2010 a été faite pour la station de la GDSI à Cap-aux-Meules.

² Gestion scientifique des données intégrées – Service hydrographique du Canada - Pêches et des Océans Canada

³ Service hydrographique du Canada – Pêches et Océans Canada

4.4 Niveaux d'eau moyens à Cap-aux-Meules

L'évaluation des niveaux d'eau moyens à Cap-aux-Meules s'est faite à partir de la banque de données horaire de niveaux d'eau de la GDSI depuis 1964 (128 809 valeurs). La figure suivante illustre l'évolution de ces niveaux d'eau moyens. On constate que le niveau moyen a de façon générale augmenté en moyenne de 4,4 mm par année sur cette période. La figure ne permet pas de mettre en lumière de modification évidente de cette tendance à la hausse sur la période pendant laquelle les données horaires de niveaux d'eau sont disponibles.

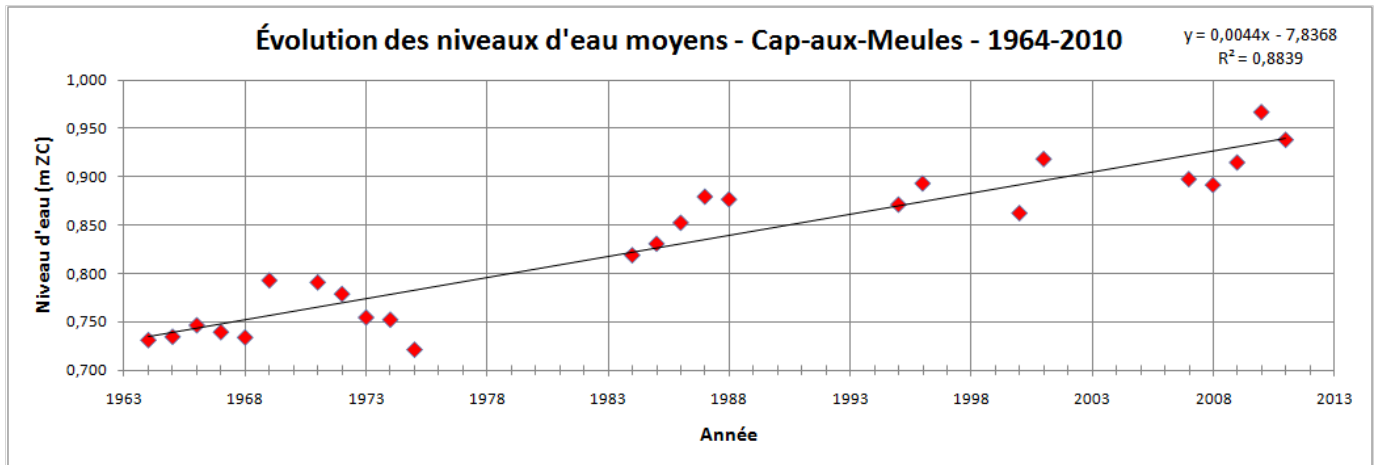


Figure 4.1 Niveaux d'eau moyens annuels à Cap-aux-Meules

Une partie non négligeable de cette remontée des eaux est due à une baisse généralisée de l'altitude des Îles de la Madeleine (phénomène relié à l'ajustement de la croûte terrestre suite à la dernière glaciation). L'information obtenue de Ressources naturelles Canada⁴ indique une subsidence des Îles de la Madeleine de l'ordre de 1,6 mm/an d'après des relevés réalisés à l'aide de GPS de haute précision.

4.5 Niveaux d'eau hauts à Cap-aux-Meules

Les données du SHC (GDSI) ont été utilisées pour analyser l'évolution des niveaux d'eau extrêmes hauts.

Le graphique suivant montre la courbe de dépassement des niveaux d'eau hauts obtenue avec la base de données disponible. On constate sur cette courbe que le niveau d'eau de +2,2 m devrait être dépassé une fois tous les dix ans.

⁴ Communication personnelle – Michael Craymer – Ressources naturelles Canada - 2011/03/07

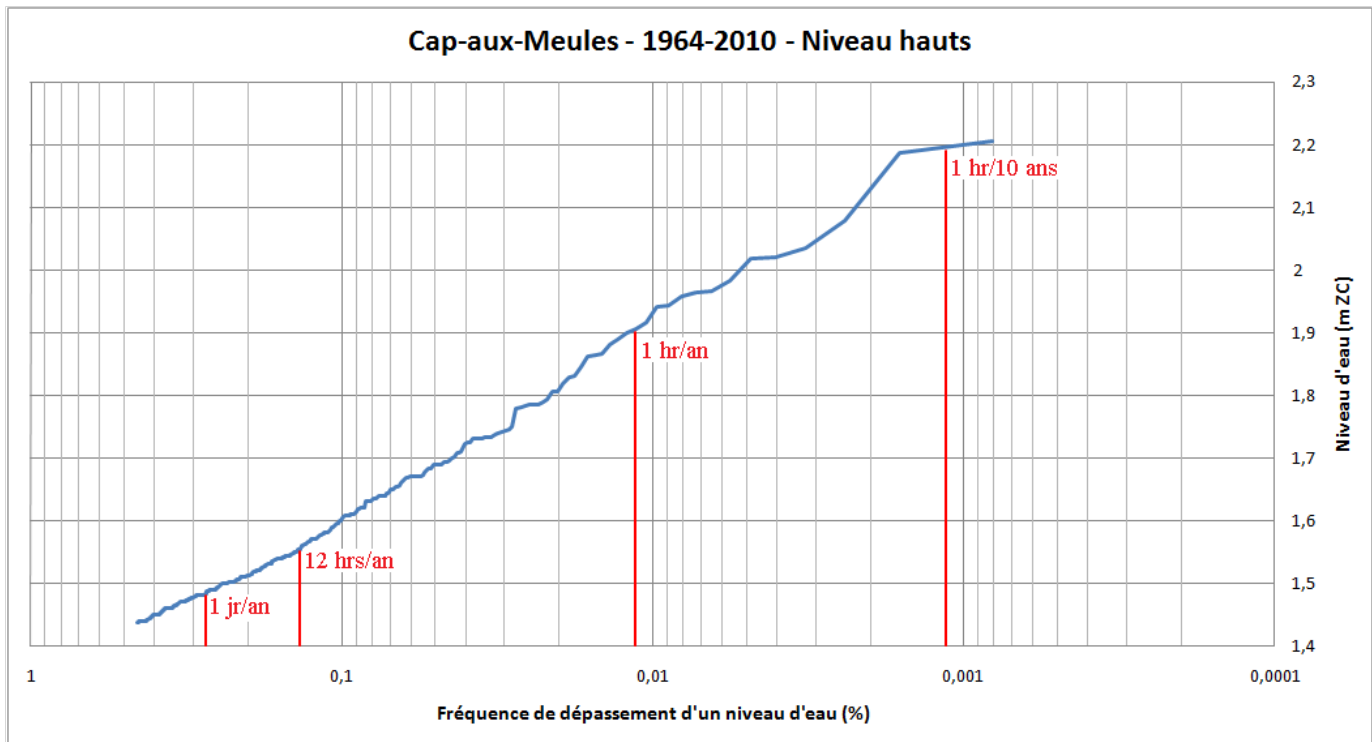


Figure 4.2 Fréquence de dépassement des niveaux d'eau hauts à Cap-aux-Meules (1964-2010)

Par contre, cette analyse est probablement faussée du point de vue statistique par le phénomène de remontée des niveaux d'eau moyens et probablement par la disparition progressive des glaces du Golfe du Saint-Laurent. Les quatorze plus hauts niveaux d'eau horaires de la base de données se sont tous produits depuis décembre 2007.

Dans le cadre du dimensionnement d'un ouvrage pour les 30 à 50 prochaines années, il faudrait au moins ajouter à la valeur de niveau d'eau (correspondant à une récurrence donnée) la prédiction de la remontée du niveau moyen de l'eau dans le Golfe sur cette période. Ce calcul sera fait plus loin.

La figure suivante illustre l'évolution des niveaux d'eau hauts (extrême, moyenne des six plus hauts niveaux et moyenne des douze plus hauts niveaux) pour chacune des années pour lesquelles des informations sont disponibles à Cap-aux-Meules. On constate sur cette figure la surreprésentation des dernières années en termes de niveaux d'eau très hauts. La tendance à la hausse des niveaux d'eau extrêmes suit celle des niveaux moyens, soit en moyenne 3,3 mm par année. Par contre, le coefficient de corrélation de cette régression linéaire est très faible.

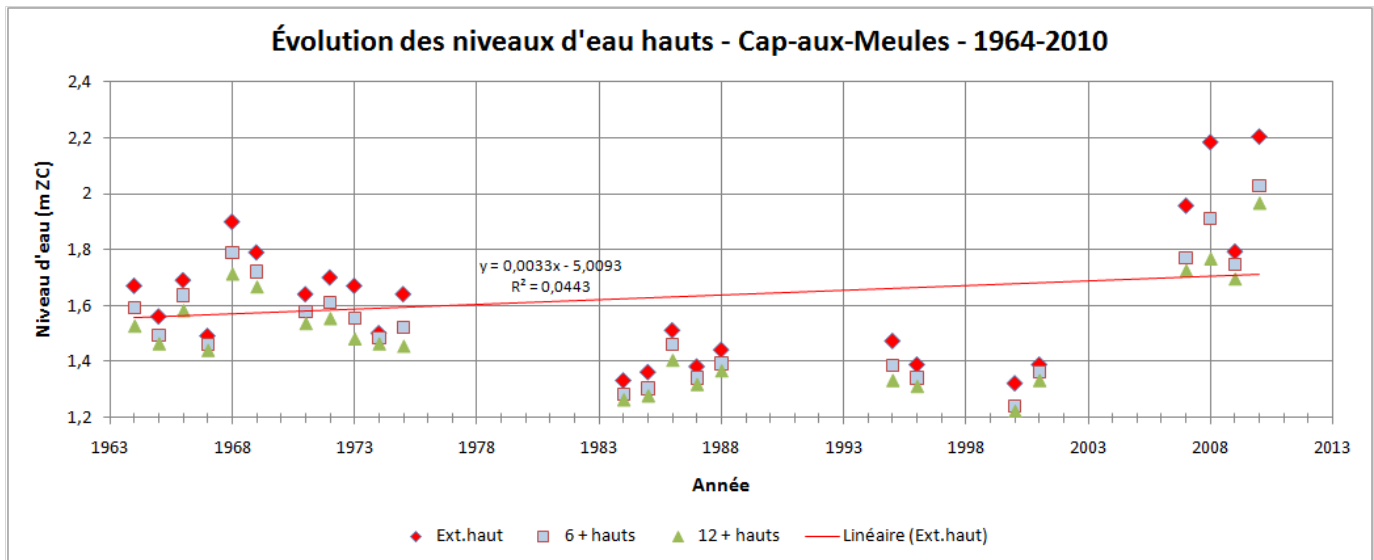


Figure 4.3 Évolution des niveaux d'eau hauts à Cap-aux-Meules

4.6 Niveaux d'eau hauts historiques à Cap-aux-Meules

Les données horaires de niveaux d'eau enregistrés à Cap-aux-Meules ont été plus particulièrement analysées à l'occasion de tempêtes qui ont produit des rehaussements importants du niveau d'eau et des dommages qui ont marqué les îliens. Les tempêtes remarquables suivantes se sont produites en même temps que des dépassements importants des niveaux d'eau prédits à la station de Cap-aux-Meules. Les figures suivantes illustrent ces phénomènes. Par maximum d'élévation du niveau d'eau décroissant, les dates des événements de surcotes récents sont les suivantes :

- 2 janvier 2010 (+2,206 m ZC)
- 22 décembre 2008 (+2,186 m ZC)
- 21 décembre 2010 (+2,034 m ZC)
- 27 décembre 2010 (+2,021 m ZC)
- 4 décembre 2007 (+1,958 m ZC)

Il y a également eu des surcotes significatives aux dates suivantes :

- 21 janvier 2000 (aucune donnée de niveau d'eau disponible à la station du SHC)
- 6 décembre 2010
- 3, 7, 9, 13 et 27 janvier 2011

Les figures suivantes illustrent les variations de niveau d'eau prédites et mesurées à Cap-aux-Meules pour différents événements de surcote importante. On constate sur ces figures que des surcotes de l'ordre du mètre d'amplitude se sont produites à plusieurs reprises au cours des quatre dernières années à Cap-aux-Meules.

Après vérification de la base de données de vent d'Environnement Canada pour la station météorologique des « Îles de la Madeleine » (station no 7053KGR), tous ces événements de surcote sont associés à des épisodes de forts vents des secteurs est à nord-est. Chaque figure illustrant ci-dessous une surcote est suivie de la figure illustrant la vitesse (km/h) et la direction (dizaine de degrés⁵) du vent correspondant à l'événement de surcote, de façon à illustrer ce phénomène.

⁵ « 36 » correspond à la direction 360 degrés, soit le Nord, « 18 » au Sud

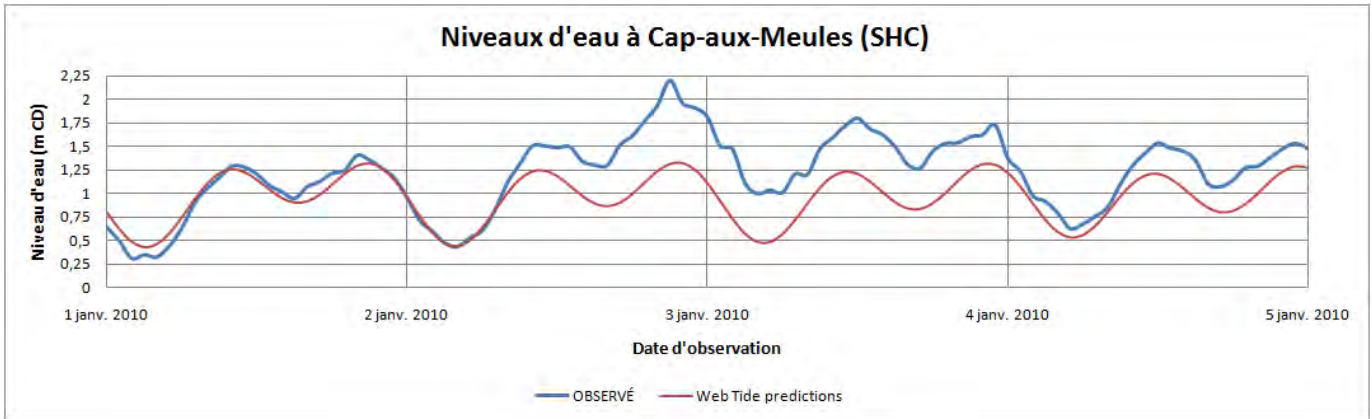


Figure 4.4 Niveaux extrêmes hauts enregistrés à Cap-aux-Meules le 2 janvier 2010

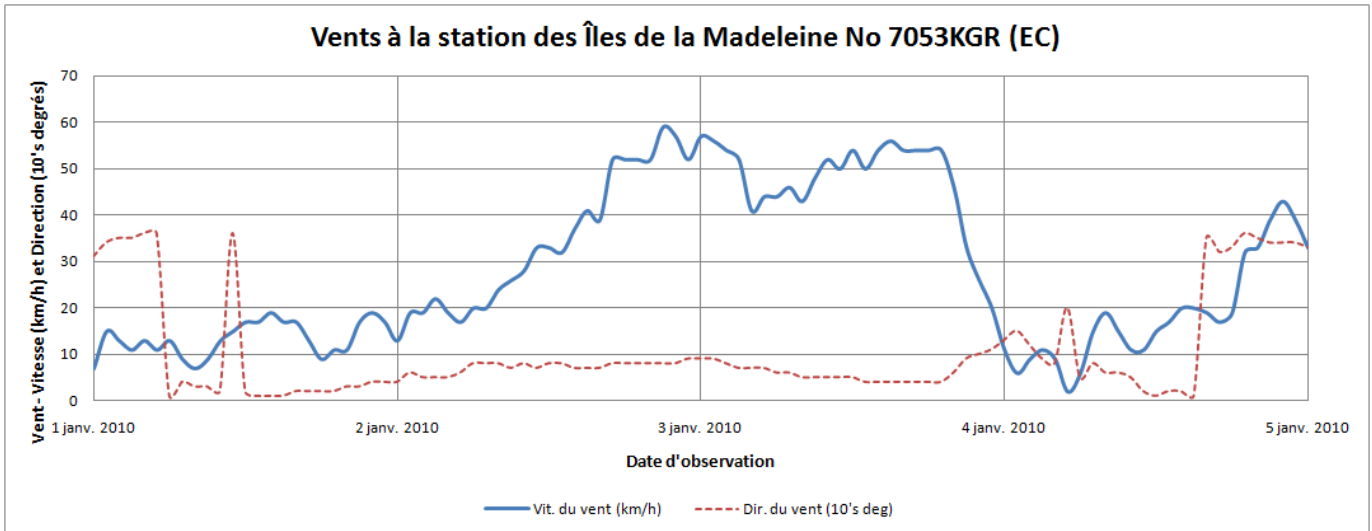


Figure 4.5 Vitesse et direction du vent le 2 janvier 2010

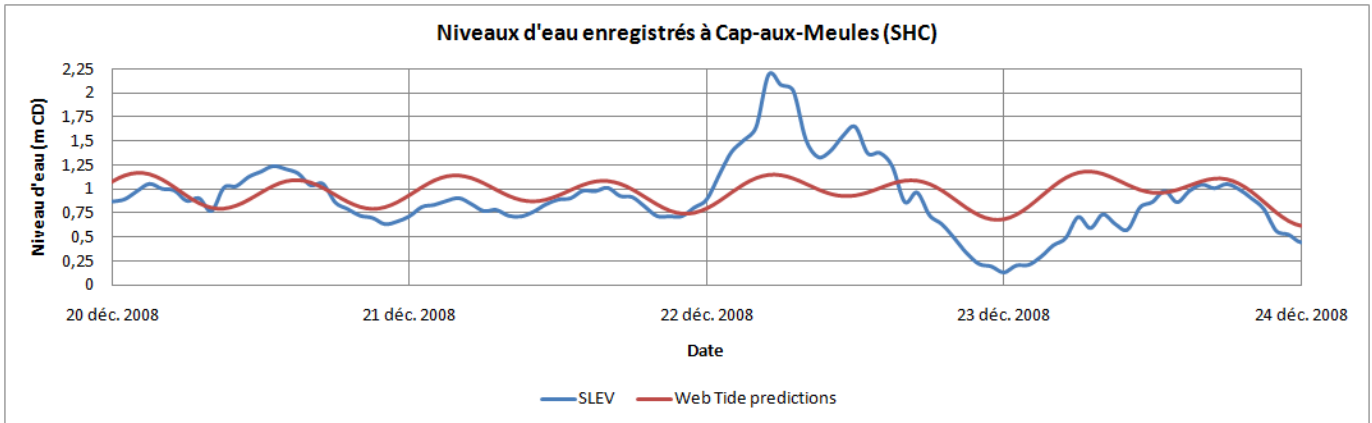


Figure 4.6 Niveaux extrêmes hauts enregistrés à Cap-aux-Meules le 22 décembre 2008

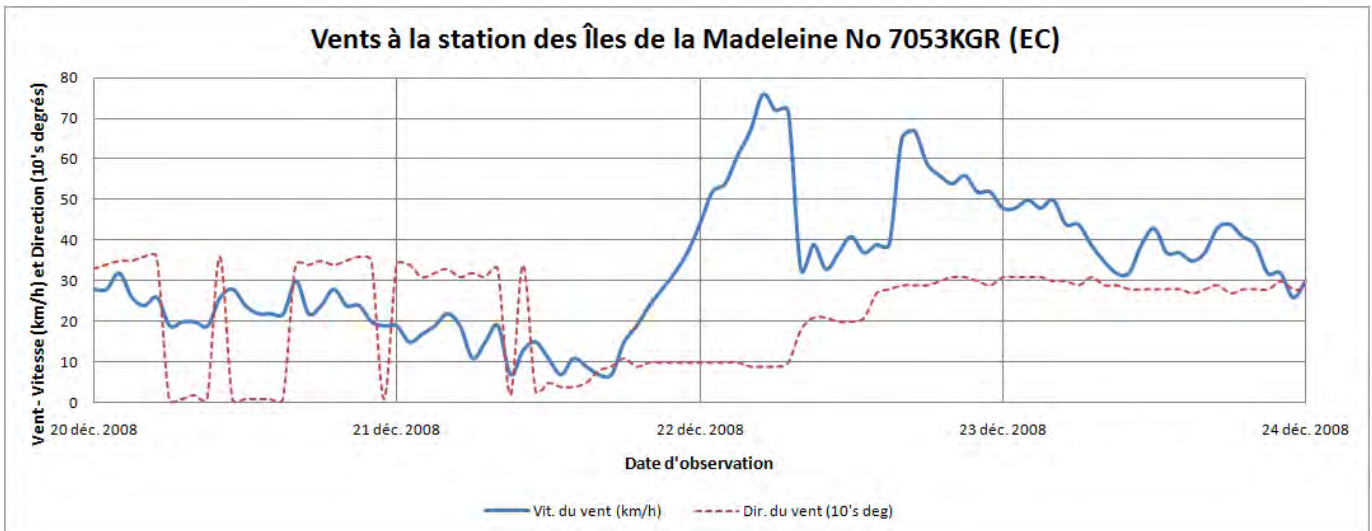


Figure 4.7 Vitesse et direction du vent le 22 décembre 2008

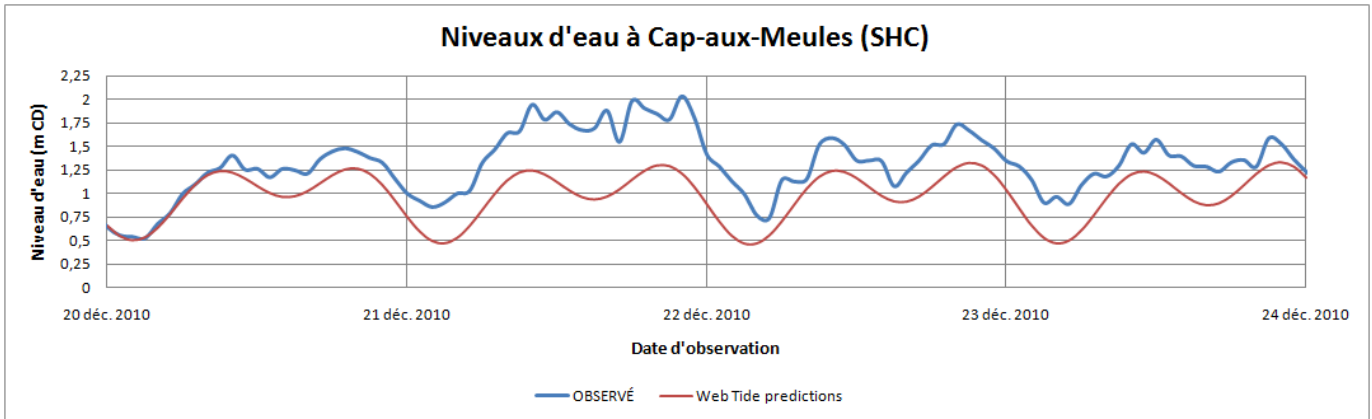


Figure 4.8 Niveaux extrêmes hauts enregistrés à Cap-aux-Meules le 21 décembre 2010

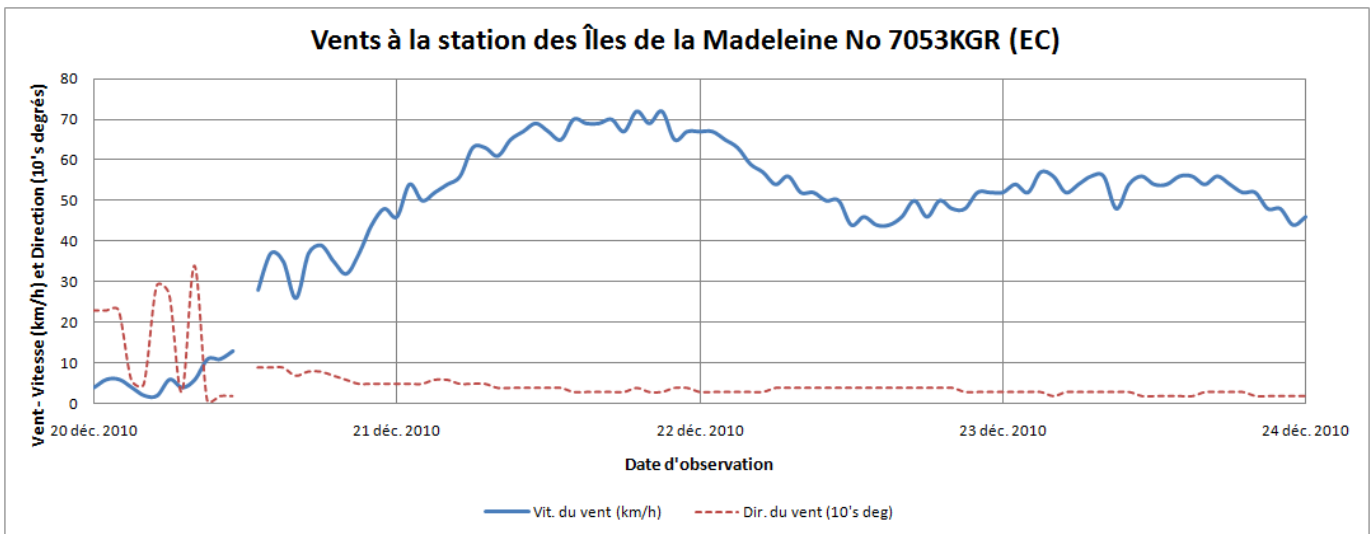


Figure 4.9 Vitesse et direction du vent le 21 décembre 2010

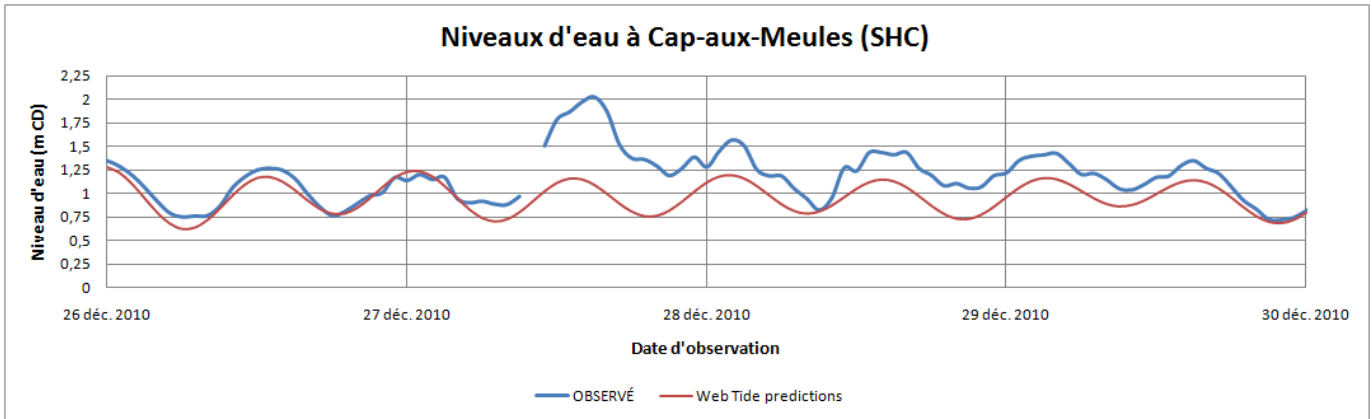


Figure 4.10 Niveaux extrêmes hauts enregistrés à Cap-aux-Meules le 27 décembre 2010

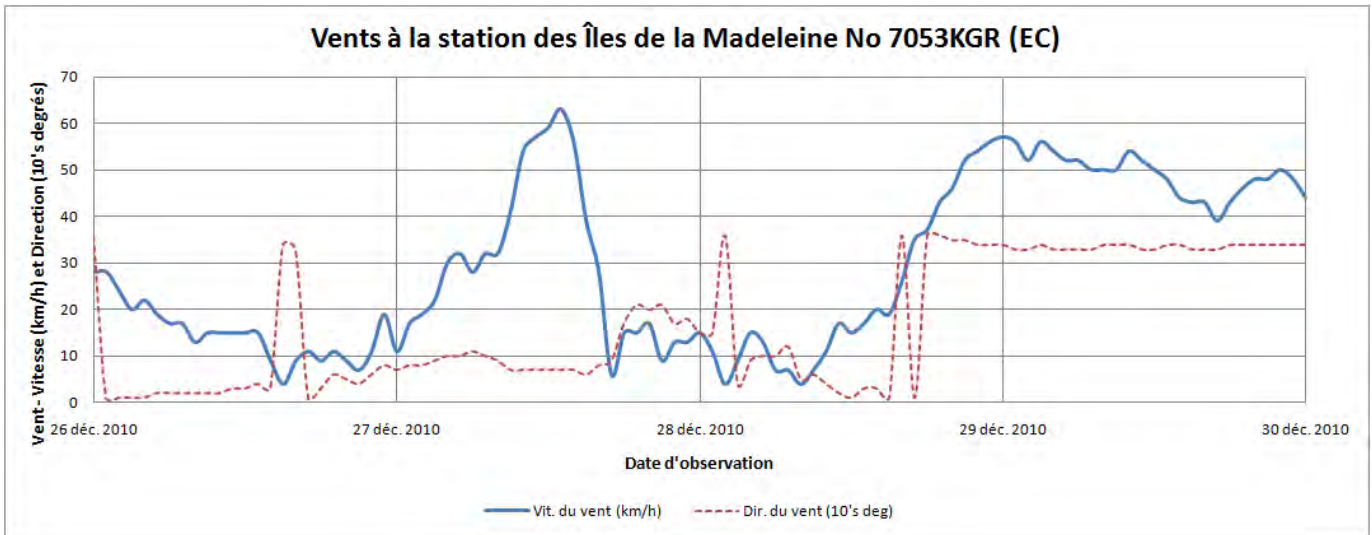


Figure 4.11 Vitesse et direction du vent le 27 décembre 2010

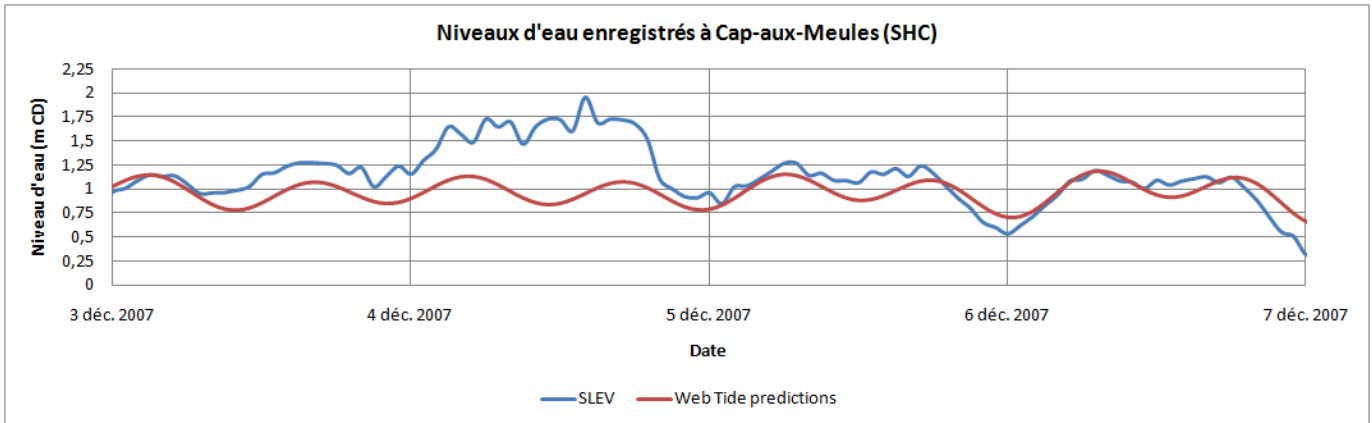


Figure 4.12 Niveaux extrêmes hauts enregistrés à Cap-aux-Meules le 4 décembre 2007

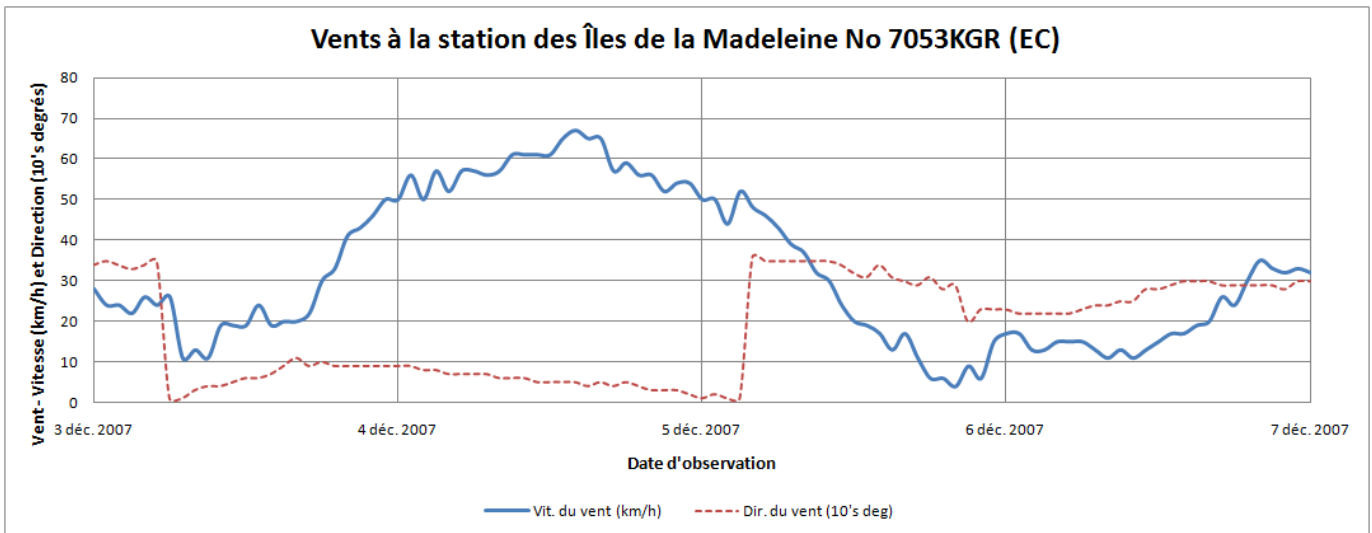


Figure 4.13 Vitesse et direction du vent le 4 décembre 2007

4.7 Niveaux d'eau à Charlottetown

Les données horaires de niveaux d'eau enregistrés à Charlottetown⁶ ont été analysées entre 1960 et 2010 (419 270 valeurs horaires de niveau d'eau). La figure suivante illustre la courbe des niveaux d'eau moyens annuels mesurés à cette station.

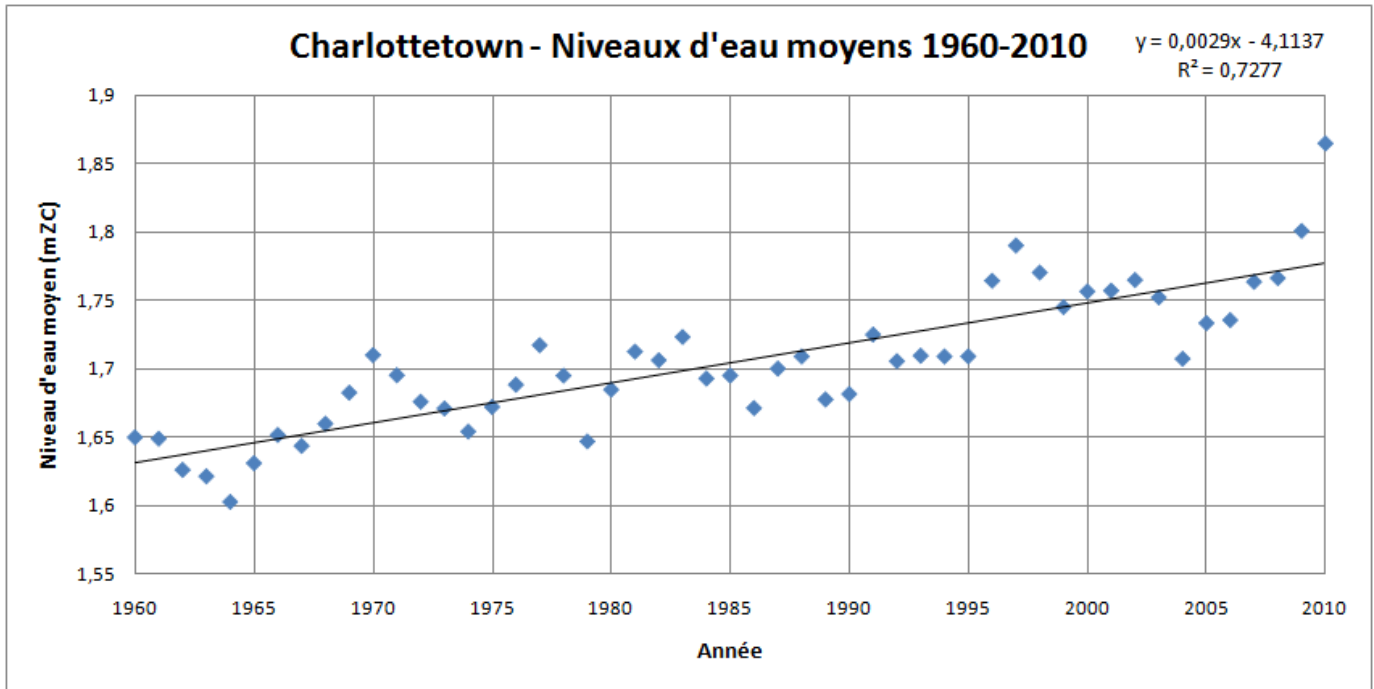


Figure 4.14 Niveaux annuels moyens à Charlottetown depuis 1960

On constate sur la figure précédente que les niveaux annuels moyens sont en hausse constante depuis 1960, à un rythme moyen d'environ 3 mm par année.

On note aussi sur la figure que l'année 2010 a établi un record de niveau moyen, record qui dépasse nettement la variabilité historique de la période considérée. Il est possible que ceci soit une indication que la tendance à la hausse du niveau d'eau s'accélère avec les années.

Si on refait l'analyse de façon distincte sur les périodes 1960-1984 et 1985-2010, on constate sur la figure suivante que la tendance à l'augmentation des niveaux d'eau moyens s'est accélérée depuis 1985. Alors que le taux moyen de hausse du niveau d'eau était de 3,3 mm par année entre 1960 et 1985, il atteindrait 4,4 mm par année depuis 1985.

Il faut noter que cette variation du niveau d'eau fournie par le SHC-SGDI inclut un mouvement d'enfoncement de la croûte terrestre au droit de l'île du Prince-Édouard (de l'ordre de

⁶ Station # 1700 du SHC-SGDI

2,1 mm/an d'après Ressources naturelles Canada⁷), la hausse absolue du niveau d'eau étant inférieure à la hausse totale. Par contre, la tendance à l'augmentation du niveau d'eau moyen avec les années ne devrait aucunement être influencée par ces mouvements tectoniques à l'échelle temporelle considérée.

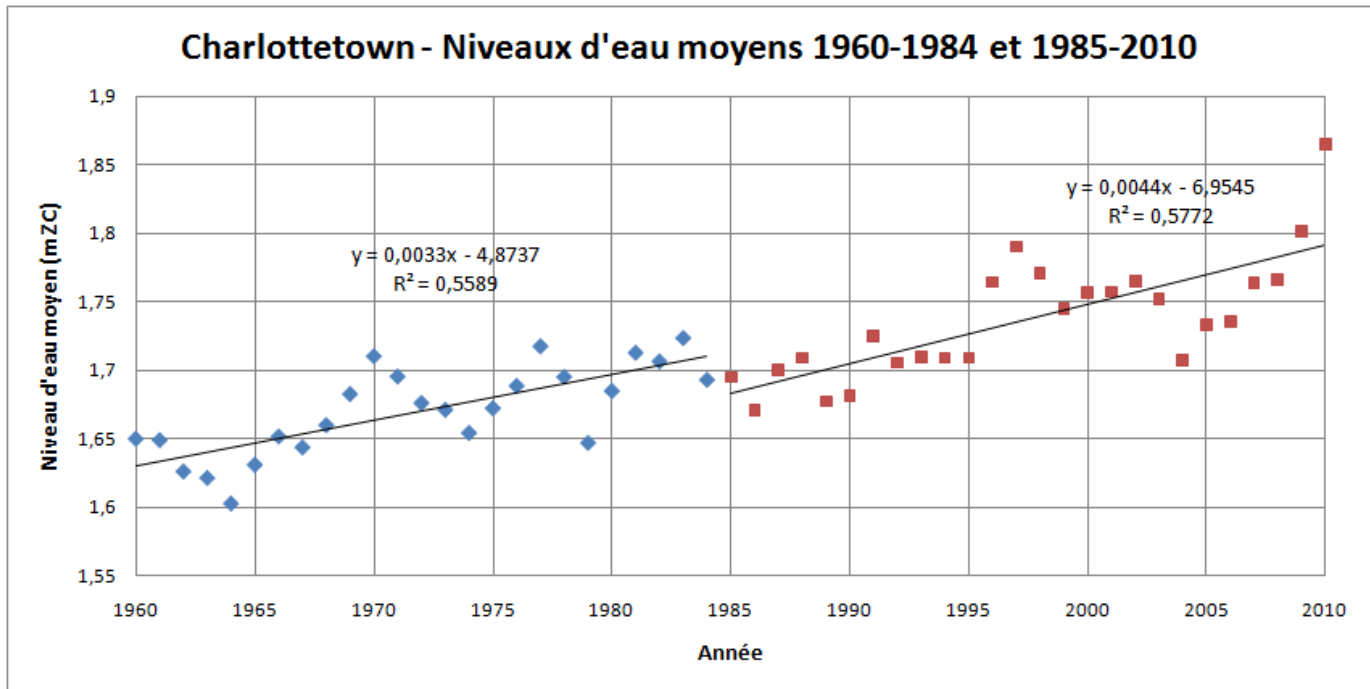


Figure 4.15 Niveaux annuels moyens à Charlottetown de 1960 à 1984 et de 1985 à 2010

4.8 Prédiction de niveaux d'eau hauts à Cap-aux-Meules

Les niveaux d'eau hauts qui devraient être considérés dans les calculs dans la région de Cap-aux-Meules doivent tenir compte du rehaussement du niveau d'eau moyen et de l'affaissement isostatique en cours.

Compte tenu du fait que le taux du rehaussement du niveau moyen des océans devrait augmenter avec les changements climatiques en cours, il est recommandé d'utiliser un taux de rehaussement de 5 mm/an (tenant compte à la fois du rehaussement du niveau moyen des océans et de l'enfoncement général des Îles de la Madeleine).

Ainsi la prédiction actuelle de niveau d'eau pour une récurrence donnée devrait être augmentée de 50 mm dans 10 ans, de 150 mm dans 30 ans et de 250 mm dans 50 ans.

⁷ Communication personnelle – Michael Craymer – Ressources naturelles Canada - 2011/3/7

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.

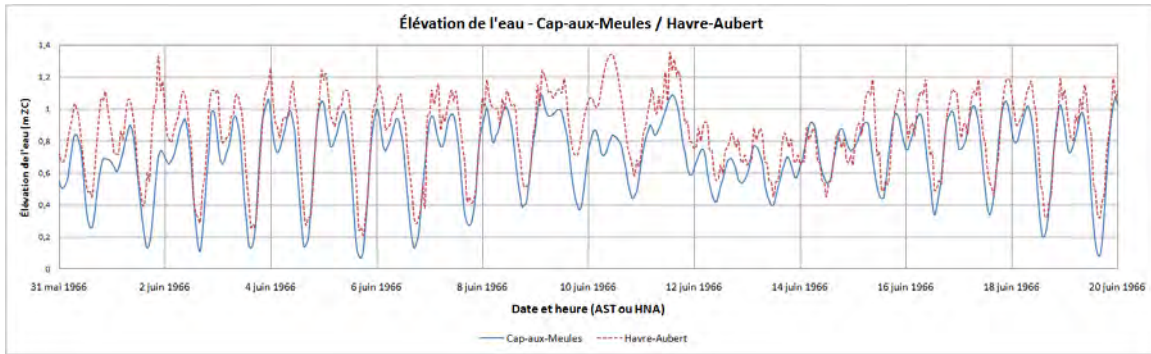


Figure 4.16 Comparaison des niveaux d'eau à Cap-aux-Meules et Havre-Aubert en juin 1966

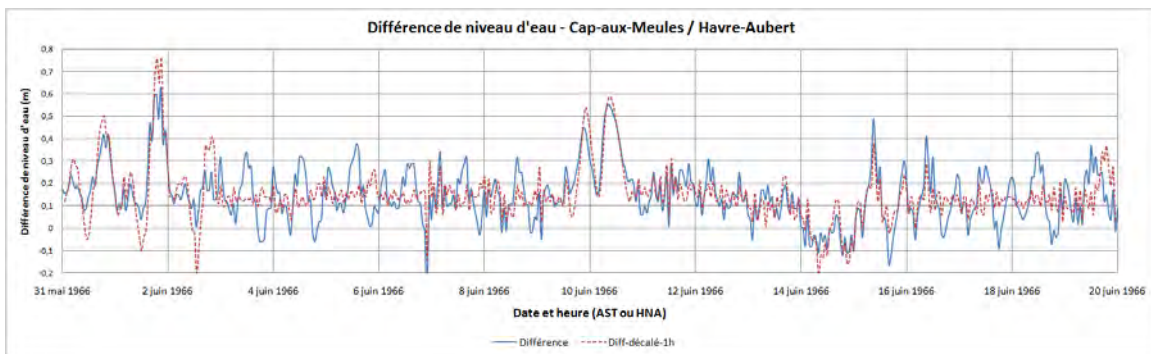


Figure 4.17 Différence de niveau d'eau entre Cap-aux-Meules et Havre-Aubert en juin 1966

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.

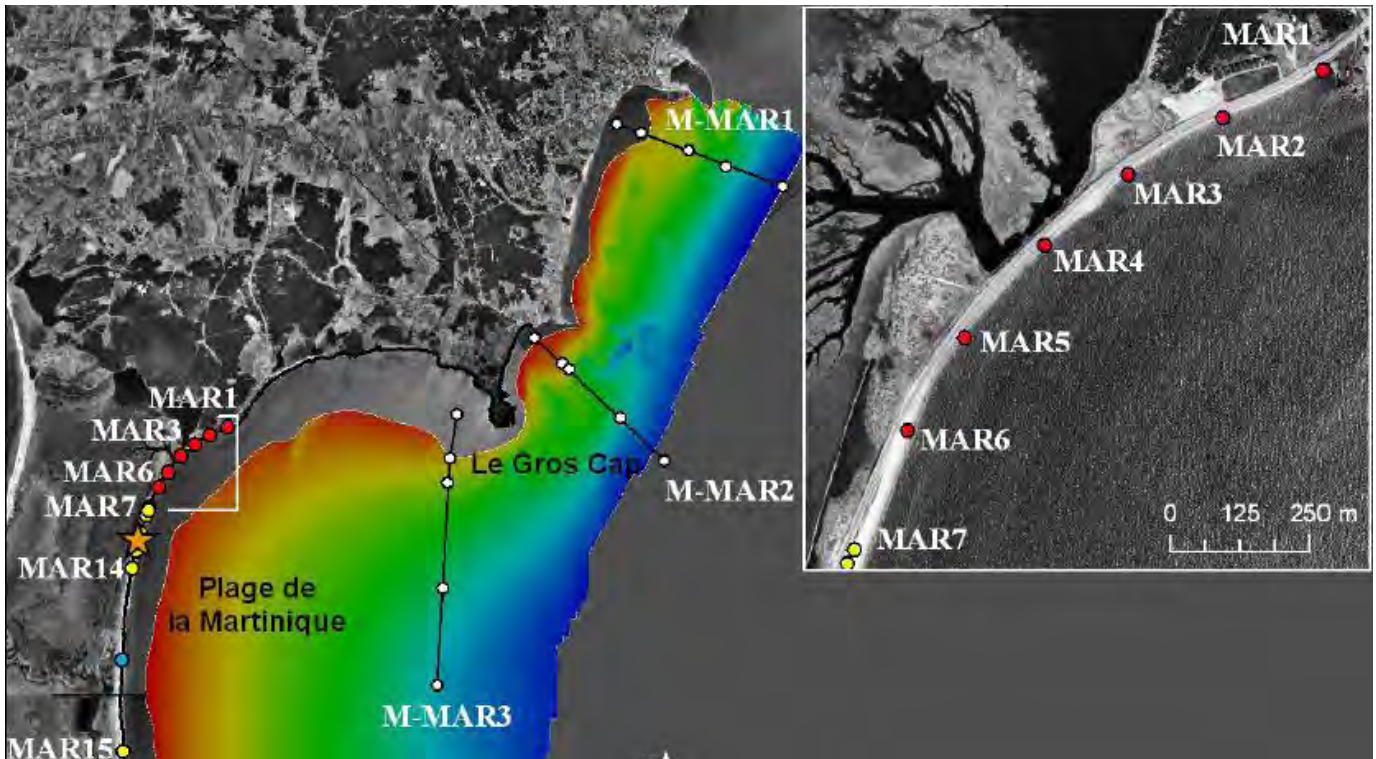


Figure 5.1 Localisation des profils et prélèvements de sédiments dans la baie de Plaisance

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).

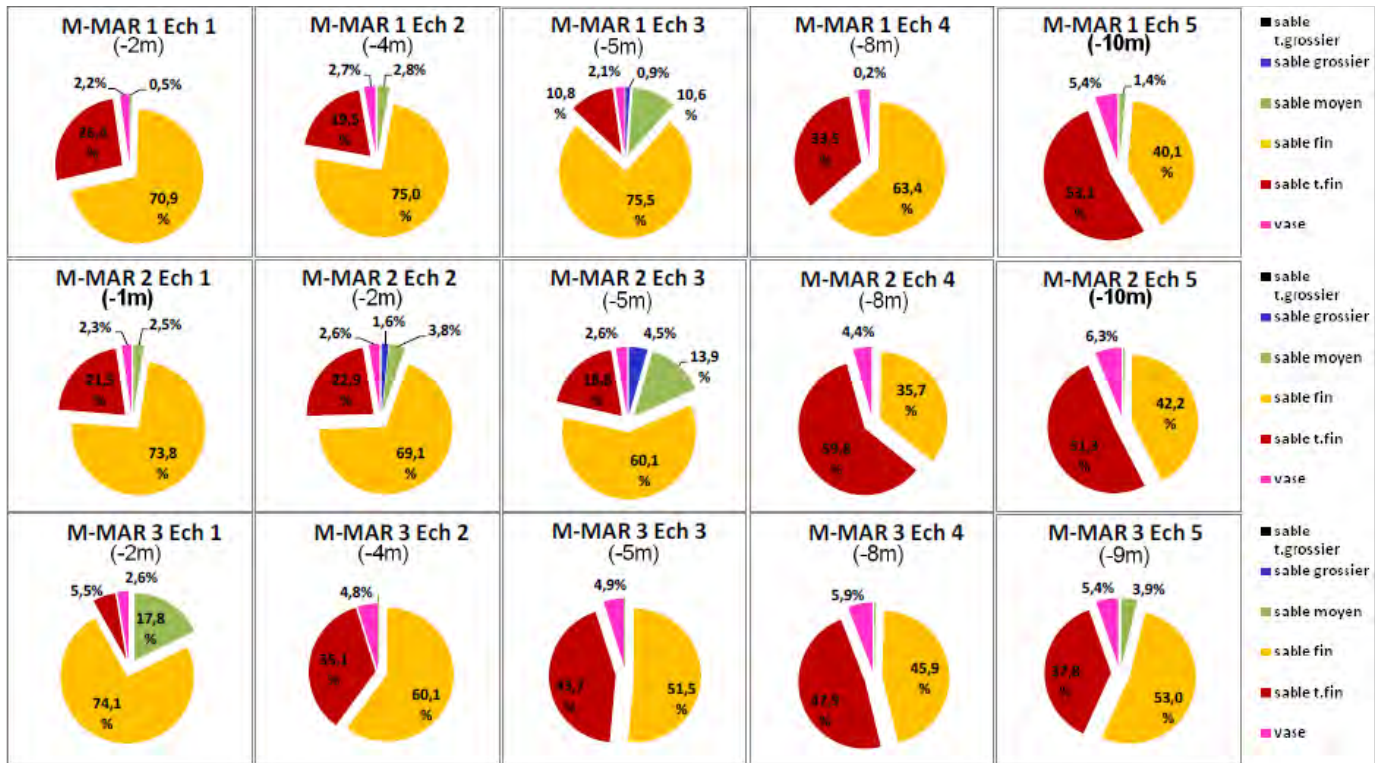


Figure 5.2 Granulométrie des sédiments prélevés au large de Gros-Cap

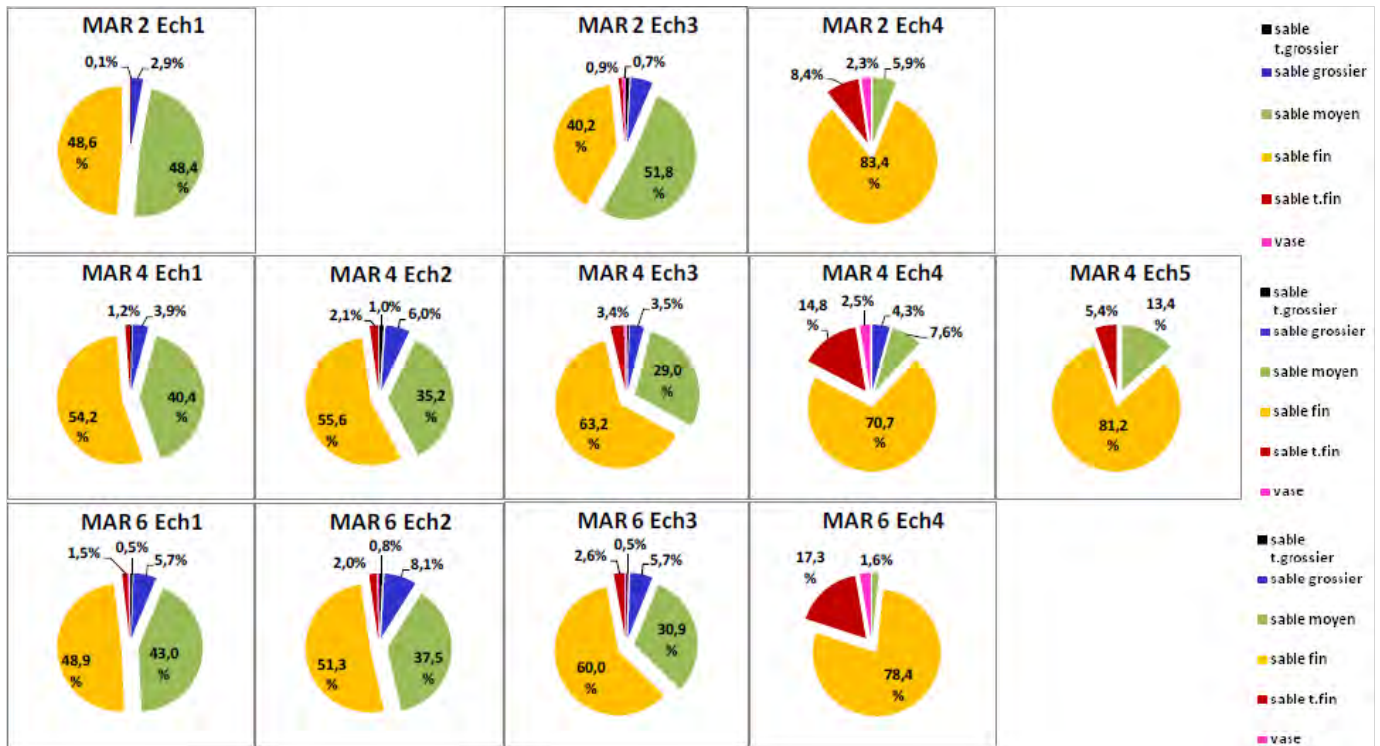


Figure 5.3 Granulométrie des sédiments prélevés sur la plage au sud de la Pointe de la Martinique

Les sédiments prélevés près de la côte devant les falaises de Cap-aux-Meules et Gros-Cap sont en général composés 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.

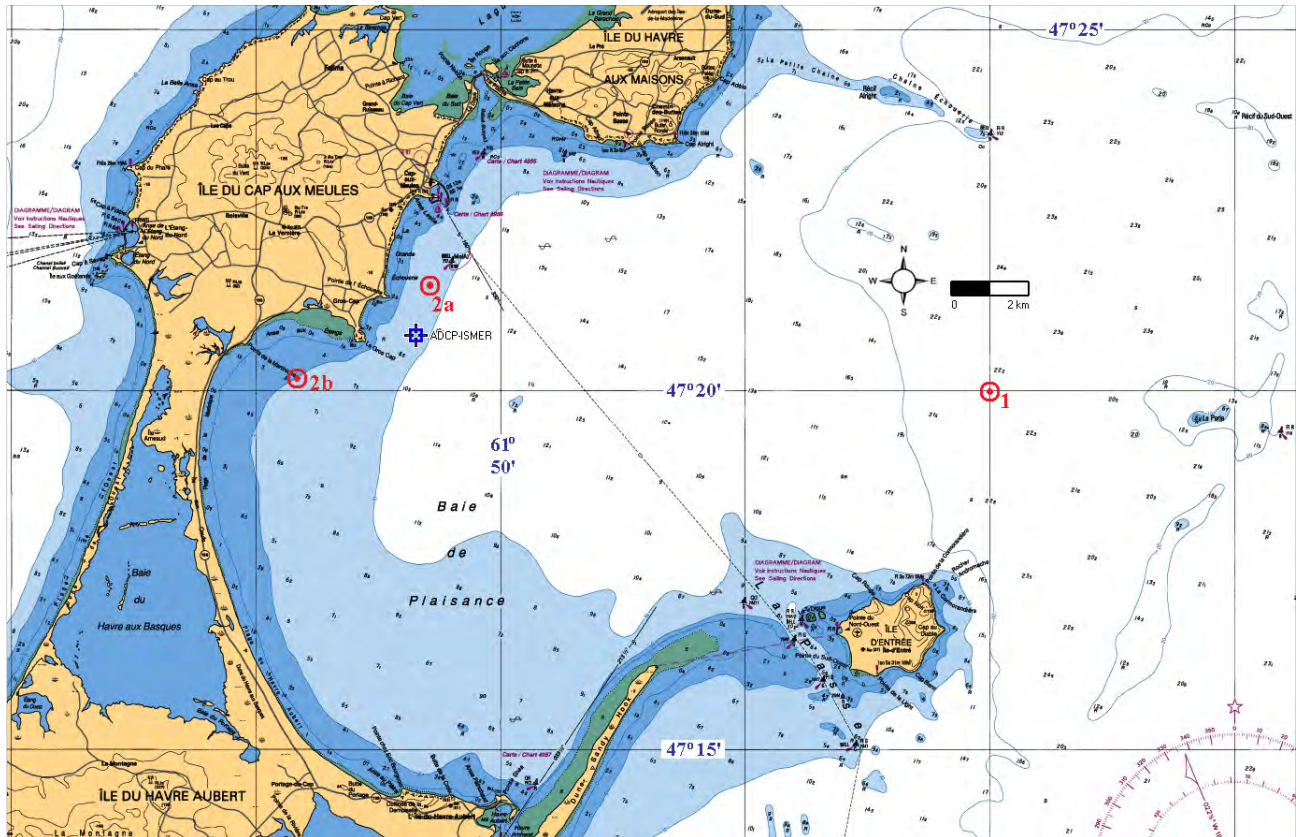


Figure 6.1 Extrait de la carte marine 4024 – Position des points de calcul des fetchs

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

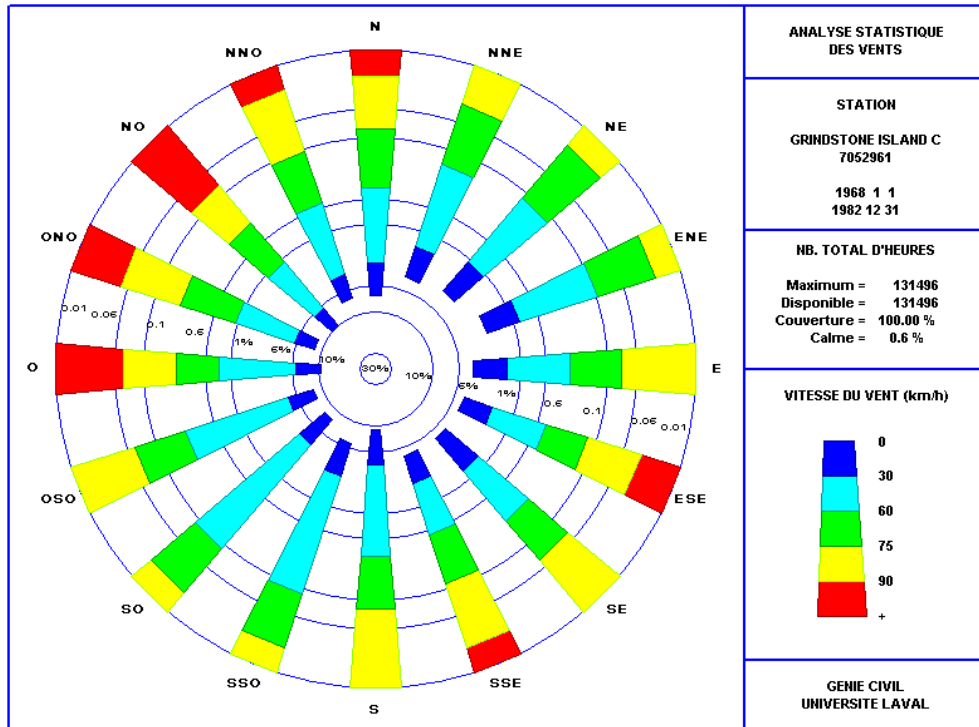


Figure 6.2 Rose des vents – Station Grindstone Island C – 1968 à 1982

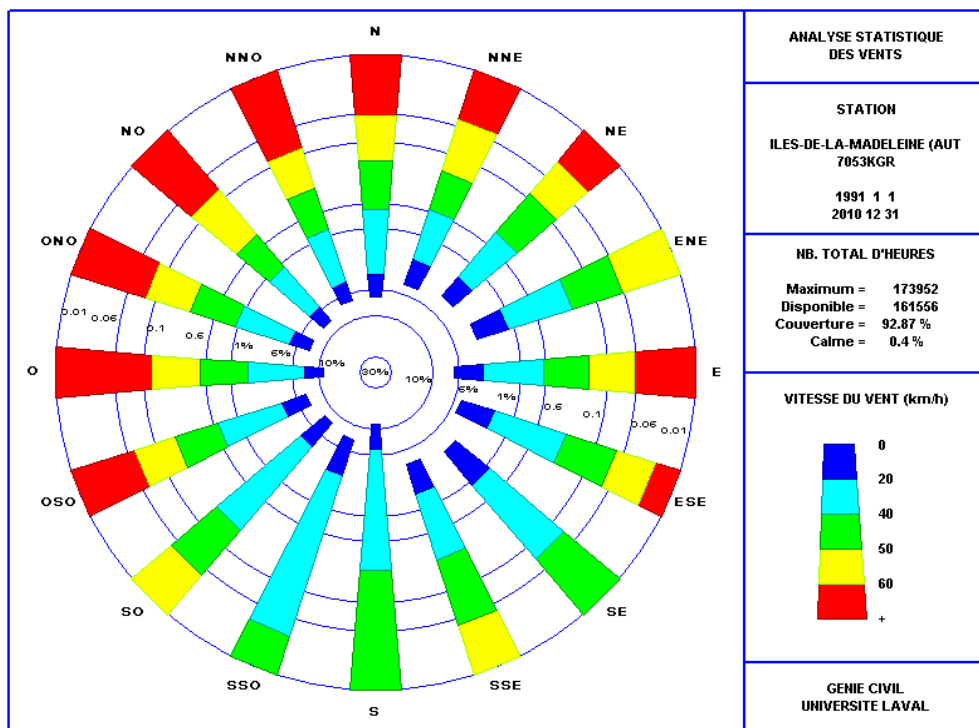


Figure 6.3 Rose des vents – Station Iles-de-la-Madeleine (Aut) – 1991 à 2010

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	0,009	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 lenombre devaleurs 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

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						
PÉRIODE Tp (secondes)																			
HAUTEUR	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13					
Hs	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	&	TOTAL			
(mètres)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	plus	LIGNE	A(%)	B(%)	C(%)	
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	43				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.

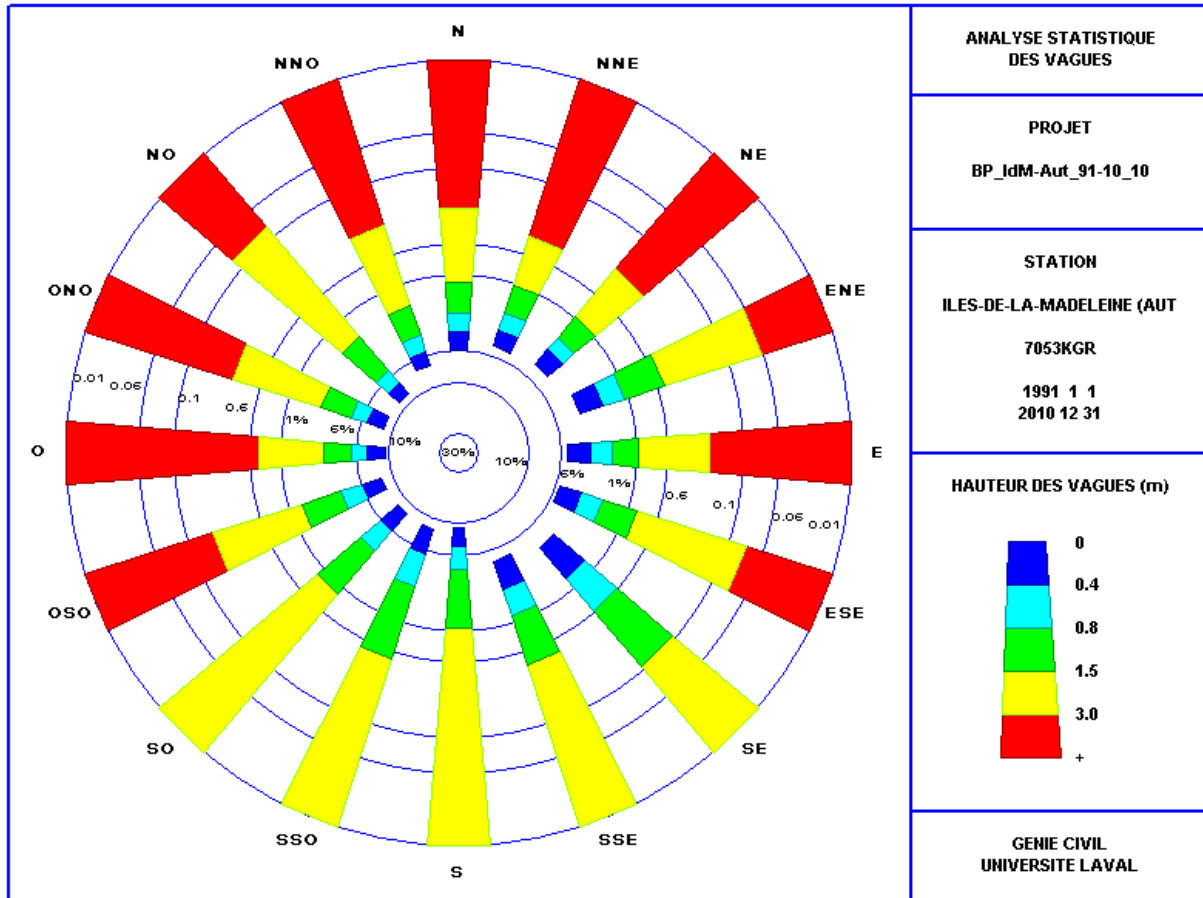


Figure 6.4 Rose des vagues au large de Cap-aux-Meules pour la période 1991 à 2010 (F=1)

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.

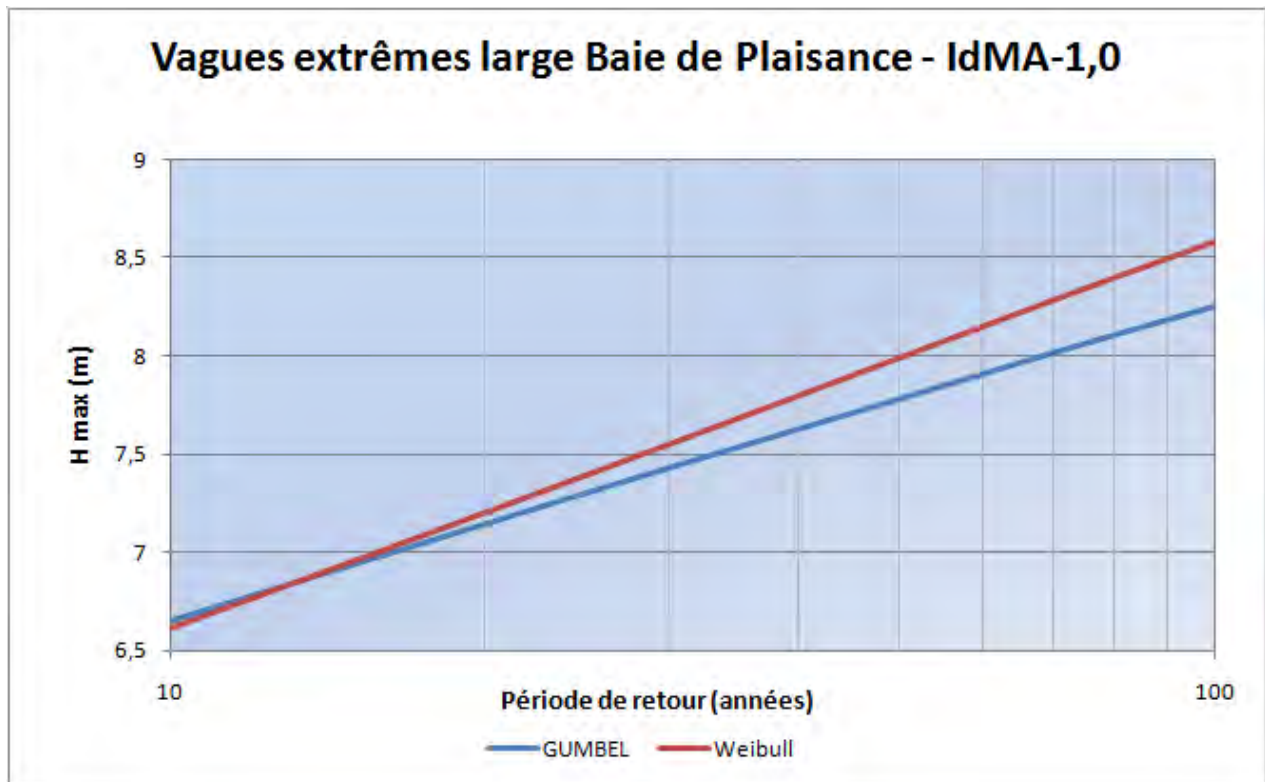


Figure 6.5 Prédiction de Hs au large de Gros-Cap (méthodes de Gumbel et Weibull)

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.

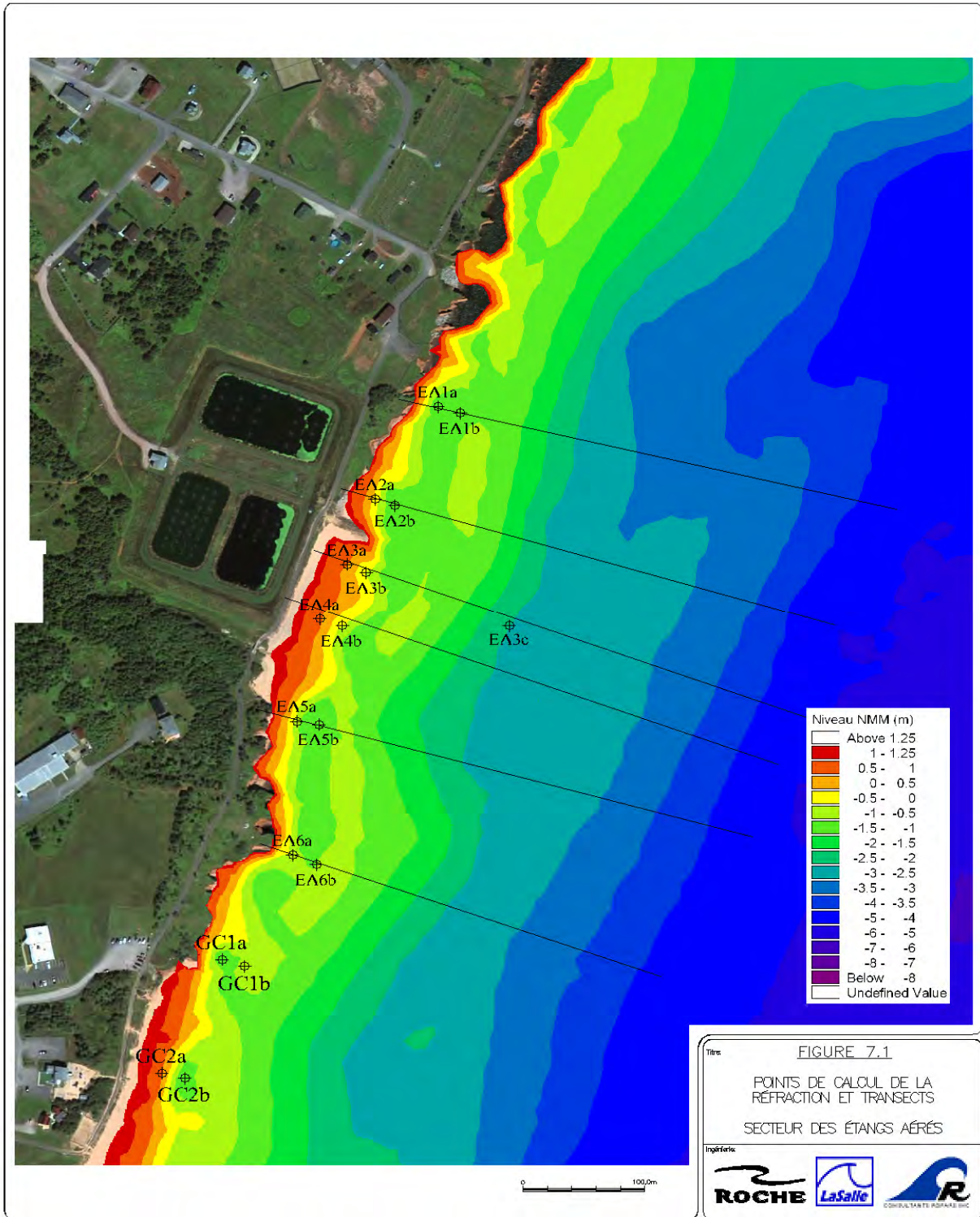


Figure 7.1 – Transects – Secteur des étangs aérés

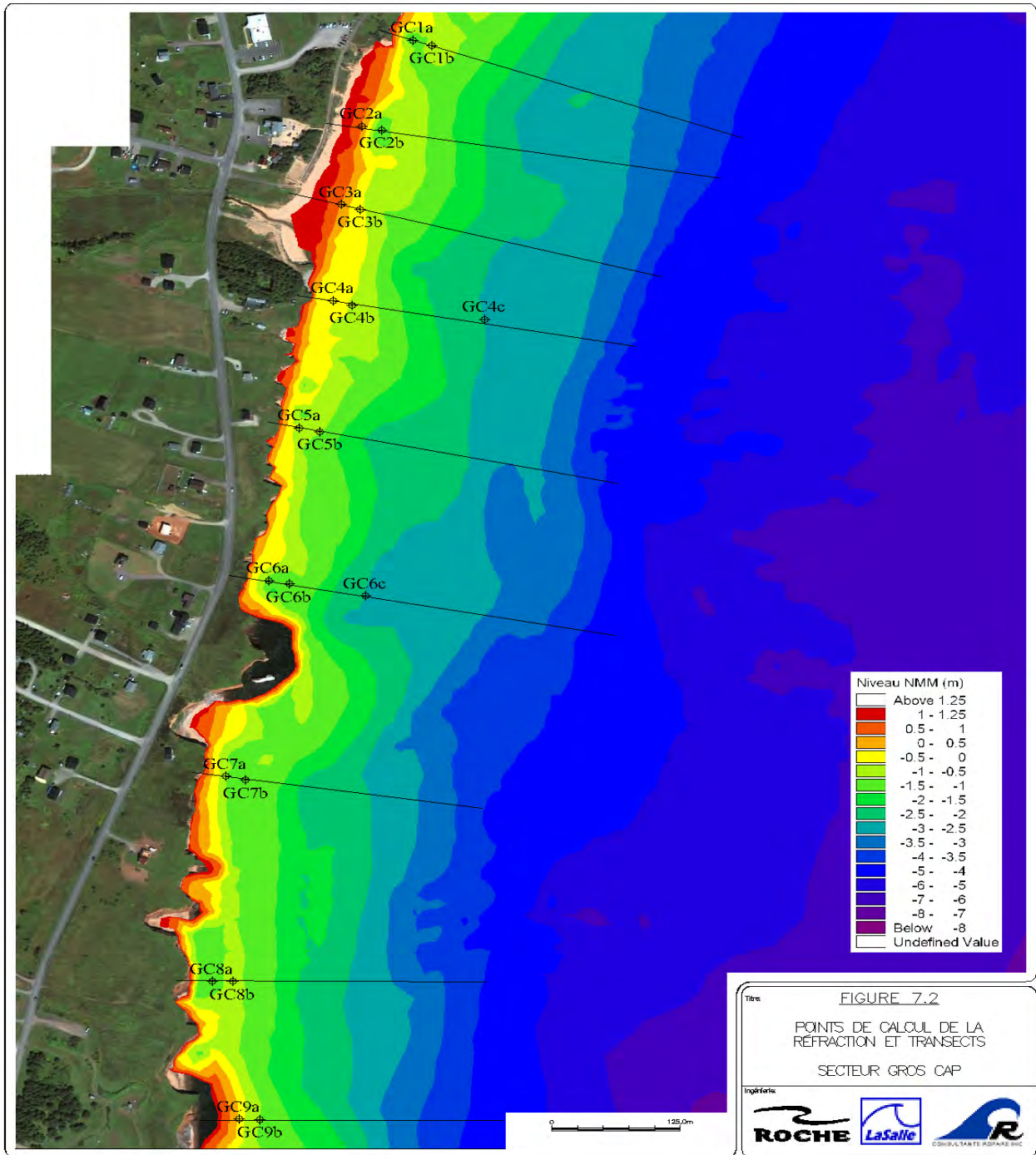


Figure 7.2 – Transects – Secteur de Gros Cap

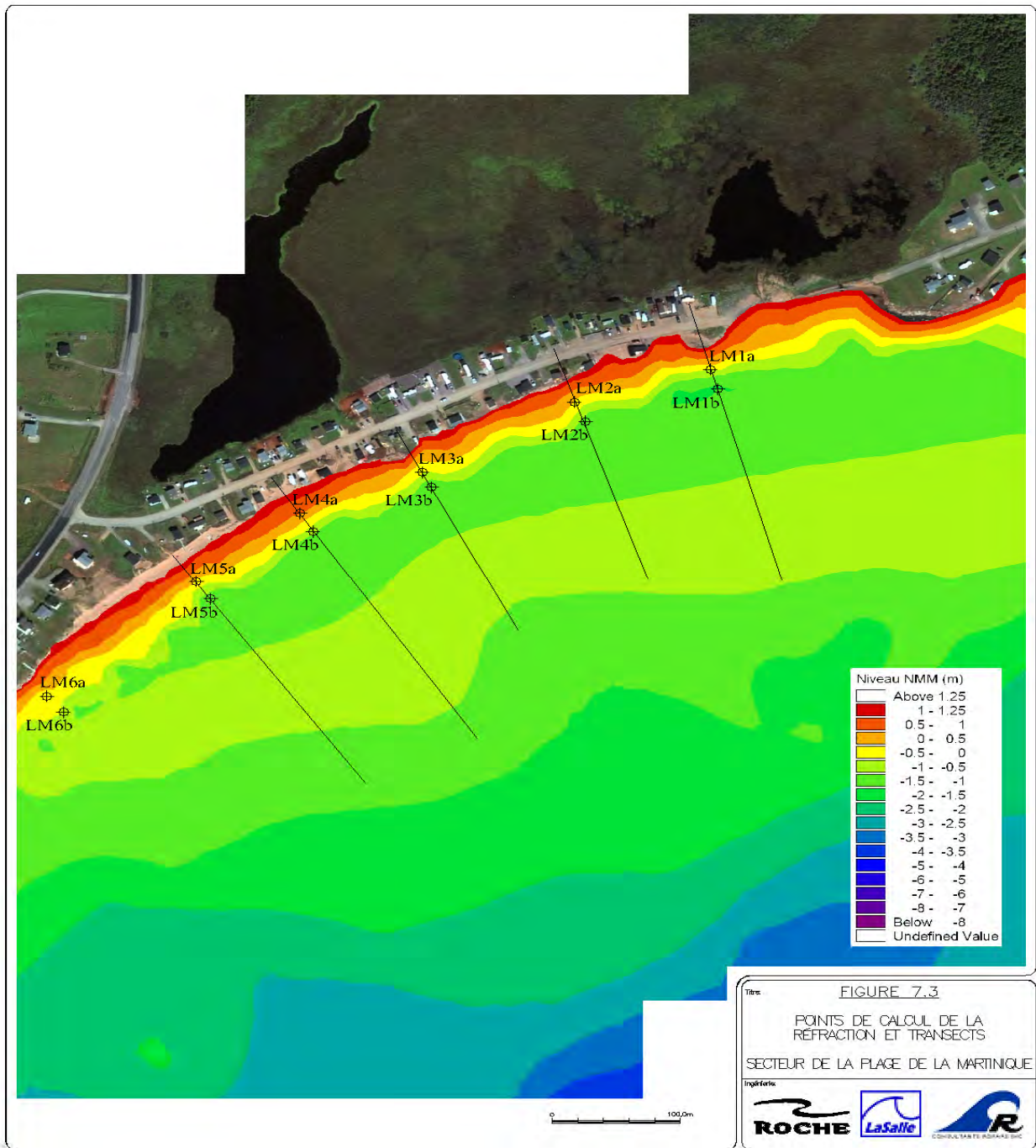


Figure 7.3 – Transects – Secteur de la plage du chemin des Chalets

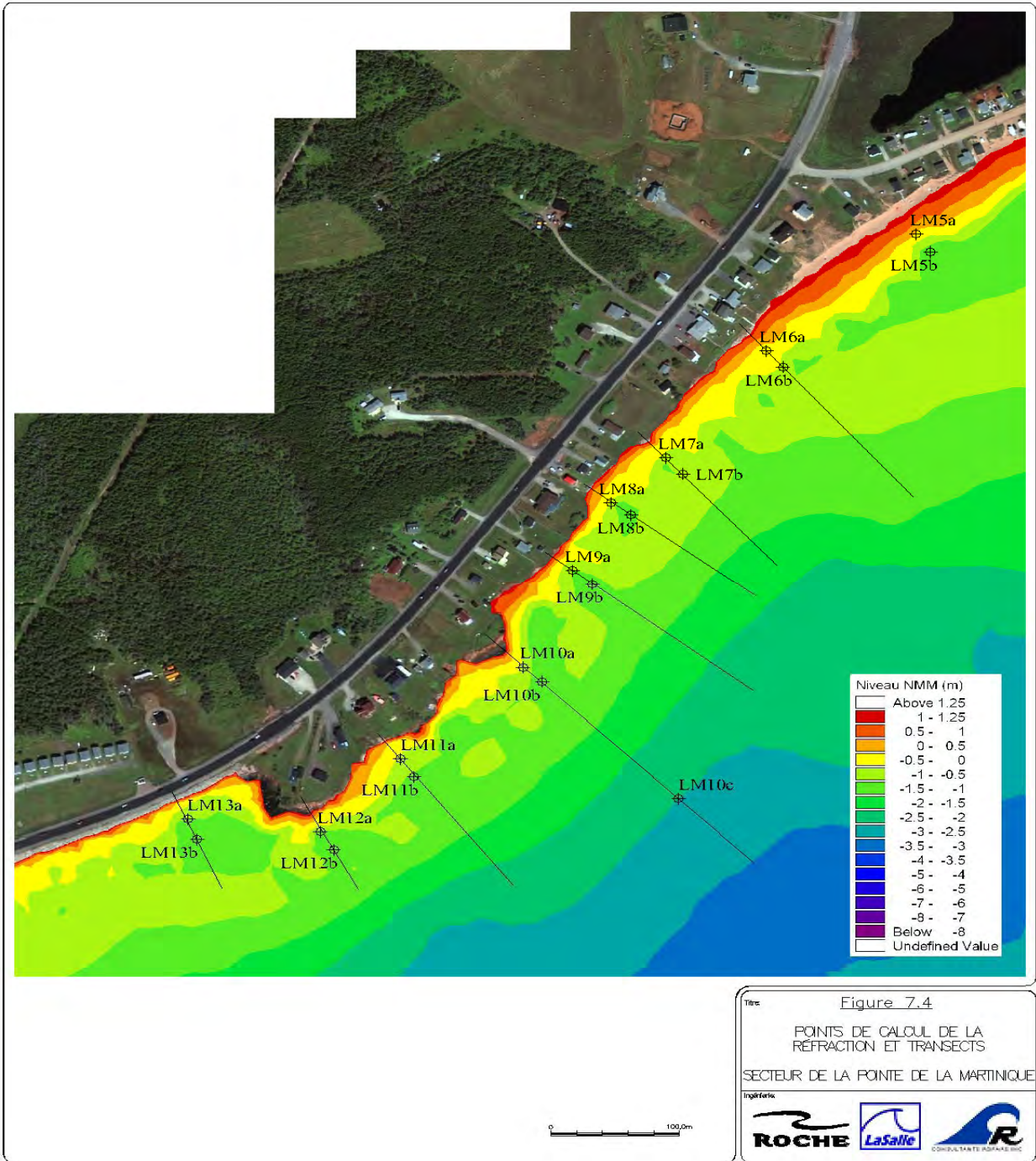


Figure 7.4 – Transects – Secteur de la Pointe de la Martinique

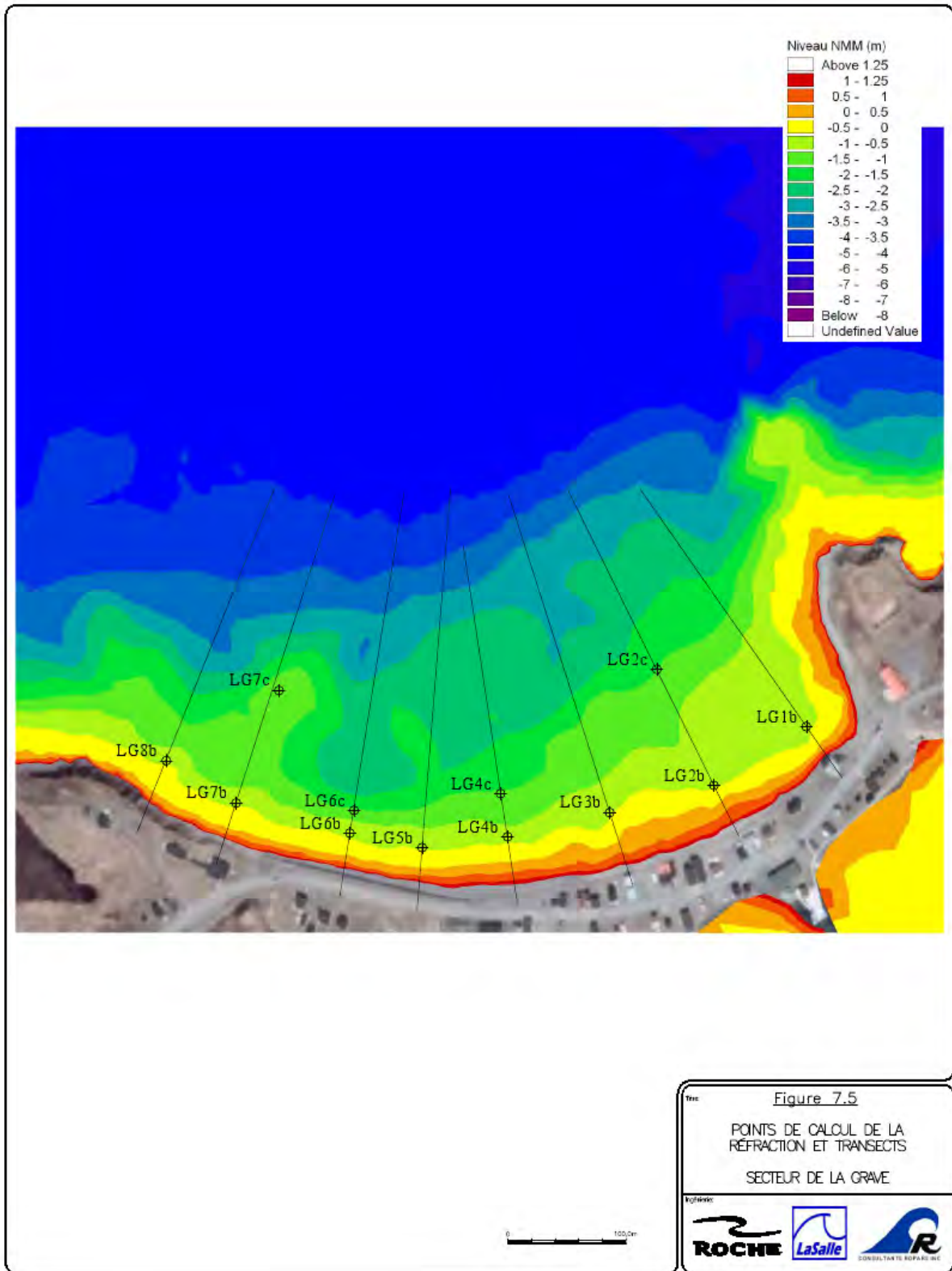


Figure 7.5 – Transects – Secteur de La Grave

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	H_s vague incidente (m)		3.97		5.92		4.12		5.74		4.03		5.57		2.81		4.17		6.00		1.97		2.88		3.99		5.71		4.41		7.08		3.01	
			X	Y	N - 12 s	N - 14 s	NNE - 12 s	NNE - 14 s	NE - 12 s	NE - 14 s	ENE - 10 s	ENE - 12 s	ENE - 14 s	E - 8 s	E - 10 s	E - 12 s	E - 14 s	ESE - 12 s	ESE - 14 s	SE - 10 s																
ÉTANGS AÉRÉS	1	EA1a	277 026	5 248 116	0.231	0.201	0.283	0.212	0.293	0.219	0.406	0.285	0.203	0.548	0.398	0.297	0.213	0.268	0.171	0.380																
	2	EA1b	277 044	5 248 110	0.237	0.208	0.294	0.221	0.305	0.228	0.422	0.296	0.211	0.567	0.413	0.309	0.221	0.279	0.177	0.394																
	3	EA2a	276 974	5 248 034	0.214	0.142	0.191	0.141	0.193	0.146	0.256	0.184	0.134	0.333	0.243	0.191	0.140	0.173	0.112	0.231																
	4	EA2b	276 991	5 248 028	0.236	0.196	0.275	0.205	0.283	0.211	0.393	0.275	0.196	0.533	0.385	0.288	0.206	0.260	0.165	0.370																
	5	EA3a	276 951	5 247 977	0.107	0.075	0.077	0.076	0.107	0.079	0.109	0.102	0.073	0.194	0.129	0.108	0.077	0.072	0.061	0.122																
	6	EA3b	276 967	5 247 969	0.215	0.154	0.214	0.158	0.218	0.163	0.302	0.211	0.150	0.408	0.291	0.220	0.158	0.198	0.127	0.279																
	7	EA3c	277 085	5 247 922	0.210	0.223	0.330	0.312	0.382	0.328	0.517	0.432	0.316	0.655	0.584	0.461	0.333	0.419	0.267	0.535																
	8	EA4a	276 929	5 247 928	0.051	0.092	0.079	0.086	0.077	0.091	0.000	0.072	0.082	0.000	0.122	0.102	0.087	0.065	0.065	0.055																
	9	EA4b	276 947	5 247 922	0.228	0.164	0.225	0.165	0.229	0.171	0.312	0.219	0.157	0.416	0.298	0.227	0.164	0.204	0.131	0.285																
	10	EA5a	276 910	5 247 838	0.221	0.192	0.271	0.202	0.281	0.209	0.389	0.272	0.194	0.525	0.380	0.284	0.203	0.255	0.162	0.361																
	11	EA5b	276 928	5 247 835	0.217	0.200	0.285	0.216	0.298	0.224	0.412	0.291	0.207	0.554	0.406	0.304	0.217	0.274	0.174	0.386																
	12	EA6a	276 908	5 247 719	0.246	0.204	0.286	0.213	0.295	0.220	0.409	0.286	0.203	0.553	0.400	0.298	0.213	0.269	0.171	0.381																
	13	EA6b	276 926	5 247 713	0.242	0.206	0.289	0.216	0.299	0.223	0.414	0.290	0.206	0.558	0.404	0.302	0.216	0.272	0.173	0.386																
GROS-CAP	14	GC1a	276 849	5 247 625	0.226	0.196	0.278	0.208	0.287	0.214	0.398	0.279	0.199	0.539	0.391	0.293	0.210	0.265	0.169	0.376																
	15	GC1b	276 868	5 247 619	0.230	0.200	0.283	0.211	0.292	0.218	0.405	0.284	0.202	0.547	0.397	0.297	0.213	0.268	0.171	0.380																
	16	GC2a	276 799	5 247 525	0.185	0.159	0.225	0.164	0.232	0.169	0.288	0.224	0.157	0.321	0.280	0.233	0.165	0.210	0.133	0.268																
	17	GC2b	276 818	5 247 520	0.223	0.188	0.265	0.198	0.274	0.205	0.380	0.266	0.189	0.512	0.370	0.276	0.198	0.249	0.158	0.351																
	18	GC3a	276 778	5 247 433	0.062	0.082	0.052	0.073	0.049	0.079	0.000	0.050	0.069	0.196	0.065	0.030	0.071	0.044	0.050	0.000																
	19	GC3b	276 797	5 247 428	0.220	0.163	0.226	0.167	0.231	0.172	0.318	0.223	0.159	0.429	0.309	0.232	0.167	0.210	0.134	0.296																
	20	GC4a	276 771	5 247 321	0.218	0.160	0.223	0.164	0.228	0.170	0.316	0.220	0.157	0.429	0.308	0.230	0.165	0.208	0.132	0.295																
	21	GC4b	276 789	5 247 316	0.229	0.188	0.262	0.195	0.270	0.201	0.372	0.260	0.186	0.501	0.362	0.272	0.195	0.245	0.156	0.346																
	22	GC4c	276 918	5 247 300	0.203	0.218	0.324	0.313	0.377	0.331	0.517	0.438	0.323	0.663	0.589	0.469	0.340	0.427	0.273	0.536																
	23	GC5a	276 738	5 247 173	0.214	0.189	0.266	0.199	0.275	0.206	0.379	0.266	0.190	0.510	0.369	0.278	0.200	0.250	0.160	0.353																
	24	GC5b	276 758	5 247 169	0.205	0.206	0.297	0.234	0.317	0.242	0.440	0.315	0.226	0.589	0.439	0.330	0.237	0.298	0.190	0.418																
	25	GC6a	276 708	5 246 996	0.209	0.203	0.291	0.223	0.307	0.232	0.424	0.301	0.215	0.568	0.417	0.313	0.225	0.282	0.180	0.395																
	26	GC6b	276 728	5 246 992	0.218	0.218	0.314	0.245	0.333	0.253	0.461	0.329	0.235	0.617	0.458	0.344	0.247	0.311	0.198	0.438																
	27	GC6c	276 802	5 246 978	0.212	0.231	0.343	0.322	0.394	0.337	0.549	0.444	0.323	0.712	0.608	0.471	0.339	0.427	0.272	0.565																
	28	GC7a	276 666	5 246 768	0.242	0.200	0.280	0.207	0.288	0.215	0.396	0.278	0.198	0.524	0.386	0.290	0.208	0.261	0.167	0.368																
	29	GC7b	276 685	5 246 764	0.231	0.220	0.314	0.239	0.329	0.247	0.455	0.321	0.229	0.608	0.446	0.335	0.240	0.302	0.192	0.424																
	30	GC8a	276 653	5 246 530	0.219	0.197	0.279	0.209	0.290	0.216	0.401	0.280	0.199	0.539	0.390	0.292	0.208	0.262	0.167	0.370																
31	GC8b	276 673	5 246 530	0.226	0.207	0.294	0.221	0.305	0.228	0.422	0.296	0.211	0.567	0.412	0.309	0.221	0.278	0.177	0.393																	
32	GC9a	276 679	5 246 370	0.176	0.108	0.139	0.097	0.133	0.099	0.164	0.121	0.090	0.219	0.167	0.126	0.095	0.114	0.075	0.169																	
33	GC9b	276 699	5 246 370	0.239	0.223	0.318	0.244	0.335	0.254	0.462	0.328	0.235	0.614	0.455	0.343	0.246	0.308	0.197	0.428																	
LA MARTINIQUE	34	LM1a	273 903	5 245 793	0.128	0.127	0.183	0.150	0.199	0.156	0.270	0.204	0.146	0.336	0.281	0.214	0.153	0.194	0.123	0.258																
	35	LM1b	273 909	5 245 774	0.118	0.119	0.172	0.148	0.190	0.154	0.258	0.203	0.146	0.317	0.276	0.215	0.154	0.195	0.124	0.247																
	36	LM2a	273 797	5 245 762	0.134	0.125	0.177	0.135	0.186	0.139	0.256	0.180	0.128	0.333	0.253	0.188	0.134	0.169	0.107	0.241																
	37	LM2b	273 805	5 245 744	0.127	0.128	0.185	0.157	0.203	0.163	0.275	0.215	0.154	0.338	0.293	0.227	0.162	0.206	0.130	0.264																
	38	LM3a	273 678	5 245 696	0.124	0.125	0.181	0.151	0.198	0.157	0.268	0.206	0.147	0.331	0.283	0.217	0.155	0.196	0.125	0.256																
	39	LM3b	273 685	5 245 682	0.122	0.123	0.179	0.153	0.198	0.159	0.268	0.209	0.149	0.331	0.286	0.220	0.157	0.199	0.126	0.257																
	40	LM4a	273 583	5 245 658	0.107	0.031	0.048	0.052	0.087	0.055	0.000	0.000	0.030	0.117	0.000	0.000	0.037	0.000	0.061	0.134																
	41	LM4b	273 593	5 245 640	0.133	0.133	0.193	0.161	0.211	0.168	0.287	0.220	0.158	0.355	0.302	0.232	0.167	0.210	0.134	0.273																
	42	LM5a	273 502	5 245 593	0.147	0.134	0.189	0.139	0.195	0.146	0.270	0.179	0.128	0.371	0.252	0.185	0.133	0.166	0.106	0.250																
	43	LM5b	273 513	5 245 577	0.134	0.134	0.194	0.160	0.211	0.166	0.289	0.218	0.156	0.362	0.301	0.230	0.164	0.208	0.132	0.274																
	44	LM6a	273 385	5 245 485	0.143	0.139	0.200	0.160	0.215	0.166	0.295	0.216	0.154	0.376	0.300	0.227	0.162	0.205	0.130	0.278																
	45	LM6b	273 398	5 245 470	0.136	0.137	0.200	0.171	0.221	0.178	0.300	0.234	0.169	0.371	0.319	0.248	0.177	0.225	0.143	0.285																
	46	LM7a	273 307	5 245 386	0.117	0.119	0.172	0.158	0.193	0.165	0.256	0.217	0.160	0.309	0.284	0.233	0.169	0.213	0.136	0.244																
	47	LM7b	273 320	5 245 371	0.113	0.116	0.168	0.162	0.190	0.172	0.252	0.227	0.174	0.303	0.285	0.249	0.184	0.229	0.148	0.240																
	48	LM8a	273 264	5 245 344	0.126	0.128	0.187	0.169	0.209	0.176	0.280	0.232	0.169	0.337	0.307	0.247	0.178	0.225	0.143	0.265																
	49	LM8b	273 280	5 245 333	0.124	0.127	0.184	0.171	0.208	0.179	0.277	0.236	0.175	0.334	0.308	0.254	0.184	0.232	0.148	0.263																
	50	LM9a	273 235	5 245 281	0.127	0.130	0.190	0.178	0.214	0.187	0.285	0.246	0.183	0.344	0.319	0.265	0.193	0.242	0.155	0.271																
51	LM9b	273 250	5 245 269	0.125	0.128	0.187	0.176	0.211	0.185	0.281	0.244	0.182	0.340	0.316	0.264	0.192	0.241	0.155	0.267																	
52	LM10a	273 196	5 245 191	0.138	0.140	0.204	0.179	0.226	0.186	0.303	0.243	0.175	0.368	0.327	0.257	0.184	0.232	0.147	0.286																	
53	LM10b	273 211	5 245 177	0.130	0.134	0.195	0.188	0.222	0.199	0.294	0.262	0.200	0.351	0.333	0.287	0.211	0.263	0.170	0.278																	
54	LM10c	273 317	5 245 069	0.125	0.130	0.190	0.192	0.218	0.207	0.288	0.274	0.240	0.345	0.332	0.318	0.263	0.305	0.216	0.273																	
55	LM11a	273 100	5 245 106	0.156	0.155	0.224	0.183	0.243	0.190	0.328	0.247	0.176	0.407	0.340	0.259	0.185	0.234	0.148	0.308																	
56	LM11b	273 111	5 245 089	0.146	0.150	0.218	0.201	0.247	0.211	0.327	0.277	0.204	0.388	0.362	0.296	0.214	0.270	0.172	0.308																	
57	LM12a	273 038	5 245 038	0.148	0.150	0.217	0.187	0.239	0.194	0.320	0.254	0.183	0.389	0.342	0.268	0.192	0.243	0.154	0.301																	
58	LM12b	273 049																																		

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.

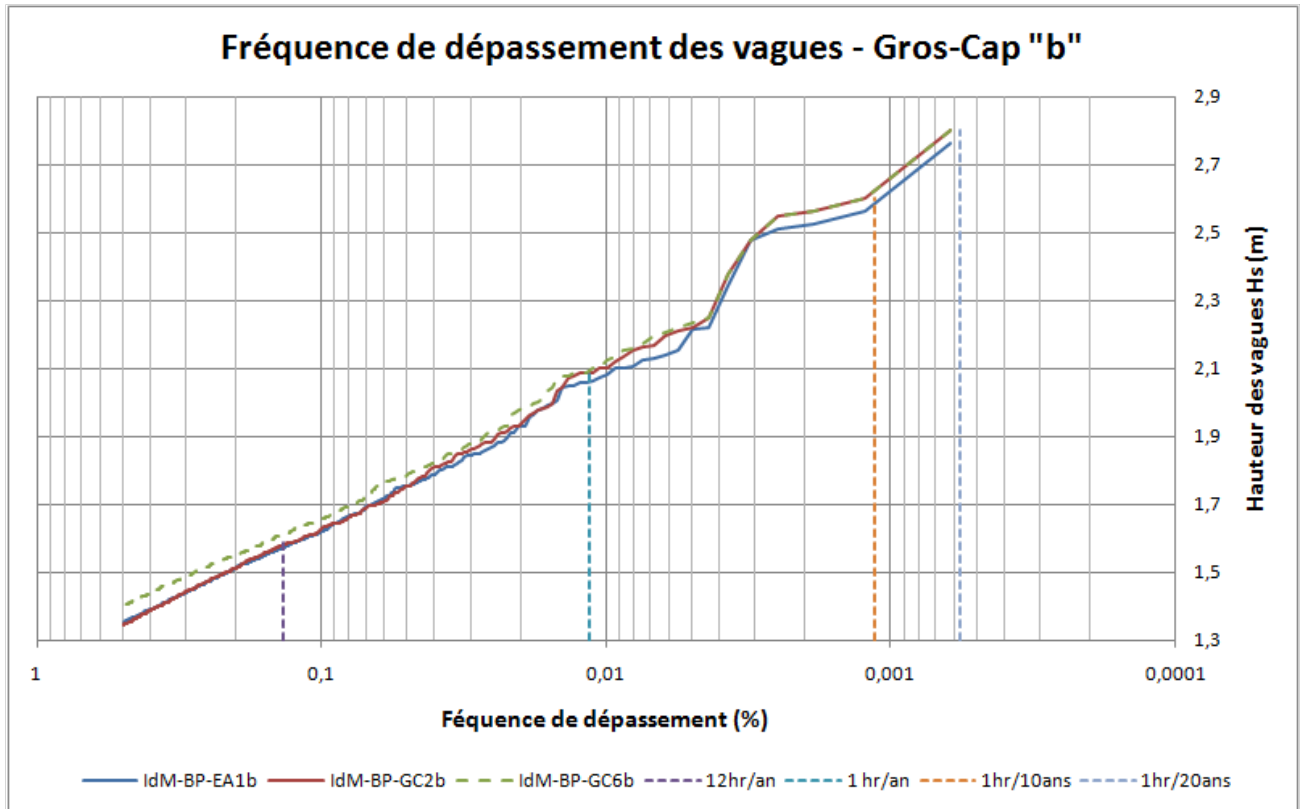


Figure 7.6 Fréquence de dépassement des hauteurs de vague – Secteur de Gros-Cap + Étangs aérés

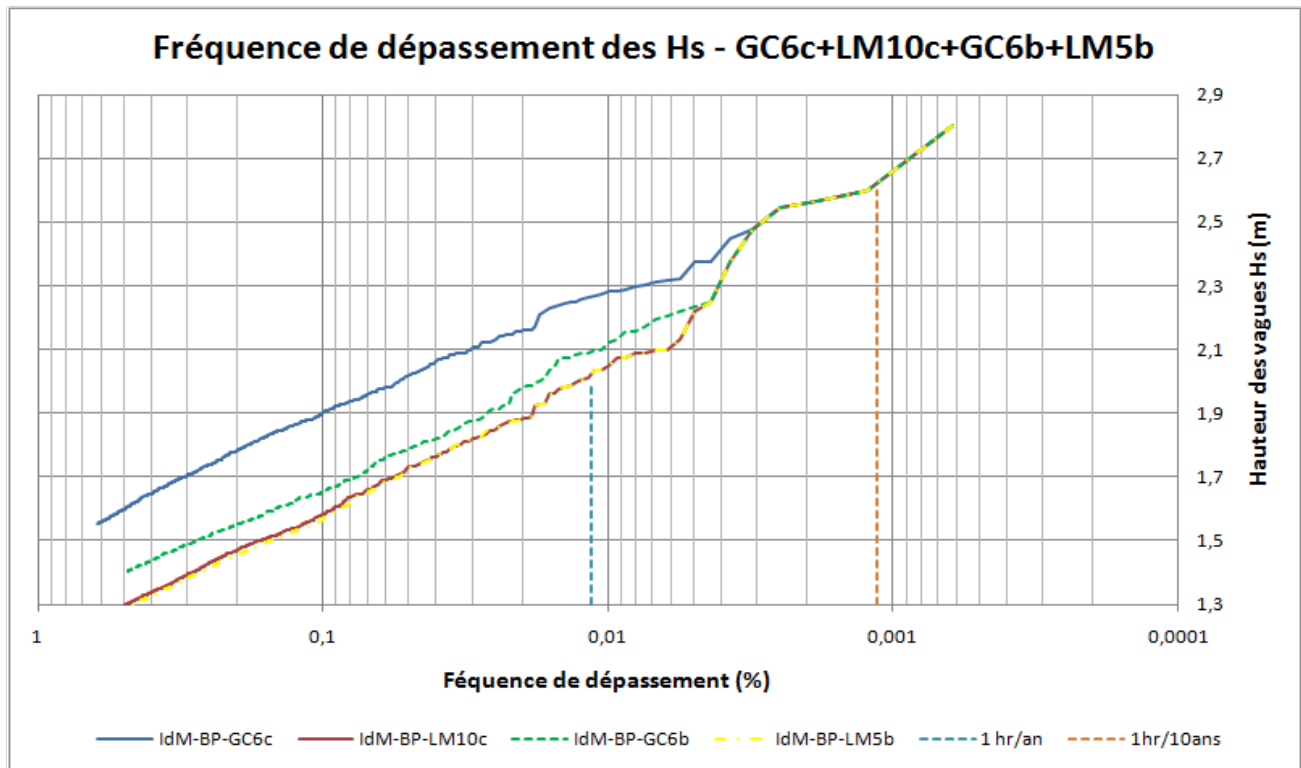


Figure 7.7 Fréquence de dépassement des hauteurs de vague – Secteur Gros-Cap + Martinique

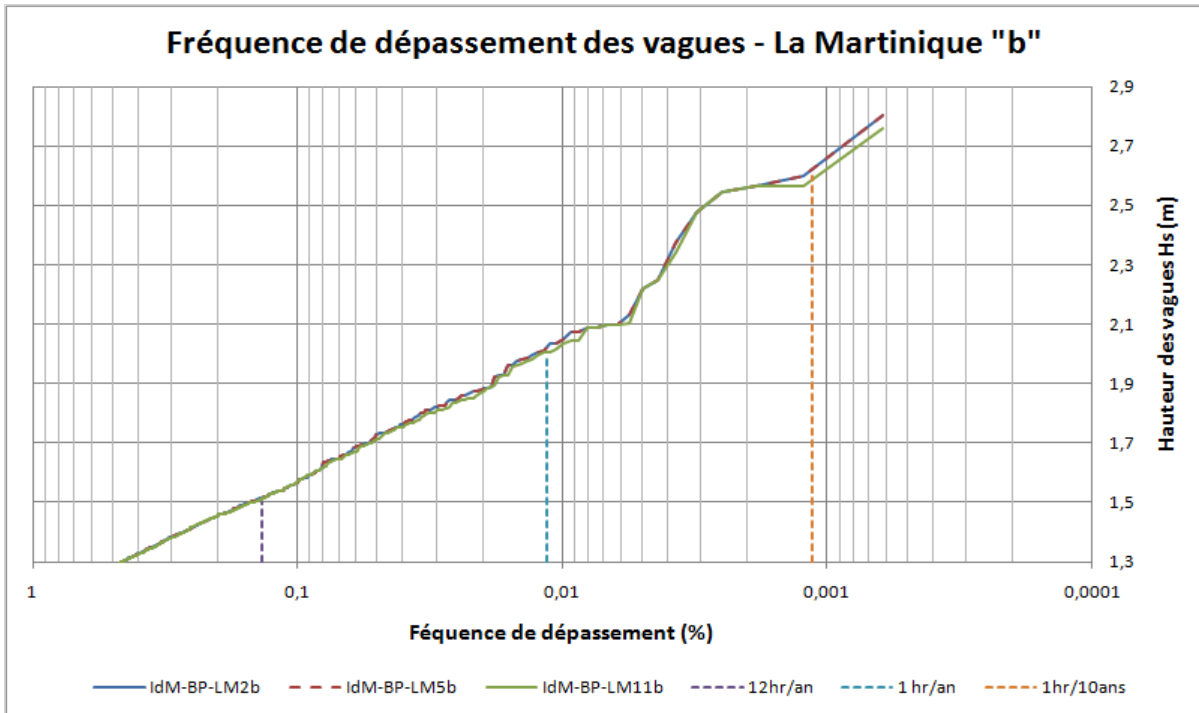


Figure 7.8 Fréquence de dépassement des hauteurs de vague – Secteur de La Martinique

La figure 7.8 met en évidence la quasi-superposition entre les valeurs de fréquence de dépassement des points LM2b et LM5b. Seul le point LM2b sera retenu pour la suite des analyses.

Les calculs de hauteur de vagues prédites pour des périodes de retour jusqu'à 100 ans ont ensuite été faits. La figure suivante présente les fréquences de dépassement des hauteurs de vagues réfractées au niveau des sept points retenus pour l'analyse.

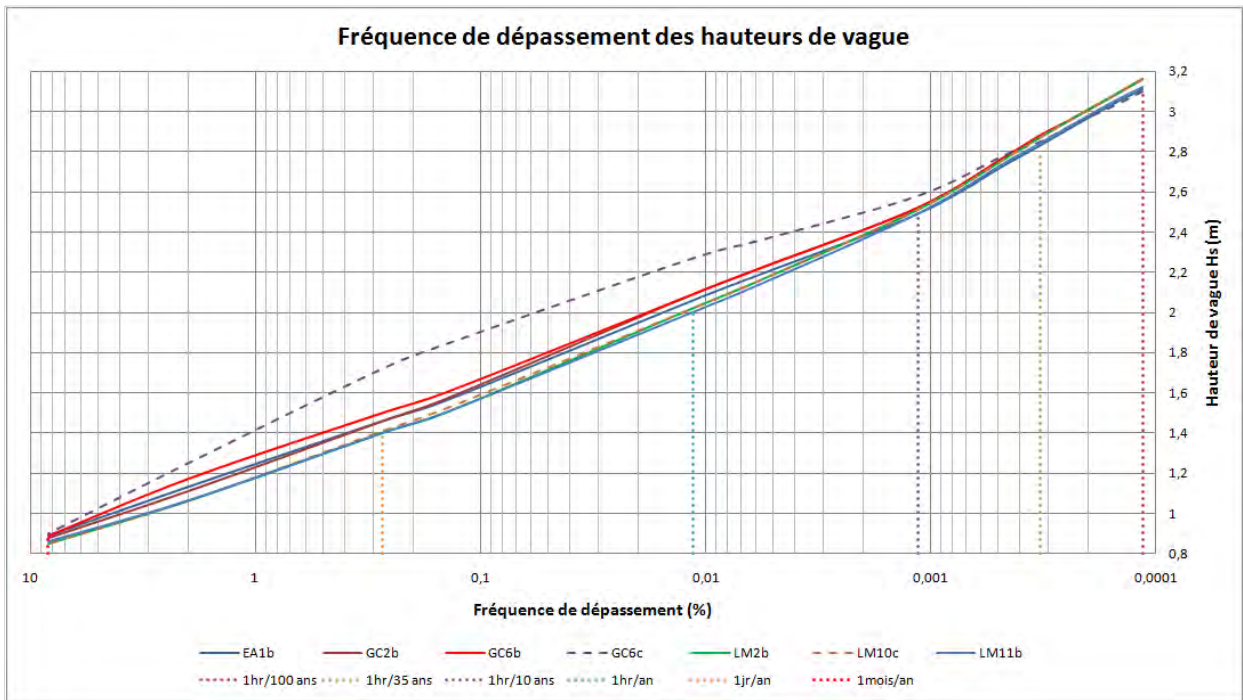


Figure 7.9 Fréquence de dépassement des hauteurs de vague – Secteurs nord de la Baie de Plaisance

La figure précédente permet de mettre en évidence la relative homogénéité des hauteurs de vagues pour tous les points étudiés. Seul le point GC6c situé au large de Gros-Cap se distingue un peu des autres pour les récurrences de 1 jour par an à 1 heure par 10 ans par des hauteurs de vagues légèrement supérieures. Par contre, toutes les stations sont pratiquement identiques au niveau de la prévision de hauteur de vagues pour des périodes de retour supérieures à 10 ans.

On parle donc d'une hauteur de vague réfractée de l'ordre de 0,9 m se produisant une fois par mois à une hauteur de vague de 3,1 m se produisant une fois tous les 100 ans pour le secteur Nord de la Baie de Plaisance.

Pour le secteur de La Grave, les figures suivantes représentent les courbes de fréquence de dépassement des vagues pour les deux points de calcul retenus (LG4b et LG7b), courbes établies à partir des séries temporelles de vagues réfractées, puis les courbes incluant les extrapolations pour des périodes de récurrences allant jusqu'à une heure dans 100 ans.

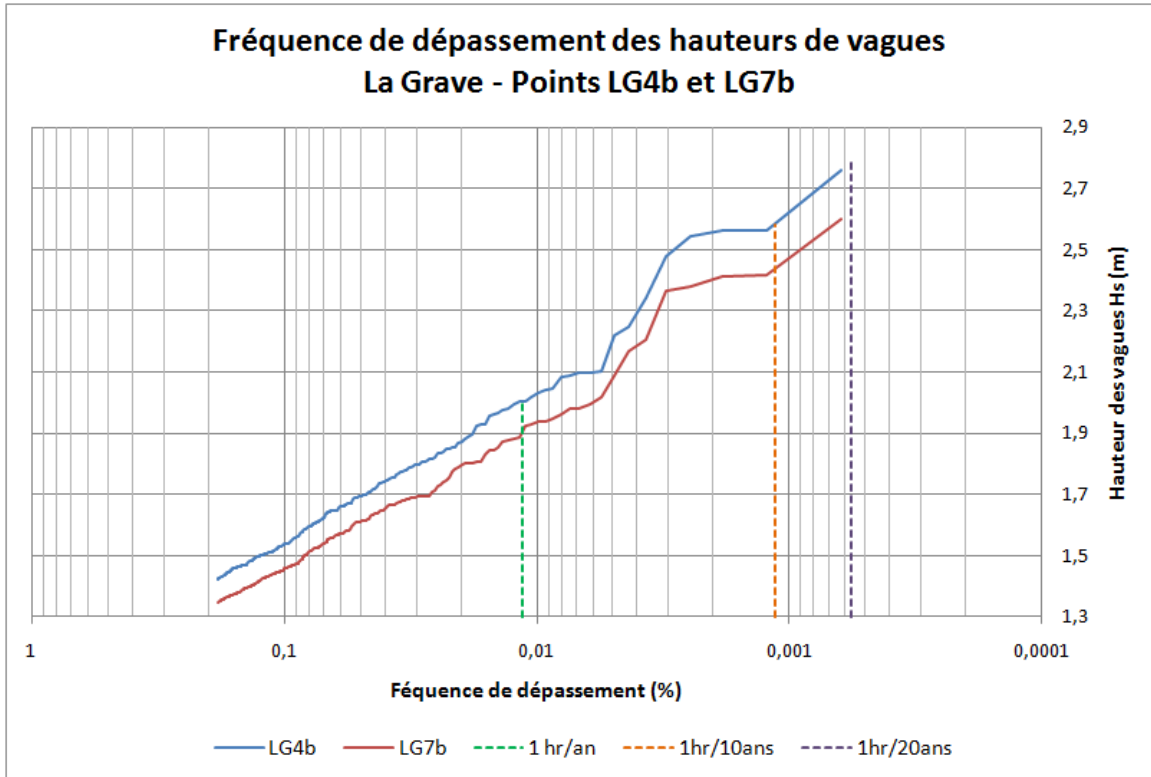


Figure 7.10 Fréquence de dépassement des hauteurs de vague – Secteur La Grave

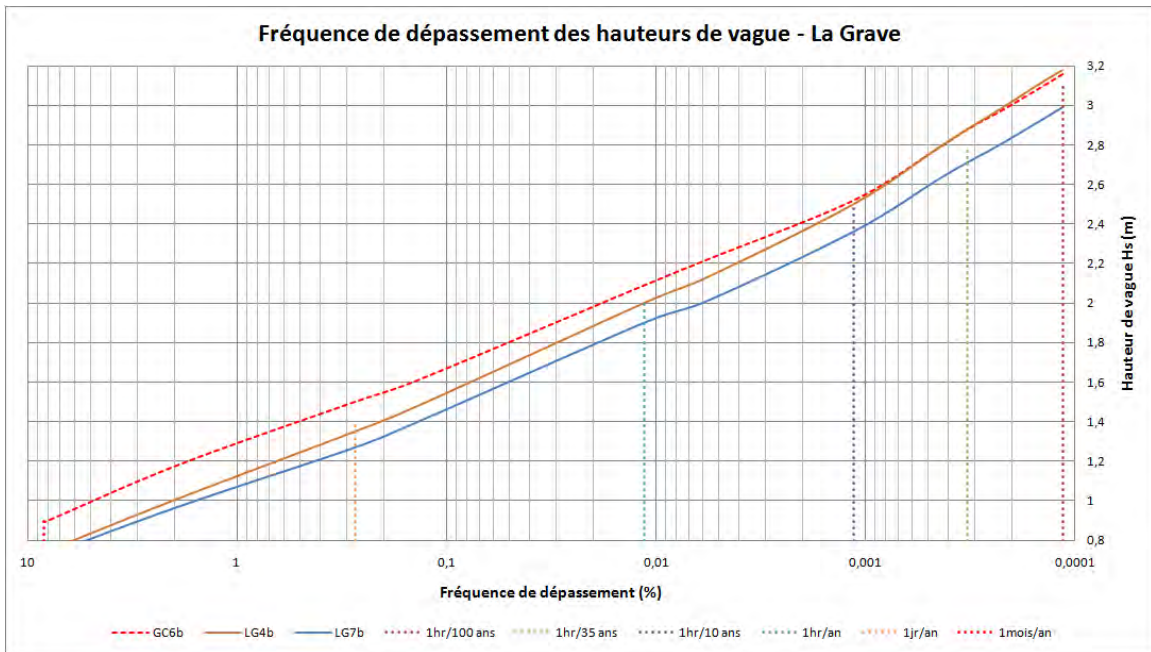


Figure 7.11 Prédiction de dépassement de hauteur de vague – Secteur La Grave

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.

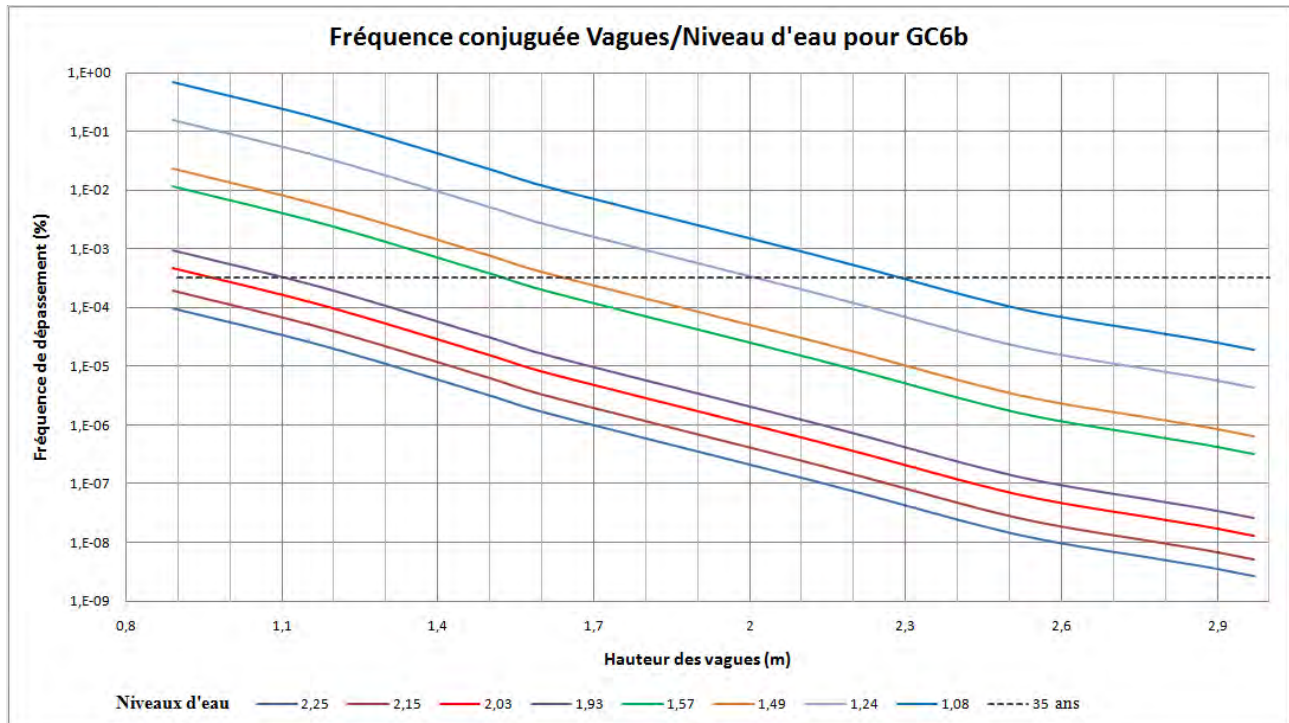


Figure 7.12 Fréquence conjuguée des vagues et niveaux d'eau pour GC6b

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.

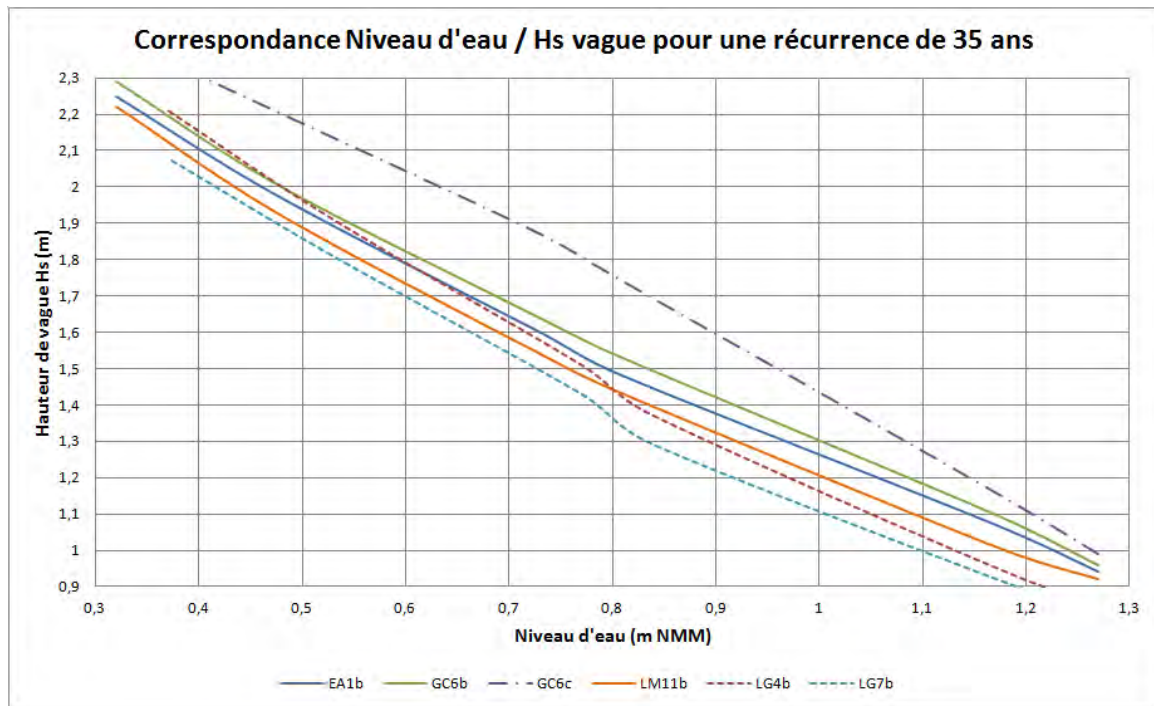


Figure 7.13 Correspondance entre vagues et niveaux d'eau pour une récurrence de 35 ans pour le secteur nord de la Baie de Plaisance et le secteur de La Grave.

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

« extraire » les sédiments du secteur et les envoyer plus au sud ou plus au large. Une étude approfondie de la circulation des sédiments de recharge de plage devrait être effectuée avant de réaliser tout projet de ce type devant les étangs aérés.

8.2.2 Secteur de Gros-Cap

La figure 8.2 présente pour le de Gros-Cap 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 et du NE (figures 8.2a et 8.2b), les courants littoraux sont orientés vers le sud. Pour les vagues en provenance de l'est et de l'ESE (figures 8.2c et 8.2d), les courants sont principalement orientés vers le nord, à l'exception de la portion nord du secteur, où les courants sont moins bien organisés et de directions variables. Pour ces deux directions de vagues, on observe également au large la formation de grands courants de retour, qui semblent être cohérents avec les figures sédimentaires présentes sur la bathymétrie de haute résolution (figure 8.6b).

On remarque qu'à mi-chemin de la figure le long de la côte, la zone où la route se situe très près de la falaise en érosion est le site d'intenses courants littoraux lors des tempêtes d'est et d'ESE. Cette particularité pourrait expliquer une partie des problèmes d'érosion spécifiques à cet endroit de la côte de Gros-Cap.

Un peu plus au nord, les sédiments devant la plage de la Garderie ont tendance à être évacués vers le large lors des tempêtes du NE, de l'est et de l'ESE. L'intensité des courants littoraux devant la plage indique que des épis perpendiculaires à la côte seraient indispensables pour stabiliser des sédiments de recharge de plage qu'on tenterait de mettre en place à cet endroit. Une étude approfondie de la circulation des sédiments de recharge de plage devrait être effectuée avant de réaliser tout projet de ce type devant la plage de la Garderie.

8.2.3 Secteur de La Martinique

Les figures 8.3 et 8.4 présentent respectivement les courants littoraux obtenus dans les secteurs du chemin des Chalets et de la Pointe de la Martinique.

Dans les deux secteurs, les courants littoraux sont orientés systématiquement vers le sud-ouest. Ce résultat s'applique non seulement pour les quatre cas de vagues illustrés aux figures 8.3 et 8.4, mais aussi à tous les scénarios de vagues modélisés (voir autres images sur le cd-rom du rapport).

Les résultats de modélisation numérique pour ce secteur concordent bien avec l'analyse des photos aériennes du site qui, par la dérive du ruisseau visible sur les photos, révèle aussi un transport littoral prédominant vers le sud-ouest.

Pour les tempêtes du NE, de l'est et de l'ESE, on voit très bien l'intense courant littoral qui se développe dans le « chenal » parallèle au rivage à proximité de la plage et qui empêche les sédiments de se déposer sur la plage. Pour les tempêtes d'est et d'ESE, l'intensité des courants littoraux plus au large est remarquable et les courants deviennent particulièrement violents (>0,5 m/s) à l'extrémité sud de la Pointe de la Martinique. Tout sédiment qui se trouverait

Érosion côtière baie de Plaisance

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.

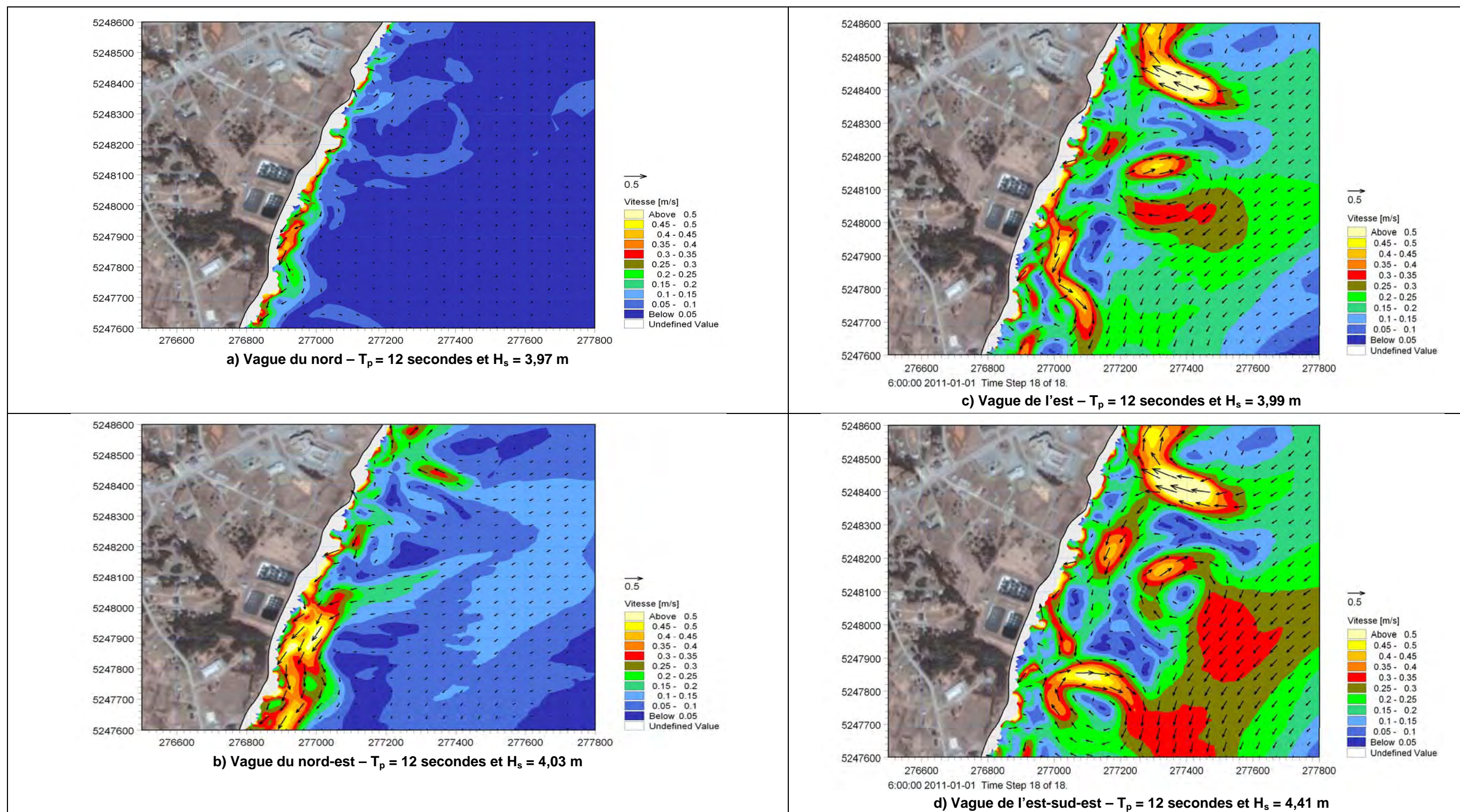


Figure 8.1 : Courants littoraux dans le secteur des étangs aérés

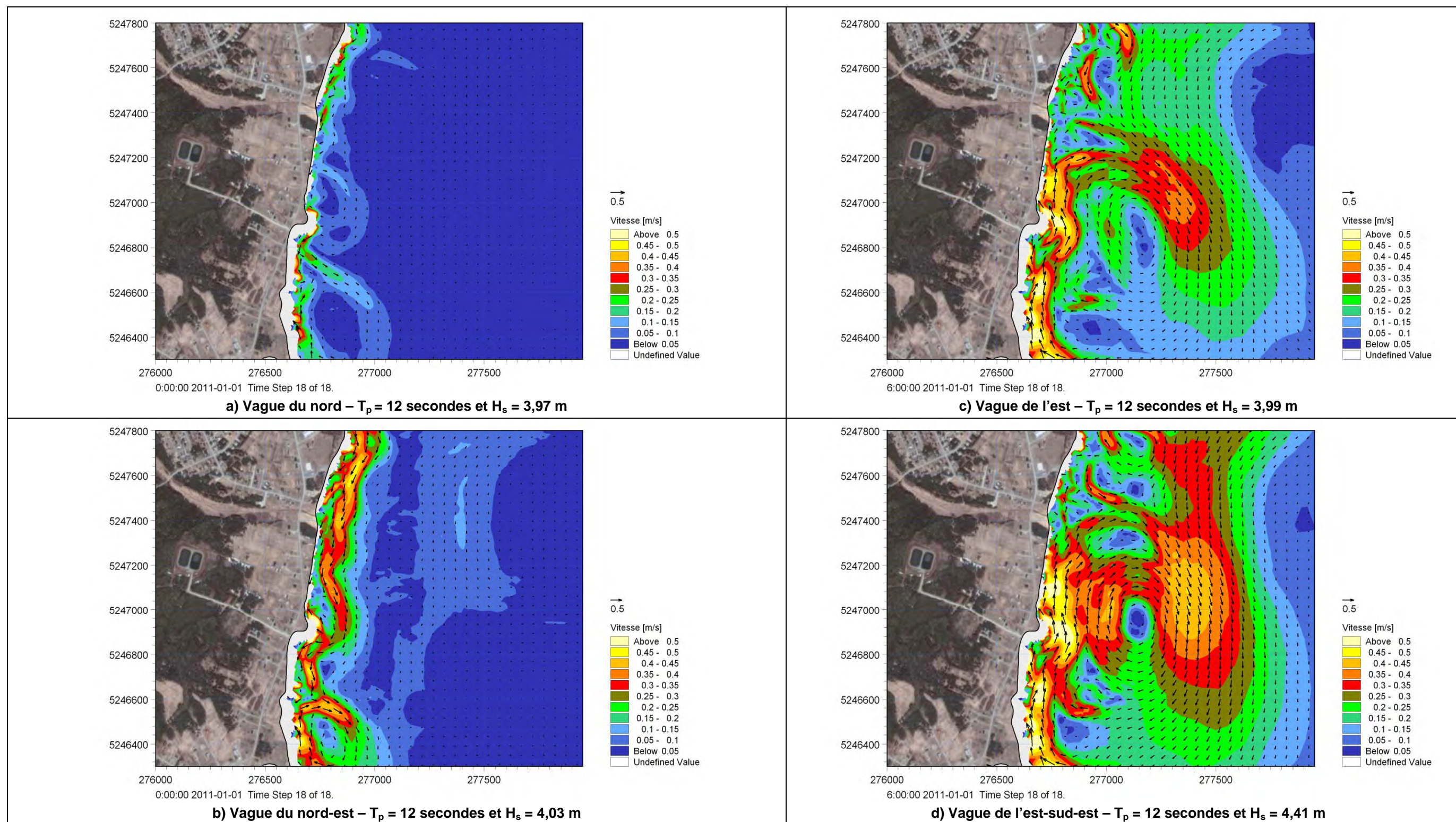


Figure 8.2 : Courants littoraux dans le secteur de Gros-Cap

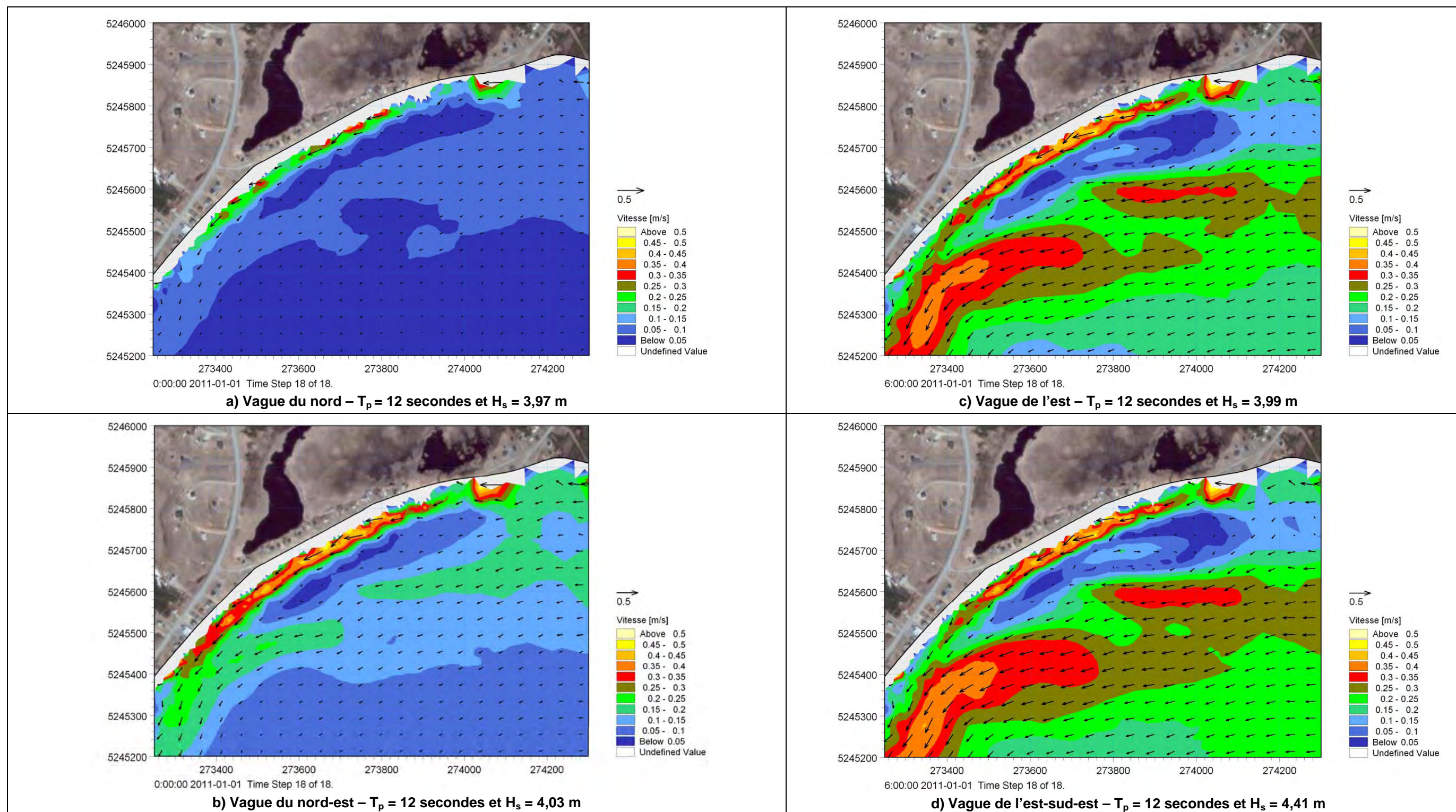


Figure 8.3 : Courants littoraux dans le secteur de la Plage de la Martinique

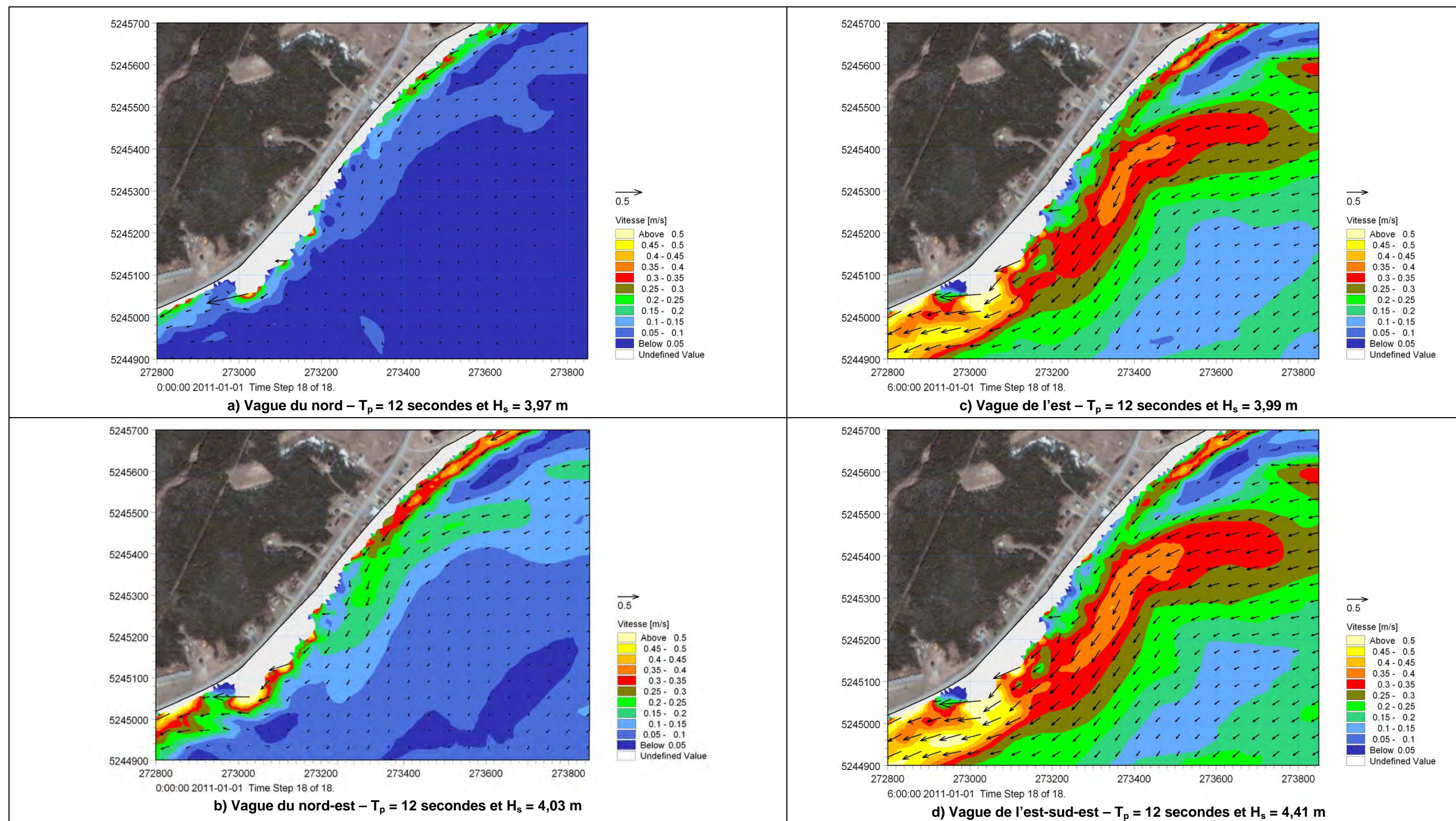


Figure 8.4 : Courants littoraux dans le secteur de la Pointe de la Martinique

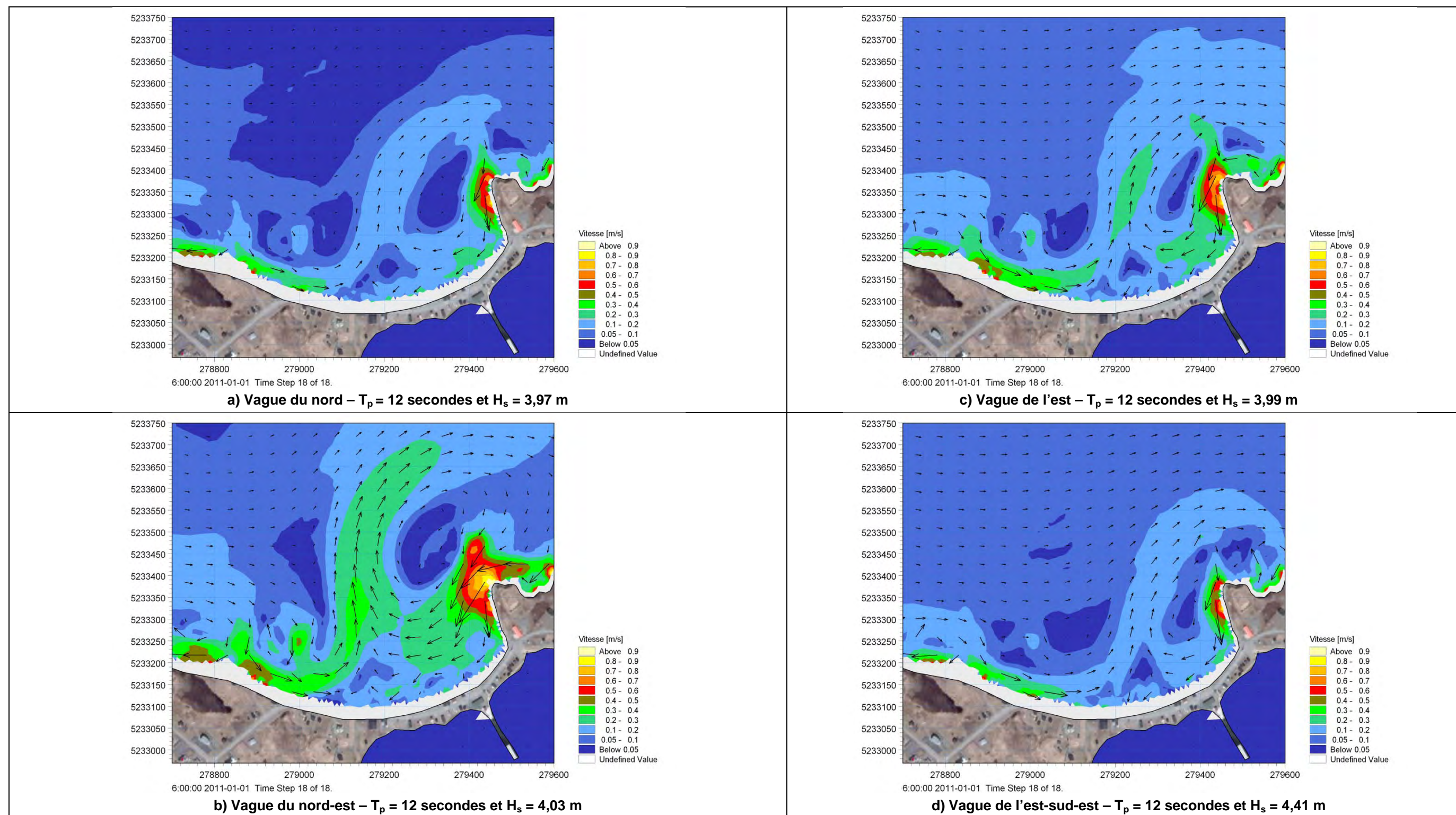
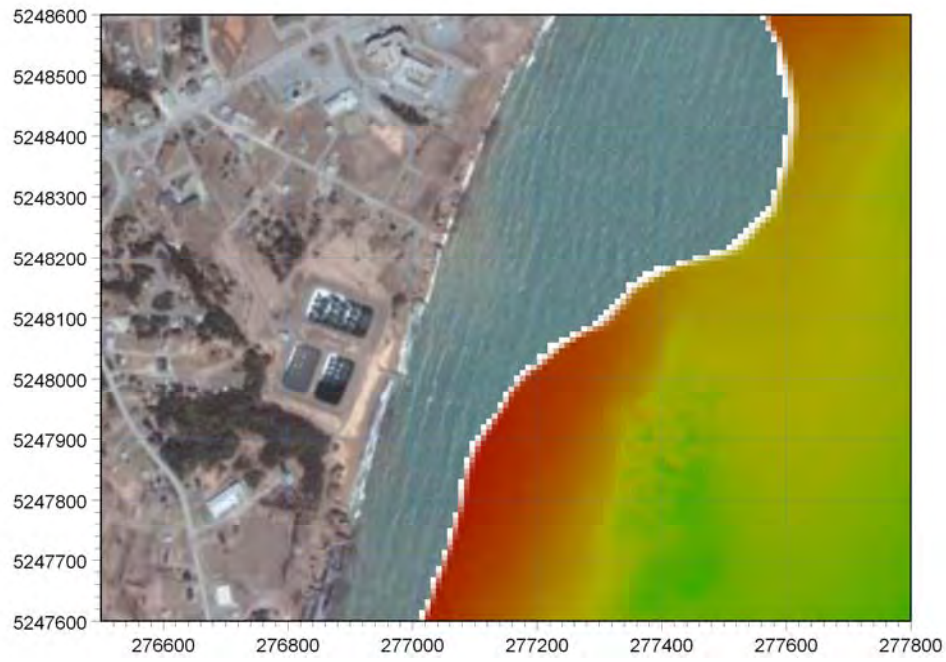
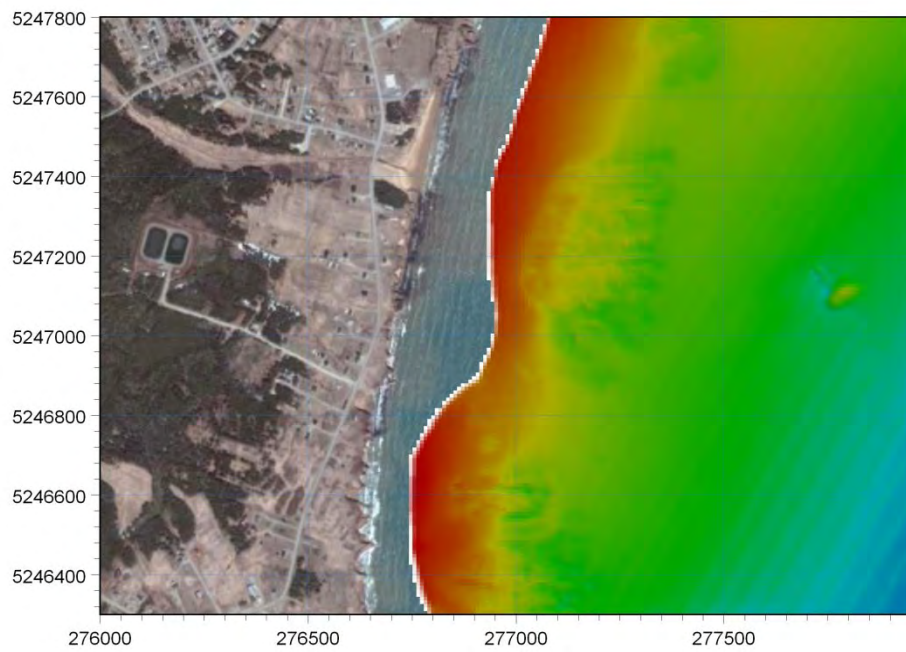


Figure 8.5 : Courants littoraux dans le secteur de La Grave



a) Secteur des étangs aérés



b) Secteur de Gros-Cap

Figure 8.6 : Bathymétrie à haute résolution dans les secteurs d'intérêt

9. PROTECTION DE LA BERGE – SECTEUR DES ÉTANGS AÉRÉS

9.1 Mécanisme d'érosion probable

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 (voir photos aériennes de 1963 et 1975),
- la décroissance de l'érosion des falaises de Cap-aux-Meules, suite à la construction du port 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.

Il n'y a malheureusement aucun relevé qui permettrait de le confirmer, mais il est probable qu'une baisse du niveau de la plage devant les étangs aérés s'est produite au cours des dernières décennies.

L'influence de la construction du havre de Cap-aux-Meules sur la dynamique sédimentaire du secteur de Gros-Cap date de nombreuses années, soit dès la construction du premier quai dans les années 1950. La construction du havre vers 1970 n'a fait qu'accélérer la tendance en soustrayant de façon efficace tout le secteur du Cap aux Meules de l'érosion provoquée par les vagues de tempête. L'extension actuelle du port de pêche ne joue qu'un rôle très marginal dans la dynamique sédimentaire du secteur de Cap-aux-Meules et Gros-Cap, car les modifications prévues concernent un secteur déjà protégé des vagues du large, celles qui sont les plus actives dans l'érosion des falaises.

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 à la construction du port de Cap-aux-Meules et 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.

9.2 Protection en enrochement

La protection de la berge à l'aide d'enrochements est un type de protection qui n'a pas vraiment été mis en œuvre dans le secteur des étangs aérés. Les essais de protection de la promenade le long des étangs aérés ne peuvent pas être considérés comme tels.

Le transect critique pour le dimensionnement des enrochements est le transect EA6 pour lequel la profondeur de 1 m sous le NMM se présente en pied de falaise. La mise en place des enrochements devant les bassins aura pour conséquence la diminution d'altitude de l'ensemble de la plage et la profondeur de 1 m sous le NMM deviendra également pertinente pour ces profils après la mise en place d'une protection en enrochement, même si actuellement l'élévation de cette plage est plutôt de l'ordre de +0,5 m NMM.

Une évaluation des phénomènes de déferlement et de remontée des vagues sur l'enrochement de protection envisagée a été faite en fonction des conditions combinées des paramètres « vagues » et « niveaux d'eau » correspondant à une durée de vie utile de 35 ans. Pour les niveaux d'eau supérieurs à +1,6 m ZC (+0,85 m NMM), les vagues correspondantes ne sont pas limitées par le déferlement. Par contre, pour des niveaux d'eau inférieurs à +1,6 m ZC, 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 ($H_s \text{ max} = 1,79 \text{ m}$) 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 à l'élévation +3,2 m NMM au pied des bassins ou des falaises de part et d'autre des bassins des étangs aérés pour empêcher les vagues de trop le franchir.

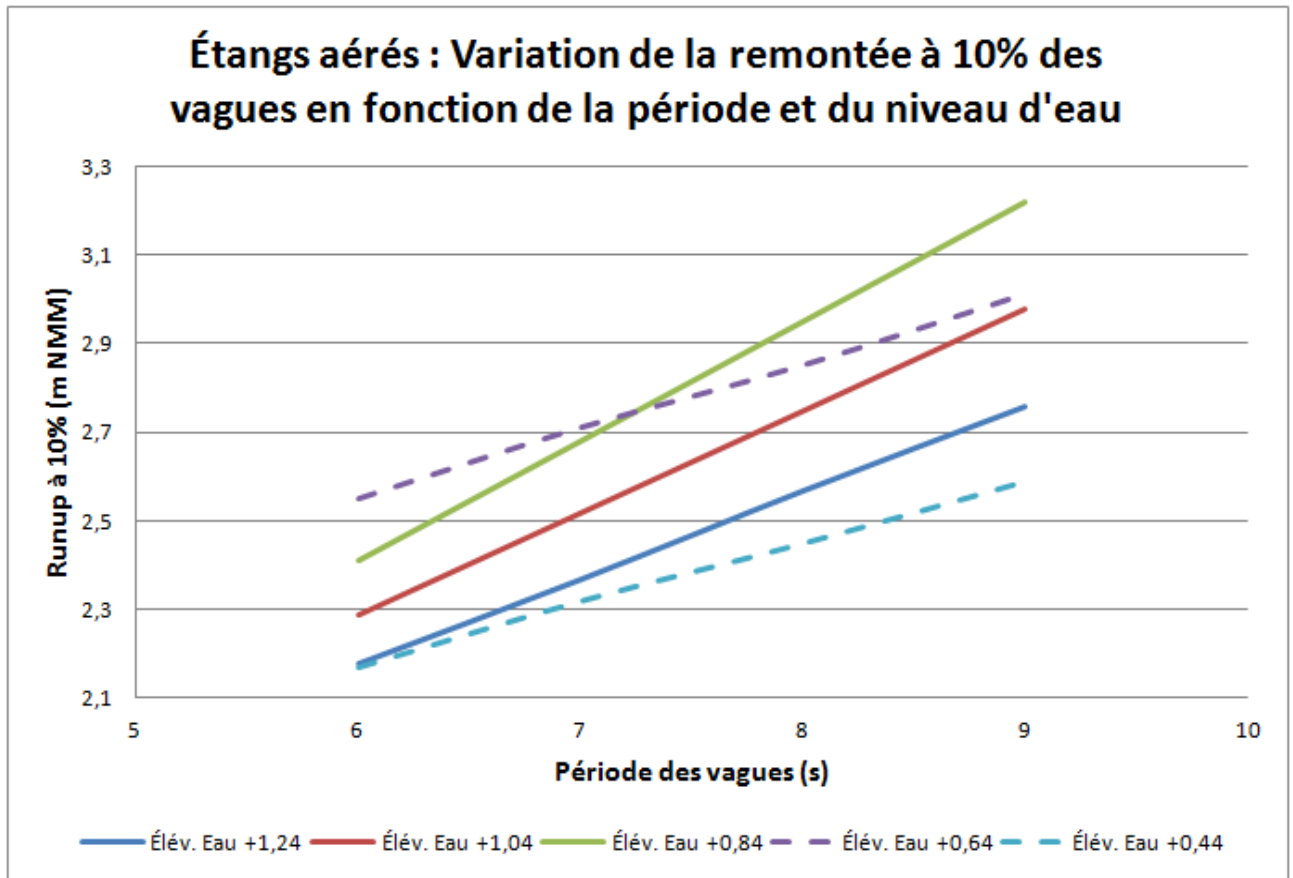


Figure 9.1 Remontée des vagues sur un enrochement près des étangs aérés

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 de la Baie de Plaisance. 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 de la Baie de Plaisance pour les houles de dimensionnement, ce qui pourrait induire des problèmes dans l'interprétation de certains résultats.

Le C.E.M. donne les taux de franchissement critiques pour un ouvrage de protection en fonction des dommages appréhendés et des infrastructures à protéger (Table VI-5-6 – page VI-5-20). Cette information provenant d'un grand nombre d'essais et d'observations est reproduite dans la figure ci-dessous.

Table VI-5-6
Critical Values of Average Overtopping Discharges

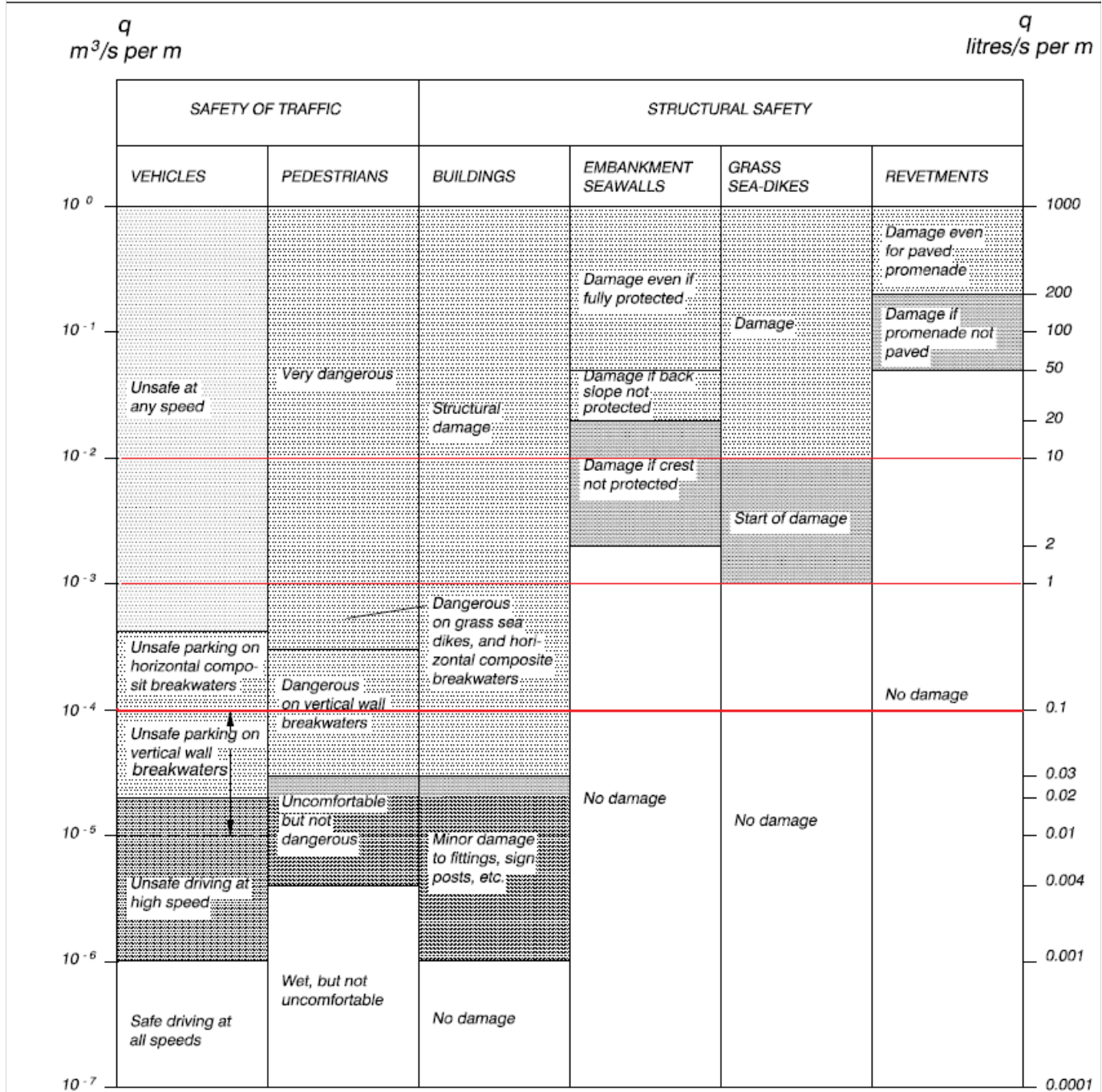


Figure 9.2 Tableau des valeurs critiques des taux moyens de franchissement d'une digue du C.E.M.

On constate sur cette figure qu'au-delà de :

- 0,1 l/s/m, la circulation des piétons près de l'enrochement n'est pas recommandée,
- 1 l/s/m, la circulation des piétons près de l'enrochement devient dangereuse,
- 2 l/s/m, la structure des enrochements pourrait être endommagée.

La valeur cible de 1 l/s/m a été retenue 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 +3,2 m NMM. Le pire cas de franchissement correspond à un niveau d'eau de +1,6 m ZC (0,84 m NMM) et à une période de pointe des vagues de 9 secondes.

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

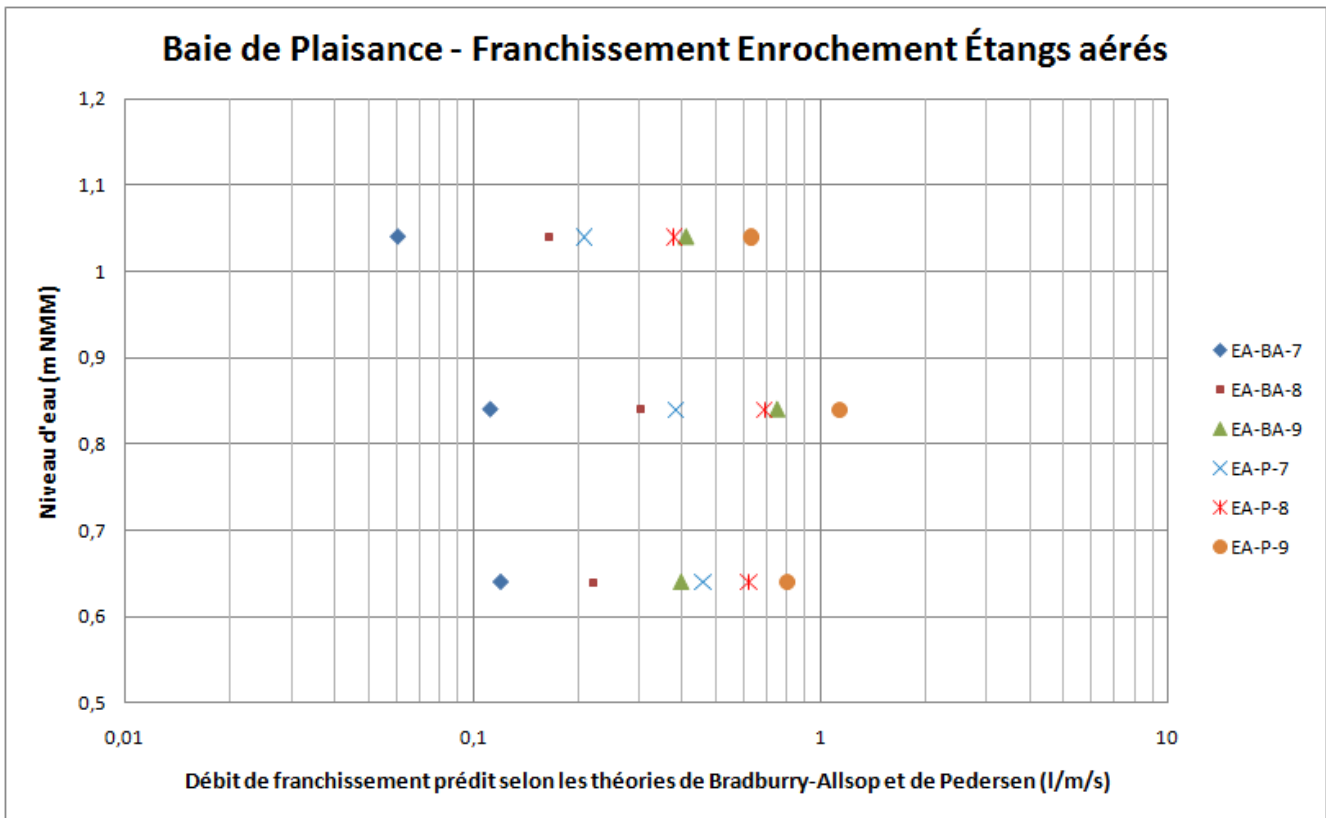


Figure 9.3 Débits de franchissement d'un enrochement dont la crête est à +3,2 m NMM

L'élévation de +3,2 m NMM a donc été retenue pour la crête de l'enrochement de protection de la zone des étangs aérés. L'optimisation de cette élévation de la protection de la rive passerait par des essais de franchissement en canal à houle, seul moyen de tenir compte de la configuration réelle des fonds marins devant ces ouvrages de protection. Ces essais en canal à houle sont recommandés lors de la phase de conception finale des ouvrages si cette solution est retenue.

Avec la vague de conception retenue (Hs max = 1,79 m de hauteur), la formule de Hudson appliquée avec les paramètres suivants au dimensionnement des enrochements donne :

- Poids unitaire des enrochements : 2,6 t/m³
- Poids unitaire de l'eau : 1,02 t/m³
- Pente de la structure : 3H / 2V
- Coefficient de stabilité des enrochements K_D (tronc, déferlant, S.P.M.84¹⁰) : 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. Les figures suivantes illustrent l'installation de cette protection en enrochement au droit des bassins et du pied de la falaise près des étangs aérés.

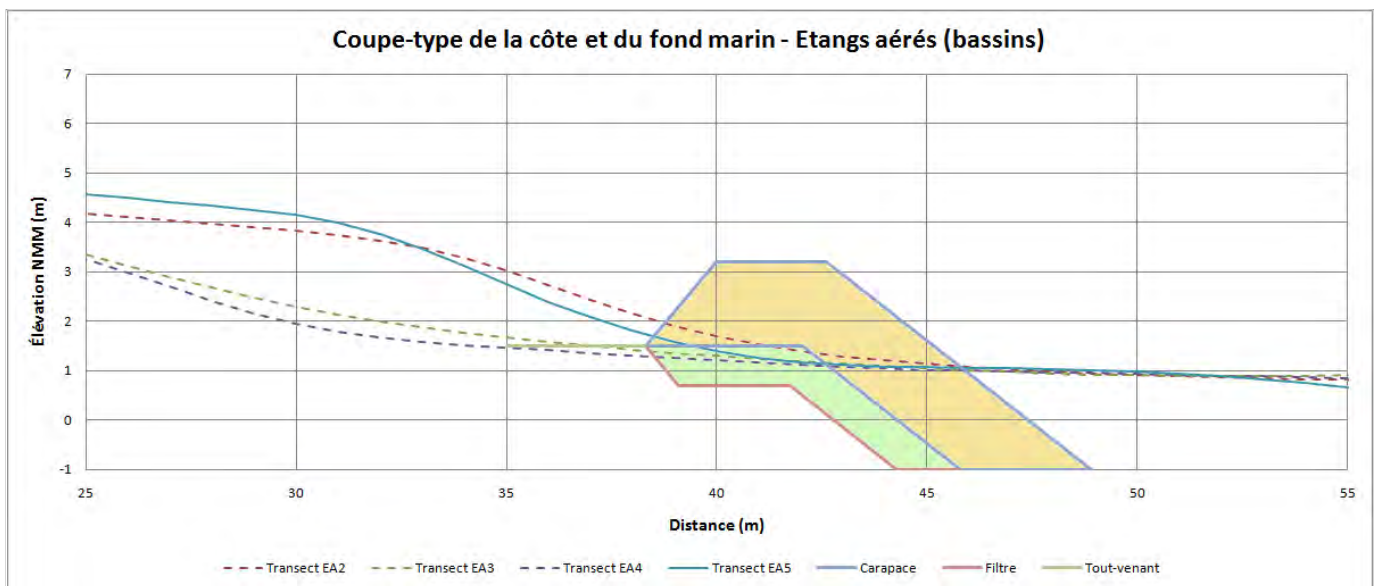


Figure 9.4 Coupe type d'un enrochement de protection au droit des bassins des étangs aérés

¹⁰ Shore Protection Manual 1984 – U.S. Army Corps of Engineers

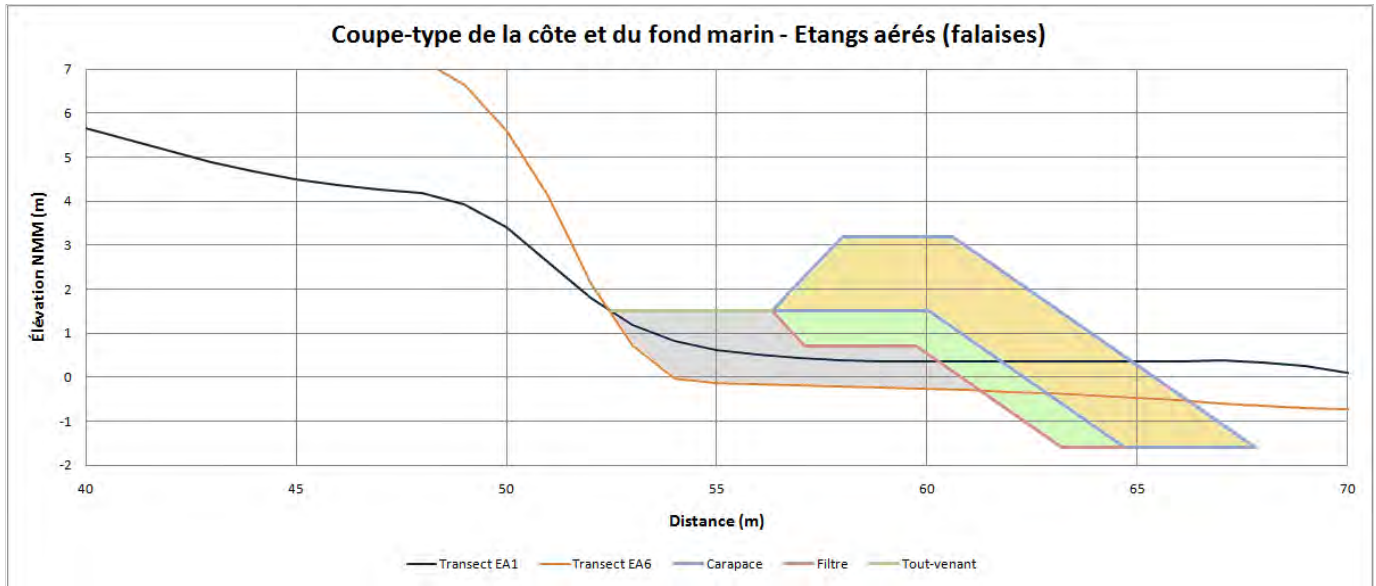


Figure 9.5 Coupe type d'un enrochement de protection de part et d'autre des étangs aérés

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. Cette voie d'accès n'est pas nécessaire en face des bassins. Par contre, la mise en place de la pierre-filtre et de la pierre de carapace réduirait à 3 m la largeur restante de la voie d'accès pour d'éventuels futurs travaux de réparations de ces enrochements, ce qui est insuffisant. Comme l'empiètement marginal nécessaire au maintien d'une voie d'accès permanente de 6 m de large après les travaux serait important (au moins 25 % de plus d'empiètement) et que les travaux de réparations ne seraient théoriquement requis que dans plusieurs dizaines d'années, il est recommandé de concevoir cette solution avec le minimum d'empiètement sur le milieu marin, la contrepartie étant un surcroît de travail pour accéder à cet enrochement en cas de réparation.

9.3 Stabilité du pied des protections en enrochement

L'ancrage des pierres du pied de l'enrochement pose un problème qui ne pourra être résolu que suite à un relevé géotechnique détaillé des zones à protéger par enrochement. De nombreux affleurements rocheux apparaissent au pied des falaises (voir photos suivantes) et, même si c'est du sable qui se retrouve au pied de ces falaises, l'épaisseur de cette couche de sable pourrait être très mince. Des pierres de carapace directement posées sur du roc affleurant sont instables (voir photo 9.8), à cause des efforts provoqués par les vagues et les glaces. Il faut ancrer les premières pierres au pied de la pente pour s'assurer de la pérennité de la protection en enrochement dans ce genre de configuration. Cet ancrage peut se faire par creusage d'une tranchée dans le roc ou, si les conditions le permettent, par mise en place d'une butée au pied de l'enrochement. Les deux méthodes ajoutent des coûts relativement importants aux travaux.

Érosion côtière baie de Plaisance

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 9.6 Roc affleurant au pied des falaises de Gros-Cap près des étangs aérés



Figure 9.7 Roc affleurant au pied des falaises de la Pointe de la Martinique



Figure 9.8 Instabilité des pierres posées directement sur du roc affleurant au pied des falaises de la Pointe de la Martinique

9.4 Crête des enrochements

Afin de valider l'élévation de la crête préconisée pour les enrochements de protection des berges le long de la Baie de Plaisance, des observations ont été faites sur les pentes des étangs aérés en place. Deux zones de dommages, en relation avec le franchissement de la promenade par les vagues, ont été identifiées entre l'exutoire des étangs aérés et le ruisseau situé au sud des étangs aérés. Les photos suivantes illustrent ces deux zones de dommages sur les pentes des talus externes des étangs aérés, dommages qui avaient été réparés au moment de la prise des photos (12 octobre 2011).



Figure 9.9 Dommage infligé par le franchissement des vagues sur le talus des étangs aérés



Figure 9.10 Dommage infligé par le franchissement des vagues sur le talus des étangs aérés

Des vérifications ont été faites pour définir l'élévation à laquelle les vagues avaient frappé les talus des étangs aérés lors des tempêtes de l'hiver 2010-2011. On s'aperçoit sur la figure suivante que l'élévation de la promenade le long de la zone endommagée par les franchissements est de +3,9 à +4,0 m NMM et que la zone d'impact des vagues s'étend entre +4,0 m et +5,5 m NMM. Les dommages observés n'ont pas remis en cause la stabilité des talus des étangs aérés (en fonction d'une intervention relativement rapide de la municipalité pour réparer ces dommages). Il semble cependant évident que l'élévation de la crête des enrochements préconisée plus haut (+3,2 m NMM) est loin d'être exagérée. Cette crête proposée si située environ 700 mm plus bas que la crête des enrochements récemment mis en place par la Municipalité le long de la promenade devant les étangs aérés (photos précédentes).

Il est même probable que l'hypothèse d'indépendance statistique des événements de niveaux d'eau extrêmes et de fortes vagues de tempête considérée dans cette étude tend à sous-évaluer les dommages potentiels que le franchissement des vagues imposera aux futures infrastructures côtières. Il est fortement recommandé de vérifier autant que faire se peut la récurrence combinée des événements de niveaux d'eau extrêmes et de fortes vagues dans le secteur de la baie de Plaisance dans le cadre du dimensionnement final de ce genre de protection.

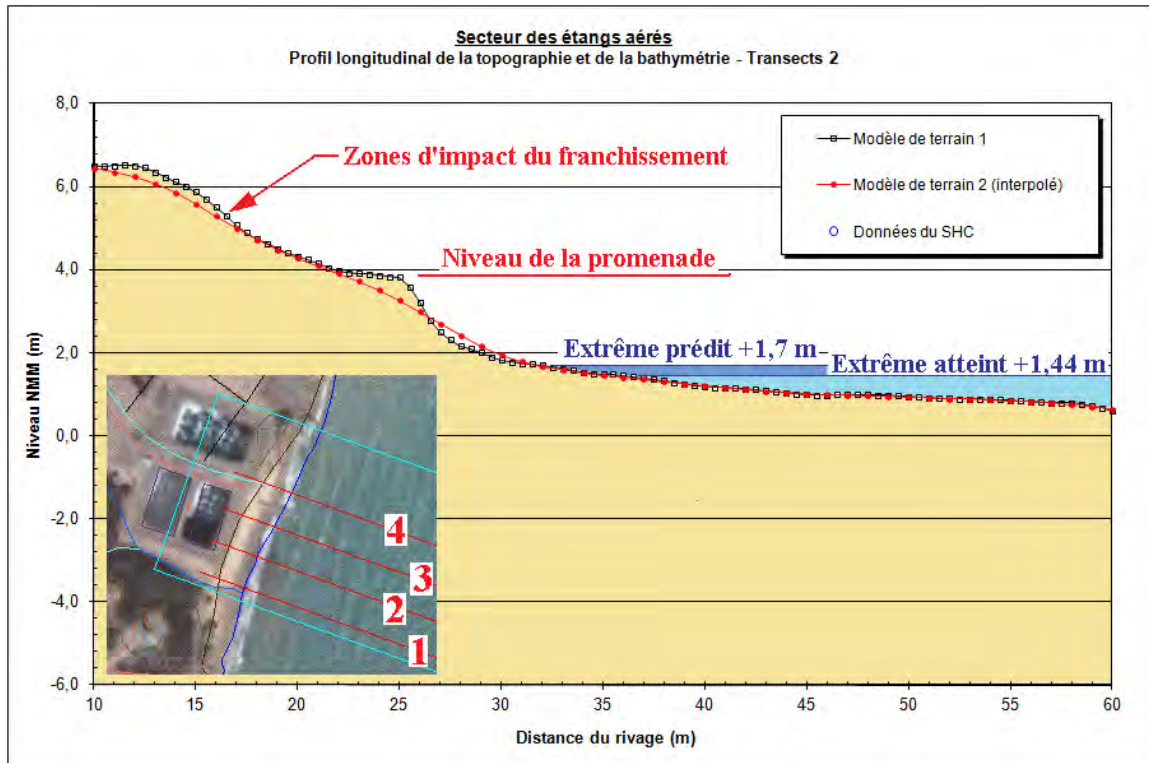


Figure 9.11 Coupe type de la berge au niveau des étangs aérés avec les élévations NMM des différentes parties de cette berge

9.5 Consolidation des falaises avec du béton

La protection du pied des falaises à l'aide de béton devrait respecter les critères de l'enrochement en termes d'élévation de la crête du mur et de stabilité du pied. Étant donné l'étanchéité du béton et le fort coefficient de réflexion des vagues sur une telle protection, la remontée des vagues est légèrement plus forte et il faut prévoir que l'érosion en pied du mur sera plus intense.

L'ancrage du mur dans le roc dont sont constituées les falaises de Gros-Cap n'étant pas viable (roc trop friable et trop sensible à l'eau et aux cycles de gel/dégel), le mur de béton devra être autostable en simple appui sur la falaise.

Pour ce qui est de la fondation du mur, une excavation sera requise au pied de la falaise pour ancrer convenablement le pied du mur de béton. Une profondeur minimale de 1,2 m dans le roc

a été considérée de façon préliminaire, mais cette profondeur devrait être confirmée par une étude géologique incluant la vitesse à laquelle se détériorerait le roc au pied du mur de béton.

De façon à dimensionner l'élévation de la crête du mur de béton à placer devant le pied des falaises de part et d'autre des étangs aérés, la formule de franchissement de Franco & Franco 1999 a été utilisée¹¹. Le débit maximal de franchissement qui a été retenu pour le dimensionnement de cette crête de mur est de 2 l/s/m correspondant au début de dommage sur des enrochements. Étant donné la nature friable et sensible aux cycles de gel/dégel du roc dont sont constituées ces falaises, même ce débit pourrait se révéler excessif.

La figure 9.6 illustre les calculs de franchissement pour une crête de mur située à +3,6 m NMM.

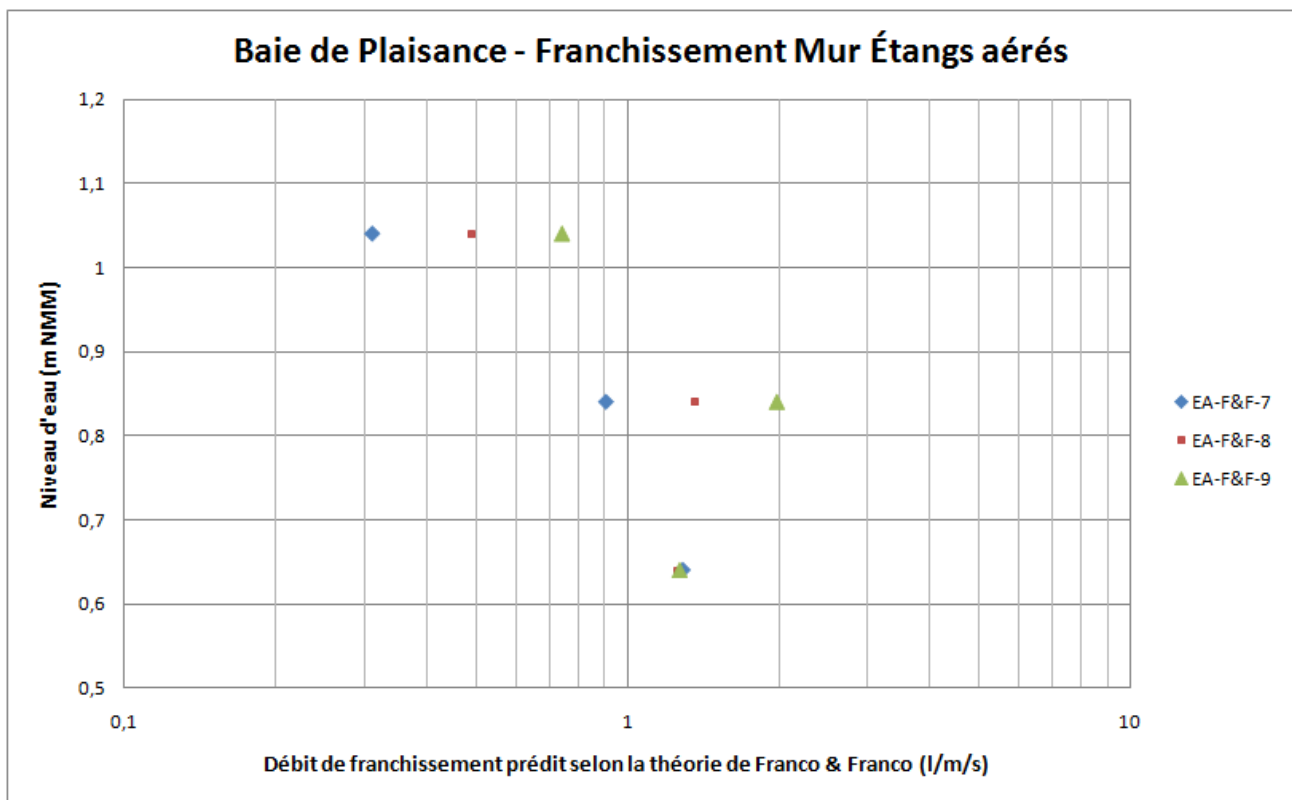


Figure 9.12 Débits de franchissement d'un mur dont la crête est située à +3,6 m NMM

La figure suivante illustre la coupe type d'une protection en béton armé placée au pied de la falaise de part et d'autre des étangs aérés.

¹¹ Coastal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineer, - Table VI-5-13 page VI-5-29

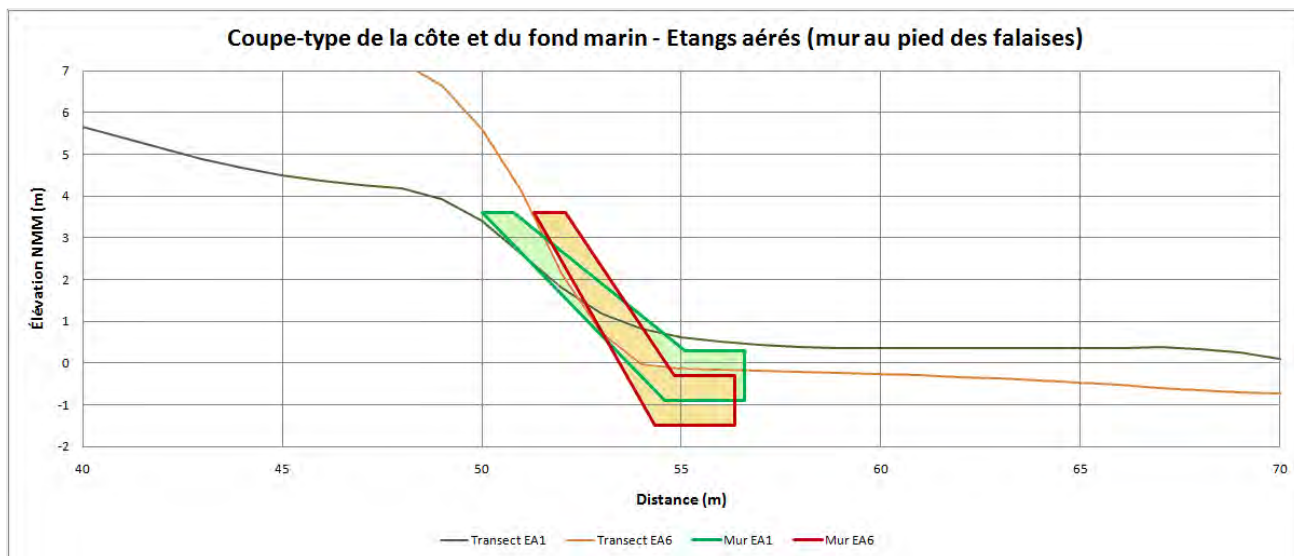


Figure 9.13 Coupe type d'une protection en béton armé de part et d'autre des étangs aérés

La solution d'un confortement en béton du pied de la falaise sera difficile à mettre en œuvre. La durabilité d'un tel concept reste à démontrer et d'importants effets de bout pourraient apparaître aux extrémités des zones bétonnées. Il s'agit de plus d'un ouvrage complexe à réaliser dans l'eau à cause de l'exigence de durabilité de l'ouvrage qui implique que la fondation soit excavée dans le roc au pied de la falaise, sous le zéro des cartes marines.

9.6 Rechargement de plage

Le CEM¹² donne certaines indications concernant la stabilité d'une plage naturelle et d'un rechargement de plage. 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 les figures suivantes pour la zone des bassins et celle de part et d'autre des bassins.

¹² Coastal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineer, Chapitre III-3-3

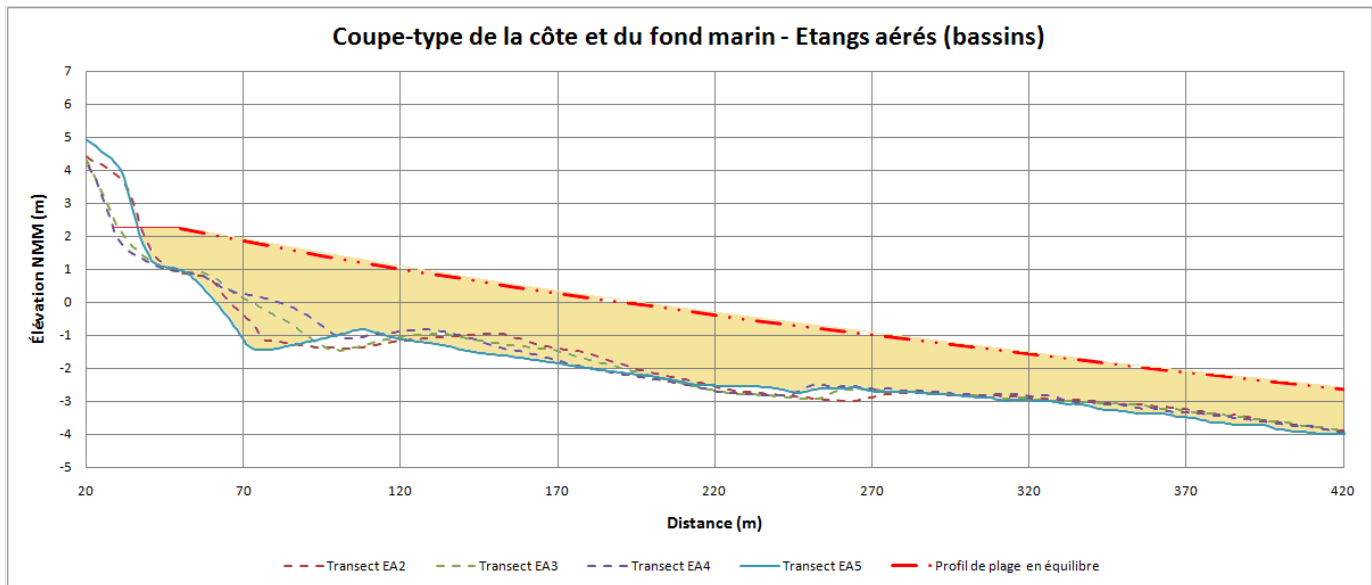


Figure 9.14 Coupe type d'une plage en équilibre devant les bassins des étangs aérés

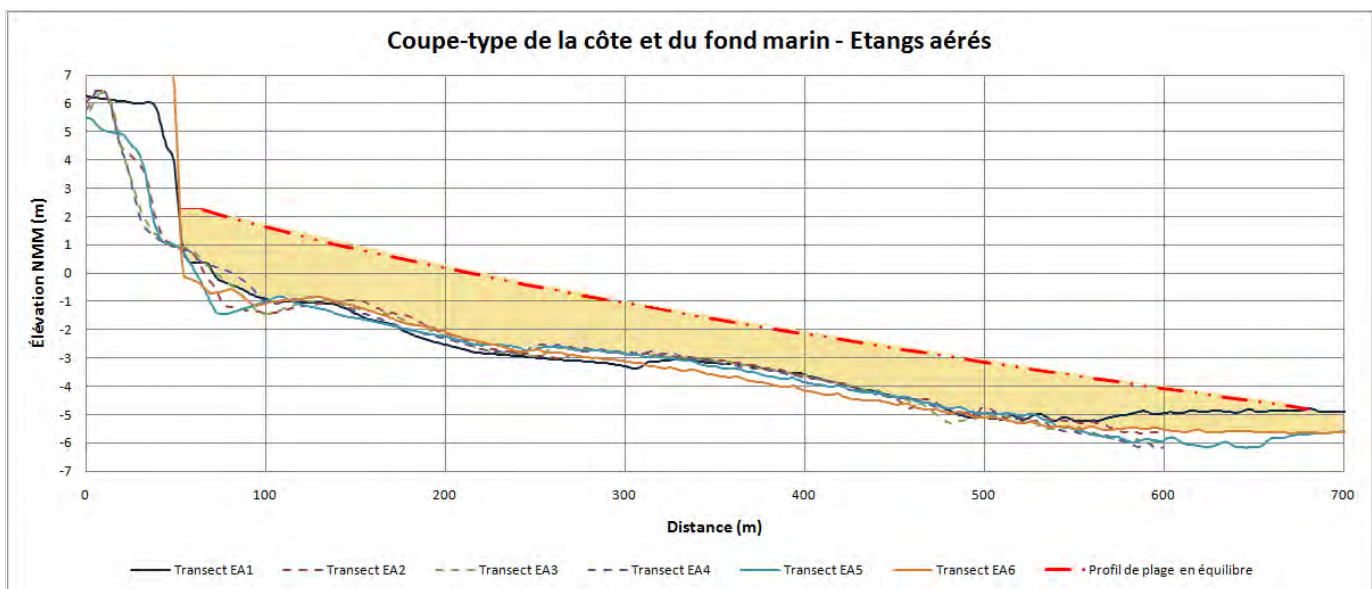


Figure 9.15 Coupe-type d'une plage en équilibre de part et d'autre des bassins des étangs aérés

La partie supérieure de la plage a été placée à l'élévation +2,2 m NMM et la largeur de 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 0,5 m de la plage par rapport aux niveaux d'eau extrêmes étant faible.

Dans les deux cas, le profil d'une plage en équilibre est relativement loin de celui du fond naturel actuel devant les bassins des étangs aérés. La distance entre le profil théorique et les profils mesurés peut dépasser plusieurs mètres par endroits.

Le chapitre III-3-3-f du C.E.M. donne certains moyens d'évaluer un peu plus précisément les caractéristiques que devrait avoir un rechargement de plage dans le cas de la zone des étangs aérés. 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 de l'ordre de 0,3 mm (au lieu des 0,25 mm du sable actuellement dans cette zone).

Devant les bassins, il faudrait envisager plus de 800 m³/m de sable pour recharger la plage (à condition d'être en mesure de retenir ce sable devant les étangs aérés). 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 800 m³/m de sable de rechargement sur une largeur minimale de 235 m de plage, on parle de 160 000 m³ de sable plus grossier que le sable en place à installer devant les étangs aérés. À ces quantités de sable s'ajouteraient les épis de protection aux extrémités de la zone de recharge afin d'éviter une fuite latérale trop rapide des sédiments et 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 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.

9.7 Rechargement de plage avec butée de pied

La seule façon d'envisager un rechargement de plage devant les étangs aérés est de concevoir ce rechargement combiné à une butée de pied pour assurer la stabilité de la plage dans le sens perpendiculaire à la côte.

De façon à tenter de minimiser les dommages à la butée de pied de la « plage suspendue », 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 du sable pour construire la plage suspendue.

La figure suivante illustre la coupe type 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 à 0,0 m NMM et une butée dont la crête serait à -1,5 m NMM.

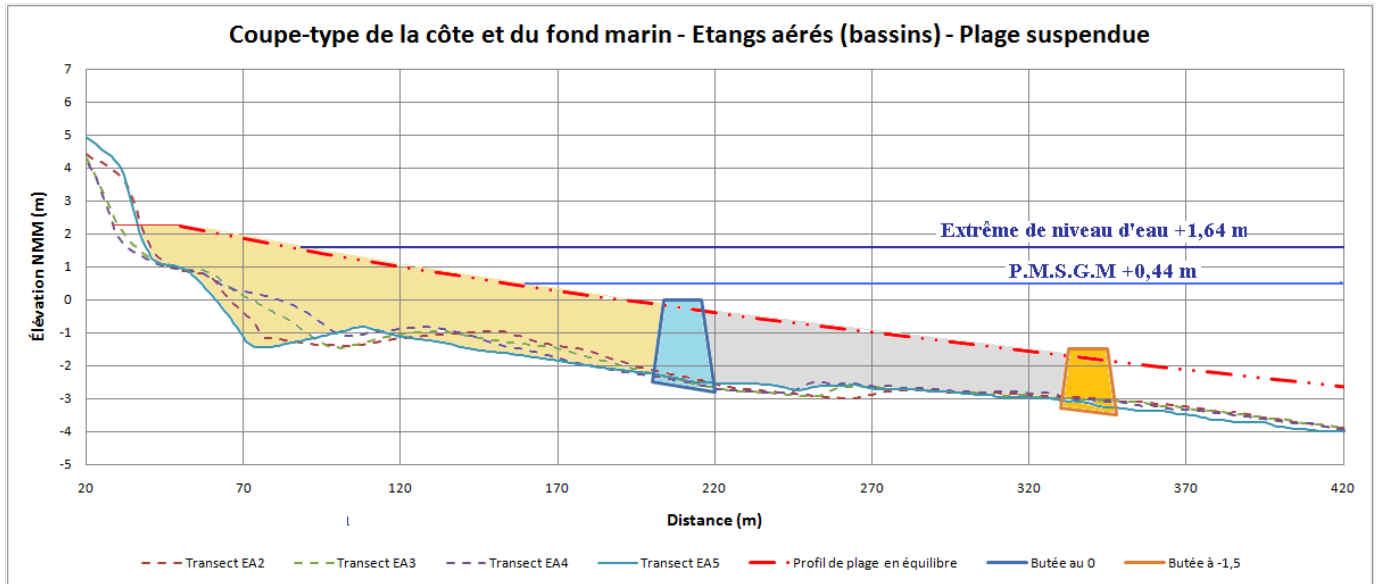


Figure 9.16 Coupe type d'une plage suspendue devant les étangs aérés

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'un chalands. À cause des contraintes mécaniques auxquelles sera soumise cette pierre, il est requis d'aller la chercher à l'extérieur des Îles de la Madeleine pour obtenir une qualité minimale des matériaux et une durabilité acceptable de l'ouvrage.

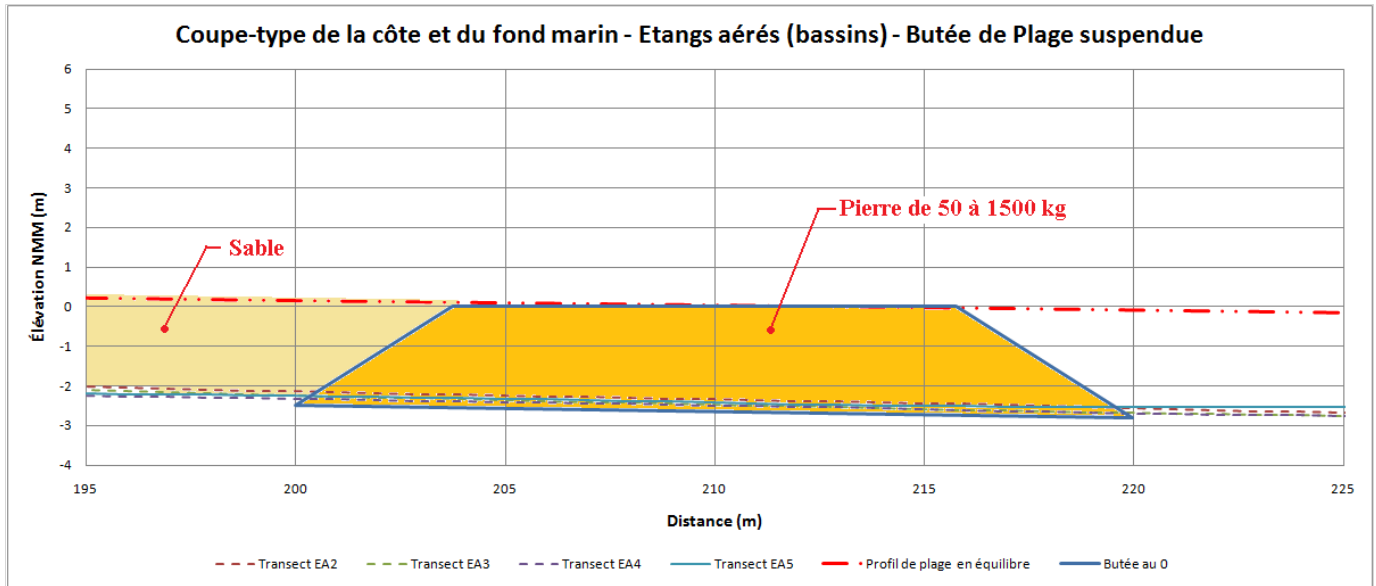


Figure 9.17 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en enrochement au zéro NMM

L'autre méthode de réalisation d'une 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 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 ont 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 serait impératif de protéger le géotextile contre les rayons ultra-violet (UV), les vagues, les débris flottants et les glaces, soit en utilisant un géotextile renforcé (par exemple avec du Kevlar), soit en recouvrant le géotextile 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 antiaffoulement est prévu sous les géotubes. Il est possible que deux géotubes soient suffisants et la compagnie Tencate/Terratube considère la possibilité 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.

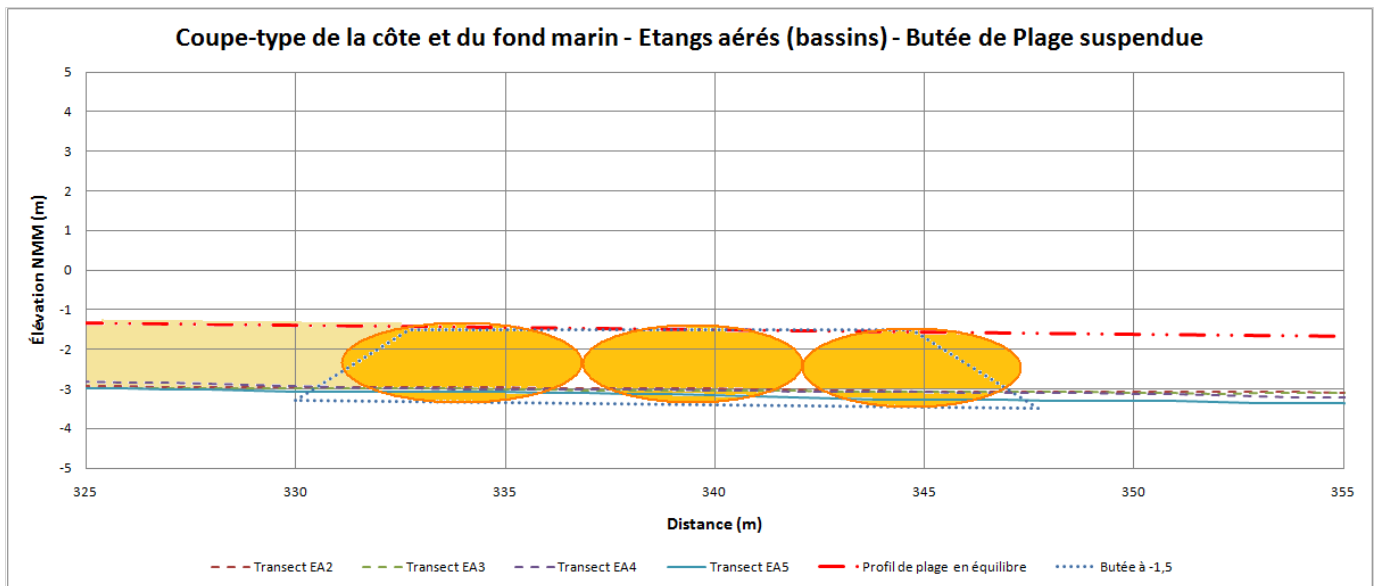


Figure 9.18 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en géotubes à -1,5 m NMM

Du rechargement de plage ne peut donc raisonnablement s'envisager dans le cas du secteur des étangs aérés qu'en parallèle avec une protection en enrochement ou en géotubes 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 à la figure 9.16 (cas de la butée en pierre au zéro NMM). Non seulement la butée de pied de plage devra être mise en place, mais il serait également nécessaire de placer des protections (en pierre) de part et d'autre de la zone rechargée en sable pour contenir ce sable latéralement et lui permettre de protéger le secteur des étangs aérés. Il s'agirait d'un projet tout à fait non traditionnel, ce genre d'intervention étant plutôt pensée en fonction de la protection d'un secteur nettement plus étendu en longueur et requérant en général moins de sable de recharge par unité de longueur. Le contexte de déficit sédimentaire de la zone implique également que les opérations de rechargement de plage seront requises de façon plus fréquente que pour un projet plus traditionnel de rechargement de plage,

9.8 Rechargement de plage en matériaux grossiers

Du rechargement de plage en tout-venant de carrière des Îles (rip-rap), en galets, en gravier ou en sable et gravier pourrait être plus intéressant que du rechargement en sable dans le secteur des étangs aérés, à cause de la pente d'équilibre de la plage qui serait nettement plus raide que celle d'un sable. 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, aux contraintes hydrodynamiques et à celles de gel/dégel, il est recommandé de bien documenter d'année en année des travaux temporaires éventuels de protection des étangs aérés pour obtenir une idée de la vitesse de dégradation de ces matériaux locaux. Ces matériaux grossiers locaux auraient l'avantage d'alimenter les plages adjacentes en sédiments identiques aux sédiments en place à travers leur processus de dégradation. Bien que certaines données préliminaires aient pu être obtenues dans le cadre de la présente étude, une étude plus approfondie de disponibilité de pierre locale de type « rip-rap » ou 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 +2,3 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. Des essais en canal à houle permettraient d'optimiser cette géométrie.

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 1,79 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 des matériaux devant être régulière entre ces deux limites.

Ce concept de protection de berge s'apparente davantage 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 25% 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.

Il a en particulier fallu faire une hypothèse sur la largeur de la crête de la protection en matériaux grossiers locaux. Il se pourrait que la largeur de 20 à 22 m retenue dans les calculs préliminaires soit trop pessimistes et qu'une largeur de 10 à 15 m soit suffisante pour assurer la protection de la rive, réduisant significativement les quantités de matériaux locaux requises dans ce genre de projet. Des études complémentaires sur la qualité des matériaux et des essais en canal à houle en phase de concept final permettraient d'optimiser le projet.

Ce concept a fait l'objet d'études sous l'appellation « plage de gravier », « bermes en blocs » ou « revêtements dynamiques » en Californie¹³. Le concept s'inspire de configurations naturelles de plages constituées non pas de sable, mais d'éléments de la taille de graviers ou de cailloux, qui sont stables selon des pentes beaucoup plus raides que du sable. De nombreux exemples de telles « plages » naturelles existent au Canada (Île du Cap-Breton, Gaspésie, Baie Georgienne, Vancouver, etc.) et dans le monde (Oregon, Chili, Nouvelle-Zélande, Hawaï, etc.). L'un de ces exemples se situe d'ailleurs aux Îles-de-la-Madeleine, derrière le Château Madelinot (Figure 9.22).

Les plages illustrées ci-dessous montrent qu'un concept de plage de galets 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 et impliquerait potentiellement une diminution des coûts de ce type de projet par rapport au projet décrit ci-dessus utilisant des matériaux locaux. Par contre, des matériaux plus résistants n'alimenteraient pas en sédiments les plages adjacentes de façon aussi efficace que des matériaux locaux.

Dans tous les cas (matériaux locaux ou importés), des essais en modèle réduit seront recommandés pour finaliser la géométrie des plages de rip-rap ou galets à mettre en place pour protéger la côte.



Figure 9-19 Plage naturelle de galets au Cap-Breton (Nouvelle-Écosse)

¹³ Alan, J.C., Geitgey, R. & Hart, R. «Dynamic revetements for coastal erosion in Oregon», August 2005



Figure 9-20 Plage naturelle de galets dans la Baie Georgienne (Ontario)



Figure 9-21 Plage naturelle de galets à Hawaï



Figure 9.22 – Plage naturelle de galets aux Îles-de-la-Madeleine (derrière le Château Madelinot)

La figure suivante illustre la coupe type proposée dans le cas d'une telle protection de berge dans le secteur des étangs aérés, réalisée à l'aide de matériaux locaux. La pierre de type rip-rap serait mise en place selon une géométrie relativement facile à obtenir pour l'entrepreneur avec des pousseurs (pente 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.

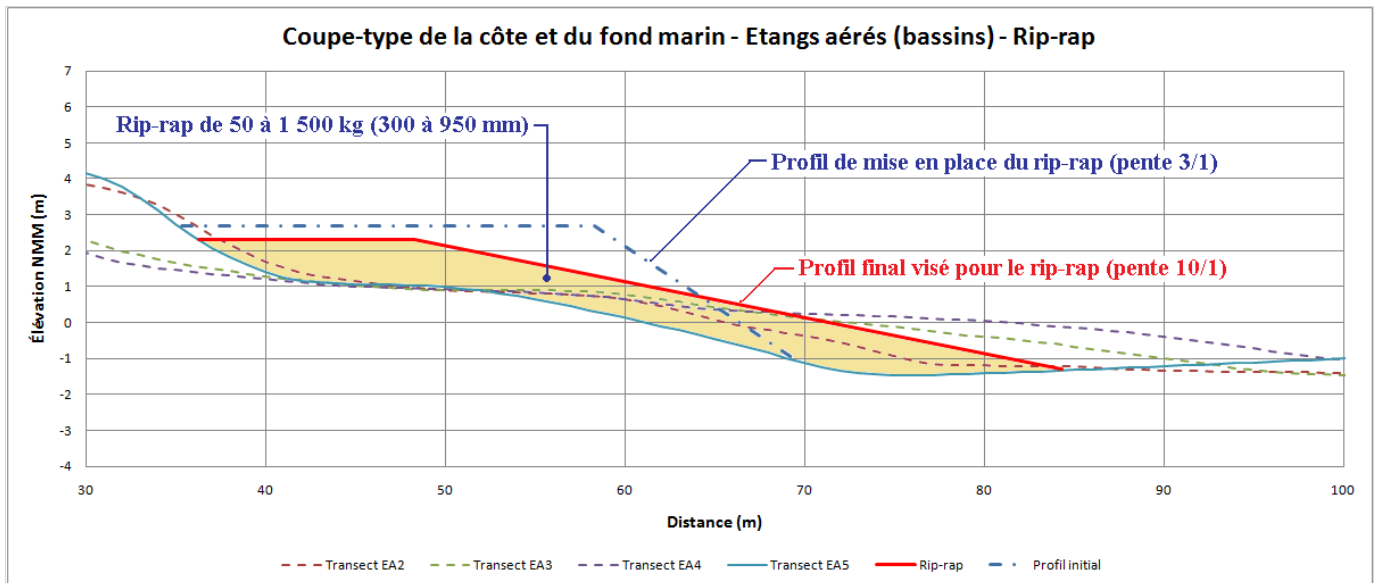


Figure 9.23 Coupe type d'une protection de berge en matériaux grossiers devant les étangs aérés

9.9 Rechargement de plage avec épis

Du rechargement de plage en sable avec épis sans butée de bas de plage ne semble pas être une avenue envisageable. La raison principale en est le non-respect de la pente d'équilibre de la plage expliquée dans les chapitres précédents (à moins de mettre en place des épis d'au moins un demi-kilomètre de longueur). Le sable de recharge de plage placé entre des épis trop courts 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 des étangs aérés avec l'attaque généralement frontale des vagues qui semble induire plus de circulation des sédiments de la côte vers le large que de circulation parallèle à la côte de ces sédiments. Une démonstration du peu d'intérêt de cette solution est faite par l'exutoire actuel des étangs aérés qui ne retient pas vraiment de sable, ni d'un côté, ni de l'autre des enrochements.

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

De plus, une recharge de plage devant les étangs aérés pose le risque de réduire la capacité d'évacuation de l'eau en provenance du ruisseau situé au sud des étangs aérés. Une façon de réduire ce risque serait de construire un épi au nord du ruisseau sur la plage pour assurer son écoulement en tout temps.

9.10 Brise-lames submersibles au large

La mise en place d'un brise-lames submersible ou d'une série de brise-lames submersibles au large des étangs aérés 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 entre 100 et 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 tels qu'illustrés sur la figure suivante). 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, ce qui n'est en général pas recommandé par les biologistes à cause des impacts négatifs sur les organismes pris au piège de ces accumulations d'eau (assèchement progressif, réchauffement de l'eau retenue, prédation par les oiseaux, etc.). Cette option n'a donc pas été retenue.

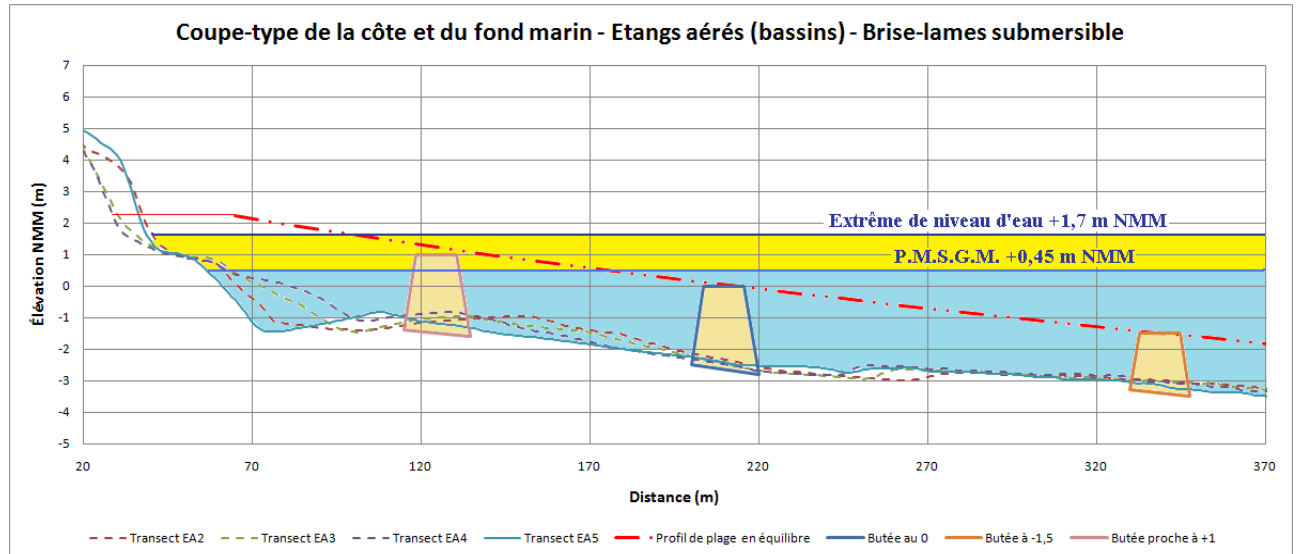


Figure 9.24 Positions possibles pour un brise-lames submersible devant les étangs aérés

9.11 Déplacement d'infrastructures

Le déplacement ou le déménagement des bassins des étangs aérés semble a priori difficile à envisager, surtout à cause des coûts très importants que cette relocalisation impliquerait.

9.12 Solutions de protection contre l'érosion pour les étangs aérés

Les solutions les plus évidentes en matière de protection contre l'érosion dans le secteur des étangs aérés sont la protection à l'aide d'un **enrochement linéaire** (Solution 1 – voir figure 9.25) ou la solution de **rechargement avec des matériaux grossiers** (rip-rap local ou plage de galets importés) (Solution 3 – voir figure 9.27 pour le rip-rap). La solution en enrochement serait du type « permanent » (35 ans de vie utile sans intervention majeure, à condition de s'assurer de la stabilité du pied de l'enrochement) alors que la solution en rip-rap extrait des carrières des îles de la Madeleine ou en galets importés de l'extérieur des îles serait une solution nécessitant des rechargements périodiques (plus fréquents pour le rip-rap). L'inconvénient principal de la solution en enrochement est la dégradation de la plage en avant de l'enrochement alors que la solution en rip-rap entretiendrait et améliorerait la plage (et les plages adjacentes) à travers le processus de dégradation des pierres constituant le rip-rap. La solution en plage de galets n'a pas les inconvénients de la solution en enrochement linéaire, mais n'offre pas le bénéfice de la solution en rip-rap. Un autre inconvénient significatif de la solution de protection à l'aide d'un enrochement linéaire est le risque très important de réclamation en cours de travaux

(géotechnique, tempêtes) et de dépassement de coûts alors que la solution de rechargement avec des matériaux grossiers ne comporte pratiquement aucun risque de cette nature.

La solution de rechargement de la plage à l'aide de sable ne semble être viable qu'à deux conditions difficiles à remplir :

- la découverte d'une source importante de sable plus grossier que le sable actuellement en place (produits du dragage de l'entrée de la lagune de Grande-Entrée ?),
- la mise en place d'une butée de pied de plage (en enrochements ou en géotubes renforcés) et d'épis transversaux (Solution 2 – voir figure 9.26).

La solution d'un confortement en béton de la falaise n'est pas vraiment une solution dans le cas des étangs aérés puisqu'elle ne s'applique pas au droit des étangs.

La solution d'un brise-lames submersible au large de la côte n'est pas une solution « en soi » étant donné la faible efficacité d'un tel ouvrage à arrêter les processus d'érosion, à moins de placer la crête de ce brise-lames au niveau de la marée haute ou plus haut, ce qui revient à la solution de l'enrochement linéaire.

Les estimations de coûts de ces trois solutions sont présentées en annexe. Elles se résument comme suit (taxes en sus) – la solution en plage de galets n'a pas pu être évaluée faute de modèle paramétrique permettant de la dimensionner :

<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 \$	

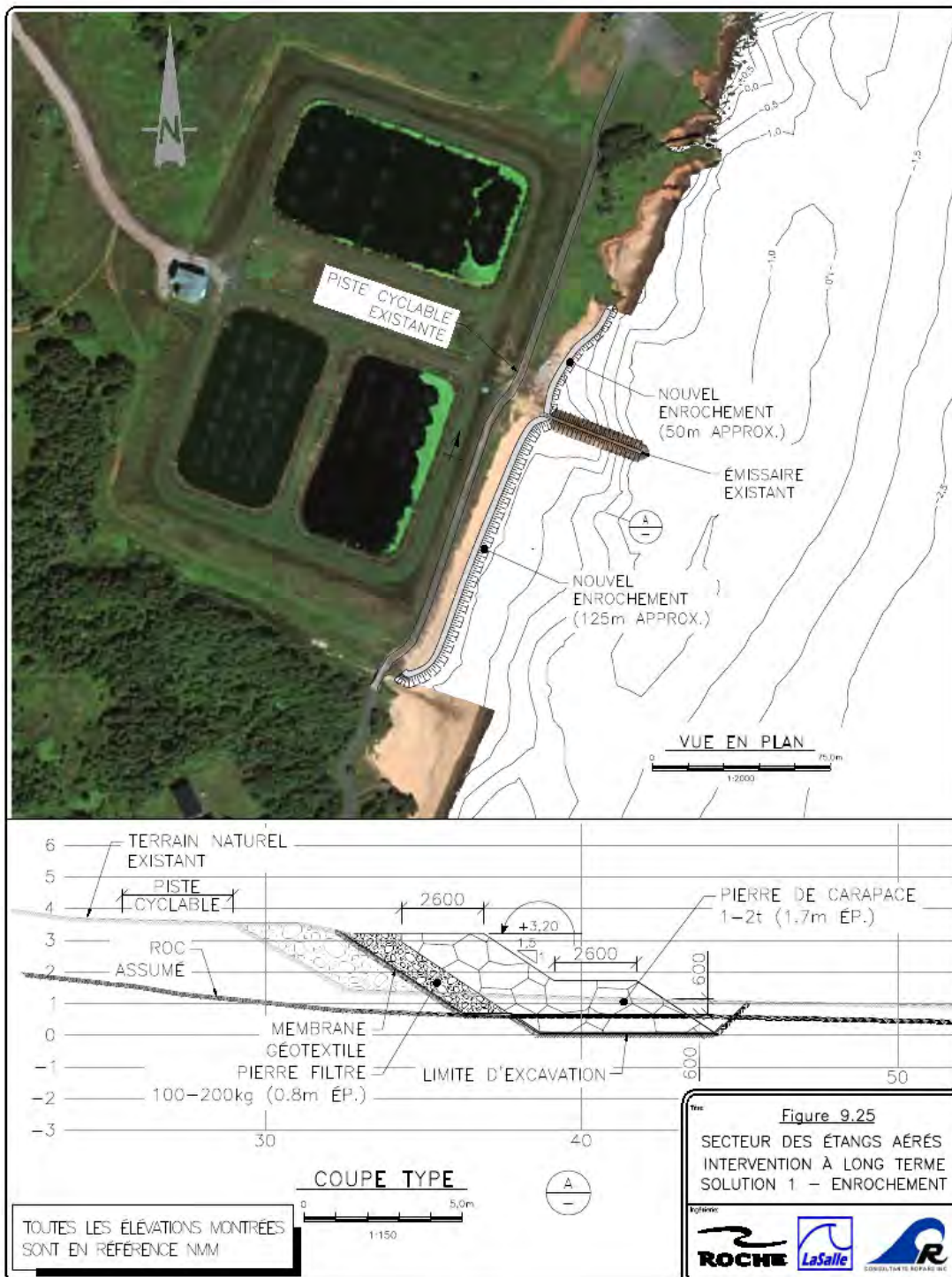


Figure 9.25 – Intervention à long terme - Solution 1 - Enrochement

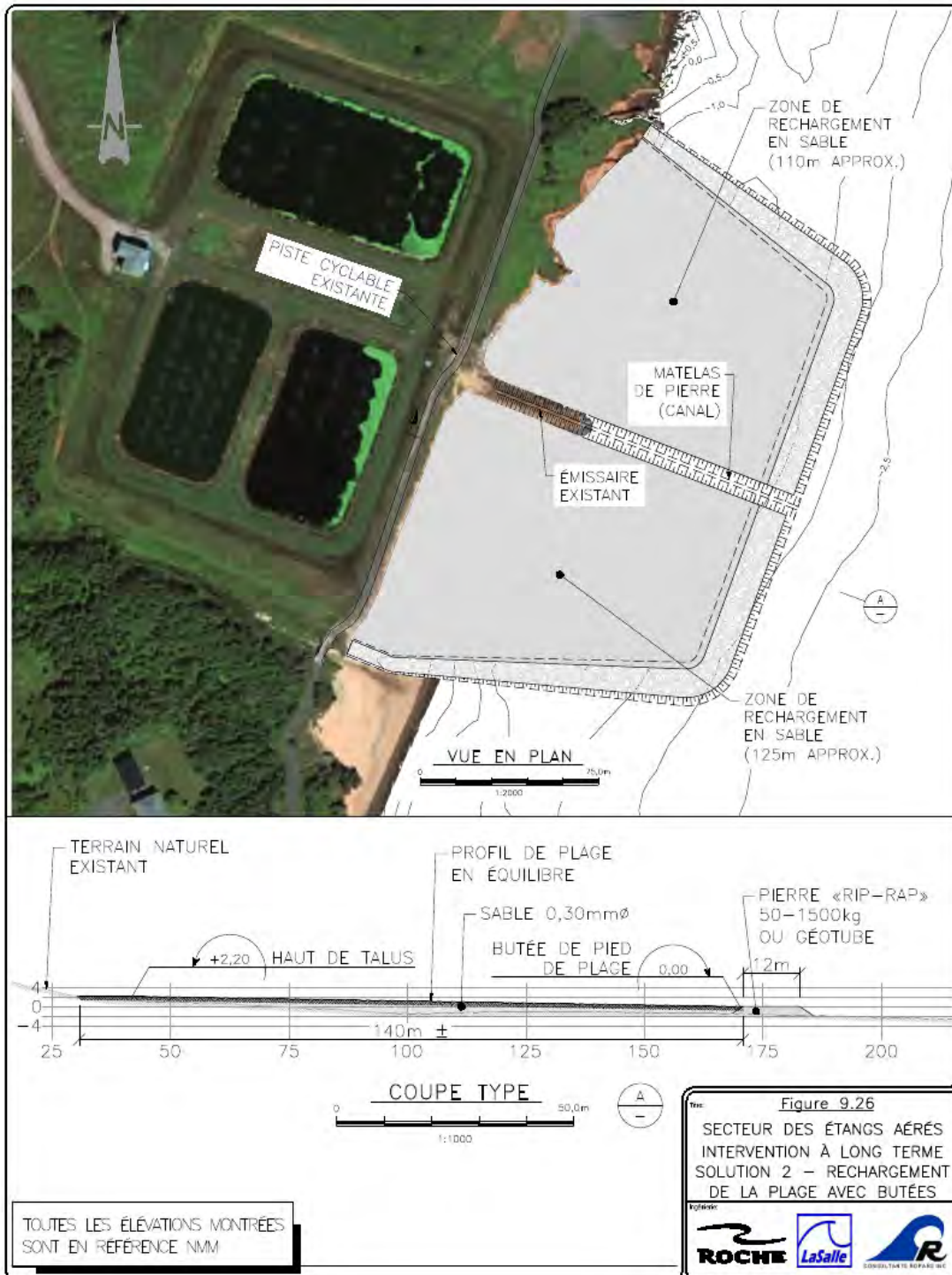


Figure 9.26 – Intervention à long terme - Solution 2 - Rechargement de la plage avec butées

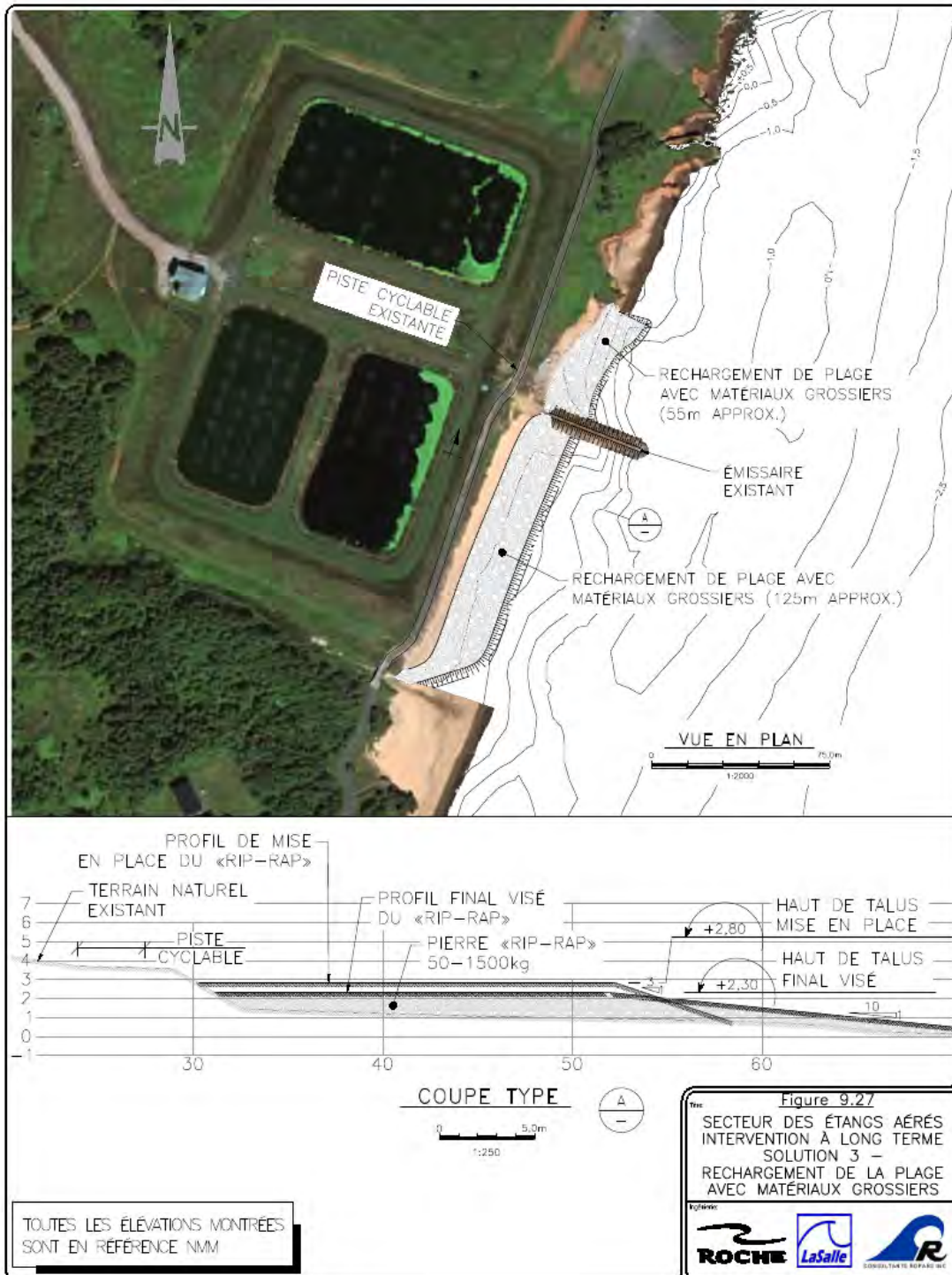


Figure 9.27 – Intervention à long terme - Solution 3 - Rechargement de la plage avec matériaux grossiers

9.13 Intervention à court terme (solution d'urgence)

9.13.1 Plan d'action préconisé

Étant donné que plusieurs mois s'écouleront avant que la solution de protection contre l'érosion à long terme ne puisse être mise en place, il est recommandé d'intervenir dès que possible avec une solution d'urgence pour maintenir la protection minimale offerte par la promenade au pied des étangs.

Le plan d'action proposé est une intervention dans les prochains mois pour empêcher la promenade de disparaître au pied des étangs aérés et une brèche de se produire dans l'étang aéré le plus au sud. Il en résulterait le déversement d'au moins une partie des eaux des étangs aérés dans la baie de Plaisance et des problèmes sérieux de fonctionnement de ce système d'épuration des eaux usées de la Municipalité.

Cette intervention d'urgence serait conçue pour permettre d'attendre la réalisation des travaux de protection de berge à long terme qui seraient les plus appropriés pour le secteur.

Il y a toutefois lieu de noter que la Ville a déjà réalisé, en août 2011, des travaux de renforcement de l'enrochement déjà en place, en ajoutant 204 tonnes de pierres 600 -1000 kg. Ces travaux ont été réalisés dans le but de contrer les effets possibles de l'ouragan Irène qui s'est produit le 26 août 2011.

9.13.2 Protection temporaire urgente de la berge

La protection de berge recommandée en urgence sera réalisée à l'aide de matériaux rocheux provenant de carrières locales. Cette protection se rapprocherait d'un concept de « plage de galets ». Un exemple de ce genre de plage se trouve immédiatement au nord de l'exutoire des étangs aérés et est illustré sur les figures 9.25 et 9.26. Cette plage protège la berge au nord de l'exutoire de façon marginale à cause de son élévation de crête trop basse. Par contre, elle évite à cette partie du rivage de se retrouver dans l'état de dégradation qu'on constate du côté sud de l'exutoire. Cette protection sommaire aurait été mise en place vers 1995, ce qui donne une idée de la durée de vie utile d'un tel concept.

On remarque sur la plage de galets au nord de l'exutoire la présence de blocs de béton et de quelques pierres nettement plus grosses que des galets. Ces deux types de matériaux seraient a priori exclus des matériaux envisagés pour créer la protection temporaire requise en attendant de définir la solution de protection à long terme, ne serait-ce que d'un point de vue esthétique (proximité d'une promenade populaire auprès des Madelinots et des touristes).

Les matériaux constituant la plage de galets pourraient provenir de carrières de grès des Îles, la qualité de la pierre n'étant pas un enjeu majeur en regard de la durabilité requise (quelques mois). La dégradation avec le temps de ces matériaux fournira de petites quantités de sable aux plages en érosion dans le secteur.



Figure 9.28 Plage de « galets » au nord de l'exutoire des étangs aérés (vu du dessus de l'exutoire)



Figure 9.29 Plage de « galets » au nord de l'exutoire des étangs aérés (vu de la plage)

La granulométrie des matériaux de cette plage serait celle d'un tout-venant de carrière, soit de 0 à 500 mm de diamètre, selon une répartition relativement régulière du fuseau entre ces deux limites. Un matériau constitué essentiellement de sable ne serait pas adéquat, sa durabilité étant beaucoup trop faible dans les conditions d'agitation qui prévalent à cet endroit. Un contrôle minimal de la granulométrie des matériaux devra être fait dans la carrière et sur le site pour s'assurer d'un minimum de durabilité de cette protection.

La mise en place de ces matériaux devrait se faire à l'aide d'un buteur sur chenille qui étalerait les pierres déversées des camions, de façon à obtenir une pente régulière et homogène sur l'ensemble de la zone à protéger. L'ancrage des pierres au pied de la pente ne serait pas requis. Une provision en termes de quantités de matériaux est prévue pour éviter d'avoir à faire ces travaux d'excavation.

Cette conception tient compte d'un coût des matériaux raisonnable. Si la Municipalité ne réussit pas à s'entendre avec les propriétaires de carrière des Îles pour obtenir un coût raisonnable de ces matériaux, d'autres solutions devront être envisagées (comme la solution de la plage de galets importés).

Le secteur de côte à protéger de façon temporaire fait environ 150 m de longueur, dont 125 m au sud de l'exutoire et 25 m au nord de l'exutoire. La falaise d'érosion au pied de la promenade fait environ 2 m de hauteur.

Selon le schéma présenté sur la figure 9.26, il faudrait prévoir environ 3 000 m³ de pierre de 0 à 500 kg pour réaliser la protection temporaire de la berge devant les étangs aérés. Le coût de cette intervention est estimé à 304 000 \$ (taxes en sus), tel que détaillé en annexe.

9.13.3 Évaluation environnementale

Le projet d'intervention d'urgence est normalement soumis comme tout projet sur le bord de l'eau à une évaluation environnementale qui, tout en étant relativement rapide dans un tel cas, pourrait prendre plusieurs semaines, le temps d'obtenir tous les avis et commentaires des autorités concernées. Il sera important pour la municipalité de démontrer l'urgence d'intervenir et la possibilité de rendre acceptables les impacts négatifs potentiels de l'intervention (identification et prise en compte lors de la conception, précautions lors des travaux, mesures de mitigation, etc.).

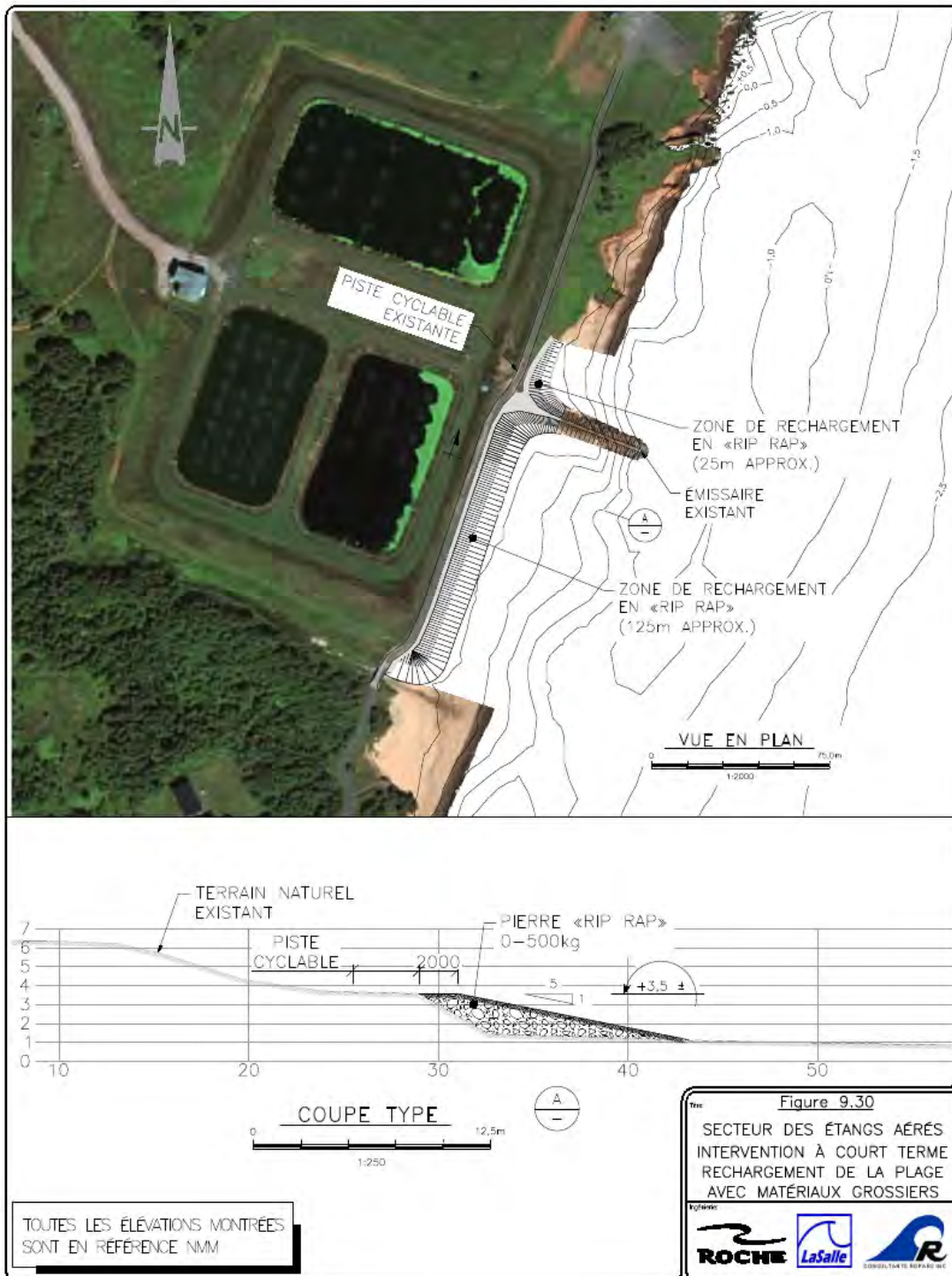


Figure 9.30 – Intervention à court terme - Rechargement de la plage avec matériaux grossiers

10. PROTECTION DE LA BERGE – SECTEUR DE GROS-CAP

10.1 Mécanisme d'érosion probable

Les mécanismes d'érosion probables des falaises de Gros-Cap sont apparentés à ceux décrits pour les étangs aérés, soit une baisse des apports en sédiments en provenance des falaises de Cap-aux-Meules, une hausse relative des niveaux d'eau et une augmentation de l'énergie des vagues au niveau de la côte suite à la disparition des glaces.

De plus, il est possible que des phénomènes de gélifraction, le déboisement, la construction domiciliaire et les phénomènes anthropiques associés (accélération du ruissellement sur des surfaces plus étanches, piétinement, installation d'escaliers, etc.) aient accéléré la dégradation des faces verticales des falaises.

Enfin, la protection de certaines parties de la côte a empiré le déficit sédimentaire et probablement provoqué une baisse de l'élévation combinée à une réduction de la largeur des plages (comparaison des photos aériennes de 1963 et de 2010, surtout à l'extrémité sud de la plage de la garderie) ainsi qu'une intensification de l'action érosive des vagues de tempête.

Ces phénomènes déstabilisent des falaises constituées de matériaux relativement fragiles.

10.2 Protection en enrochement

La protection de la berge à l'aide d'enrochements est un type de protection qui a déjà été mis en œuvre dans le secteur. Le transect critique pour le dimensionnement des enrochements est le transect GC8 pour lequel la profondeur de 1 m sous le NMM se présente en pied de falaise.

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 ($H_s \text{ max} = 1,83 \text{ m}$) 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 Gros-Cap à l'élévation +3,3 m NMM pour empêcher les vagues de le franchir en trop grande quantité.

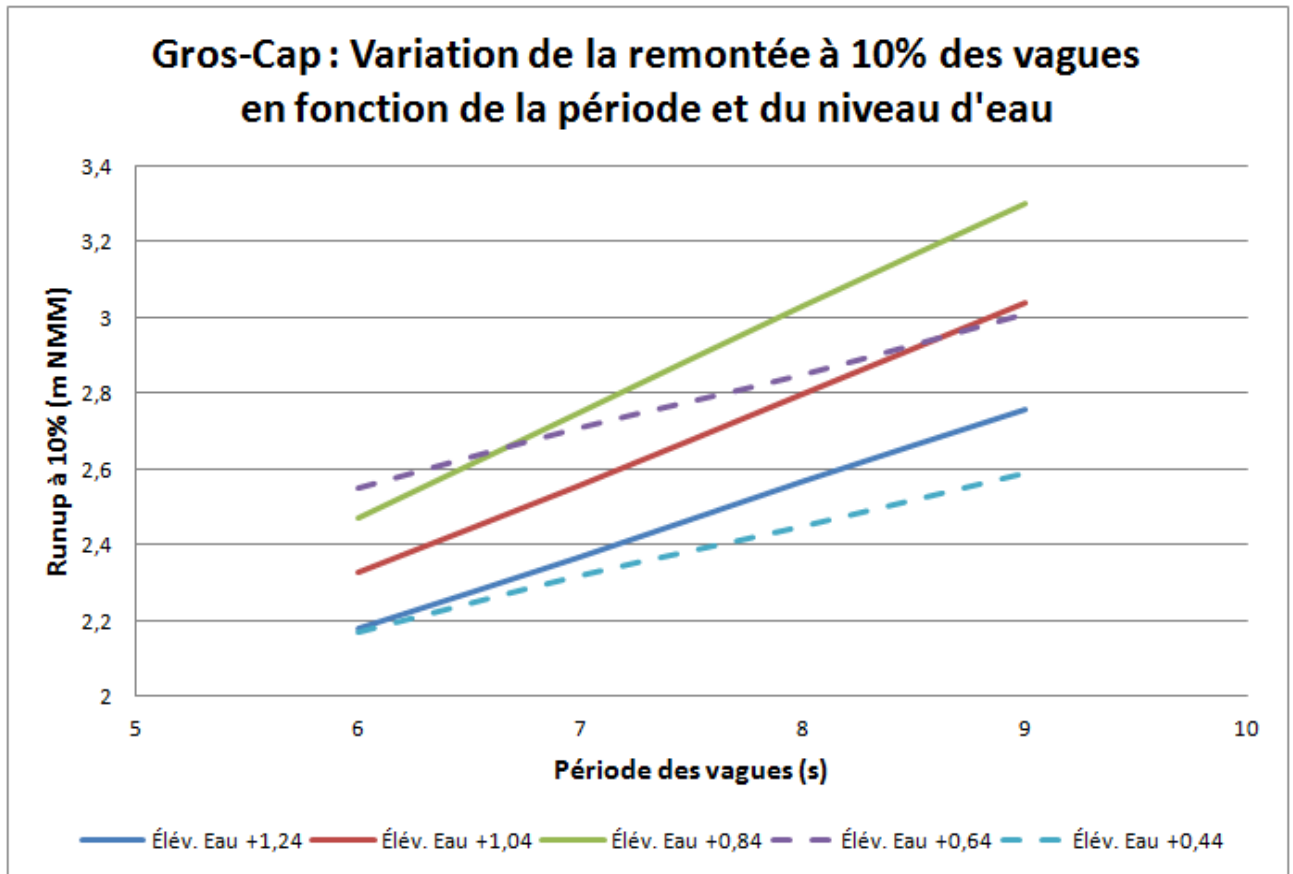


Figure 10.1 Remontée des vagues sur un enrochement à Gros-Cap

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 de la Baie de Plaisance. 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 de la Baie de Plaisance 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 9.2) 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 +3,3 m NMM. Le pire cas de franchissement correspond à un niveau d'eau de +1,6 m ZC (0,84 m NMM) et à une période de pointe des vagues de 9 secondes.

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

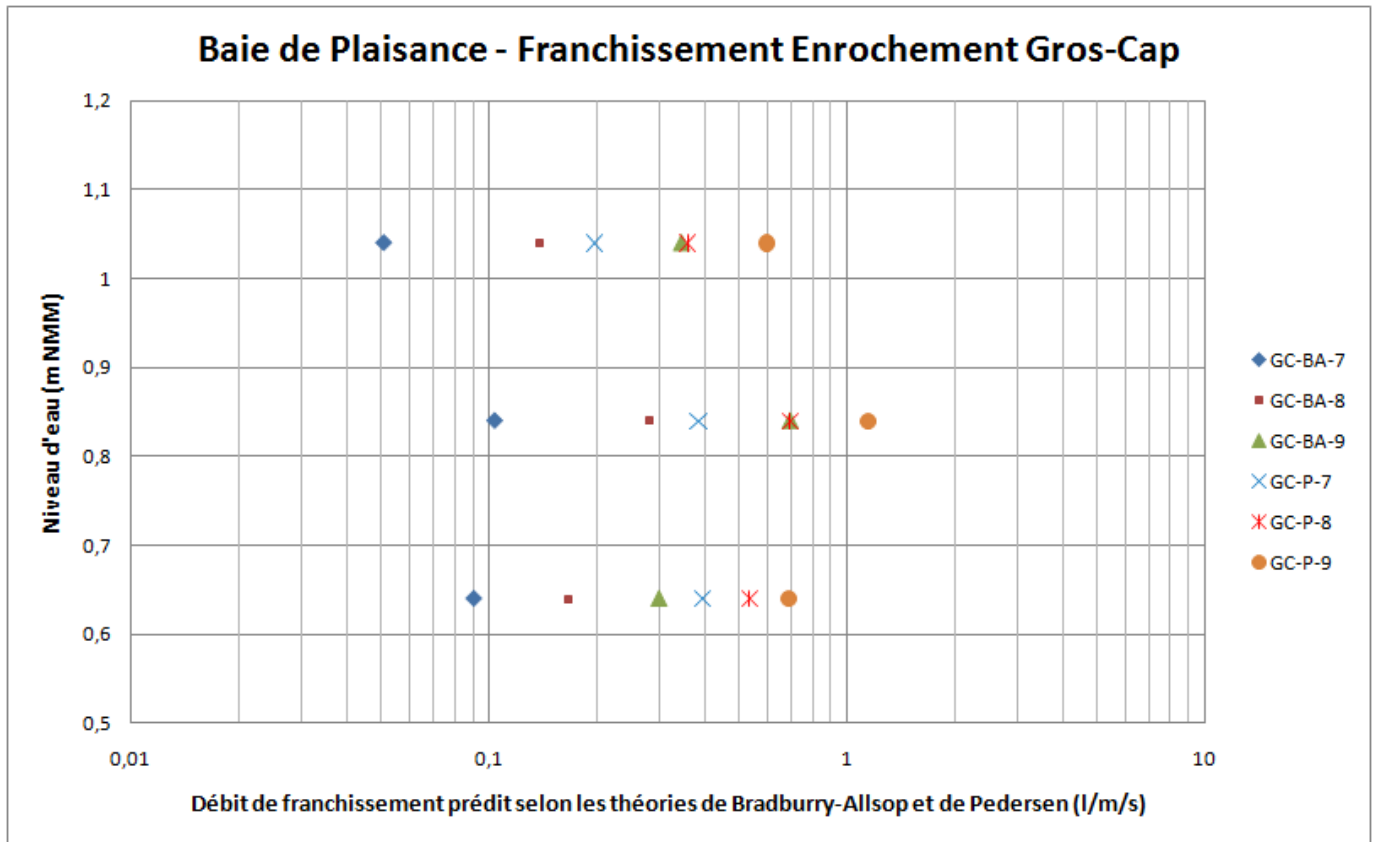


Figure 10.2 Débit de franchissement d'un enrochement dont la crête est à +3,3 m NMM

L'élévation de +3,3 m NMM a donc été retenue pour la crête de l'enrochement de protection de la zone de Gros-Cap. L'optimisation de cette élévation de la protection de la rive passerait par des essais de franchissement en canal à houle, seul moyen de tenir compte de la configuration réelle des fonds marins devant ces ouvrages de protection. Compte tenu des longueurs de falaise concernées par cette protection de berge et des bénéfices de l'optimisation du concept, ces essais en canal à houle sont recommandés lors de la phase de conception finale des ouvrages si cette solution est retenue.

Avec la vague de conception retenue ($H_s = 1,83$ 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 t/m³
- Pente de la structure : 3H / 2V
- Coefficient de stabilité des enrochements K_D (tronc, déferlant, S.P.M.84¹⁴) : 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 10.3 illustre l'installation de cette protection en enrochement du pied de la falaise de Gros-Cap. 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. Par contre, la mise en place de la pierre-filtre et de la pierre de carapace réduirait à 3 m la largeur restante de la voie d'accès pour d'éventuels futurs travaux de réparations de ces enrochements, ce qui est insuffisant. Comme l'empiètement marginal nécessaire au maintien d'une voie d'accès permanente de 6 m de large après les travaux serait important (au moins 25 % de plus d'empiètement) et que les travaux de réparations ne seraient théoriquement requis que dans plusieurs dizaines d'années, il est recommandé de concevoir cette solution avec le minimum d'empiètement sur le milieu marin, la contrepartie étant un surcroît de travail pour accéder à cet enrochement en cas de réparation.

Il est important de noter que la protection du pied des falaises à l'aide d'enrochement n'exclura qu'un type d'érosion de la falaise, soit celui provoqué par les vagues. Les autres types d'érosion (ruissellement, gélifraction, etc.) continueront à agir sur la face de la falaise jusqu'à ce que la pente de cette falaise soit assez douce pour permettre à la végétation de s'installer.

L'ancrage des pierres du pied de l'enrochement pose un problème qui ne pourra être résolu que suite à un relevé géotechnique détaillé des zones à protéger par enrochement. De nombreux affleurements rocheux apparaissent au pied des falaises (voir figures 9.6 et 9.7) et, même si c'est du sable qui se retrouve au pied de ces falaises, l'épaisseur de cette couche de sable pourrait être très mince. Des pierres de carapace directement posées sur du roc affleurant sont instables (voir figure 9.8), à cause des efforts provoqués par les vagues et les glaces. Il faut ancrer les premières pierres au pied de la pente pour s'assurer de la pérennité de la protection en enrochement dans ce genre de configuration. Cet ancrage peut se faire par creusage d'une tranchée dans le roc ou, si les conditions le permettent, par mise en place d'une butée au pied de l'enrochement. Les deux méthodes ajoutent des coûts relativement importants aux travaux. Pour les besoins de l'évaluation des coûts du concept de protection en enrochement, une tranchée de 1,2 m (environ un tiers dans les sédiments et deux tiers dans le roc) a été considérée, cette tranchée étant comblée à l'aide d'une butée de pied en pierres de carapace.

¹⁴ Shore Protection Manual 1984 – U.S. Army Corps of Engineers

Une particularité de la zone des falaises de Gros-Cap est la configuration parfois complexe du rivage, avec ses multiples criques et pointes. Il sera difficile de tenir compte de tous ces détours dans la réalisation des travaux de protection en enrochement, ce qui pourrait augmenter significativement les coûts actuellement prévisibles de cette solution de protection de berge. Les risques de réclamations lors des travaux (conditions géotechniques ou météorologiques particulières, dépassement des quantités prévues au contrat) sont jugés relativement élevés dans de telles conditions.

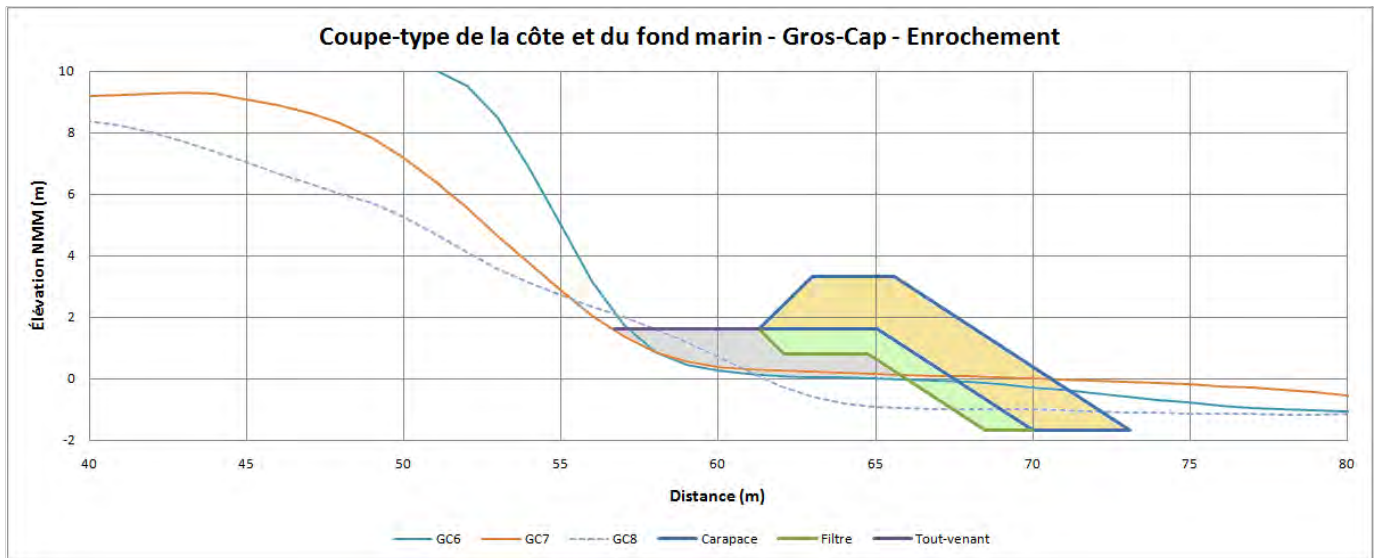


Figure 10.3 Coupe type d'une protection en enrochement à Gros-Cap

10.3 Consolidation des falaises avec du béton

La protection du pied des falaises à l'aide de béton devrait respecter les critères de l'enrochement en termes d'élévation de la crête du mur et de stabilité du pied. Étant donné l'étanchéité du béton et le fort coefficient de réflexion des vagues sur une telle protection, la remontée des vagues est légèrement plus forte et il faut prévoir que l'érosion en pied du mur sera plus intense.

L'ancrage du mur dans le roc dont sont constituées les falaises de Gros-Cap n'étant pas viable (roc trop friable et trop sensible à l'eau et aux cycles de gel/dégel), le mur de béton devra être autostable en simple appui sur la falaise.

Pour ce qui est de la fondation du mur, une excavation sera requise au pied de la falaise pour ancrer convenablement le pied du mur de béton. Une profondeur minimale de 1,2 m a été considérée de façon préliminaire, mais cette profondeur devrait être confirmée par une étude géologique incluant la vitesse à laquelle se détériorerait le roc au pied du mur de béton.

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

De façon à dimensionner l'élévation de la crête du mur de béton à placer devant le pied des falaises de part et d'autre des étangs aérés, la formule de franchissement de Franco & Franco 1999 a été utilisée¹⁵. Le débit maximal de franchissement qui a été retenu pour le dimensionnement de cette crête de mur est de 2 l/s/m correspondant au début de dommage sur des enrochements. Étant donné la nature friable et sensible aux cycles de gel/dégel du roc dont sont constituées ces falaises, même ce débit important pourrait se révéler excessif.

La figure suivante illustre les calculs de franchissement pour une crête de mur située à +3,7 m NMM.

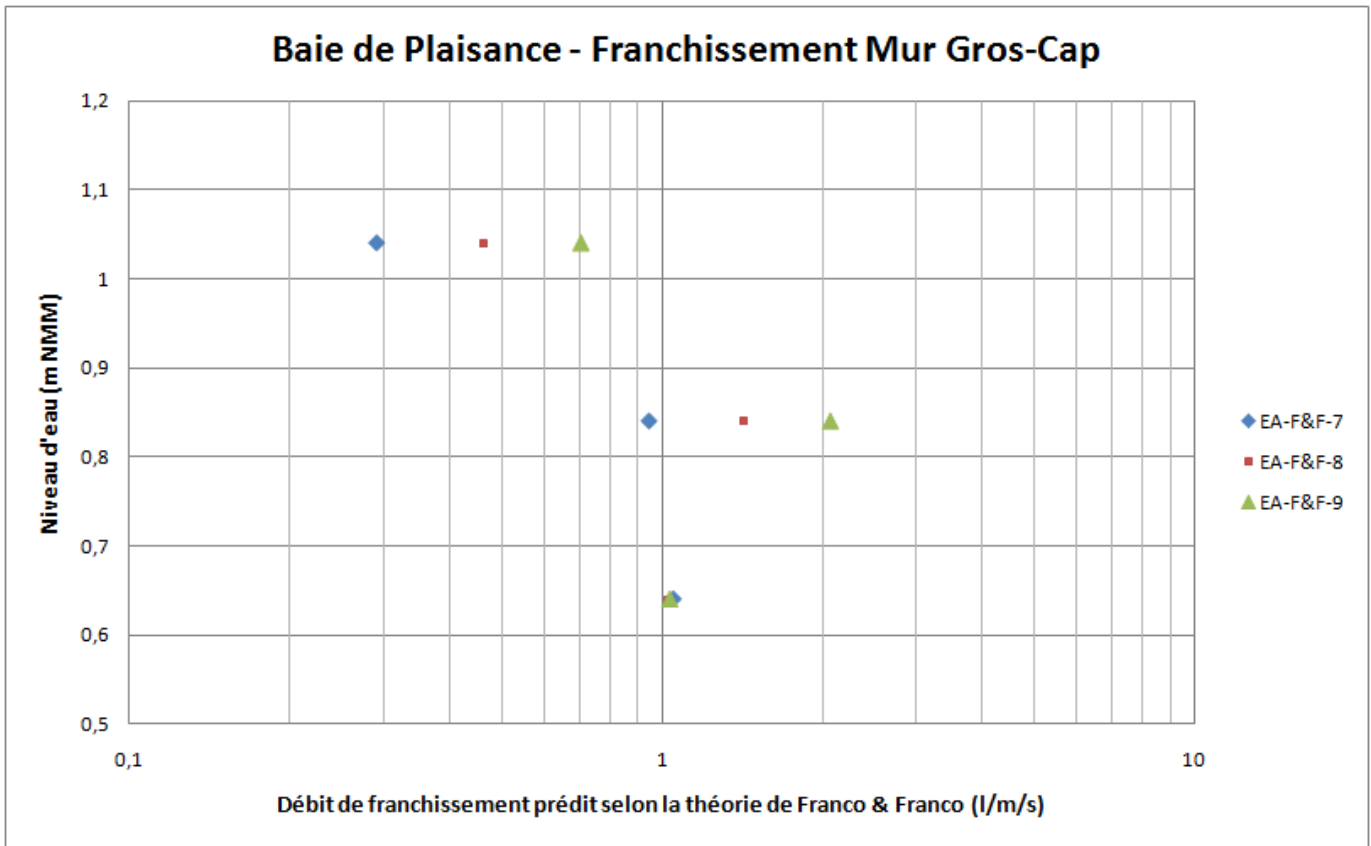


Figure 10.4 Débits de franchissement d'un mur dont la crête est située à +3,7 m NMM

La figure 10.5 illustre la coupe type d'une protection en béton armé placée au pied de la falaise de Gros-Cap.

La solution d'un confortement en béton du pied de la falaise sera difficile à mettre en œuvre et ne répondrait pas vraiment à des impératifs d'intégration esthétique de cette solution de confortement dans les falaises, à cause des contraintes techniques de durabilité, à moins de

¹⁵ Coastal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineer, - Table VI-5-13 page VI-5-29

faire appel à des artistes qui travailleraient au niveau des formes pour donner une apparence plus naturelle à ce béton, ce qui pourrait faire exploser les coûts.

La durabilité d'un tel concept reste à démontrer et d'importants effets de bout pourraient apparaître aux extrémités des zones bétonnées. Il s'agit de plus d'un ouvrage complexe à réaliser dans l'eau à cause de l'exigence de durabilité de l'ouvrage qui implique que la fondation soit excavée dans le roc au pied de la falaise, sous le zéro des cartes marines, à la merci des intempéries.

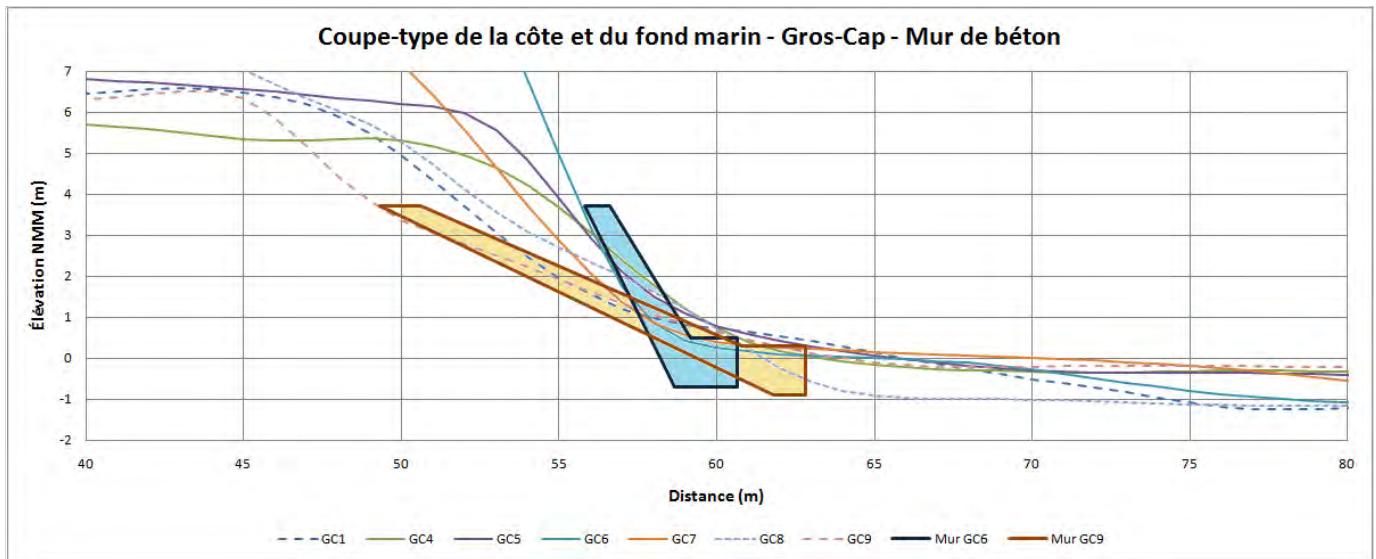


Figure 10.5 Coupe type d'une protection en béton armé du pied des falaises de Gros-Cap

10.4 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 les figures 10.6 et 10.7 pour la zone des falaises et celle de la plage de la Garderie.

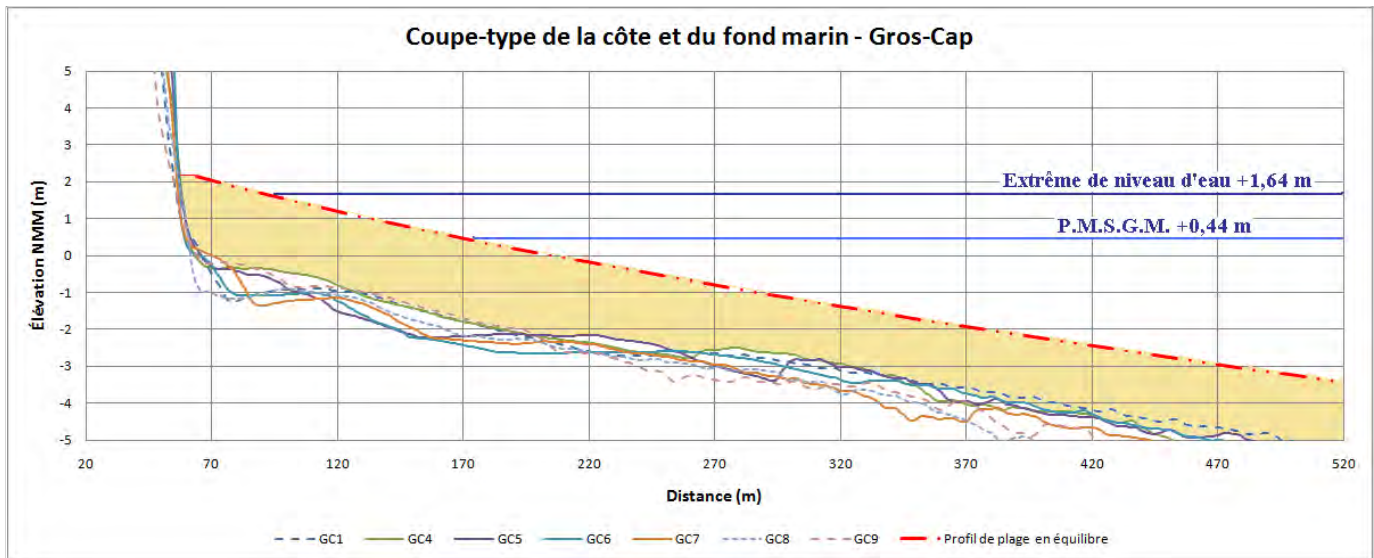


Figure 10.6 Coupe type d'une plage en équilibre devant les falaises de Gros-Cap

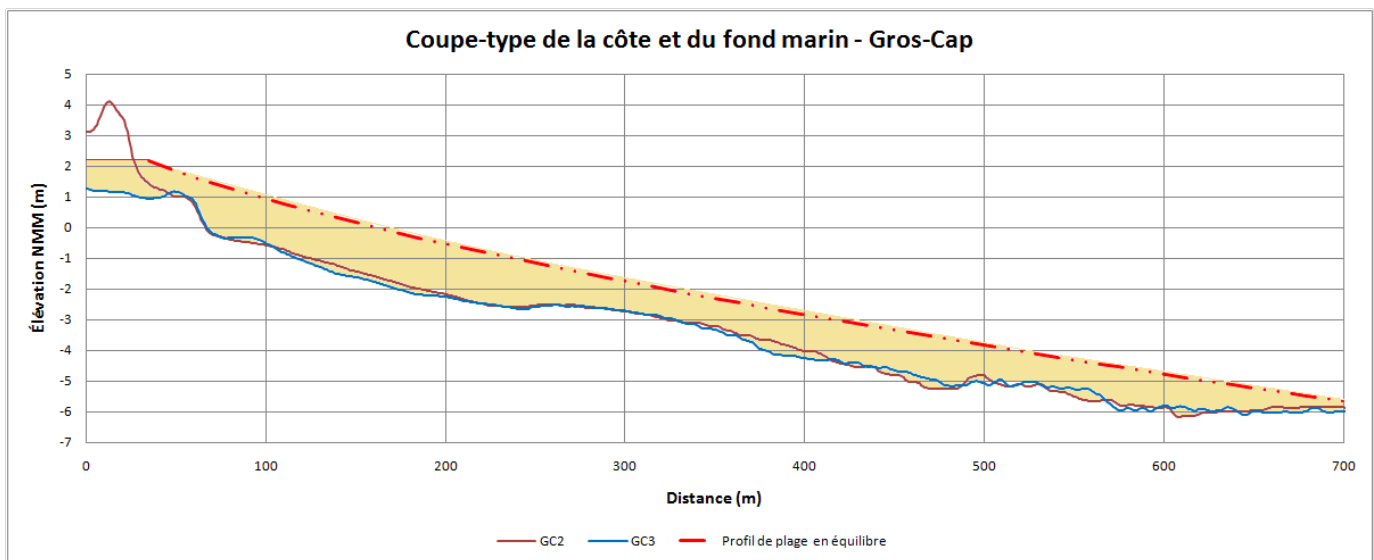


Figure 10.7 Coupe type d'une plage en équilibre au niveau de la plage de la Garderie

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 0,5 m de la plage par rapport aux niveaux d'eau extrêmes étant faible.

Dans le cas des falaises de Gros-Cap, le profil d'une plage en équilibre est loin de celui du fond naturel actuel. La distance entre le profil théorique et les profils mesurés peut dépasser plusieurs mètres par endroits.

Dans le cas de la plage de la Garderie, le profil d'équilibre de la plage est un peu moins loin de celui du fond naturel que dans le cas des falaises, mais les deux profils ne se croisent qu'à 650 m de la rive.

Le C.E.M. donne certains moyens d'évaluer un peu plus précisément les caractéristiques que devrait avoir un rechargement de plage dans le cas de la plage de la Garderie. 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 de l'ordre de 0,3 mm (au lieu des 0,25 mm du sable actuellement dans cette zone). Le diamètre caractéristique des sédiments dragués dans le havre de Cap-aux-Meules n'étant pas connu, il est difficile de recommander son utilisation dans ce cas.

Devant la plage de la Garderie, il faudrait envisager plus de 800 m³/m de sable pour recharger la plage (à condition d'être en mesure de retenir ce sable devant la plage sans butée de pied). Même avec ces volumes et un sable présentant un diamètre de 0,30 mm, la relation concernant le volume critique de sédiments n'est pas respectée, ce qui laisse entrevoir des problèmes de stabilité de ce rechargement. Les cartes de courants littoraux (chapitre 8) indiquent également un potentiel d'instabilité d'un tel rechargement de plage avec des courants induits par les tempêtes qui emportent les sédiments vers le large.

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 850 m³/m de sable de rechargement sur une largeur minimale de 350 m de plage, on parle de 300 000 m³ de sable plus grossier que le sable en place à installer uniquement devant la plage de la Garderie. À ces quantités de sable s'ajouteraient les épis de protection aux extrémités de la zone de recharge afin d'éviter une fuite latérale trop rapide des sédiments, des épis intermédiaires et 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 coûts. L'hypothèse de récurrence des rechargements de plage a été de placer 25% 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.

10.5 Rechargement de plage avec butée de pied

La seule façon d'envisager un rechargement de plage devant la Garderie est de concevoir ce rechargement combiné à une butée de pied pour assurer la stabilité de la plage dans le sens perpendiculaire à la côte. Des épis seraient requis pour assurer la stabilité de la plage dans le sens parallèle à la côte.

De façon à tenter de minimiser les dommages à la butée de pied de la « plage suspendue », 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 profond d'eau, moins elle est efficace pour réduire la hauteur des vagues et plus il faut mettre de sable pour construire la plage suspendue.

La figure 10.8 illustre la coupe type 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. Trois exemples de butée de pied sont illustrés, soit une butée dont la crête serait à +1,0 m NMM, une butée dont la crête serait au 0,0 m NMM et une butée dont la crête serait à -1,5 m NMM.

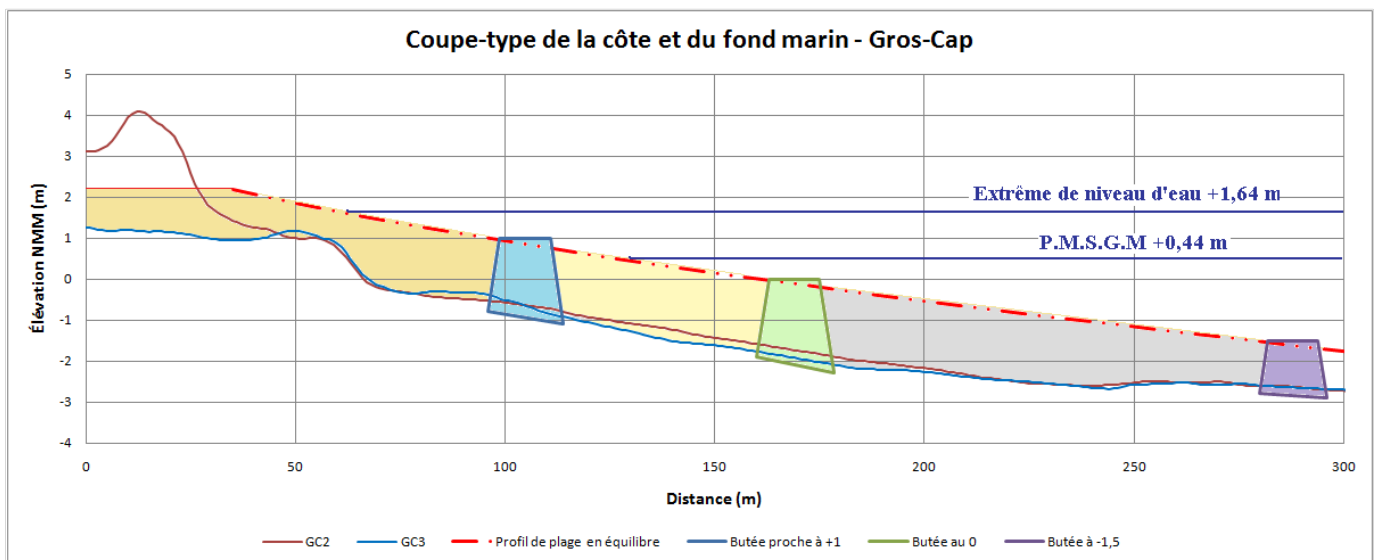


Figure 10.8 Coupe type d'une plage suspendue devant la plage de la Garderie

Pour garder le caractère esthétique d'une plage à ce secteur, il serait requis de placer la crête de la berme de protection de pied de plage au moins à -1,0 m NMM sinon à -1,5 m NMM (la butée la plus éloignée du rivage sur la figure précédente). Ce dernier choix implique de placer environ 450 m³/m de sable de rechargement sur une largeur minimale de 250 m de plage. En plus des protections en pied de plage et sur les côtés de la recharge, on parle donc de 115 000 m³ de sable requis pour recharger une première fois cette plage suspendue devant la plage de la Garderie. 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.

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'un chaland. À cause des contraintes mécaniques auxquelles sera

soumise cette pierre, il est requis d'aller la chercher à l'extérieur des îles de la Madeleine pour obtenir une qualité minimale des matériaux et une durabilité acceptable de l'ouvrage.

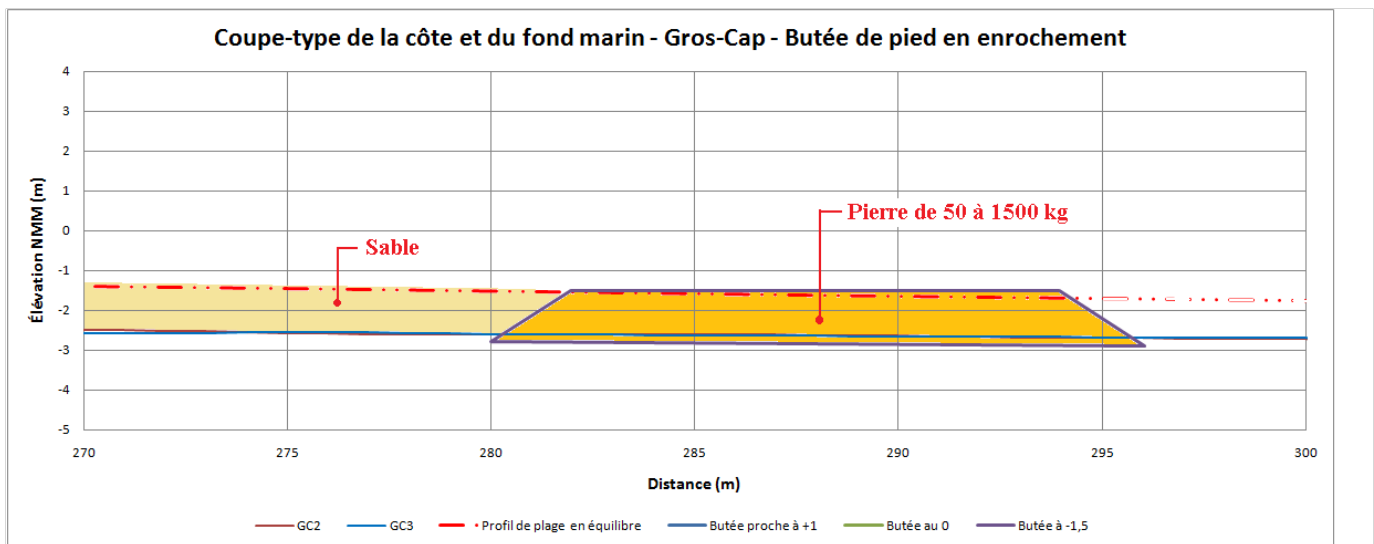


Figure 10.9 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en enrochement à -1,5 m NMM

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. Le sable utilisé dans les géotubes pourrait provenir du dragage du havre de Cap-aux-Meules. 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 Mexique¹⁶ (voir figure 10.8) indiquent 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 ont 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 10.8 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

¹⁶ <http://www.cenotes.com/save/Report.html>

antiaffouillement est prévu sous les géotubes. Il est possible que deux géotubes soient suffisants et la compagnie Tencate/Terratube considère la possibilité 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.



Photo 38 8/09/07

After Hurricane Dean this geotube was found blanketing the reef, 100 meters from the shoreline.

Figure 10.10 Géotube endommagé suite à un ouragan à Riviera Maya (Mexique)

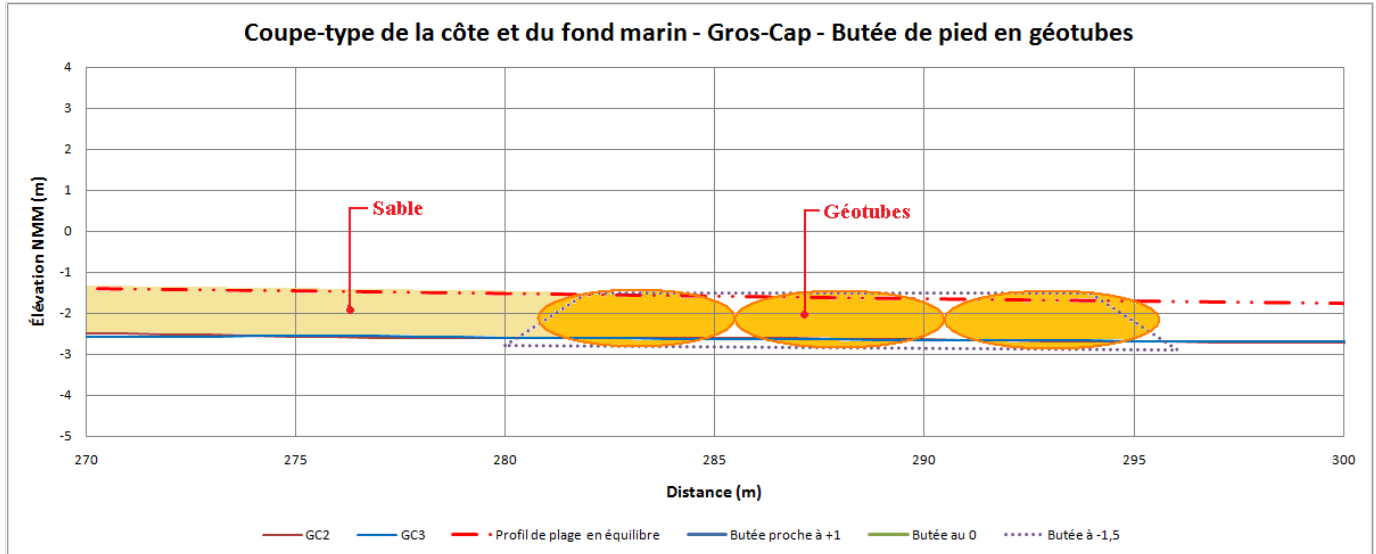


Figure 10.11 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en géotubes à -1,5 m NMM

Du rechargement de plage ne peut donc raisonnablement s'envisager dans le cas du secteur de la Garderie 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.

Dans le cadre de cette solution de plage suspendue, il faudra résoudre le problème du ruisseau qui arrive du côté sud de la plage de la Garderie et dont l'altitude est d'un mètre inférieure à celle de la crête de la plage préconisée. Cette ouverture pour laisser l'eau s'écouler de ce ruisseau permettra à l'eau de mer de passer de l'autre côté de la rive et d'inonder la route et des terrains si rien n'est fait pour y remédier. Il s'agit d'un obstacle potentiel à ce genre de solution de rechargement de plage.

La mise en place de ce rechargement de plage pourrait prendre les dimensions illustrées sur la figure 10.8 (cas de la butée en pierre au zéro NMM). Non seulement la butée de pied de plage devra être mise en place, mais il serait également nécessaire de placer des protections (en pierre et/ou géotubes) de part et d'autre de la zone rechargée en sable pour contenir ce sable latéralement et lui permettre de protéger le secteur de la plage de la Garderie à Gros-Cap. Il sera également nécessaire de prévoir des épis intermédiaires pour stabiliser les sédiments face au transport littoral. Il s'agirait d'un projet relativement traditionnel, même si en général ce genre de protection se fait sur un secteur plus étendu en longueur et dans un milieu moins déficitaire en sédiments. Des études spécifiques seront requises pour optimiser le concept et la position des épis de protection avant de passer à une éventuelle phase de réalisation.

10.6 Rechargement en bas de falaise avec des matériaux grossiers

Du rechargement de plage en tout-venant de carrière des Îles (rip-rap), en galets, en gravier ou en sable et gravier pourrait être plus intéressant que du rechargement en sable dans le secteur de Gros-Cap, 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, aux contraintes hydrodynamiques et à 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. Ces matériaux grossiers locaux auraient l'avantage d'alimenter les plages adjacentes en sédiments identiques aux sédiments en place à travers leur processus de dégradation. Une étude de disponibilité de pierre de type « rip-rap » local ou de type 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 +2,4 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 1,83 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 davantage 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.

Il a en particulier fallu faire une hypothèse sur la largeur de la crête de la protection en matériaux grossiers locaux. Il se pourrait que la largeur de 20 à 22 m retenue dans les calculs préliminaires soit trop pessimistes et qu'une largeur de 10 à 15 m soit suffisante pour assurer la protection de la rive, réduisant significativement les quantités de matériaux locaux requises dans ce genre de projet. Des études complémentaires sur la qualité des matériaux et des essais en canal à houle en phase de concept final permettraient d'optimiser le projet.

La figure 10.12 illustre la coupe type proposée dans le cas d'une telle protection de berge dans le secteur des falaises de Gros-Cap. La pierre de rip-rap locale serait mise en place selon une géométrie relativement facile à obtenir pour l'entrepreneur avec des buteurs (pente 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.

Les deux avantages de cette solution de protection de berge par rapport à l'enrochement traditionnel sont :

- l'absence d'exigence concernant la tranchée de stabilisation du pied (à creuser en grande partie dans le roc) et
- la grande flexibilité du concept dans le contexte d'une ligne de rivage présentant beaucoup d'irrégularités (criques et pointes).

Ces deux caractéristiques diminuent significativement le niveau de risque de cette solution en termes de coûts des travaux (difficulté de creuser le roc sous l'eau, à la merci des intempéries, moindre risque de réclamations résultant de conditions géotechniques ou météorologiques particulières, moindre risque de dépassement des quantités de matériaux initialement prévues).

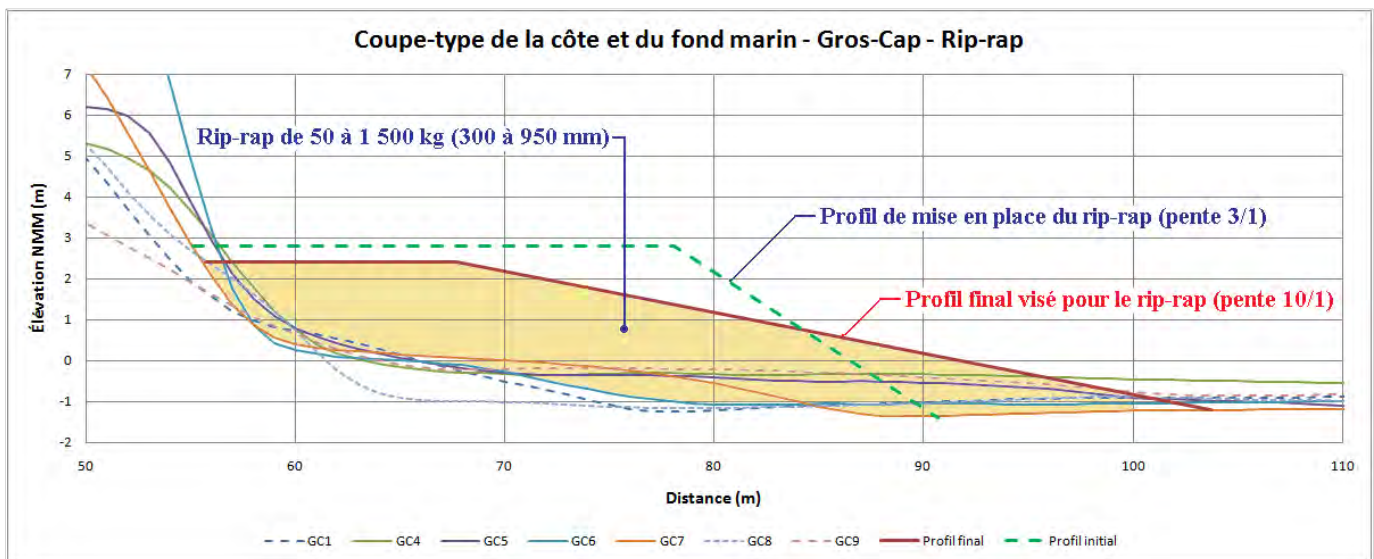


Figure 10.12 Coupe type d'une protection en matériaux grossiers devant les falaises de Gros-Cap

Un concept de plage de galets 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 et impliquerait potentiellement une diminution des coûts de ce type de projet par rapport au projet décrit ci-dessus utilisant des matériaux 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.

Dans tous les cas (matériaux locaux ou importés), des essais en modèle réduit seront recommandés pour finaliser la géométrie des plages de rip-rap ou galets à mettre en place pour protéger la côte.

10.7 Rechargement du haut de plage en matériaux grossiers

Un rechargement de haut de plage en tout-venant de carrière des îles (rip-rap), en galets, en gravier ou en sable et gravier pourrait être intéressant pour le secteur de la plage de la Garderie à Gros-Cap, à cause de la présence du haut de plage. Il y a 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 certaines données préliminaires aient pu être obtenues dans le cadre de la présente étude, une étude plus approfondie de disponibilité de pierre locale de type « rip-rap » ou 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 1,35 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 20 et 600 kg (230 à 700 mm de diamètre équivalent), la granulométrie du matériel devant être régulière entre ces deux limites. Étant donné la présence de la plage, pour des raisons esthétiques et d'accès sur la plage, il faudrait envisager recouvrir cette pierre grossière à l'aide de sable au début de chaque saison estivale. Le sable utilisé sur le rip-rap pourrait provenir du dragage du havre de Cap-aux-Meules, à condition que ce sable présente une granulométrie qui ne soit pas trop fine et une qualité minimale (absence de contamination) dans le cadre de son utilisation comme plage accessible au public.

Ce concept de protection de berge s'apparente beaucoup 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. L'hypothèse de récurrence des rechargements en sable a été de placer la moitié de la quantité initiale tous les ans. Des

études spécifiques quant à la durabilité de la pierre utilisée et du sable devraient être entreprises pour confirmer ces hypothèses si cette solution est sérieusement envisagée.

La figure suivante illustre la coupe type proposée dans le cas d'une telle protection de berge dans le secteur de la plage de la Garderie. La pierre de rip-rap locale pourrait être mise en place selon une géométrie relativement facile à obtenir pour l'entrepreneur avec des bouteurs (pente 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. Par contre, s'il est requis de redonner sans délai une fonction récréative à la plage (travaux réalisés en début d'été), il serait préférable d'exiger de l'entrepreneur la mise en place des matériaux grossiers selon une pente plus douce que 3/1.

Une percée devra être réservée dans cette protection au droit du ruisseau pour laisser l'eau s'écouler vers la mer. Par contre, cette percée laissera l'eau pénétrer en arrière de la protection lors des épisodes de très hauts niveaux d'eau.

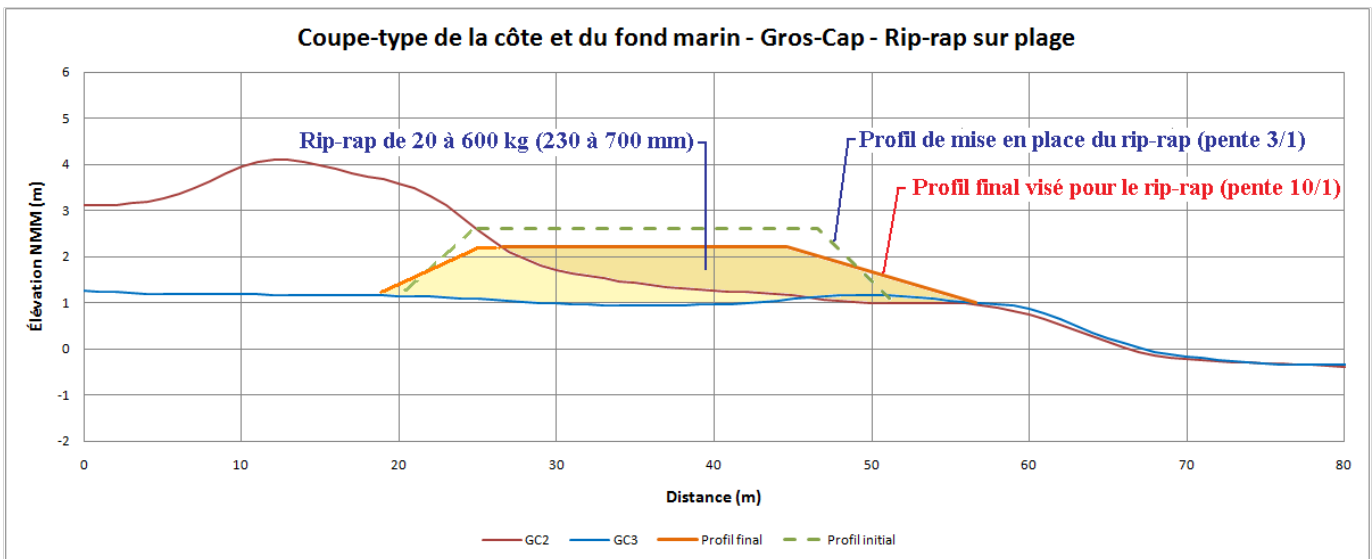


Figure 10.13 Coupe type d'une protection de berge en matériaux grossiers sur la plage de Gros-Cap

Un concept de noyau dur réalisé à l'aide de galets importés ayant une durabilité améliorée par rapport aux matériaux locaux requerrait nettement moins de matériaux grossiers à mettre en place contre la dune littorale de la plage de la Garderie et impliquerait potentiellement une diminution des coûts de ce type de projet par rapport au projet décrit ci-dessus utilisant des matériaux grossiers locaux. La taille du noyau destiné à résister aux événements exceptionnels serait moins grande, de même que les quantités de sable de recouvrement de ces galets. Ce projet serait aussi nettement plus facile à intégrer de façon esthétique au milieu que du rip-rap.

Dans tous les cas (matériaux locaux ou importés), des essais en modèle réduit seront recommandés pour finaliser la géométrie des plages de rip-rap ou galets à mettre en place pour protéger la plage de la Garderie.

10.8 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 de la pente d'équilibre de la plage 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 pour retenir les sédiments est la trop faible quantité de sable qui semble circuler devant la plage de la Garderie avec l'attaque généralement frontale des vagues qui semble induire plus de circulation des sédiments de la côte vers le large que de circulation parallèle à la côte de ces sédiments (voir chapitre 8). Une démonstration du peu d'intérêt de cette solution est faite par l'exutoire actuel des étangs aérés qui ne retient pas vraiment de sable, ni d'un côté, ni de l'autre des enrochements.

Par contre, ces épis perpendiculaires au rivage peuvent (et doivent probablement) être envisagés pour retenir une recharge de plage faite devant les côtes de Gros-Cap (avec butée de pied de plage).

De plus, une recharge de plage devant la plage de la Garderie pose le risque de réduire la capacité d'évacuation de l'eau en provenance du ruisseau situé au sud de la Garderie. Une façon de réduire ce risque serait de construire un épi au nord du ruisseau sur la plage pour assurer son écoulement en tout temps.

10.9 Brise-lames submersibles au large

La mise en place d'un brise-lames submersible au large de Gros-Cap 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 entre 150 et 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 tels qu'illustrés sur la figure suivante). 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, ce qui n'est en général pas recommandé par les biologistes à cause des impacts négatifs sur les organismes pris au piège de ces

accumulations d'eau (assèchement progressif, réchauffement de l'eau retenue, prédation par les oiseaux, etc.). Cette option n'a donc pas été retenue.

10.10 Déplacement d'infrastructures

Le déplacement ou le déménagement de certaines résidences et de certaines infrastructures urbaines (route, services) devrait également être envisagé, surtout dans le cas où ces infrastructures sont tellement avancées sur la plage ou sur le bord de la falaise qu'elles augmentent significativement le coût d'une solution globale.

Cette hypothèse touche tout particulièrement la route 199 à environ 1 km au sud du ruisseau de la plage de la Garderie. Si une protection de berge n'est pas mise en place bientôt, cette portion de route sera mise en danger par l'érosion et un déplacement de la route vers l'intérieur des terres sera requis.

10.11 Solutions en érosion pour le secteur de Gros-Cap

Les solutions les plus évidentes en matière de protection contre l'érosion des falaises dans le secteur de Gros-Cap sont la protection à l'aide d'un **enrochement linéaire** (voir figures 10.14 et 10.15) ou la solution de **rechargement avec des matériaux grossiers** (rip-rap local ou galets importés) (figures 10.16 et 10.17 pour le rip-rap). La solution en enrochement serait du type « permanent » (35 ans de vie utile sans interventions majeures, à condition de s'assurer de la stabilité du pied de l'enrochement) alors que la solution en rip-rap extrait des carrières des îles de la Madeleine ou en galets importés de l'extérieur des îles serait une solution nécessitant des rechargements périodiques (à tous les 15 ans pour le rip-rap). L'inconvénient principal de la solution en enrochement est la dégradation de la plage en avant de l'enrochement alors que la solution en rip-rap entretiendrait et améliorerait les plages adjacentes à travers le processus de dégradation des pierres constituant le rip-rap. La solution en plage de galets n'a pas les inconvénients de la solution en enrochement linéaire, mais n'offre pas le bénéfice de la solution en rip-rap. Un autre inconvénient significatif de la solution de protection à l'aide d'un enrochement linéaire est le risque très important de réclamation en cours de travaux (géotechnique, tempêtes) et de dépassement de coûts alors que la solution de rechargement avec des matériaux grossiers ne comporte pratiquement aucun risque de cette nature.

Ces solutions devraient être modulées en fonction de l'importance des infrastructures à protéger (en particulier la route), le retrait ou l'absence d'intervention pouvant être des solutions nettement plus économiques que la protection à certains endroits où les infrastructures sont soit minimales, soit suffisamment distantes du rivage.

Pour le secteur de la plage de la Garderie, la solution du **rechargement du haut de plage à l'aide de matériaux grossiers** (rip-rap local ou galets importés) recouverts de sable pour la saison estivale) serait probablement la solution à privilégier. Le rechargement de la plage à l'aide de sable (figures 10.18 et 10.19) ne semble être viable qu'à deux conditions difficiles à remplir :

- la découverte d'une source importante de sable plus grossier que le sable actuellement en place (produits du dragage de l'entrée de la lagune de Grande-Entrée ?),
- la mise en place d'une butée de pied de plage (en enrochements ou en géotubes renforcés).

La solution d'un confortement en béton du pied de la falaise n'est pas vraiment une solution dans le cas de Gros-Cap. La durabilité d'un tel concept reste à démontrer et d'importants effets de bout pourraient apparaître aux extrémités des zones bétonnées. Il s'agit de plus d'un ouvrage complexe à réaliser dans l'eau à cause de la durabilité requise de l'ouvrage qui exige que la fondation soit excavée dans le roc au pied de la falaise sous le zéro des cartes marines.

La solution d'un brise-lames submersible au large de la côte n'est pas une solution « en soi » étant donné la faible efficacité d'un tel ouvrage à arrêter les processus d'érosion, à moins de placer la crête de ce brise-lames au niveau de la marée haute, ce qui aura un impact visuel très important.

Les estimations de coûts de ces trois solutions sont présentées en annexe. Elles se résument comme suit (taxes en sus) – la solution en plage de galets n'a pas pu être évaluée faute de modèle paramétrique permettant de la dimensionner :

Solution 1 – Enrochement (1975 m.l.)		15 680 000 \$	
Solution 2 – Rechargement de la plage avec matériaux grossiers (1975 m.l.)	Coût initial :	12 909 000 \$	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>6 697 000 \$</u>	
	Coût total :	19 606 000 \$	
Solution 3 – Rechargement de la plage avec butée de pied (350 m.l.; plage de la Garderie seulement)	Coût initial :	11 167 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 7-8 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans). À valider par des études complémentaires, y inclus modélisation physique.
	Rechargements périodiques :	<u>6 323 000 \$</u>	
	Coût total :	17 490 000 \$	

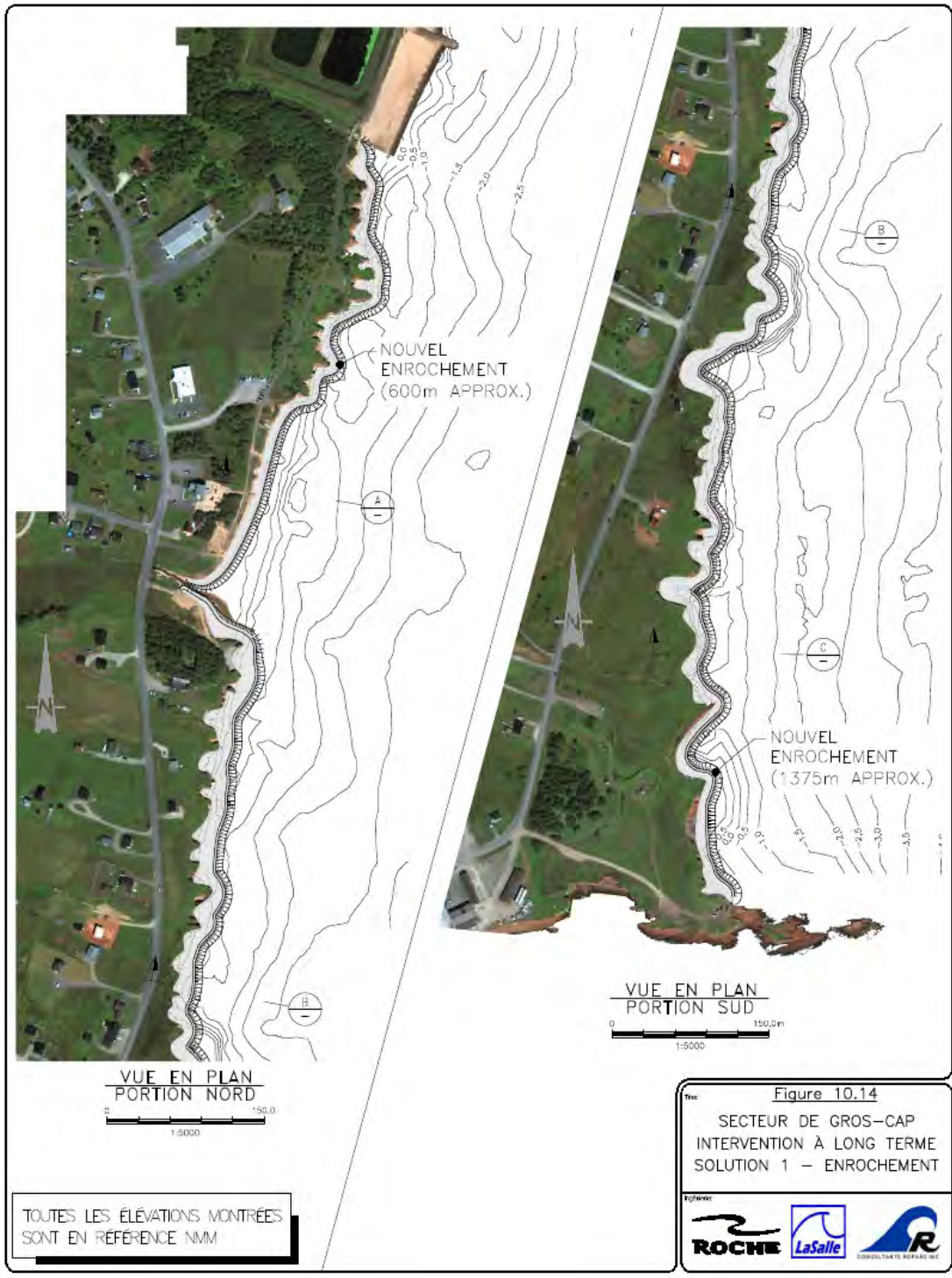


Figure 10.14 – Intervention à long terme – Solution 1 – Enrochement – Vue en plan

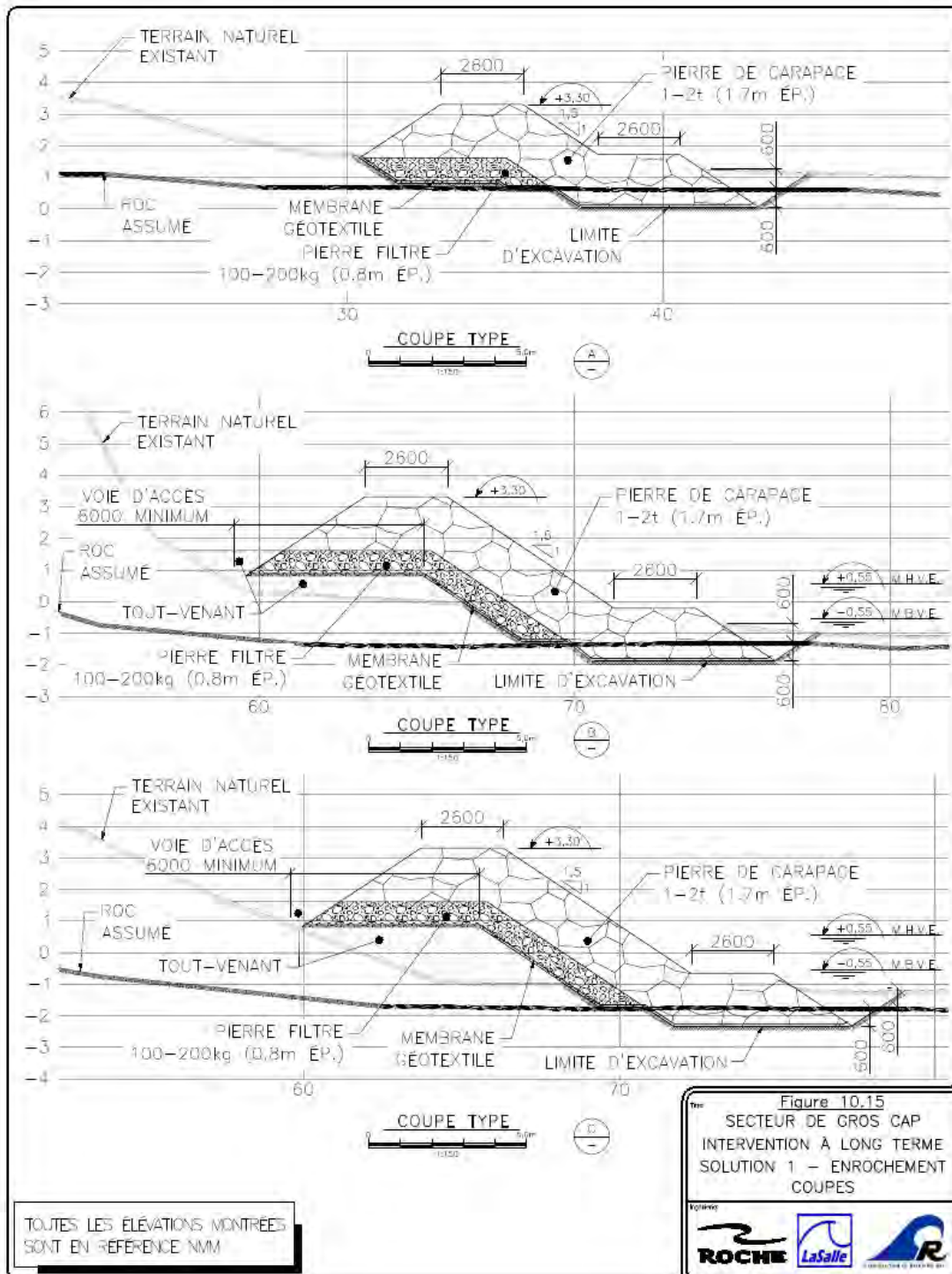


Figure 10.15 – Intervention à long terme – Solution 1 – Enrochement – Coupes types

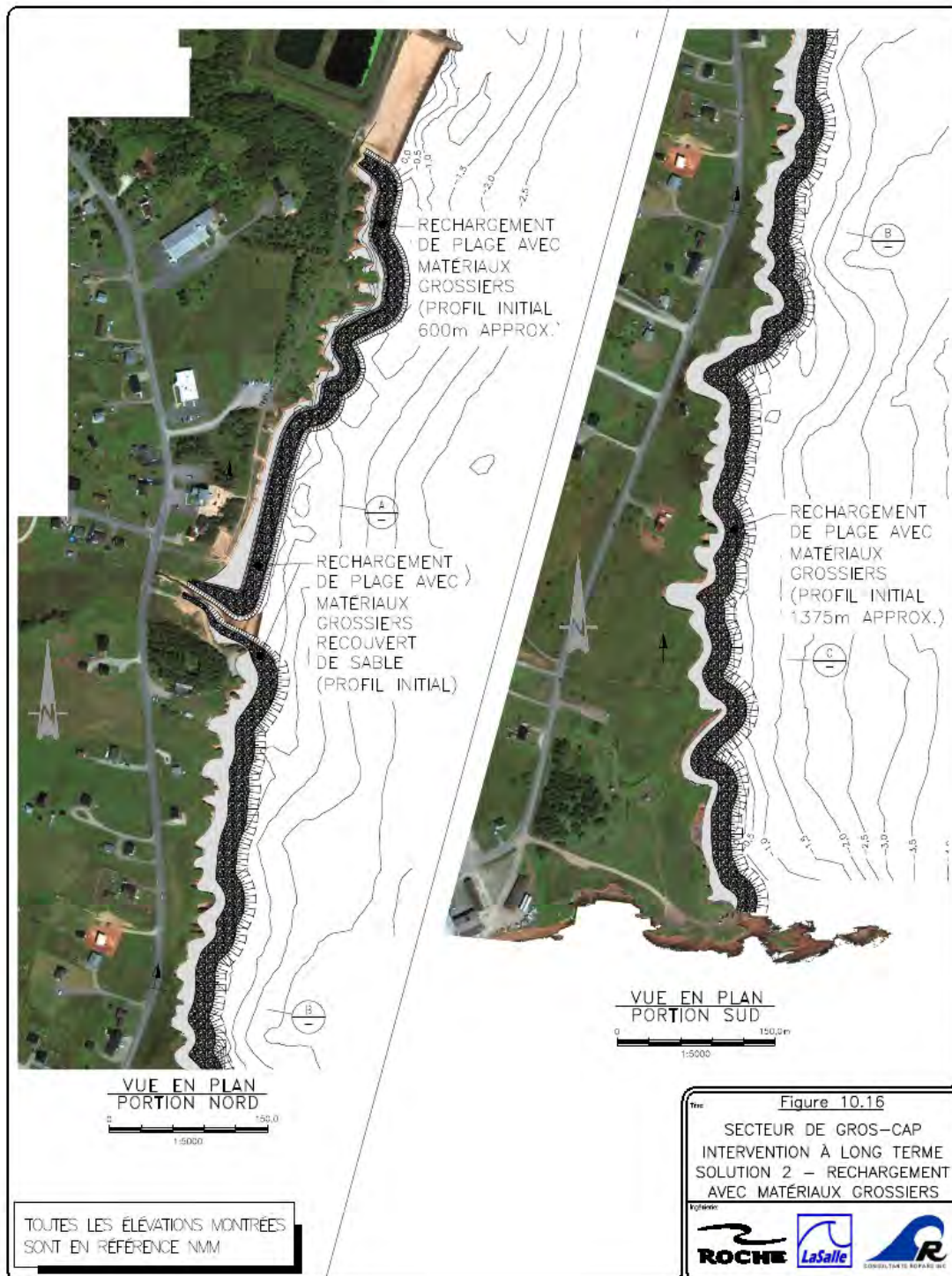


Figure 10.16 – Intervention à long terme – Solution 2 – Rechargement avec matériaux grossiers–
Vue en plan

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

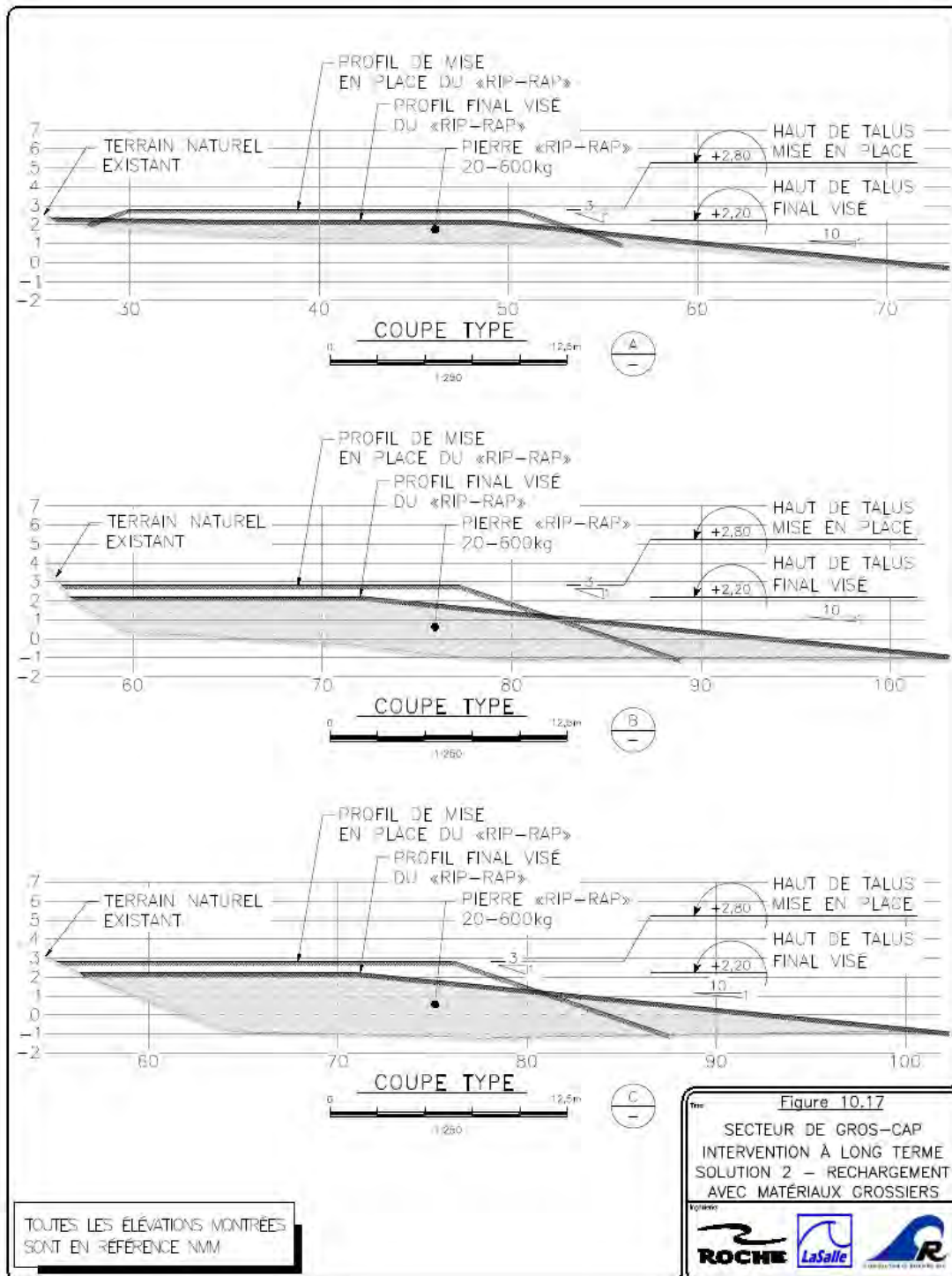


Figure 10.17 – Intervention à long terme – Solution 2 – Rechargement avec matériaux grossiers – Coupes types

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine



Figure 10.18 – Intervention à long terme – Solution 3 – Rechargement de la plage avec butées–
Vue en plan

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

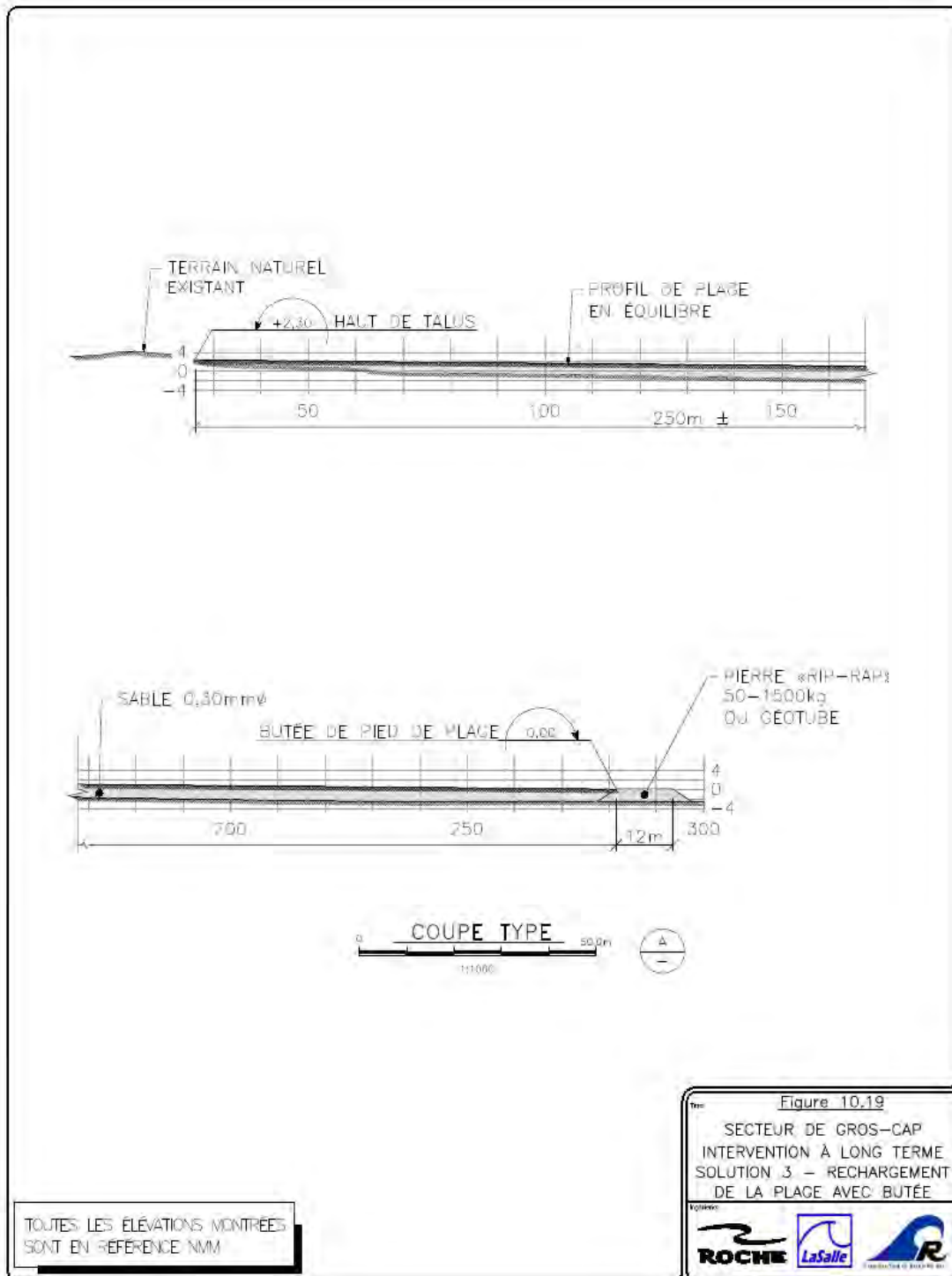


Figure 10.19 – Intervention à long terme – Solution 3 – Rechargement de la plage avec butées – Coupes types

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

11. PROTECTION DE LA BERGE – SECTEUR DE LA PLAGE DU CHEMIN DES CHALETS

11.1 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 mentionnés pour les secteurs précédents sont également impliqués dans les problèmes relevés dans le secteur de la plage du chemin des Chalets. D'après l'information bathymétrique disponible, la pente de la plage est très forte pour une plage de sable et un canal passerait au pied de cette plage (figure 11.1). Il se peut donc qu'un important transport de sable se produise parallèlement à la côte dans ce canal, ce qui expliquerait encore mieux les problématiques d'érosion de cette plage. Il serait important de valider cette information bathymétrique qui provient essentiellement d'anciennes données du SHC et non des relevés récents (LIDAR et CIDCO). Cette morphologie particulière de la plage pourrait provenir d'un relevé bathymétrique effectué peu de temps après une tempête du secteur est.

Un phénomène spécifique à ce secteur est la dégradation de la dune littorale qui a accompagné le développement domiciliaire le long de la plage. Ce phénomène n'est pas la cause de l'érosion, mais l'a significativement accéléré en retirant du système le tampon que constituait cette réserve de sédiments.

Avec le rehaussement des niveaux d'eau appréhendé, il s'agit de l'un des secteurs les plus à risque des cinq secteurs à l'étude à cause de la faible élévation de la zone (risques importants de submersion) et de l'étendue de la zone à protéger pour contrecarrer ce phénomène d'érosion.

11.2 Protection en enrochement

La protection de la berge à l'aide d'enrochements s'est révélée une très mauvaise solution sur la plage de la Martinique. Appliquée selon les règles de l'art, cette solution consisterait à détruire l'ensemble de la plage de la Martinique en y installant un « mur de pierres » sur la plage.

Selon les calculs faits pour les autres secteurs, l'élévation de la crête de cet enrochement devrait se situer à environ +3,2 m NMM, ce qui correspond pratiquement à l'élévation du vestige de dune littorale se trouvant à l'extrémité sud-ouest de la plage ou à l'élévation du haut des fenêtres de la plupart des chalets.

Sans parler des problèmes d'accélération de l'érosion de la plage au large de l'enrochement qui y sont associés, cette solution ne correspondrait pas du tout à la vocation récréotouristique du secteur.

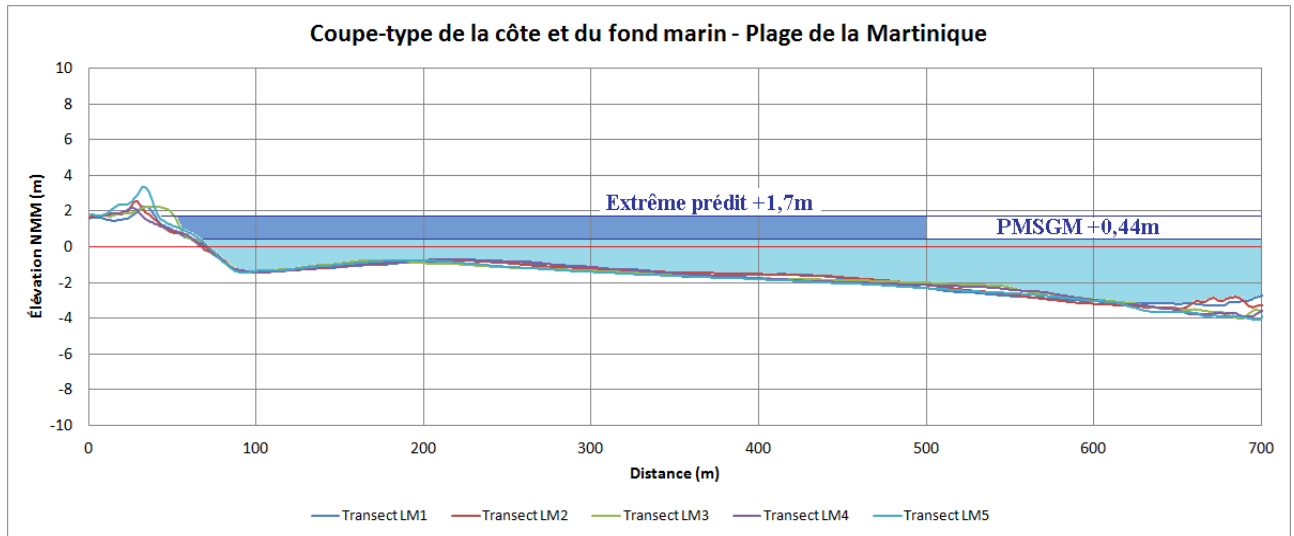


Figure 11.1 Coupe type de la plage de la Martinique

11.3 Rechargement de plage

Le rechargement de la plage de la Martinique semble, d'après la figure suivante, pouvoir s'envisager. Il impliquerait cependant des quantités de sable non négligeables (de l'ordre de $300 \text{ m}^3/\text{m}$) qu'il faudrait placer sur l'ensemble de la plage, y compris le secteur est, soit environ 900 m de longueur (rechargement initial d'environ $270\,000 \text{ m}^3$). Des rechargements récurrents seraient nécessaires pour maintenir la plage. 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.

Mais le principal problème à résoudre avant de se lancer dans ce genre d'intervention serait de comprendre la raison de la présence de ce canal au pied de la plage et du transit littoral associé, sinon les travaux de rechargement risquent d'être réalisés en pure perte pour la plage. Il est presque acquis que des épis transversaux seront requis pour assurer un minimum de stabilité au rechargement de plage. Une étude approfondie devrait être réalisée pour définir le système d'épis qui correspondrait aux contraintes du système sédimentaire de la plage.

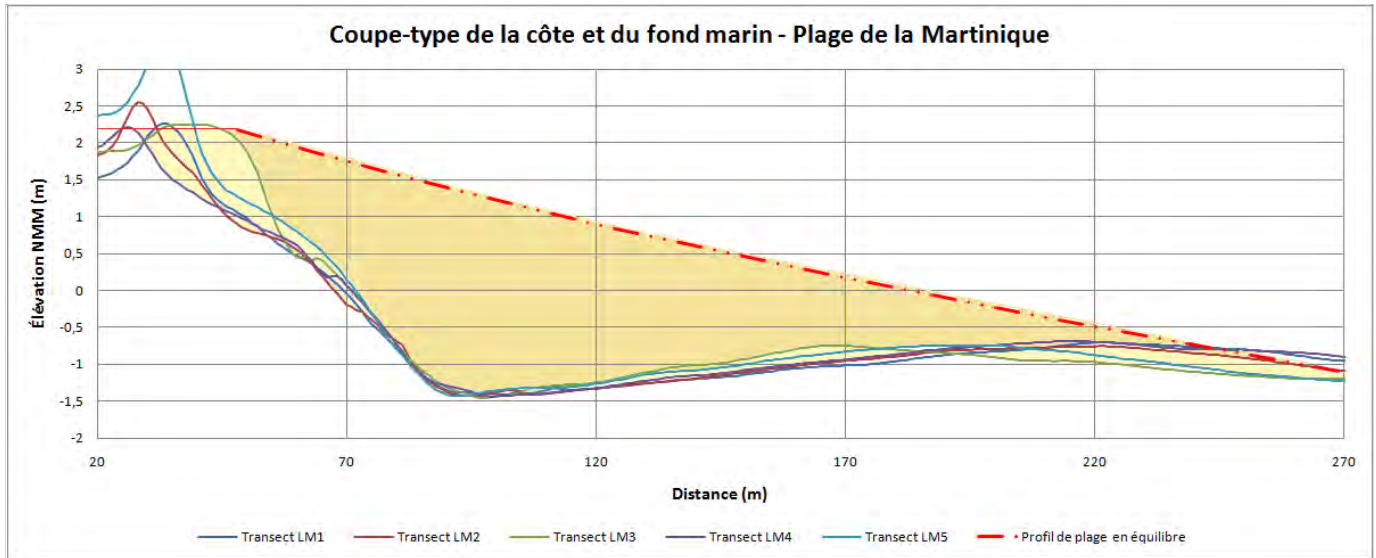


Figure 11.2 Coupe type d'une plage de la Martinique rechargée

11.4 Géotubes en haut de plage

Un concept populaire consiste à placer des géotubes en haut de plage pour lui permettre de résister à des événements exceptionnels¹⁷.

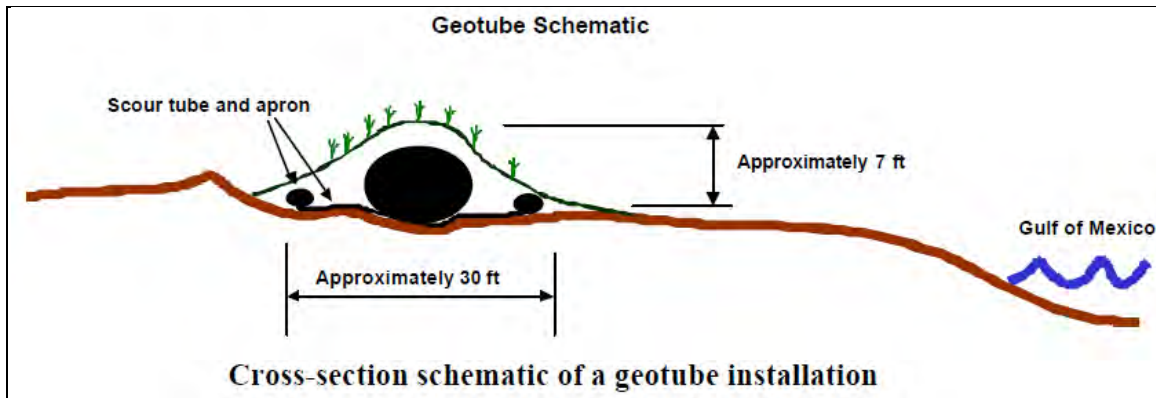


Figure 11.3 Exemple d'installation de géotube en haut de plage

Ce concept est pratiquement impossible à mettre en œuvre dans le cas de la plage de la Martinique dans le contexte actuel de son utilisation (route, chalets). Pour être efficace, ce système exige :

- une stabilité minimale de la plage : ceci est loin d'être acquis, compte tenu de la pente actuelle de la plage (qui s'éloigne beaucoup d'une pente d'équilibre), de l'élévation

¹⁷ Guibeau, J. & al., "Geotubes for temporary erosion control and storm surge protection along the Gulf of Mexico shoreline of Texas", Proceedings of the 13th Biennial Coastal Zone Conference, Baltimore, MD. July 2003

atteinte par l'eau lors des événements de hauts niveaux d'eau et de la tendance à la hausse du niveau d'eau moyen aux Îles de la Madeleine,

- un espace minimal pour déployer les géotubes sans qu'ils soient constamment sollicités par les vagues de tempête : la présence des chalets empêche cette condition d'être remplie et on peut se demander si le déplacement des chalets n'enlèverait pas tout intérêt à cette solution.

11.5 Déplacement d'infrastructures et renaturalisation du secteur

Le déplacement ou le déménagement des résidences et de certaines infrastructures urbaines (route, services) devrait certainement être envisagé dans le cas de la plage de la Martinique, surtout que nombre de ces infrastructures se retrouvent tellement avancées sur la plage qu'elles interdisent toute solution globale. Si la dune littorale est laissée à son état naturel sans rechargement, l'ensemble des chalets devrait être déplacé, y compris ceux situés du côté nord de la route que les vagues de tempête ont déjà commencé à atteindre.

Le déménagement des chalets devrait s'accompagner de l'enlèvement des enrochements placés par les résidents, enrochements qui pourraient éventuellement être repositionnés à l'extrémité sud-ouest de la plage pour tenter de protéger le reliquat de dune littorale qui s'y trouve encore.

La renaturalisation de la plage passerait par un apport minimum de sable en haut de plage pour tenter de reconstituer la dune littorale (figure suivante). Des opérations récurrentes de rechargement seraient par la suite recommandées, sous forme de dépôt de sable en haut de plage à l'extrémité est de la plage, la circulation naturelle redistribuant ce sable sur l'ensemble de la plage.

Un programme de plantation d'élyme des sables sur une dune restaurée à l'aide d'un minimum de sable importé devrait être envisagé de façon à favoriser la rétention des sables éoliens et la stabilisation de la dune. Le contrôle de la circulation des piétons et véhicules devrait accompagner cet effort de restauration de la dune littorale.

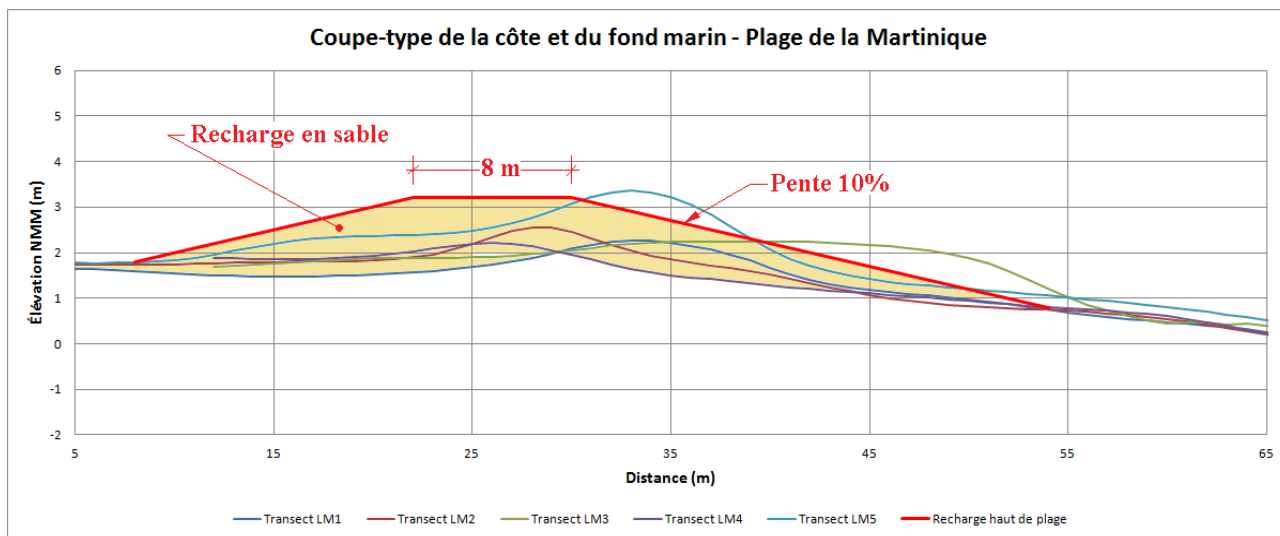


Figure 11.4 Principe de rechargement du haut de plage de la Martinique

11.6 Solutions en érosion pour la plage de la Martinique

La solution la plus évidente en matière de protection contre l'érosion de la plage de la Martinique est le **déménagement de l'ensemble des chalets**, si possible accompagné du **rechargement du haut de plage (Figure 11.5)**. Cette solution du déménagement et du rechargement partiel devrait s'accompagner d'un programme de restauration de la dune littorale (plantation, contrôle de la circulation) et d'un programme de recharge récurrente de l'extrémité est de la plage.

En ce qui concerne les coûts de ces interventions, la solution du déménagement des chalets ne peut être estimée dans le cadre de la présente étude, puisqu'elle nécessite une expertise totalement différente du génie côtier. De plus, il faudrait connaître le nombre exact de chalets impliqués, leur destination, le coût d'achat de nouveaux terrains, etc.

Le coût du rechargement de haut de plage a été évalué en fonction d'une restauration de 700 m de longueur, soit environ 20 000 m³ de sable à mettre en place en haut de plage.

La seconde solution consiste en un **rechargement de la plage, avec ajout d'épis de protection (7 requis)**. Cette solution est montrée à la figure 11.6 et son coût est détaillé en annexe. Ceci inclut les rechargements périodiques, puisque le système d'épis ne sera pas suffisamment efficace pour retenir en place le sable du rechargement initial. Cette hypothèse devrait toutefois être vérifiée par des analyses plus approfondies (notamment, modélisation physique en laboratoire d'hydraulique).

Une coordination de la solution retenue pour la plage avec celle retenue pour la Pointe de la Martinique devra être faite, sous peine de minimiser les bénéfices des solutions sélectionnées.

Le coût des différents projets est estimé comme suit :

Solution 1 – Déménagement des chalets	(à déterminer)	Nécessiterait une étude spécifique
Complément solution 1 – Rechargement de haut de plage	726 000 \$	Pourrait nécessiter des rechargements récurrents pour éviter le recul de la plage (non comptabilisés dans le coût du projet)
Solution 2 – Rechargement de la plage en sable (900 m.l.), avec épis (7 x 150 m)	Coût initial : 16 870 000 \$ Rechargements périodiques : <u>8 710 000 \$</u> Coût total : 25 580 000 \$	Des rechargements périodiques sont requis, soit 25% du volume initial à tous les 7-8 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans). À valider par des études complémentaires, y inclus modélisation physique.

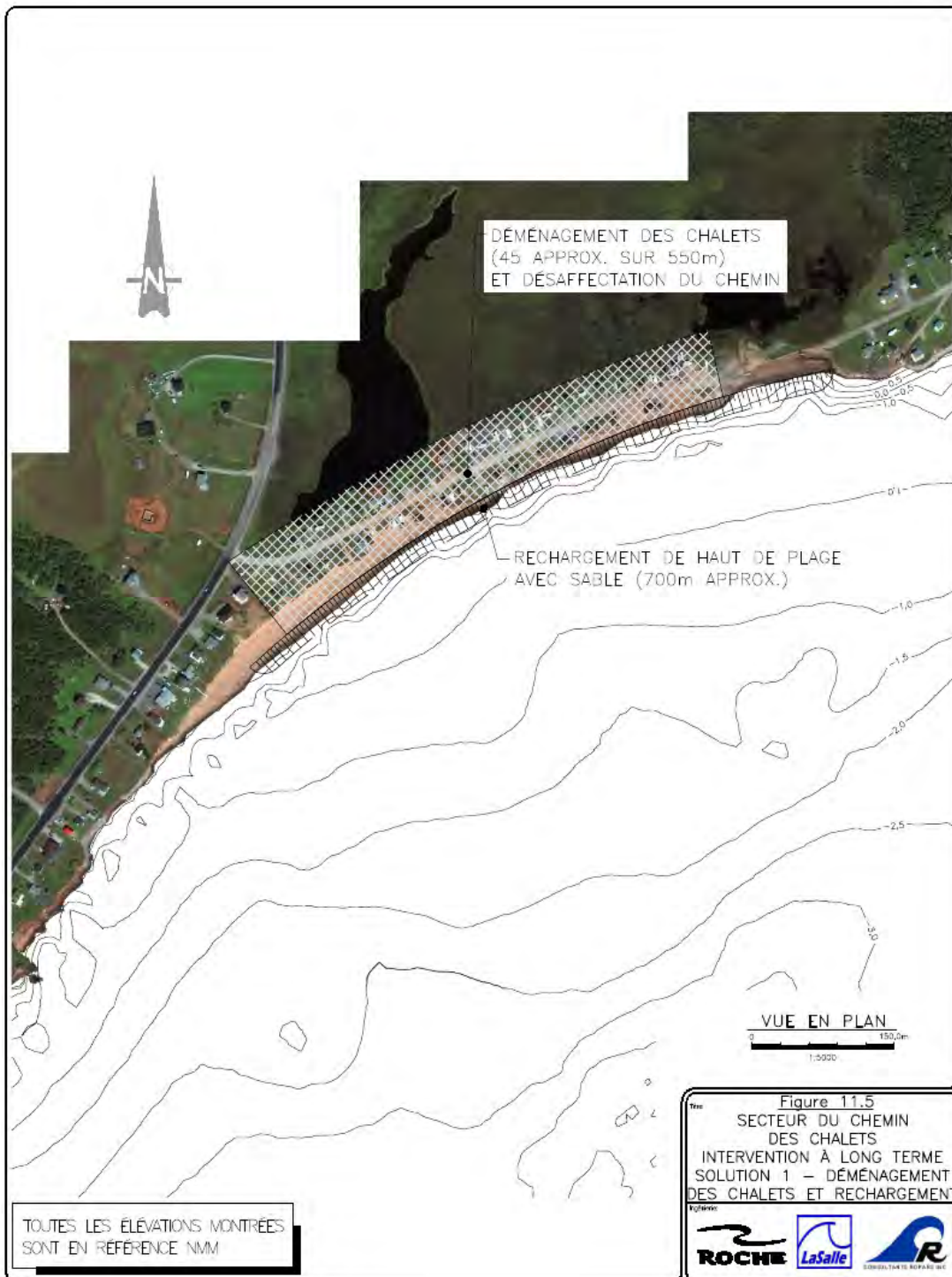


Figure 11.5 – Intervention à long terme – Solution 1 – Déménagement des chalets et rechargement

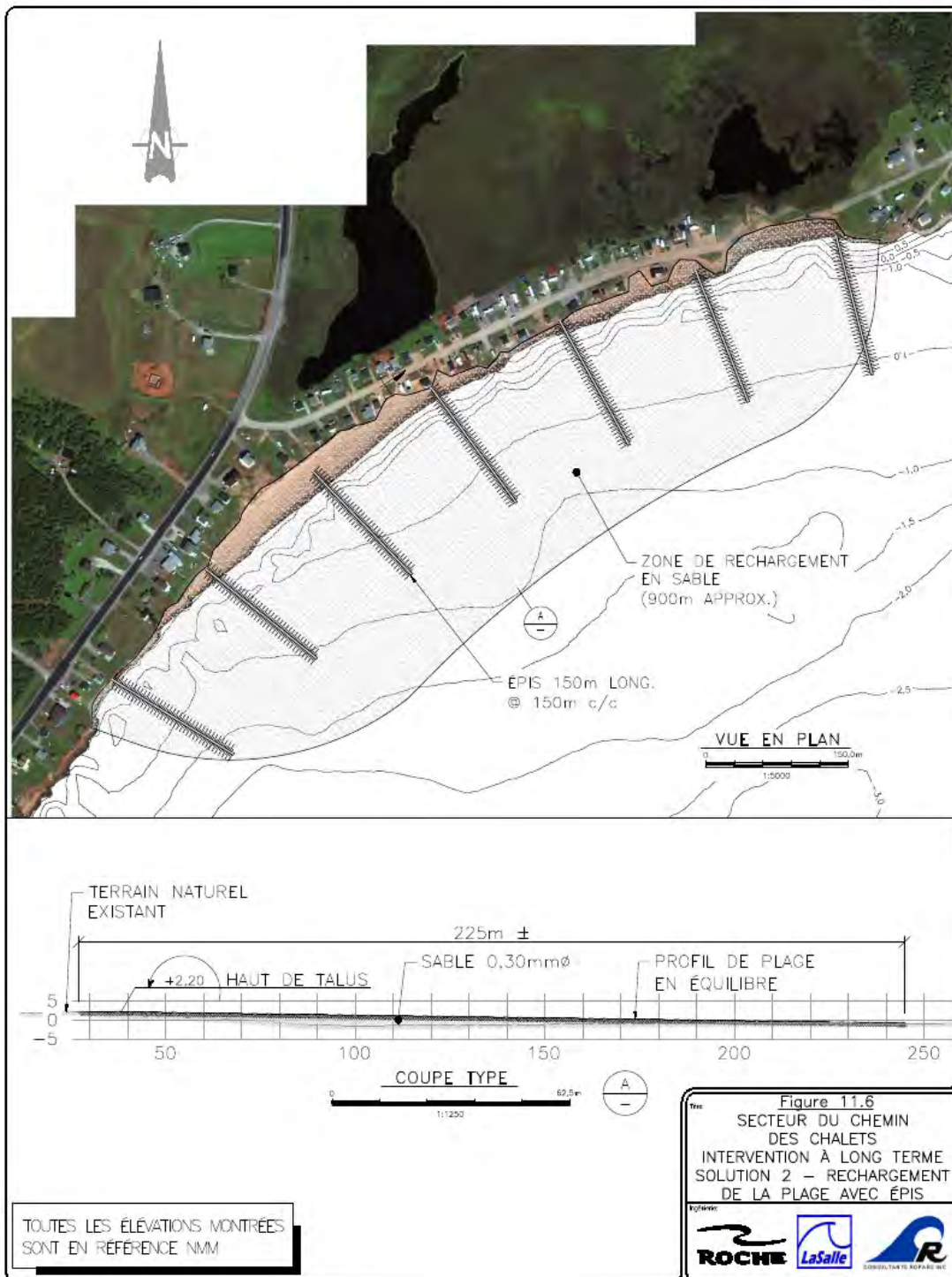


Figure 11.6 – Intervention à long terme – Solution 2 – Rechargement de la plage avec épis

12. PROTECTION DE LA BERGE – SECTEUR DE LA POINTE DE LA MARTINIQUE

12.1 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 du pied de la falaise mentionnés pour les secteurs précédents sont également impliqués dans les problèmes relevés dans le secteur de la Pointe de la Martinique. La largeur des plages a diminué de façon remarquable entre la photo aérienne de 1963 et celle de 2010. Les courants littoraux violents qui se produisent devant cette pointe expliqueraient assez bien la sensibilité à l'érosion de ce secteur.

Une particularité de ce secteur est l'étendue des protections en enrochement qui ont accompagné le développement domiciliaire sur le haut de la falaise. Ces protections retirent du système des sédiments qui amélioreraient un peu la protection des falaises contre l'érosion en rehaussant le niveau de la plage au pied de ces falaises. Par contre, cet effet serait probablement très marginal par rapport aux phénomènes accompagnant la hausse des niveaux d'eau et la disparition des glaces. Les photos aériennes démontrent le caractère ancien du phénomène d'érosion des falaises de ce secteur. 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).

12.2 Protection en enrochement

La protection de la berge à l'aide d'enrochements est un type de protection qui a déjà été mis en œuvre dans le secteur. Le transect critique pour le dimensionnement des enrochements est le transect LM12 pour lequel la profondeur de 1 m sous le NMM se présente devant le pied de la falaise.

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 ($H_s \text{ max} = 1,79 \text{ m}$) 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 Pointe de la Martinique à l'élévation +3,1 m NMM pour empêcher les vagues de trop le franchir.

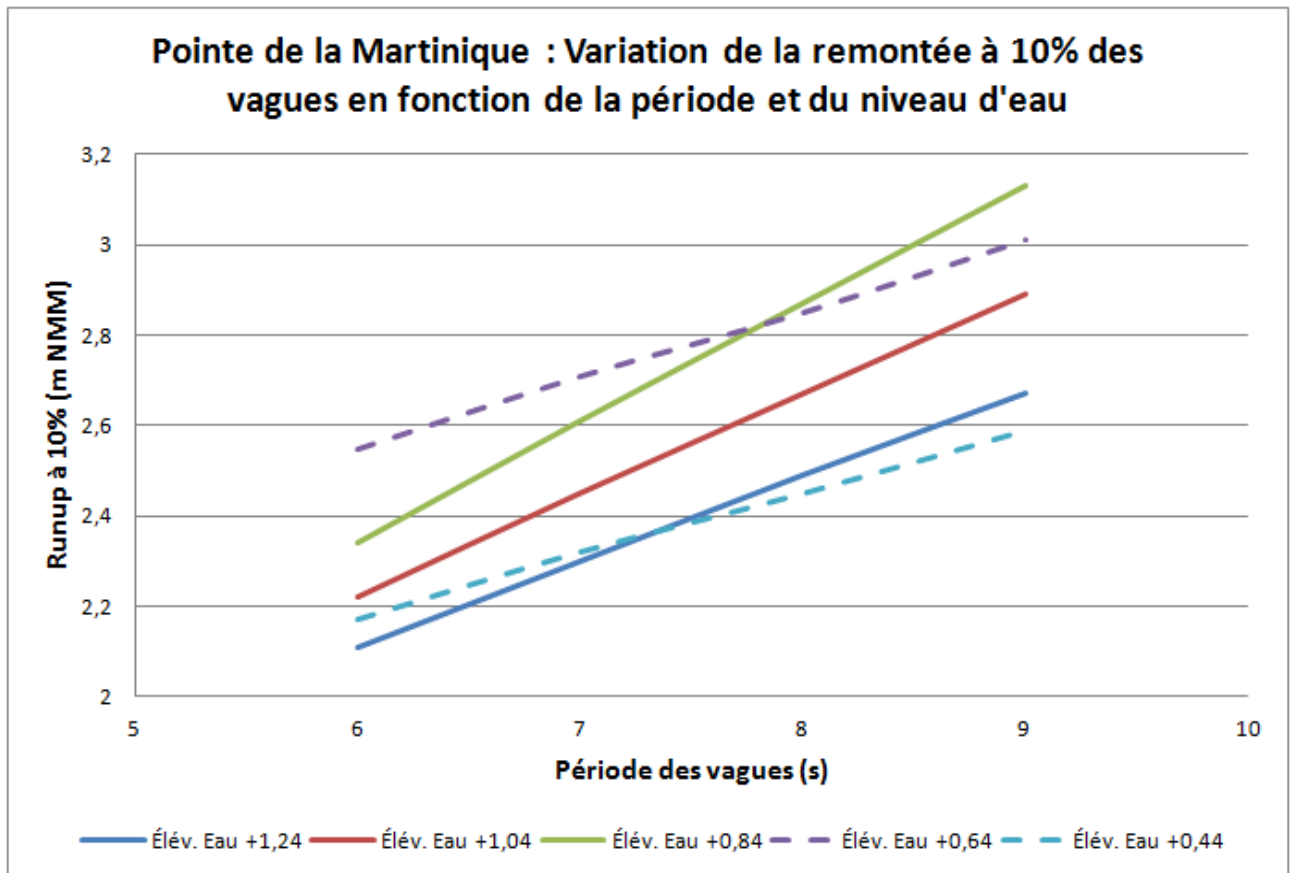


Figure 12.1 Remontée des vagues sur un enrochement à la Pointe de la Martinique

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 de la Baie de Plaisance. 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 de la Baie de Plaisance 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 +3,2 m NMM. Le pire cas de franchissement correspond à un niveau d'eau de +1,6 m ZC (0,84 m NMM) et à une période de pointe des vagues de 9 secondes.

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

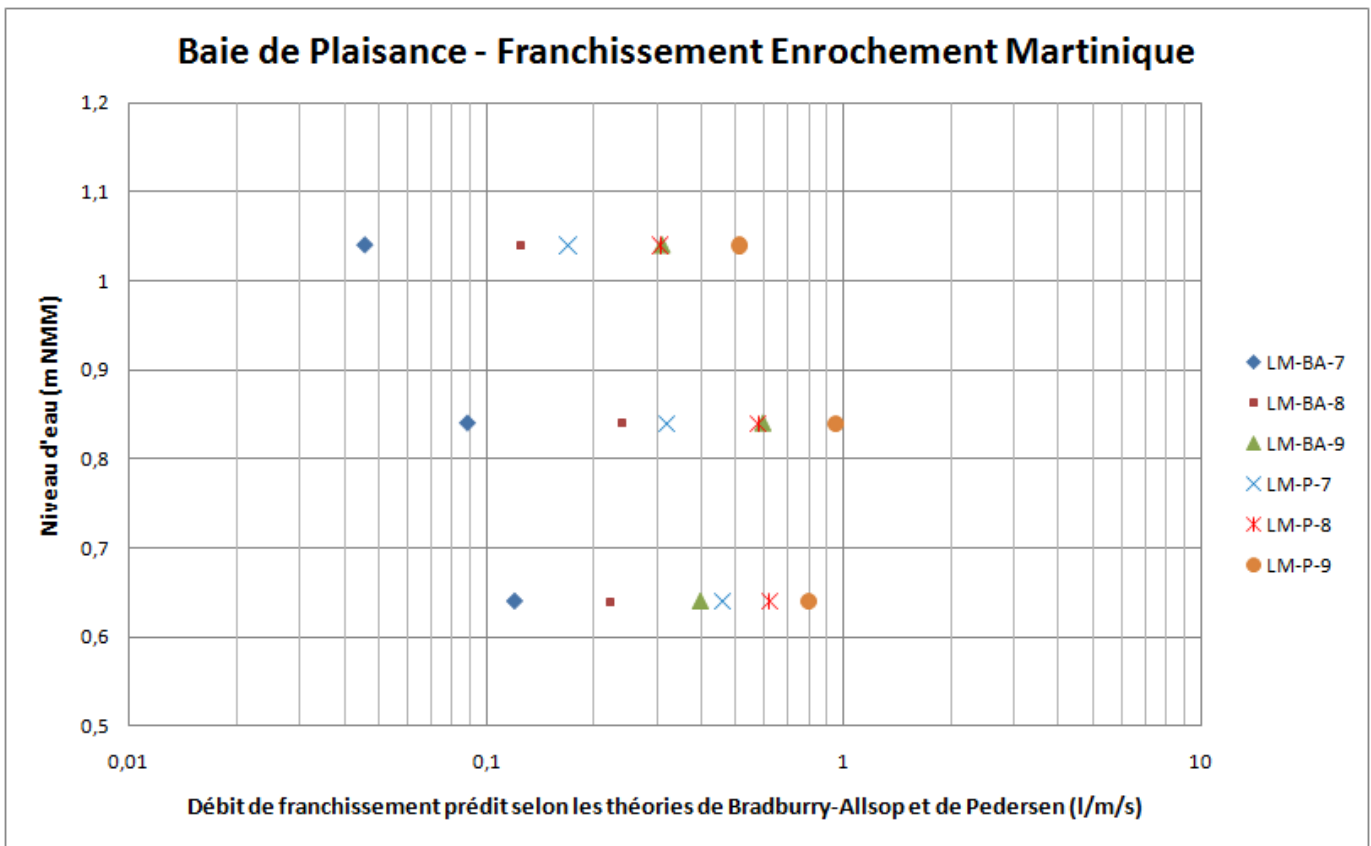


Figure 12.2 Débit de franchissement d'un enrochement dont la crête est à +3,2 m NMM

L'élévation de +3,2 m NMM a donc été retenue pour la crête de l'enrochement de protection de la zone de la Pointe de la Martinique. L'optimisation de cette élévation de la protection de la rive passerait par des essais de franchissement en canal à houle, seul moyen de tenir compte de la configuration réelle des fonds marins devant ces ouvrages de protection. Ces essais en canal à houle sont recommandés lors de la phase de conception finale des ouvrages si cette solution est retenue.

Avec la vague de conception retenue ($H_s = 1,79$ 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.84¹⁸) : 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 de la Pointe de la Martinique. 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, mais qui est encore plus aigüe dans le cas de la Pointe de la Martinique 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, car des pierres de carapace directement posées sur du roc affleurant sont instables (voir photo 9.8), à cause des efforts provoqués par les vagues et les glaces. Pour les besoins de l'évaluation des coûts du concept de protection en enrochement, une tranchée de 1,2 m (environ un dixième dans les sédiments et le reste dans le roc) a été considérée, cette tranchée étant comblée à l'aide d'une butée de pied en pierres de carapace.

Une particularité de la zone des falaises de la pointe de la Martinique est la configuration parfois complexe du rivage, avec ses multiples criques et pointes. Il sera difficile de tenir compte de tous ces détours dans la réalisation des travaux de protection en enrochement, ce qui pourrait augmenter significativement les coûts actuellement prévisibles pour ce type de protection de berge. Les risques de réclamations lors des travaux (conditions géotechniques ou météorologiques particulières, dépassement des quantités prévues au contrat) sont jugés relativement élevés dans de telles conditions.

¹⁸ Shore Protection Manual 1984 – U.S. Army Corps of Engineers

Il est important de noter que la protection du pied des falaises à l'aide d'enrochement n'exclura qu'un type d'érosion de la falaise, soit celui provoqué par les vagues. Les autres types d'érosion (ruissellement, gélifraction, etc.) continueront à agir sur la face de la falaise jusqu'à ce que la pente de cette falaise soit assez douce pour permettre à la végétation de s'installer.

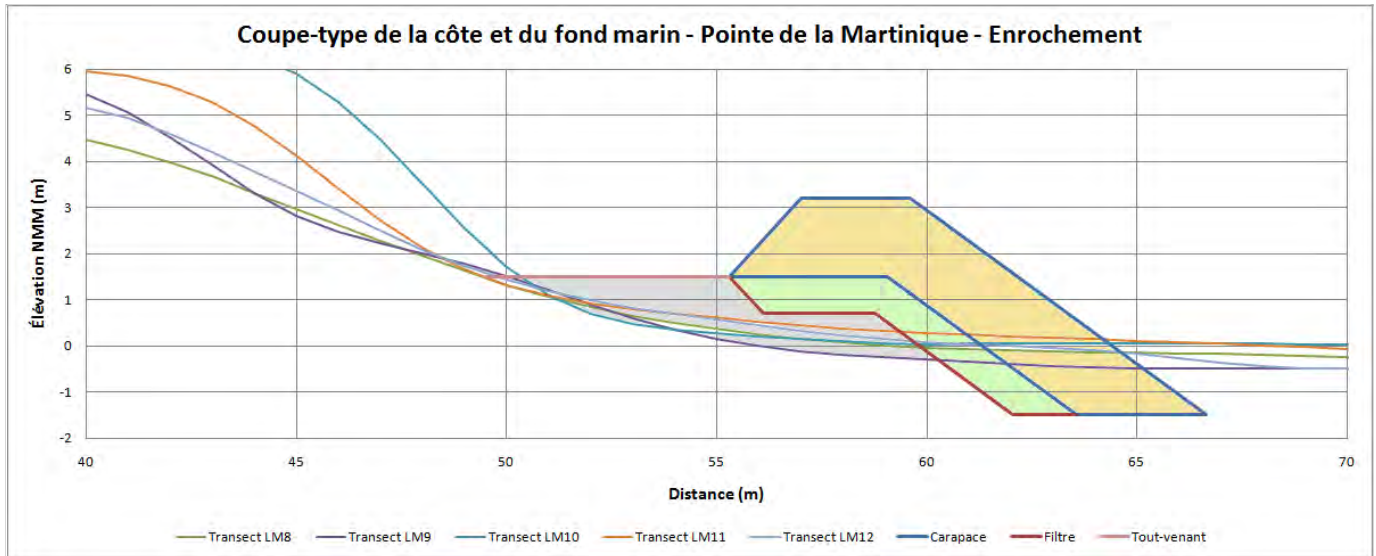


Figure 12.3 Coupe type d'une protection en enrochement de la pointe de la Martinique

12.3 Consolidation des falaises avec du béton

La protection du pied des falaises à l'aide de béton devrait respecter les critères de l'enrochement en termes d'élévation de la crête du mur et de stabilité du pied. Étant donné l'étanchéité du béton et le fort coefficient de réflexion des vagues sur une telle protection, la remontée des vagues est légèrement plus forte et il faut prévoir que l'érosion en pied du mur sera plus intense.

L'ancrage du mur dans le roc dont sont constituées les falaises de la Pointe de la Martinique n'étant pas viable (roc trop friable et trop sensible à l'eau et aux cycles de gel/dégel), le mur de béton devra être autostable en simple appui sur la falaise.

Pour ce qui est de la fondation du mur, une excavation sera requise au pied de la falaise pour ancrer convenablement le pied du mur de béton. Une profondeur minimale de 1,2 m a été considérée de façon préliminaire, mais cette profondeur devrait être confirmée par une étude géologique incluant la vitesse à laquelle se détériorerait le roc au pied du mur de béton.

De façon à dimensionner l'élévation de la crête du mur de béton à placer devant le pied des falaises de part et d'autre des étangs aérés, la formule de franchissement de Franco & Franco

1999 a été utilisée¹⁹. Le débit maximal de franchissement qui a été retenu pour le dimensionnement de cette crête de mur est de 2 l/s/m correspondant au début de dommage sur des enrochements. Étant donné la nature friable et sensible aux cycles de gel/dégel du roc dont sont constituées ces falaises, même ce débit important pourrait se révéler excessif.

La figure suivante illustre les calculs de franchissement pour une crête de mur située à +3,5 m NMM.

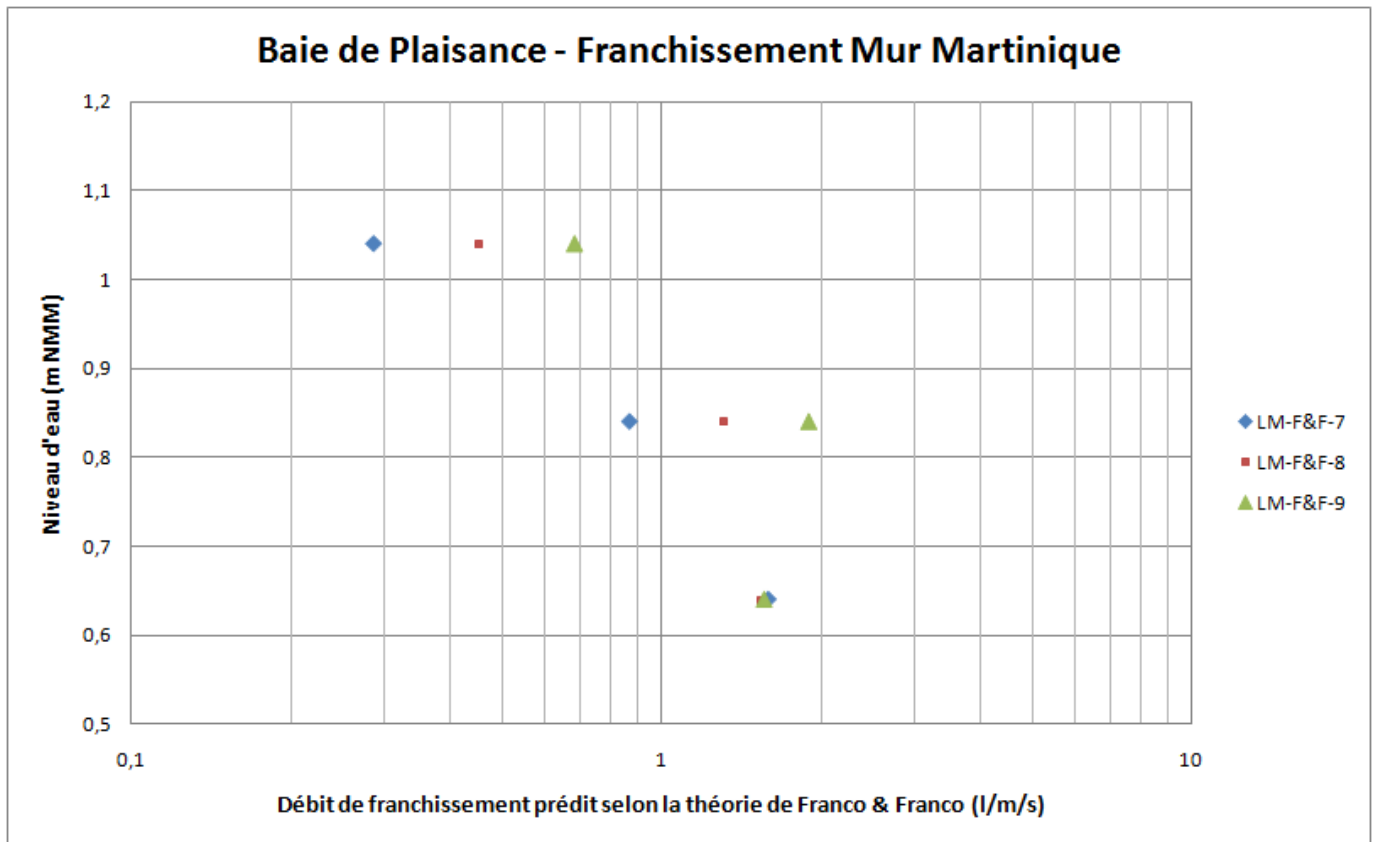


Figure 12.4 Débits de franchissement d'un mur dont la crête est située à +3,5 m NMM

La figure suivante illustre la coupe type d'une protection en béton armé placée au pied de la falaise de part et d'autre de la Pointe de la Martinique.

La solution d'un confortement en béton du pied des falaises de la Pointe de la Martinique sera difficile à mettre en œuvre et ne répondrait pas vraiment à des impératifs d'intégration esthétique de cette solution de confortement dans les falaises, à cause des contraintes techniques de durabilité, à moins de faire appel à des artistes qui travailleraient au niveau des formes pour donner une apparence plus naturelle à ce béton, ce qui pourrait faire exploser les coûts.

¹⁹ Coastal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineer, - Table VI-5-13 page VI-5-29

La durabilité d'un tel concept reste à démontrer et d'importants effets de bout pourraient apparaître aux extrémités des zones bétonnées. Il s'agit de plus d'un ouvrage complexe à réaliser dans l'eau à cause de l'exigence de durabilité de l'ouvrage qui implique que la fondation soit excavée dans le roc au pied de la falaise, sous le zéro des cartes marines, à la merci des intempéries.

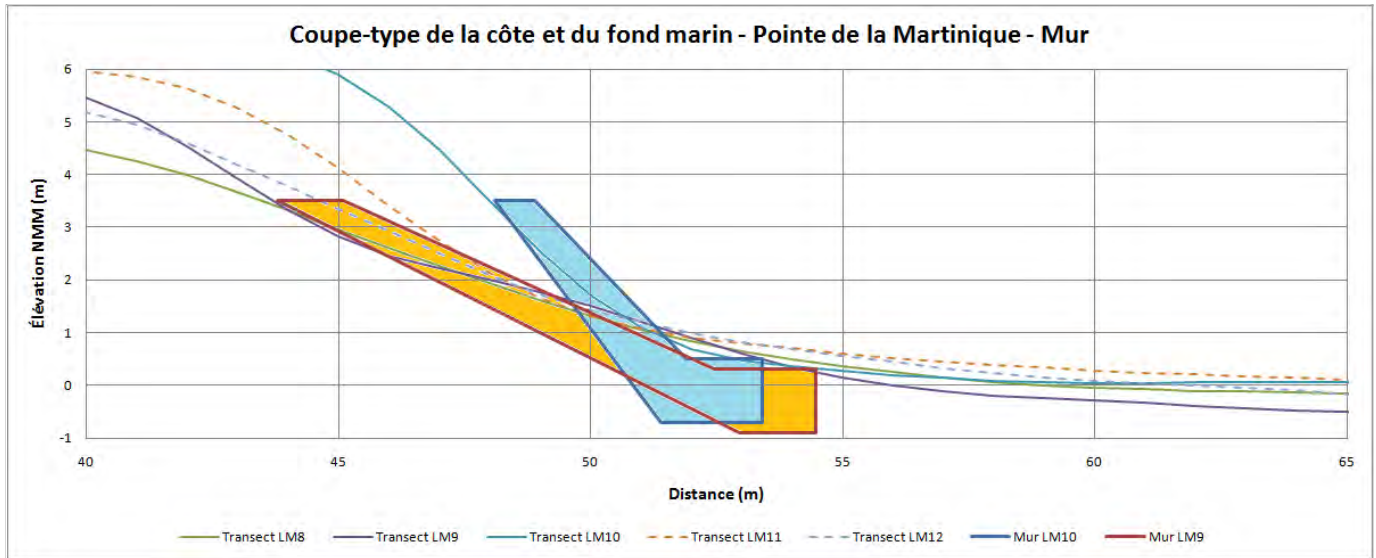


Figure 12.5 Coupe type d'une protection en béton armé du pied des falaises de la Pointe de la Martinique

12.4 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 la zone des falaises de la Pointe de la Martinique.

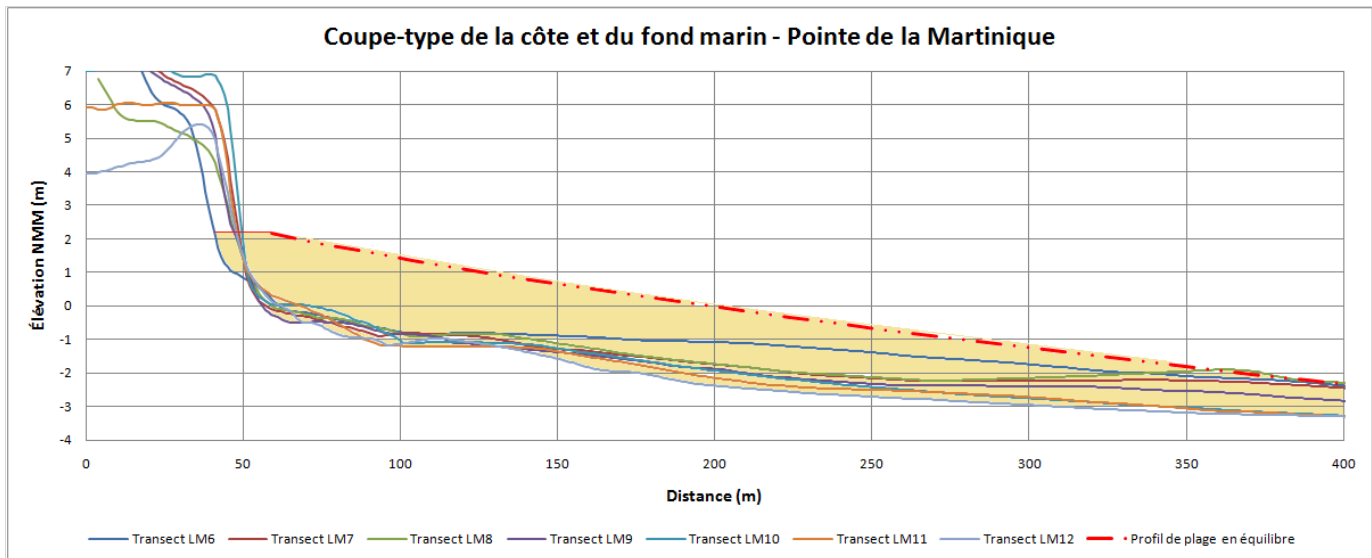


Figure 12.6 Coupe type d'une plage en équilibre devant les falaises de la Pointe de la Martinique

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.

Dans le cas des falaises de la Pointe de la Martinique, le profil d'une plage en équilibre est loin de celui du fond naturel actuel. La distance entre le profil théorique et les profils mesurés peut dépasser deux mètres par endroits. Le profil d'équilibre de la plage rejoint celui du fond marin entre 350 et 450 m de la côte pour les profils évalués.

Le C.E.M. donne certains moyens d'évaluer un peu plus précisément les caractéristiques que devrait avoir un rechargement de plage dans le cas de la Pointe de la Martinique. 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 de l'ordre de 0,3 mm (au lieu des 0,25 mm du sable actuellement dans cette zone).

Devant la Pointe de la Martinique, il faudrait envisager plus de 700 m³/m de sable pour recharger la plage (à condition d'être en mesure de retenir ce sable devant la pointe). 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 $700 \text{ m}^3/\text{m}$ de sable de rechargement sur une largeur minimale de 900 m de la pointe, on parle de $630\,000 \text{ m}^3$ de sable plus grossier que le sable en place à installer devant la Pointe de la Martinique.

À ces quantités de sable s'ajouteraient les épis de protection aux extrémités de la zone de recharge afin d'éviter une fuite latérale trop rapide des sédiments, des épis intermédiaires régulièrement espacés et 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 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.

12.5 Rechargement de plage avec butée de pied

La seule façon d'envisager un rechargement de plage devant la Pointe de la Martinique 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 les épis régulièrement espacés.

De façon à tenter de minimiser les dommages à la butée de pied de la « plage suspendue », 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 profond d'eau, moins elle est efficace pour réduire la hauteur des vagues et plus il faut mettre de sable pour construire la plage suspendue.

La figure suivante illustre la coupe type 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. Trois exemples de butée de pied sont illustrés, soit une butée dont la crête serait à +1,0 m NMM, une butée dont la crête serait au 0,0 m NMM et une butée dont la crête serait à -1,5 m NMM.

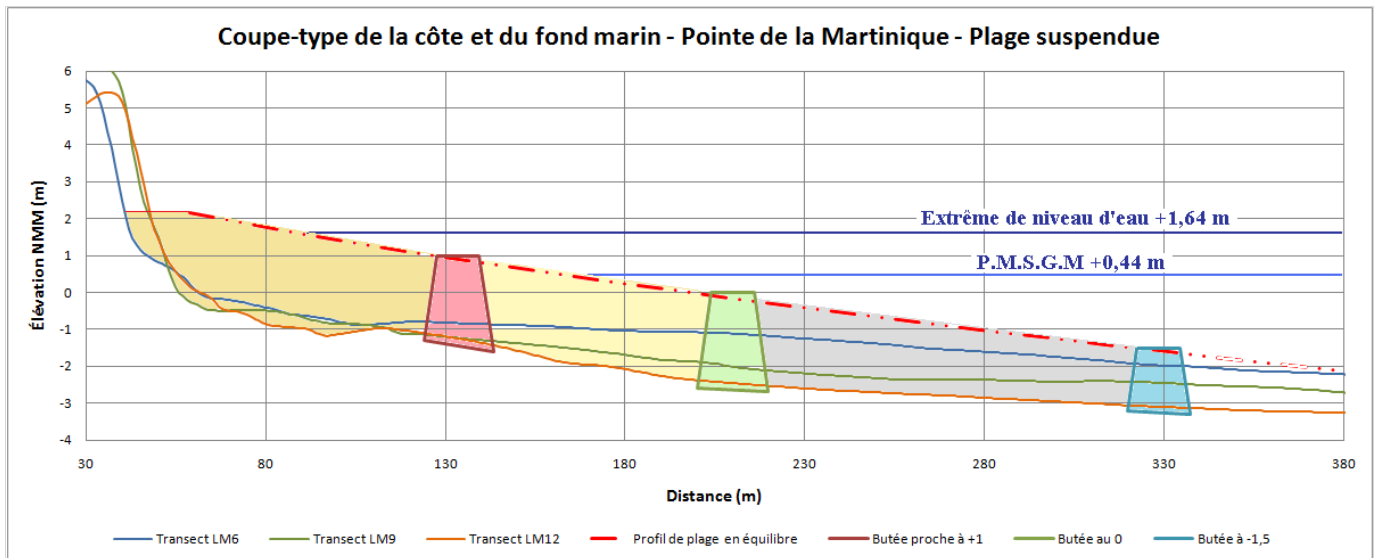


Figure 12.7 Coupe type d'une plage suspendue devant la Pointe de la Martinique

Pour garder un minimum de caractère esthétique à ce secteur, il serait requis de placer la crête de la berme de protection de pied de plage au plus au 0 m NMM sinon à -1,5 m NMM (la butée la plus éloignée du rivage sur la figure précédente).

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 au 0 NMM.

Le choix d'une butée en rip-rap placée au 0 NMM implique de placer environ 170 m³/m de sable de rechargement sur une largeur de 700 m de côte. 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 120 000 m³ de sable requis pour recharger une première fois cette plage suspendue. 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.

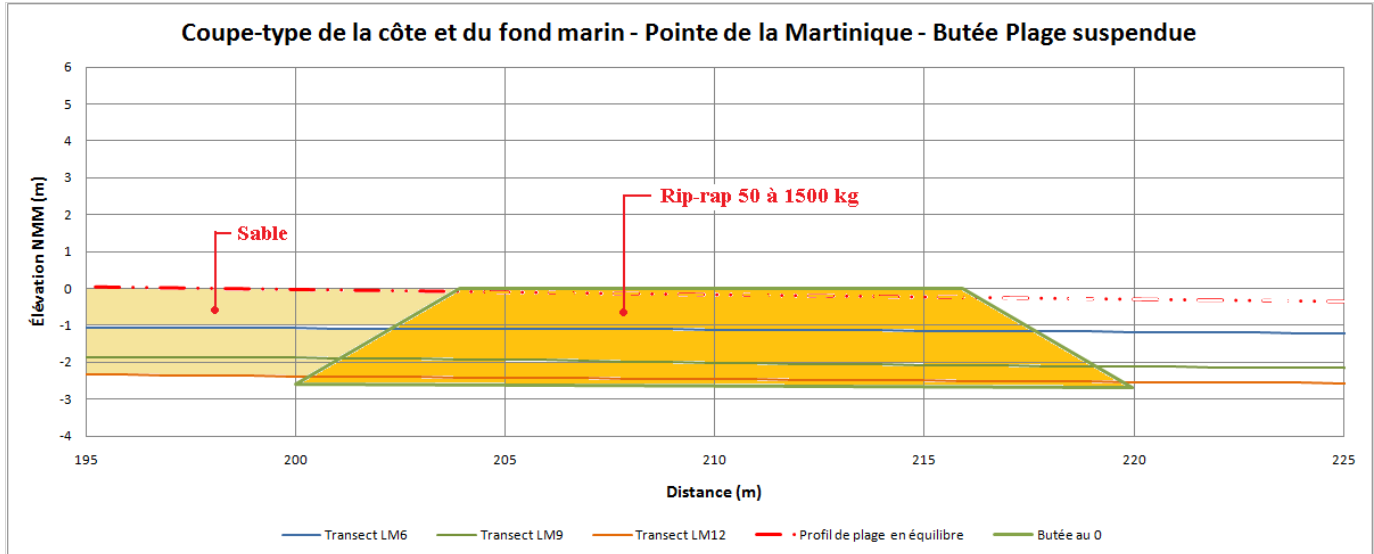


Figure 12.8 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en enrochement à 0,0 m NMM

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 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 ont 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 parle 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.

Le choix d'une butée en géotubes placée à -1,5 m NMM implique de placer environ 340 m³/m de sable de rechargement sur une largeur de 700 m de côte. 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 240 000 m³ de sable requis pour recharger une première fois cette plage suspendue.

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.

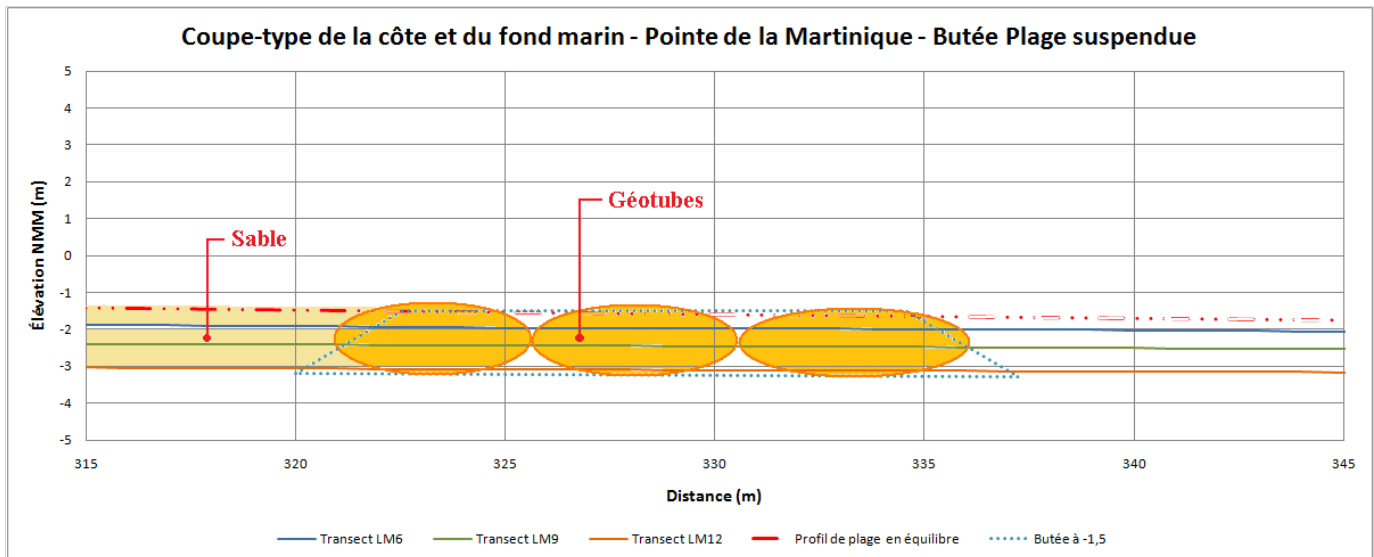


Figure 12.9 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en géotubes à -1,5 m NMM

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

Non seulement la butée de pied de plage devra être mise en place, mais il serait également nécessaire de placer des protections (épis en pierre) de part et d'autre et régulièrement le long de la zone rechargée en sable pour contenir ce sable latéralement et lui permettre de protéger le secteur de la pointe de la Martinique. Des courants parallèles au rivage relativement violents sont générés par les vagues de tempête devant les falaises de la pointe de la Martinique (voir chapitre 8).

12.6 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 de la Pointe de la Martinique, 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

Érosion côtière baie de Plaisance

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. Une étude approfondie de disponibilité de pierre locale de type « rip-rap » ou de galets importés devra 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 +2,3 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 1,79 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 davantage 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.

Il a en particulier fallu faire une hypothèse sur la largeur de la crête de la protection en matériaux grossiers. Il se pourrait que la largeur de 20 à 22 m retenue dans les calculs préliminaires soit trop pessimistes et qu'une largeur de 10 à 15 m soit suffisante pour assurer la protection de la rive, réduisant significativement les quantités de matériaux requises dans ce genre de projet. Des études complémentaires sur la qualité des matériaux et des essais en canal à houle en phase de concept final permettraient d'optimiser le projet.

La figure 12.10 illustre la coupe type proposée dans le cas d'une telle protection de berge dans le secteur de la Pointe de la Martinique. La pierre de rip-rap locale serait mise en place selon une géométrie relativement facile à obtenir pour l'entrepreneur avec des buteurs (pente 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.

Les deux avantages de cette solution de protection de berge par rapport à l'enrochement traditionnel sont :

- l'absence d'exigence concernant la tranchée de stabilisation du pied (à creuser en grande partie dans le roc) et
- la grande flexibilité du concept dans le contexte d'une ligne de rivage présentant beaucoup d'irrégularités (criques et pointes).

Ces deux caractéristiques diminuent significativement le niveau de risque de cette solution en termes de coûts des travaux (difficulté de creuser le roc sous l'eau, à la merci des intempéries, moindre risque de réclamations résultant de conditions géotechniques ou météorologiques particulières, moindre risque de dépassement des quantités de matériaux initialement prévues).

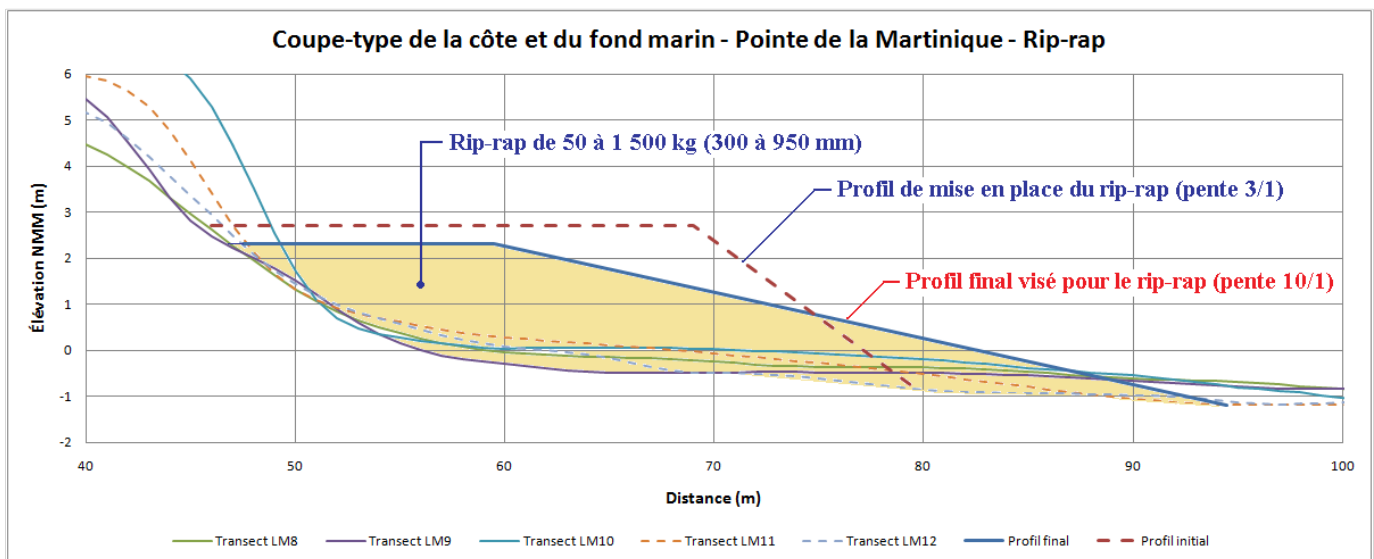


Figure 12.10 Coupe type d'une protection de berge en matériaux grossiers devant la Pointe de la Martinique

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 Martinique 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.

12.7 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 de la pente d'équilibre de la plage 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 pointe de la Martinique avec l'attaque généralement oblique des vagues qui induit une forte circulation des sédiments le long de la côte. La violence des courants littoraux qui se produisent lors des tempêtes pourrait poser quelques problèmes de viabilité de ce concept devant les falaises de la Pointe de la Martinique.

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

12.8 Brise-lames submersibles au large

La mise en place d'un brise-lames submersible au large de la Pointe de la Martinique 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 entre 150 et 200 m du rivage.

Sans rechargement artificiel de la plage et épis transversaux, 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. La présence de ces zones de rétention d'eau n'est en général pas recommandée par les biologistes à cause des impacts négatifs sur les organismes pris au piège de ces accumulations d'eau (assèchement progressif, réchauffement de l'eau retenue, prédation par les oiseaux, etc.). Cette option n'a donc pas été retenue.

12.9 Déplacement d'infrastructures

Le déplacement ou le déménagement de certaines résidences pourrait également être envisagé, surtout dans le cas où ces infrastructures sont tellement avancées sur le bord de la falaise qu'elles augmentent significativement le coût d'une solution globale. Par contre, dans le secteur de la pointe de la Martinique, la plupart des résidences à risque en termes d'érosion ont été

partiellement protégées par des enrochements « maison » et celles qui ne le sont pas sont soit encore suffisamment éloignées du bord de la falaise, soit de faible valeur (chalets, voir figure 2.26).

12.10 Solutions en érosion pour le secteur de la 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 plage de galets importés).

La solution en enrochement (Figure 12. 11) 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 (Figure 12.12) ou en galets importés de l'extérieur des îles serait une solution nécessitant des rechargements périodiques (plus fréquents pour le rip-rap). Les inconvénients principaux de la solution en enrochement sont la dégradation du peu de plage qui resterait en avant de l'enrochement et les risques élevés de dépassement de coûts lors des travaux alors que la solution en rip-rap entretiendrait et améliorerait les plages adjacentes à travers le processus de dégradation des pierres constituant le rip-rap et serait nettement moins susceptible de connaître des problèmes de contrôle des coûts de construction. La solution en plage de galets n'a pas les inconvénients de la solution en enrochement linéaire, mais n'offre pas le bénéfice de la solution en rip-rap.

Une coordination des travaux réalisés devant la pointe de la Martinique et la plage du chemin des Chalets devra se faire, sous peine de minimiser les bénéfices d'une ou des deux solutions, ou pire de nuire à la solution d'un secteur par la mise en place de la solution de l'autre secteur.

La solution d'un confortement en béton du pied de la falaise n'est pas vraiment une solution dans le cas de la Pointe de la Martinique. La durabilité d'un tel concept reste à démontrer et d'importants effets de bout pourraient apparaître aux extrémités des zones bétonnées. Il s'agit de plus d'un ouvrage complexe à réaliser dans l'eau à cause de l'exigence de durabilité de l'ouvrage qui exige que la fondation soit excavée dans le roc au pied de la falaise sous le zéro des cartes marines.

La solution du rechargement de plage n'est pas vraiment adaptée à ce secteur de falaises, que ce soit avec ou sans butée de pied de plage. Les violents courants parallèles à la côte engendrés par les vagues de tempête laissent présager de sérieux problèmes de stabilité du matériel de recharge de plage.

La solution d'un brise-lames submersible au large de la côte n'est pas une solution « en soi » étant donné la faible efficacité d'un tel ouvrage à arrêter les processus d'érosion, à moins de placer la crête de ce brise-lames au niveau de la marée haute, ce qui reviendrait au projet d'enrochement linéaire.

Les coûts des deux solutions retenues pour ce secteur sont comme suit (voir détails en annexe)
 – la solution en plage de galets n’a pas pu être évaluée faute de modèle paramétrique permettant de la dimensionner :

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 \$ Rechargements périodiques : <u>2 202 000 \$</u> Coût total : 6 606 000 \$	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.

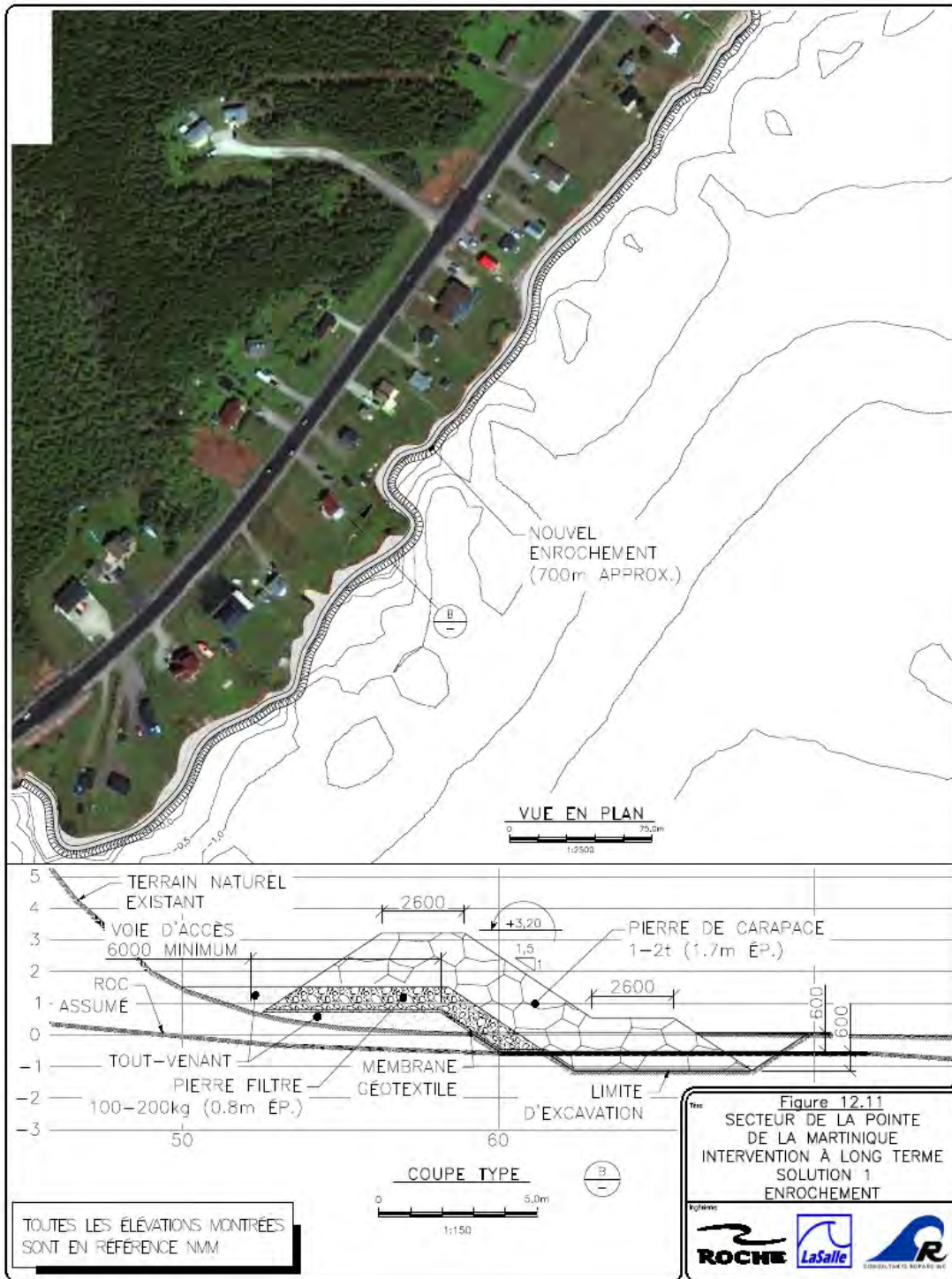


Figure 12.11 – Secteur de la Pointe de la Martinique – Intervention à long terme – Solution 1 - Enrochement

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

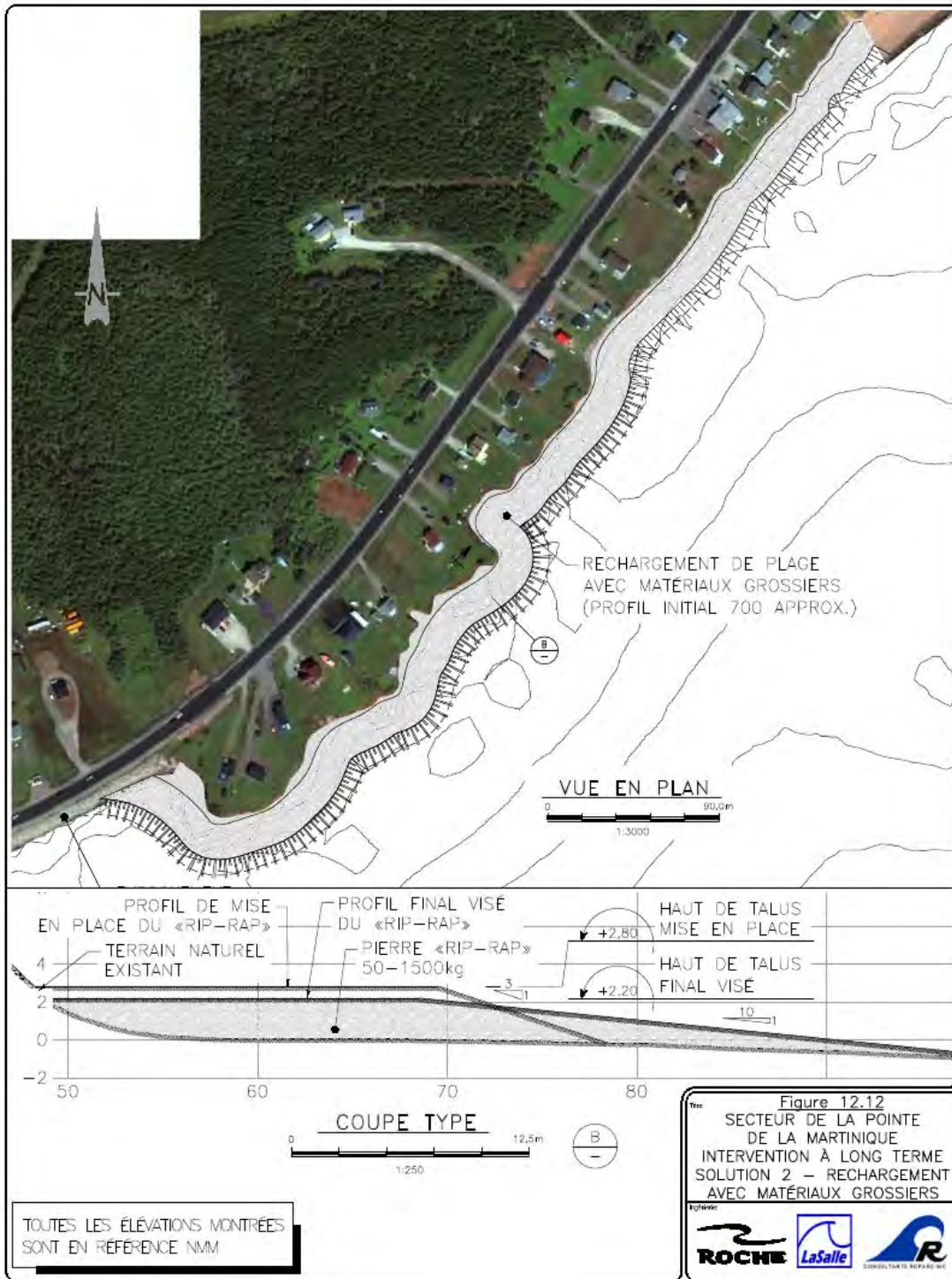


Figure 12.12 – Secteur de la Pointe de la Martinique – Intervention à long terme – Solution 2 – Rechargement de plage avec matériaux grossiers

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

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

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

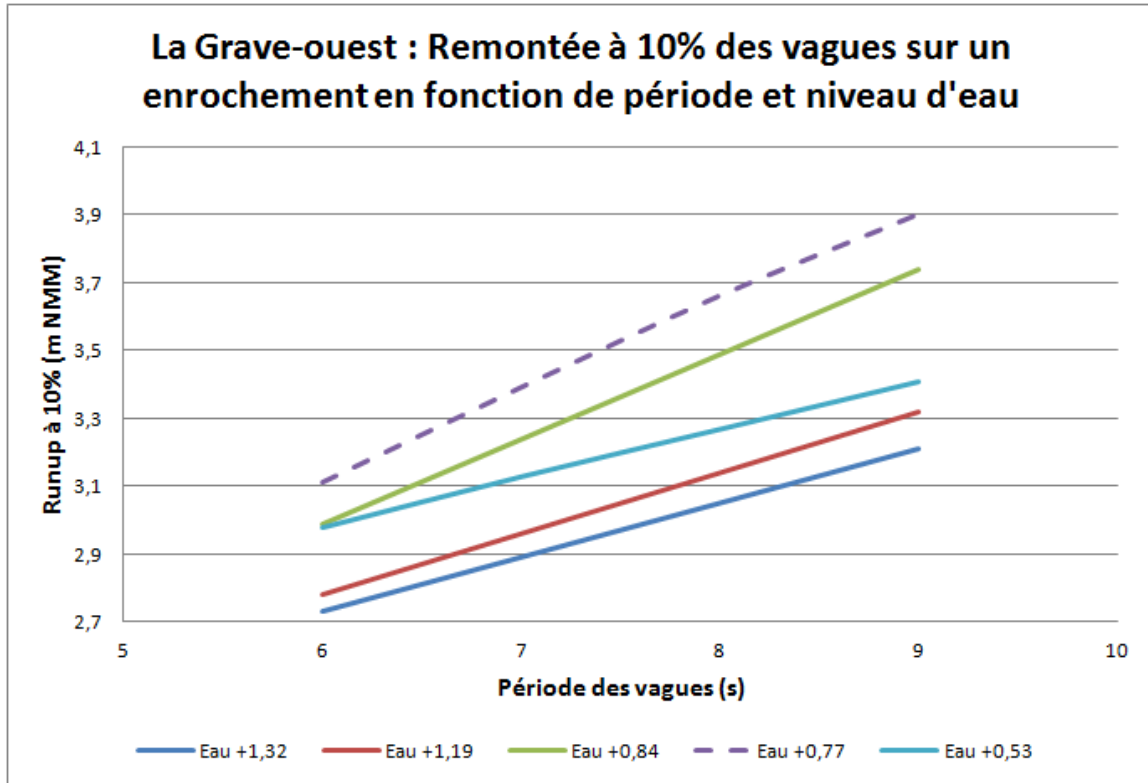


Figure 13.1 Remontée des vagues sur un enrochement dans la partie ouest de La Grave

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.

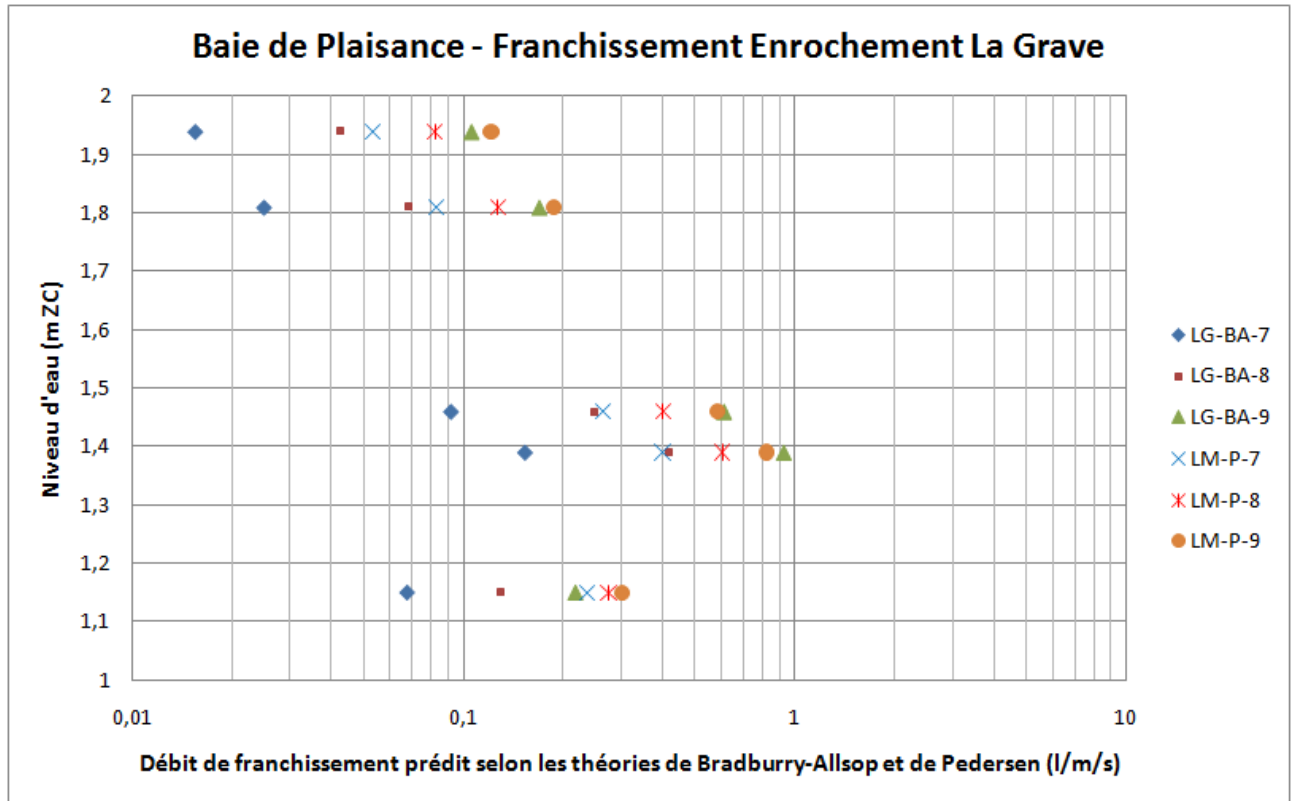


Figure 13.2 Débit de franchissement d'un enrochement dont la crête est à +3,1 m NMM

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 creusage 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.

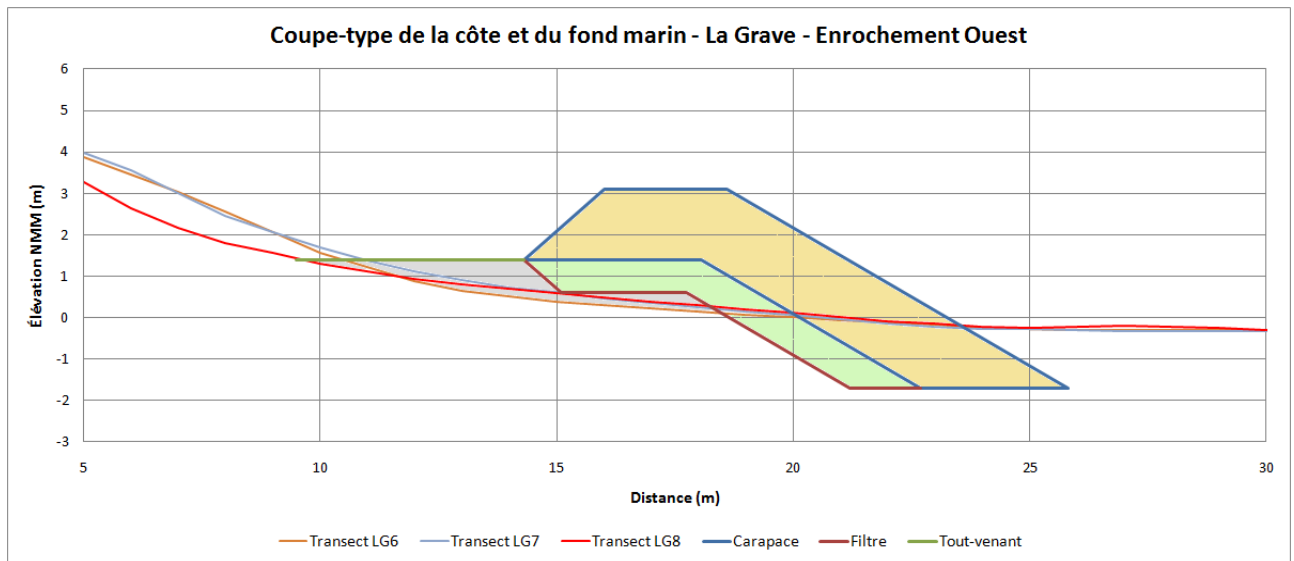


Figure 13.3 Coupe type d'une protection en enrochement de la partie ouest de La Grave

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).

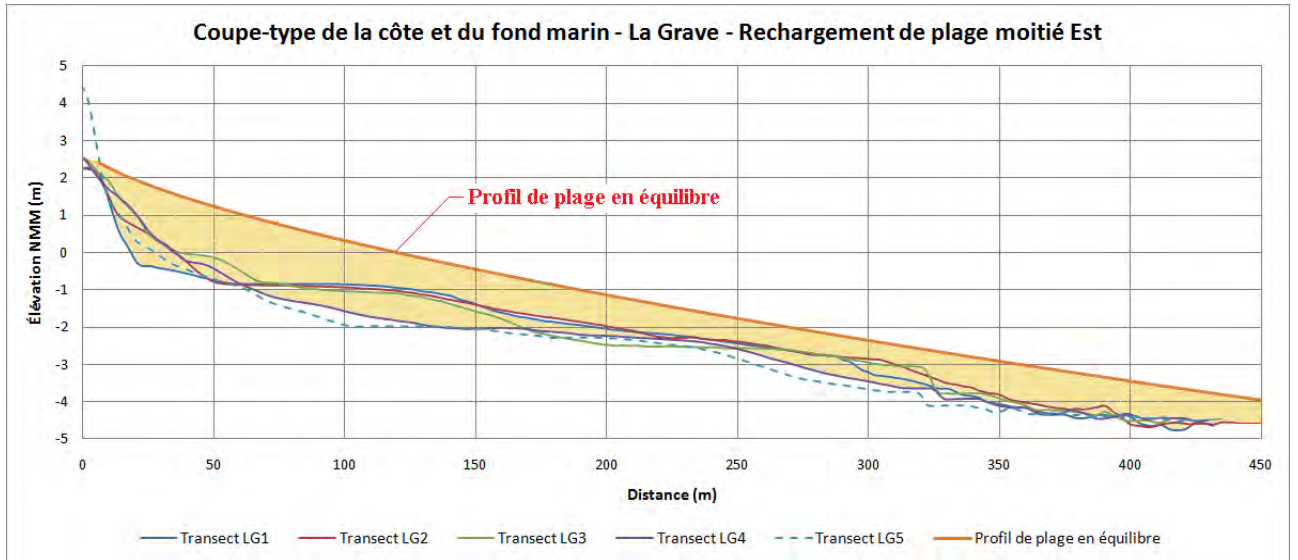


Figure 13.4 Coupe type d'une plage en équilibre devant la partie est de La Grave (plage)

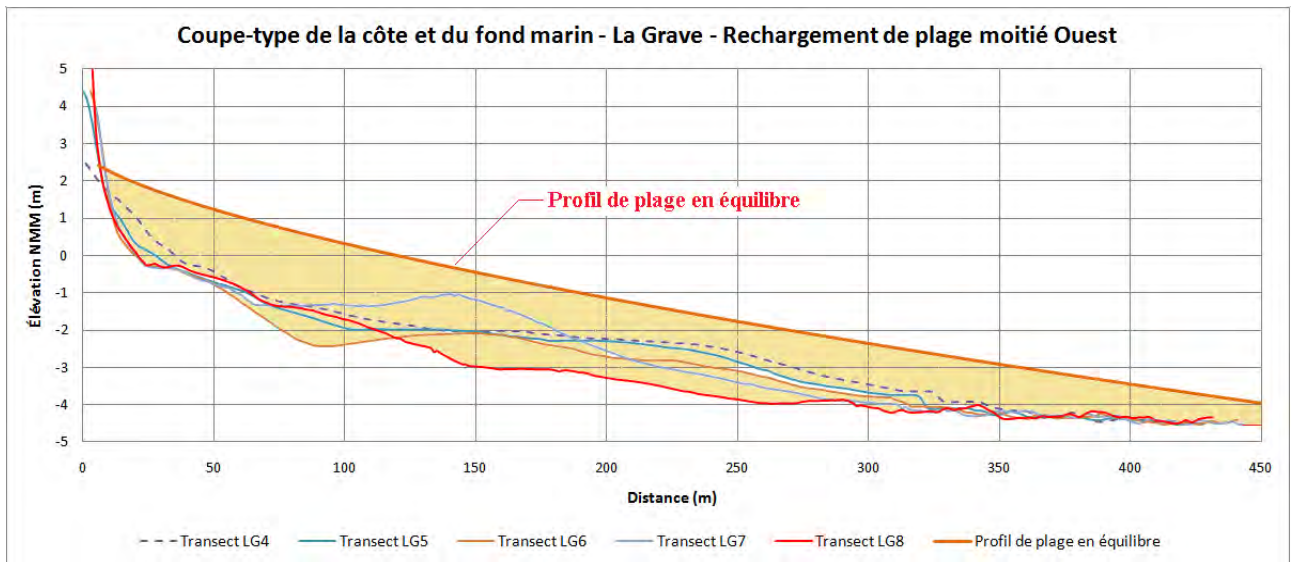


Figure 13.5 Coupe type d'une plage en équilibre devant la partie ouest de La Grave (falaise)

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.

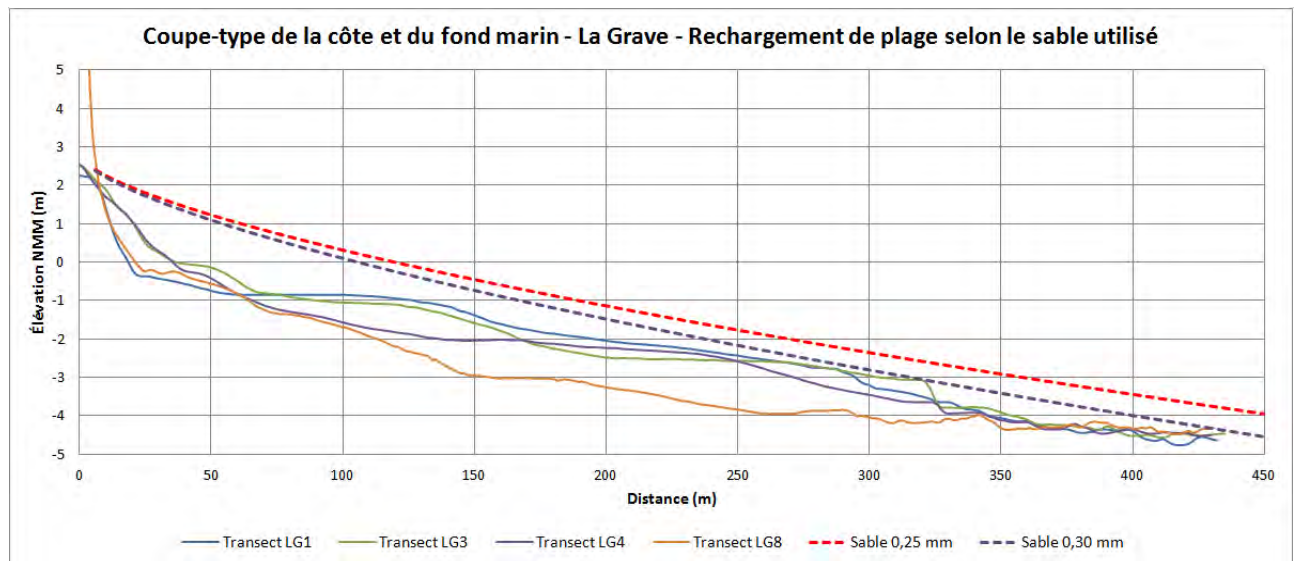


Figure 13.6 Coupe type d'une plage en équilibre devant La Grave selon le diamètre du sable

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 m³/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 m³ 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.

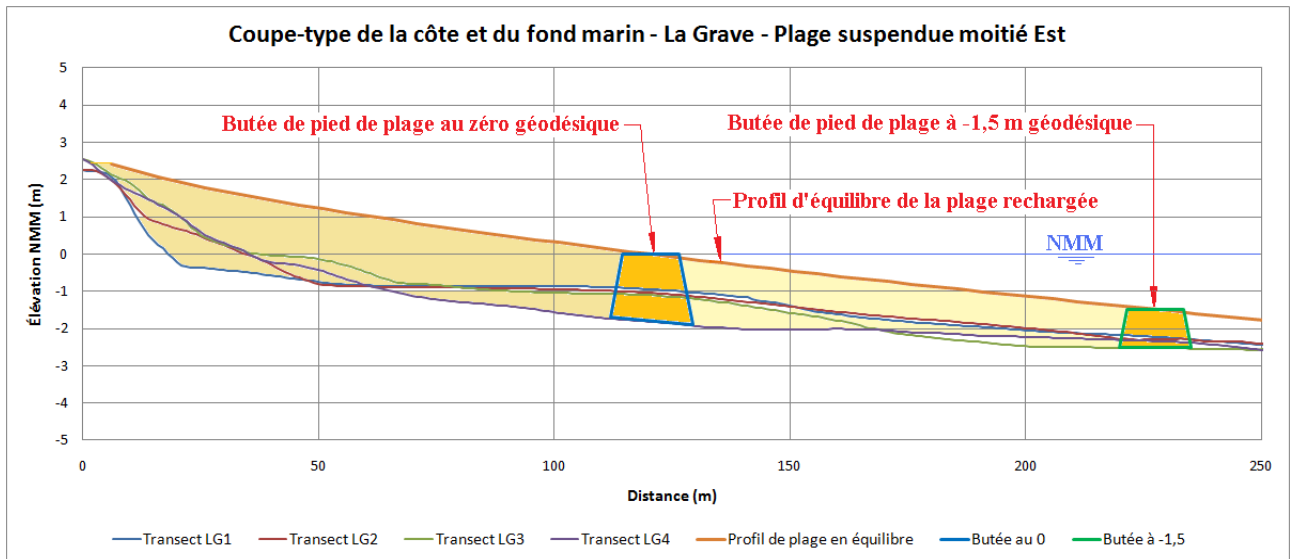


Figure 13.7 Coupe type d'une plage suspendue devant la plage de La Grave – partie est

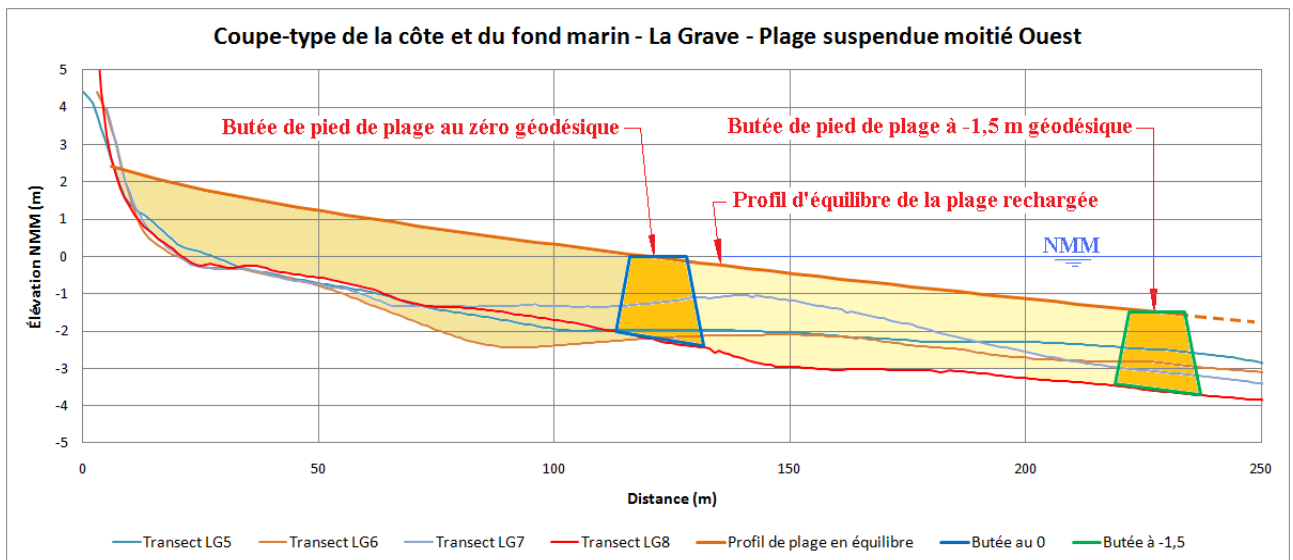


Figure 13.8 Coupe type d'une plage suspendue devant la plage de La Grave – partie ouest

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.

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.

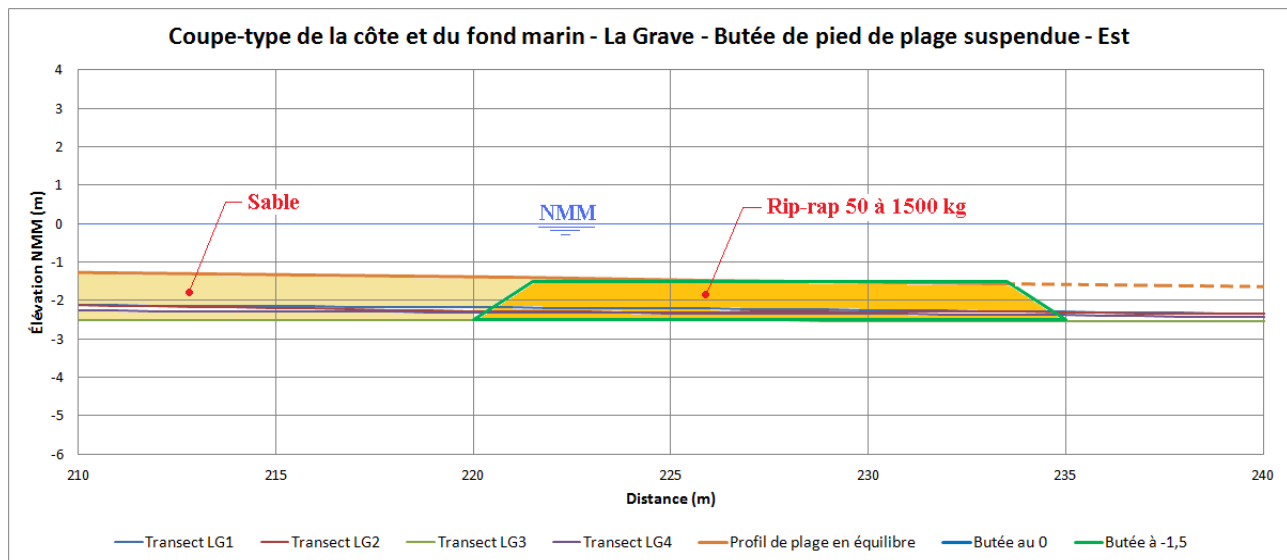


Figure 13.9 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en enrochement à -1,5 m NMM

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

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 antiaffoulement 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.

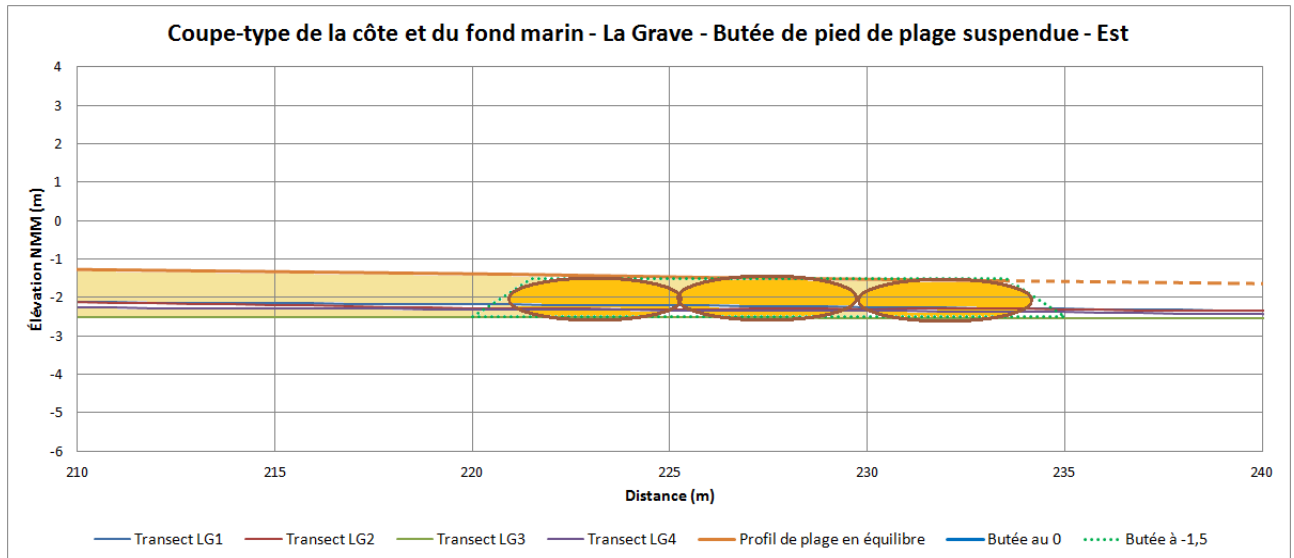


Figure 13.10 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en géotubes à -1,5 m NMM

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 reliés 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.

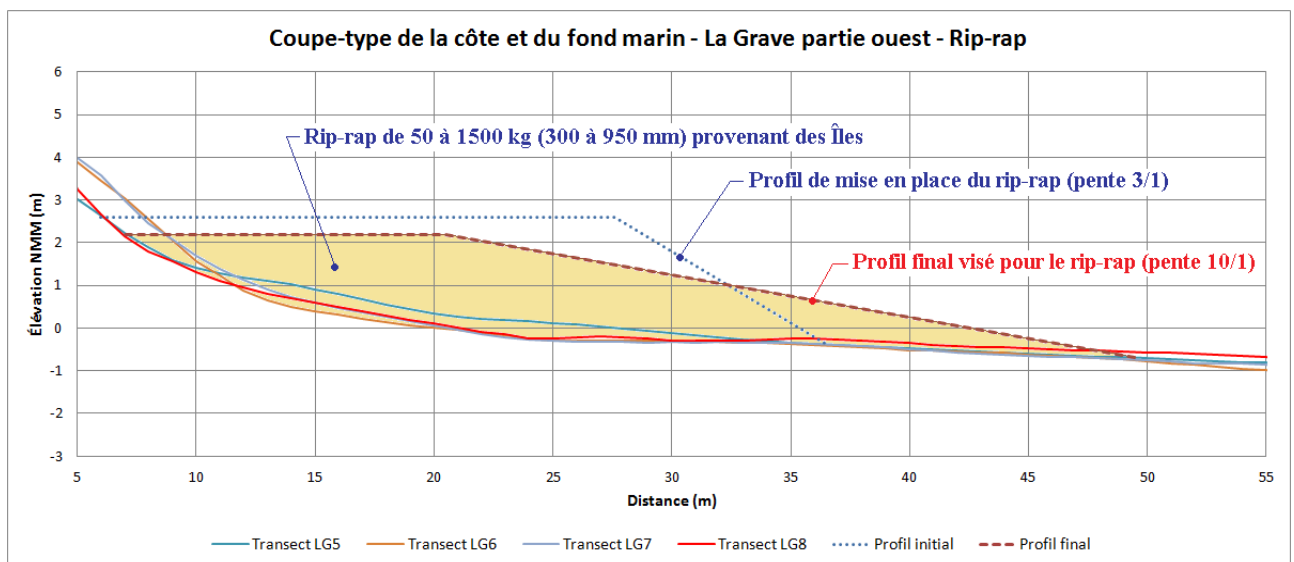


Figure 13.11 Coupe type d'une protection de berge en matériaux grossiers devant la partie ouest de la plage de La Grave

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).

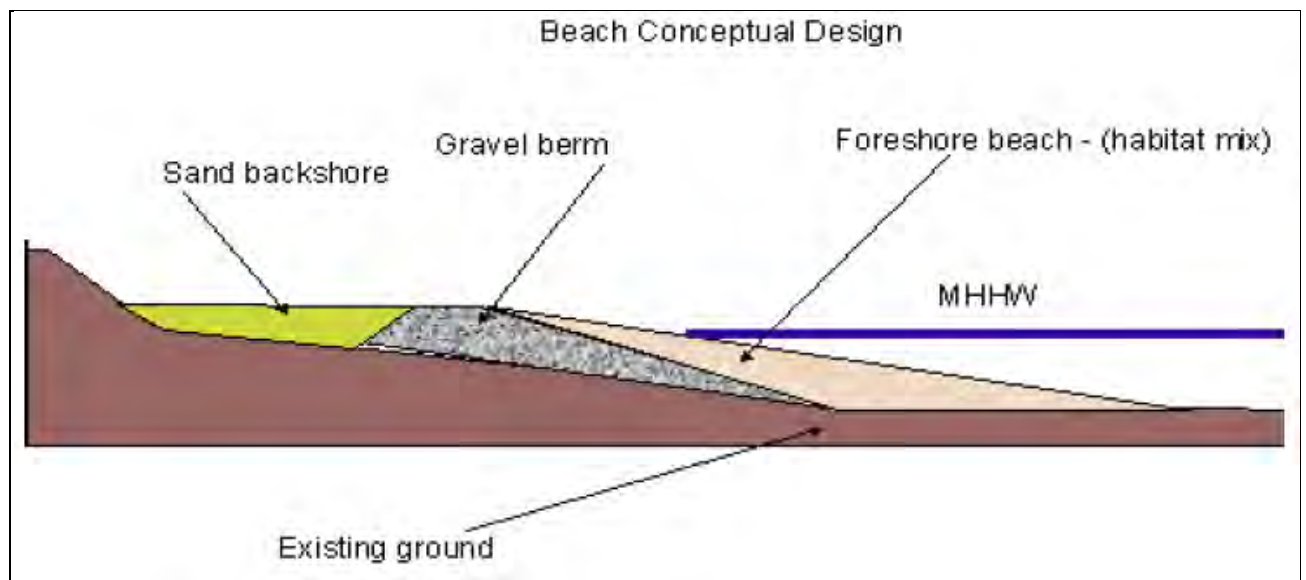


Figure 13.12 Exemple de concept de rechargement de plage mixte dans l'état de Washington USA

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.

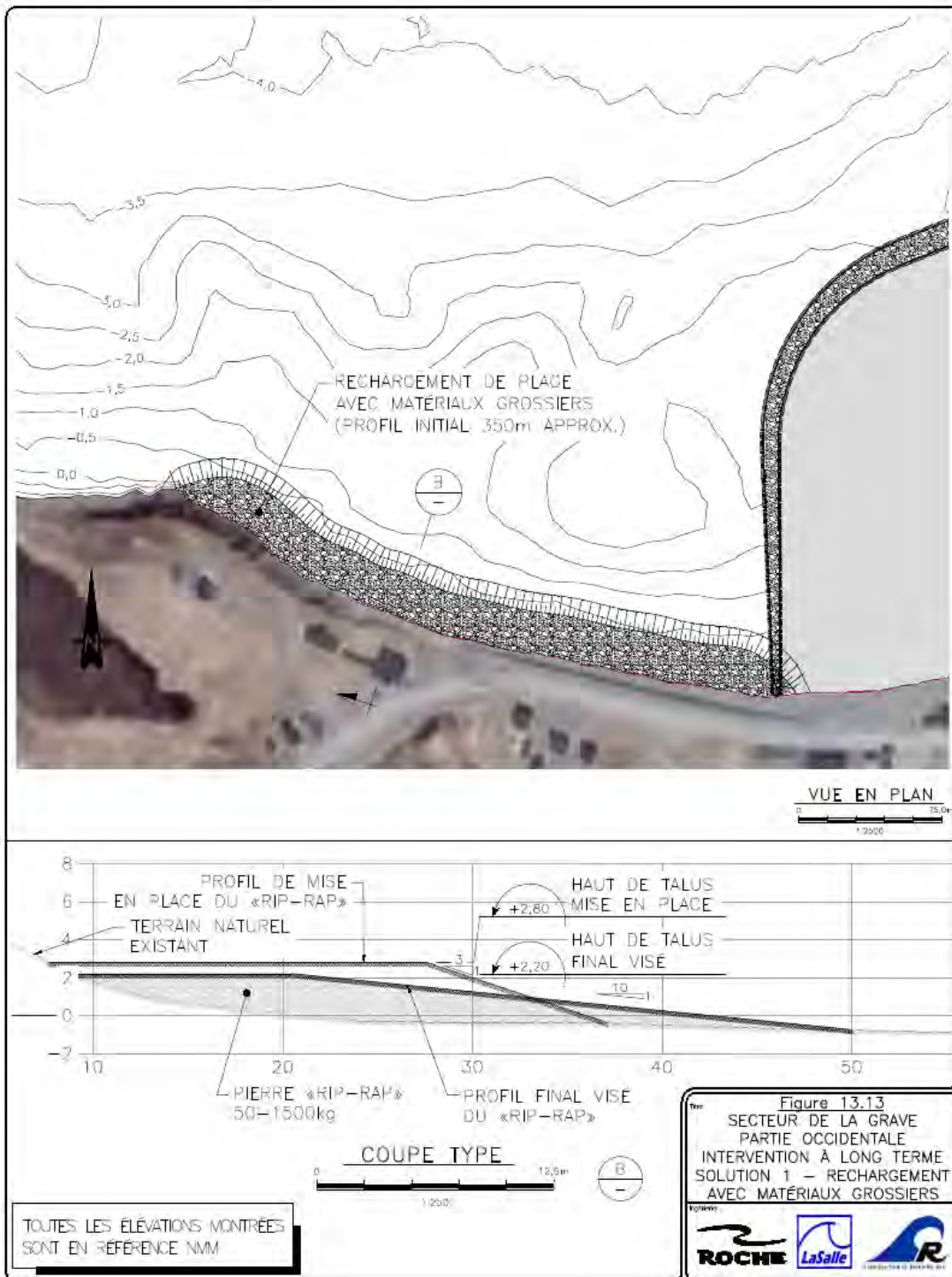


Figure 13.13 Secteur de La Grave – Partie ouest – Rechargement de la plage avec matériaux grossiers

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

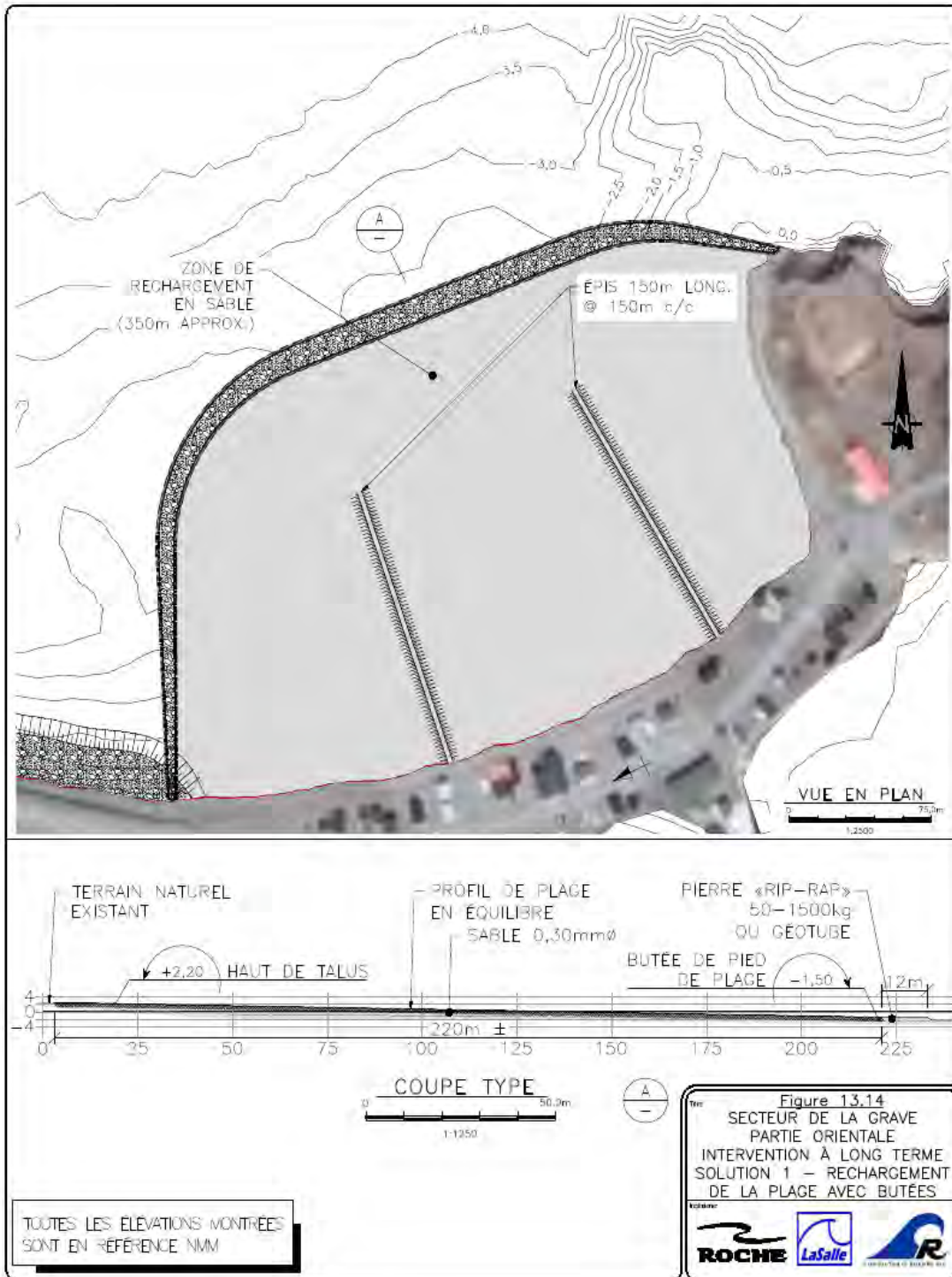


Figure 13.14 Secteur de La Grave – Partie est – Rechargement de la plage avec épis et butées

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.

Tableau 14.1 – 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 GROS CAP

Solution 1 – Enrochement (1975 m.l.)		15 680 000 \$	
Solution 2 – Rechargement de la plage avec matériaux grossiers (1975 m.l.)	Coût initial :	12 909 000 \$	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>6 697 000 \$</u>	
	Coût total :	19 606 000 \$	
Solution 3 – Rechargement de la plage avec butée de pied (350 m.l.; plage de la Garderie seulement)	Coût initial :	11 167 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 7-8 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans). À valider par des études complémentaires, y inclus modélisation physique.
	Rechargements périodiques :	<u>6 323 000 \$</u>	
	Coût total :	17 490 000 \$	

SECTEUR DE LA PLAGES DU CHEMIN DES CHALETS

Solution 1 – Déménagement des chalets	(à déterminer)	Nécessiterait une étude spécifique
Complément solution 1 – Rechargement de haut de plage	726 000 \$	Pourrait nécessiter des rechargements récurrents pour éviter le recul de la plage (non comptabilisés dans le coût du projet)
Solution 2 – Rechargement de la plage en sable (900 m.l.), avec épis (7 x 150 m)	Coût initial : 16 870 000 \$ Rechargements périodiques : <u>8 710 000 \$</u> Coût total : 25 580 000 \$	Des rechargements périodiques sont requis, soit 25% du volume initial à tous les 7-8 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans). À valider par des études complémentaires, y inclus modélisation physique.

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 \$ Rechargements périodiques : <u>2 202 000 \$</u> Coût total : 6 606 000 \$	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.

SECTEUR DE LA GRAVE

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.

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 transporteront 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).



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 des Étangs Aérés
Intervention à long terme - Solution 1
Enrochement (125 + 50 m)

175 ml

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	65 000 \$
2	Excavation & remblai	1200	m ³	30	36 000 \$
3	Excavation roc	900	m ³	100	90 000 \$
4	Pierre filtre 100 - 200 kg	700	m ³	110	77 000 \$
5	Pierre de carapace 1 - 2 tonnes	2450	m ³	125	306 250 \$
6	Membrane géotextile	2275	m ²	15	34 125 \$
	SOUS-TOTAL				609 000 \$
7	Contingences			20%	122 000 \$
8	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			25%	183 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				914 000 \$

Secteur des Étangs Aérés

Intervention à long terme - Solution 2

Rechargement de la plage avec butée (125 + 110 m) 235 ml

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	320 000 \$
2	Sable 0,30mm dia.	68 000	m ³	20	1 360 000 \$
3	Pierre RIP-RAP (50 - 1500 kg)	10 900	m ³	120	1 308 000 \$
	SOUS-TOTAL				2 988 000 \$
4	Contingences			20%	598 000 \$
5	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			15%	538 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				4 124 000 \$

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%	163 000 \$
2	Sable 0,30mm dia.	68 000	m ³	20	1 360 000 \$
	SOUS-TOTAL				1 523 000 \$
4	Contingences			20%	305 000 \$
5	Études (environnement, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			15%	275 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				2 103 000 \$

	TOTAL DU PROJET (Taxes en sus)				6 227 000 \$
--	---------------------------------------	--	--	--	---------------------

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

Secteur des Étangs Aérés

Intervention à long terme - Solution 3

**Rechargement de la plage avec avec matériaux grossiers
(125 + 55 m)**

180 ml

Item	Description	Quantité	Unité de mesure	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	67 000 \$
2	Pierre de rechargement grossier (50-1500kg)	9000	m ³	60	540 000 \$
SOUS-TOTAL					607 000 \$
3	Contingence			20%	121 000 \$
4	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			23%	162 000 \$
TOTAL (Taxes en sus)					908 000 \$

Rechargements récurrents: cette solution nécessitera des rechargements périodiques

Hypothèse: 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	Quantité	Unité de mesure	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	32 000 \$
2	Pierre de rechargement grossier (50-1500kg)	4500	m ³	60	270 000 \$
SOUS-TOTAL					302 000 \$
3	Contingence			20%	61 000 \$
4	Études (environnement, topo-bathymétrie, autres) ingénierie, surveillance des travaux			23%	61 000 \$
TOTAL (Taxes en sus)					454 000 \$

TOTAL DU PROJET (Taxes en sus)					1 362 000 \$
---------------------------------------	--	--	--	--	---------------------

Secteur des Étangs Aérés
Intervention à court terme
Rechargement de la plage avec avec matériaux grossiers
(125 + 25 m)

150 ml

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	22 000 \$
2	Pierre (0 - 500 kg)	3000	m ³	60	180 000 \$
	SOUS-TOTAL				202 000 \$
3	Contingences			20%	41 000 \$
4	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			25%	61 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				304 000 \$

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

Secteur du Gros-Cap
Intervention à long terme - Solution 1
Enrochement (1375+ 600 m)

1975 ml

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	1 217 000 \$
2	Excavation & remblai	10 000	m ³	30	300 000 \$
3	Excavation roc	14 000	m ³	100	1 400 000 \$
4	Pierre filtre 100 - 200 kg	15 800	m ³	110	1 738 000 \$
5	Pierre de carapace 1 - 2 tonnes	49 375	m ³	125	6 171 875 \$
6	Membrane géotextile	35 550	m ²	15	533 250 \$
	SOUS-TOTAL				11 361 000 \$
7	Contingences			20%	2 273 000 \$
8	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			15%	2 046 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				15 680 000 \$

Secteur du Gros-Cap

Intervention à long terme - Solution 2

Rechargement de la plage avec matériaux grossiers (1375 + 600m)

1975 ml

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	1 002 000 \$
2	Sable 0,30mm dia. (recouvrement initial plage de la garderie 600m)	12 600	m ³	20	252 000 \$
3	Pierre Rip-Rap (50 - 1500 kg)	135 000	m ³	60	8 100 000 \$
	SOUS-TOTAL				9 354 000 \$
4	Contingences			20%	1 871 000 \$
5	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			15%	1 684 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				12 909 000 \$

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)

Hypothèse pour sable: Ajout de 25% du volume initial chaque année, pour la durée de la vie utile (35 ans)

Note: estimation de coût en dollars constants

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	520 000 \$
2	Sable 0,30mm dia. (recouvrement annuel plage de la garderie 600m)	12 600	m ³	20	252 000 \$
3	Pierre Rip-Rap (50 - 1500 kg) Rechargement à tous les 15 ans)	68 000	m ³	60	4 080 000 \$
	SOUS-TOTAL				4 852 000 \$
4	Contingences			20%	971 000 \$
5	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			15%	874 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				6 697 000 \$

TOTAL DU PROJET (Taxes en sus)	19 606 000 \$
---------------------------------------	----------------------

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

Secteur du Gros-Cap (plage de la Garderie)

Intervention à long terme - Solution 3

Rechargement de la plage avec butée de pied de plage (350 m; plage de la Garderie seulement)

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	867 000 \$
2	Sable 0,30mm dia.	210 000	m ³	20	4 200 000 \$
3	Pierre Rip-Rap (50 - 1500 kg)	25 200	m ³	120	3 024 000 \$
	SOUS-TOTAL				8 091 000 \$
4	Contingences			20%	1 619 000 \$
5	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			15%	1 457 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				11 167 000 \$

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%	504 000 \$
2	Sable 0,30mm dia.	210 000	m ³	20	4 200 000 \$
	SOUS-TOTAL				4 704 000 \$
4	Contingences			20%	941 000 \$
5	Études (environnement, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			12%	678 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				6 323 000 \$

TOTAL DU PROJET (Taxes en sus)					17 490 000 \$
---------------------------------------	--	--	--	--	----------------------

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

Secteur de la plage du Chemin des Chalets
Intervention à long terme - Solution 1
Déménagement des chalets et rechargement du haut de la plage (700 m)

NOTE: Le coût du déménagement des chalets n'est pas estimé dans le tableau suivant.

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	50 000 \$
2	Sable 0,30mm dia.	20 000	m ³	20	400 000 \$
3	Renaturalisation de la berge (plantation)		global		15 000 \$
	SOUS-TOTAL				465 000 \$
3	Contingences			20%	93 000 \$
4	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			30%	168 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				726 000 \$

Secteur de la plage du Chemin des Chalets
Intervention à long terme - Solution 2
Réchargement de la plage (900 m) avec épis (7 x 150 m)

Item	Description	Quantité	Unité de mesure	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	6 obs		12%	1 299 000 \$
2	Sable # 3, 50mm d'a.	270 000	m ³	30	8 100 000 \$
3	Pierre R P-RAP (30 - 1500 kg)	40000	m ³	120	4 800 000 \$
	SOUS-TOTAL				14 200 000 \$
4	Coûts généraux			25%	3 543 000 \$
5	Études (environnement, géotechnique, modélisation physique, topographique, autres), ingénierie, surveillance des travaux			25%	2 912 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				16 870 000 \$

Rechargements récurrents: cette solution nécessite 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	Quantité	Unité de mesure	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	6 obs		12%	848 000 \$
2	Sable # 3, 50mm d'a.	270 000	m ³	30	8 100 000 \$
	SOUS-TOTAL				8 948 000 \$
4	Coûts généraux			25%	1 212 000 \$
5	Études (environnement, géotechnique, modélisation physique, topographique, autres), ingénierie, surveillance des travaux			25%	1 482 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				8 710 000 \$

TOTAL DU PROJET (Taxes en sus)	25 580 000 \$
---------------------------------------	----------------------

Secteur de la Pointe de la Martinique
Intervention à long terme - Solution 1
Enrochement (700 m)

700 ml

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	365 000 \$
2	Excavation & remblai	700	m ³	30	21 000 \$
3	Excavation roc	6 300	m ³	100	630 000 \$
4	Pierre filtre 100 - 200 kg	4 550	m ³	100	455 000 \$
5	Pierre de carapace 1 - 2 tonnes	14 700	m ³	120	1 764 000 \$
6	Membrane géotextile	11 200	m ²	15	168 000 \$
	SOUS-TOTAL				3 403 000 \$
7	Contingences			20%	681 000 \$
8	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			20%	817 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				4 901 000 \$

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

**Secteur de la Pointe de la Martinique
Intervention à long terme - Solution 2**

Rechargement de la plage avec matériaux grossiers (700 m) 700 ml

Item	Description	Quantités	Unités de mesurage	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	Global		12%	328 000 \$
2	Pierre RIP-RAP (50 - 1500 kg)	45 500	m ³	60	2 730 000 \$
SOUS-TOTAL					3 058 000 \$
3	Contingences			20%	612 000 \$
4	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			20%	734 000 \$
TOTAL (Taxes en sus)					4 404 000 \$

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%	164 000 \$
2	Pierre RIP-RAP (50 - 1500 kg)	22 750	m ³	60	1 365 000 \$
SOUS-TOTAL					1 529 000 \$
3	Contingences			20%	306 000 \$
4	Études (environnement, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			20%	367 000 \$
TOTAL (Taxes en sus)					2 202 000 \$

COÛT TOTAL DU PROJET (TAXES EN SUS)					6 606 000 \$
--	--	--	--	--	---------------------

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 \$

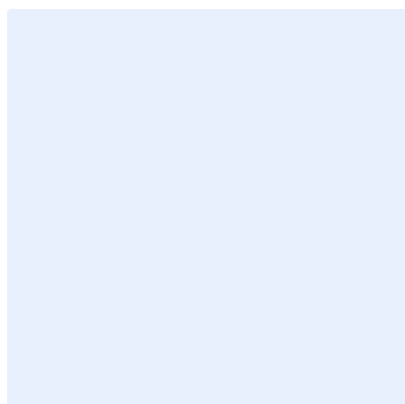
Rechargements récurrents: cette solution nécessitera des rechargements périodiques
Hypothèse: 25% du volume initial à tous les 7-8 ans, soit 100% sur la vie utile du projet (35 ans)
Note: estimation de coût en dollars constants

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 \$
---------------------------------------	---------------------

Annexe III
Plan de localisation

Insérez une carte topographique ou cadastrale de localisation du projet ainsi que, s'il y a lieu, un plan de localisation des travaux ou des activités à une échelle adéquate indiquant notamment les infrastructures en place par rapport au site des travaux.



Municipalité : Les Îles-de-la-Madeleine



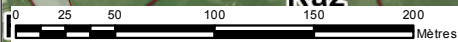
La Grave

Golfe du Saint-Laurent

Rc1

Ra2

1:3,801



Projection : NAD 1983 MTM 4

Odonyme <i>Nom de rue</i> Odonyme		Unité d'évaluation Flèche de renvoi Connectivité Occupation		Pylône de ligne électrique Point d'immatriculation Unité d'évaluation Hautes eaux		# xxx Numéro civique ft : xx,xx Mesure de front st : xxx,xx Superficie totale xxxx-xx-xxxx Immatriculation		Droit de passage Servitude Servitude linéaire Servitude surfacique		Cadastre Flèche de renvoi r : xx,xx Rayon de courbure de ligne de lot xx,xx Mesure de ligne de lot		Lot régulier xx,xx Mesure de rue Réseau routier s : xxx,xx Superficie de lot Cadastre x xxx xxx Numéro de lot	
Limite administrative <i>Nom de l'organisation</i> Identification de l'entité municipale Limite municipale Zone verte Identification de la zone agricole Zone verte										Hydrographie Rivière Hydroonyme Hydrographie linéaire Hydrographie surfacique		Unité de voisinage Identification d'unité de voisinage Unité de voisinage	

Les informations contenues dans le présent site Internet sont la propriété de la municipalité des Îles-de-la-Madeleine et sont destinées à l'usage exclusif de ses employé(e)s pour fins de consultation ou étude. La municipalité des Îles-de-la-Madeleine ne se porte aucunement garante de quelque document, donnée ou information contenus sur le présent site Internet. De plus, en cas de divergence entre un texte officiel et le contenu de ce site, le texte officiel a préséance. Copie de tout texte officiel peut être obtenu, moyennant des frais raisonnables, auprès de la mairie de la municipalité de Les Îles-de-la-Madeleine. Données produites par : Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. Date de la dernière mise à jour : 20 juin 2019.



Municipalité des
Îles-de-la-Madeleine
460, chemin Principal
Cap-aux-Meules, Québec G4T 1A1
Téléphone : 418 986-3100 Télécopieur : 418 986-6962
CÉ : communications@muniles.ca
http://www.muniles.ca



Le système d'information géographique est diffusé par : **Gonet**[™]
© Groupe de géomatique AZIMUT inc., 1998 - 2019. Tous droits réservés.

Imprimé le : 2 août 2019 à 11:17:48
Auteur : Utilisateur public

Municipalité : Les Îles-de-la-Madeleine



Odonyme <i>Nom de rue</i> Odonyme Limite administrative <i>Nom de l'organisation</i> Identification de l'entité municipale Limite municipale Zone verte Identification de la zone agricole Zone verte	Unité d'évaluation Flèche de renvoi Connectivité Occupation Pylône de ligne électrique Point d'immatriculation Unité d'évaluation Hautes eaux	# xxx Numéro civique ft : xx,xx Mesure de front st : xxx,xx Superficie totale xxxx-xx-xxxx Immatriculation	Droit de passage Servitude Servitude linéaire Servitude surfacique	Cadastre Flèche de renvoi r : xx,xx Rayon de courbure de ligne de lot xx,xx Mesure de ligne de lot [] Lot régulier xx,xx Mesure de rue [] Réseau routier s : xxx,xx Superficie de lot [] Cadastre x xxx xxx Numéro de lot	Hydrographie Rivière Hydroonyme Hydrographie linéaire Hydrographie surfacique	Unité de voisinage Identification d'unité de voisinage Unité de voisinage
--	---	---	--	---	---	--

Les informations contenues dans le présent site Internet sont la propriété de la municipalité des Îles-de-la-Madeleine et sont destinées à l'usage exclusif de ses employé(e)s pour fins de consultation ou étude. La municipalité des Îles-de-la-Madeleine ne se porte aucunement garante de quelque document, donnée ou information contenus sur le présent site Internet. De plus, en cas de divergence entre un texte officiel et le contenu de ce site, le texte officiel a préséance. Copie de tout texte officiel peut être obtenu, moyennant des frais raisonnables, auprès de la mairie de la municipalité de Les Îles-de-la-Madeleine. Données produites par : Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. Date de la dernière mise à jour : 20 juin 2019.



Municipalité des Îles-de-la-Madeleine
 460, chemin Principal
 Cap-aux-Meules, Québec G4T 1A1
 Téléphone : 418 986-3100 Télécopieur : 418 986-6962
 CÉ : communications@muniles.ca
<http://www.muniles.ca>



Le système d'information géographique est diffusé par : **GOnet™**
 © Groupe de géomatique AZIMUT inc., 1998 - 2019. Tous droits réservés.

Imprimé le : 2 août 2019 à 11:32:10
 Auteur : Utilisateur public