

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.

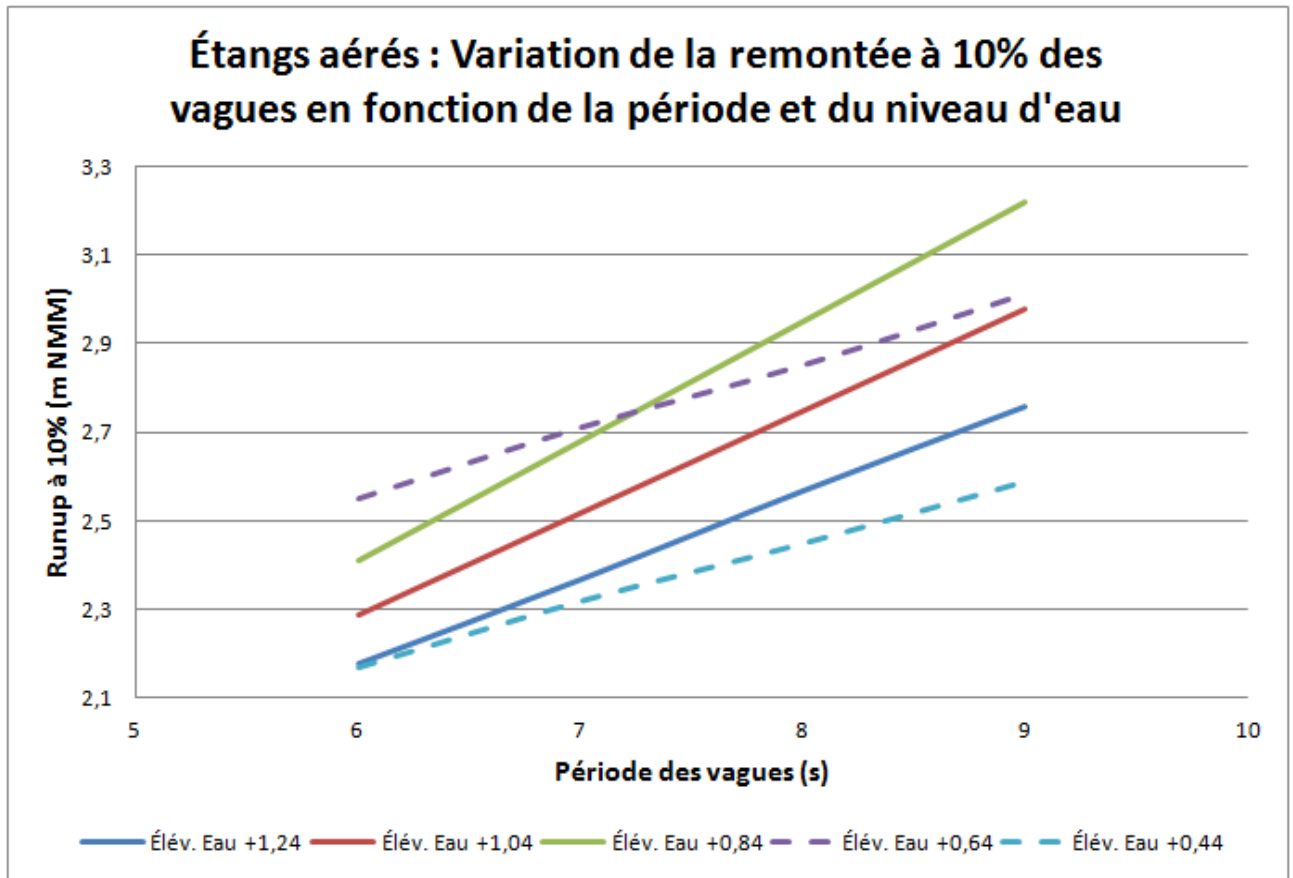


Figure 9.1 Remontée des vagues sur un enrochement près des étangs aérés

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

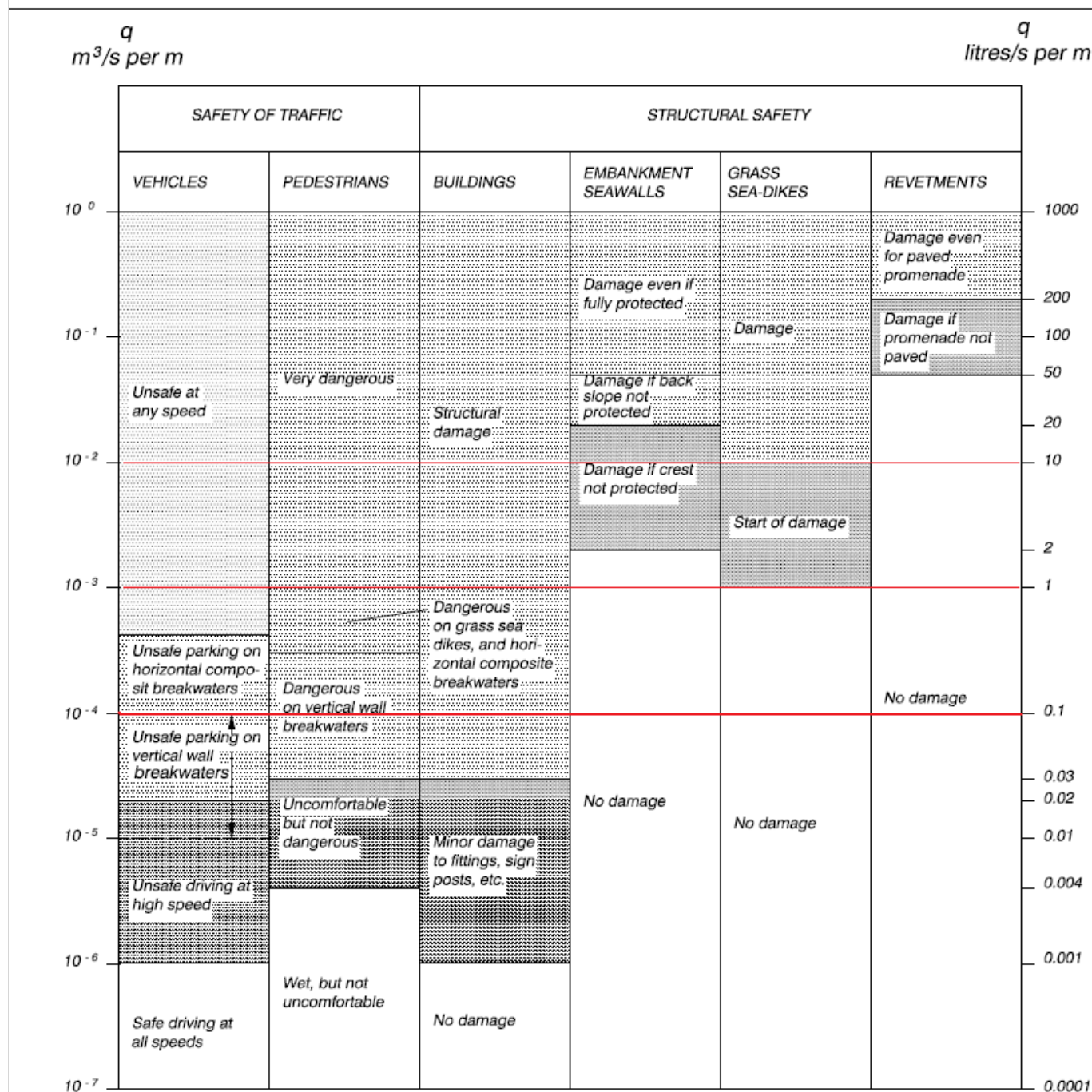


Figure 9.2 Tableau des valeurs critiques des taux moyens de franchissement d'une digue du C.E.M.

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.

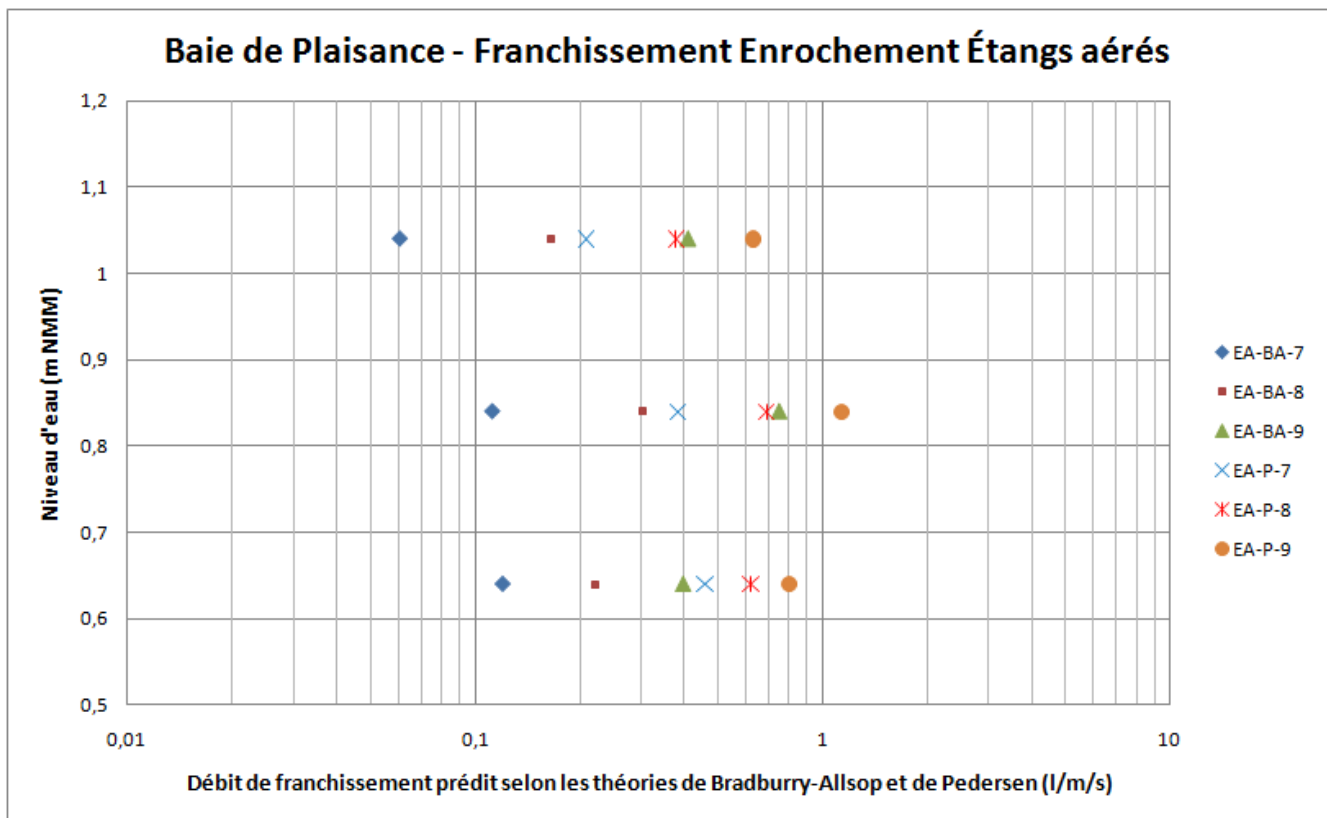


Figure 9.3 Débits de franchissement d'un enrochement dont la crête est à +3,2 m NMM

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 ($H_s \text{ max} = 1,79 \text{ m}$ de hauteur), la formule de Hudson appliquée avec les paramètres suivants au dimensionnement des enrochements 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.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.

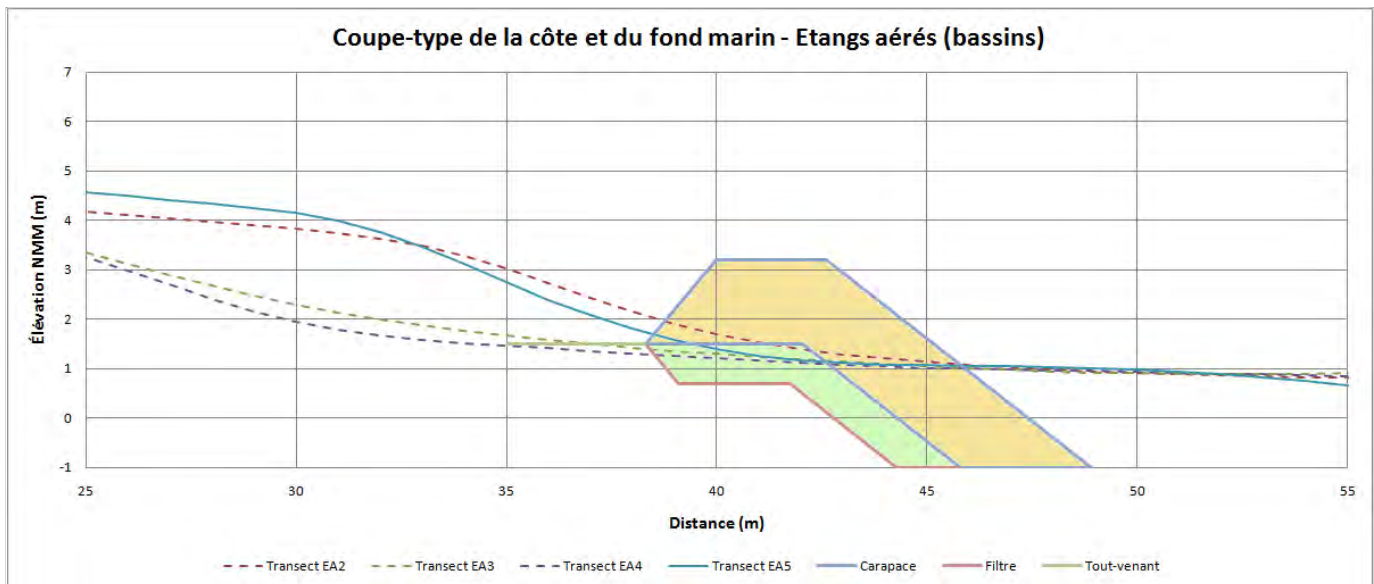


Figure 9.4 Coupe type d'un enrochement de protection au droit des bassins des étangs aérés

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

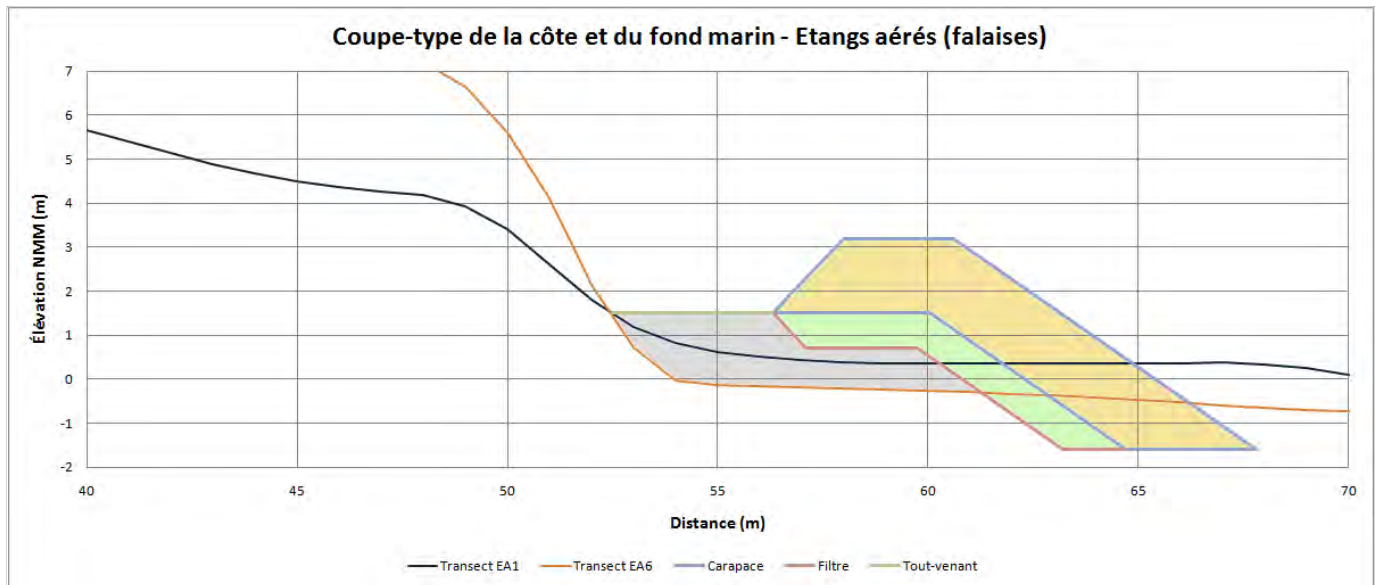


Figure 9.5 Coupe type d'un enrochement de protection de part et d'autre des étangs aérés

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 situe 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.

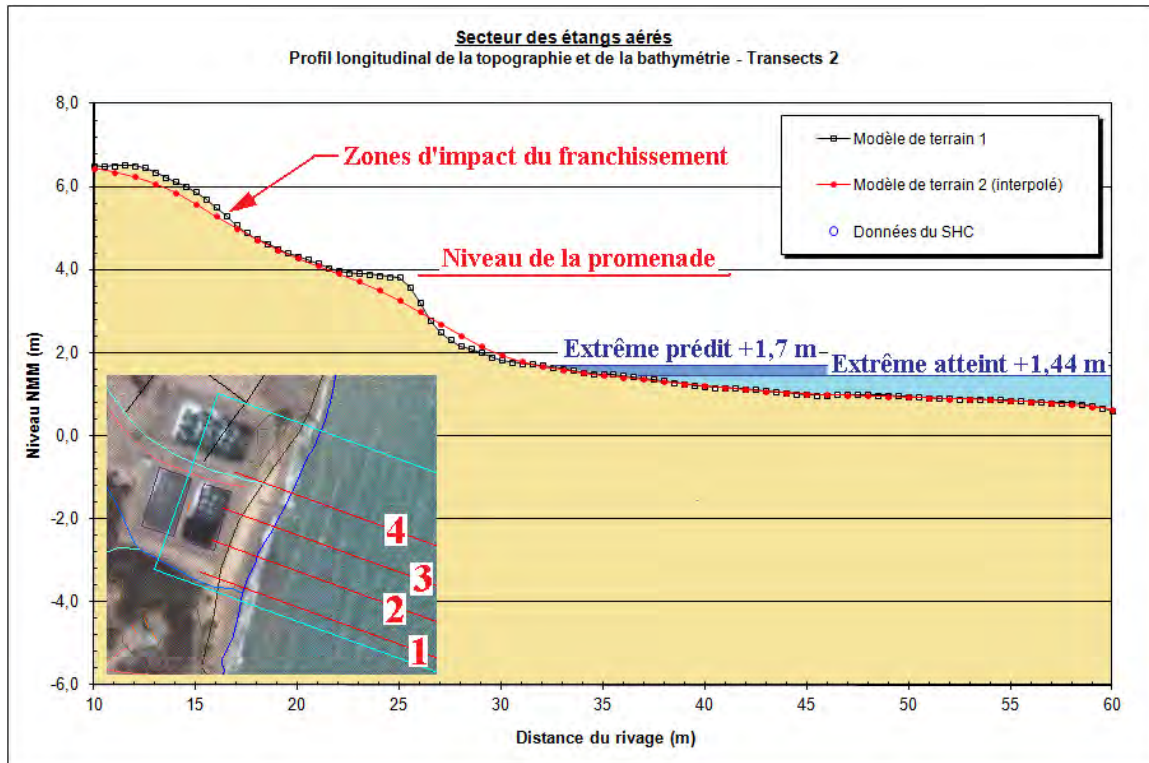


Figure 9.11 Coupe type de la berge au niveau des étangs aérés avec les élévations NMM des différentes parties de cette berge

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.

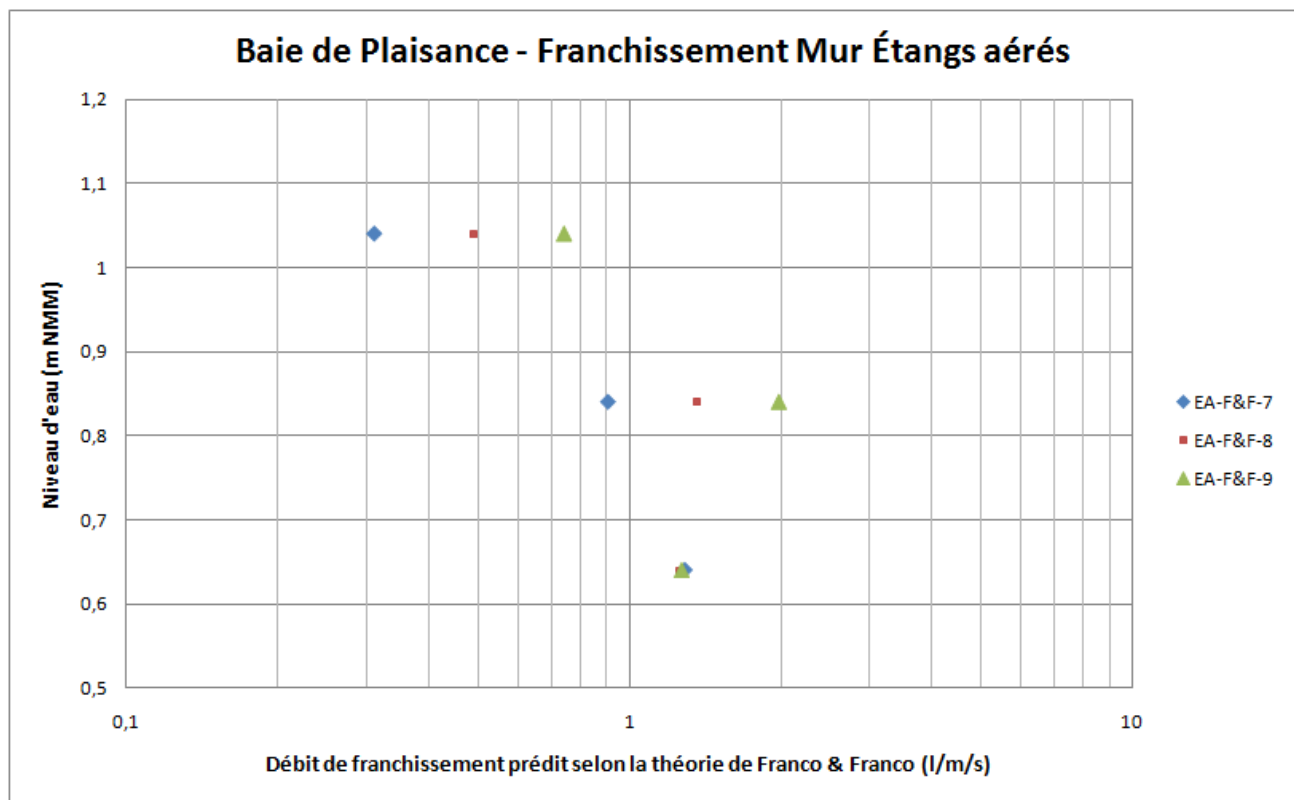


Figure 9.12 Débits de franchissement d'un mur dont la crête est située à +3,6 m NMM

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

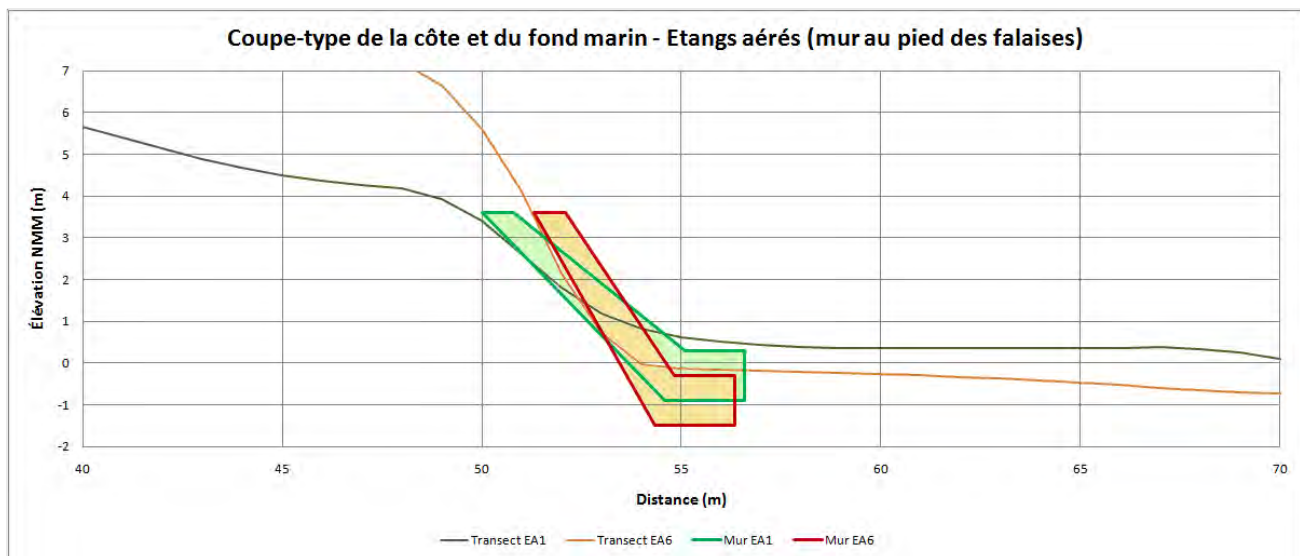


Figure 9.13 Coupe type d'une protection en béton armé de part et d'autre des étangs aérés

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

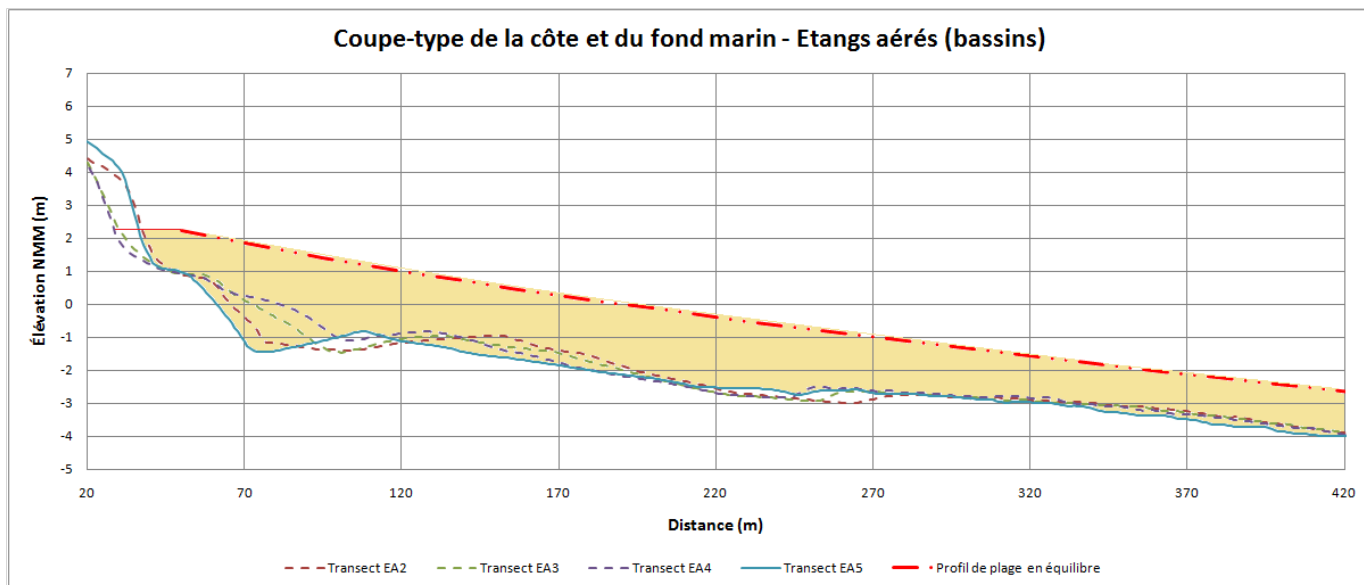


Figure 9.14 Coupe type d'une plage en équilibre devant les bassins des étangs aérés

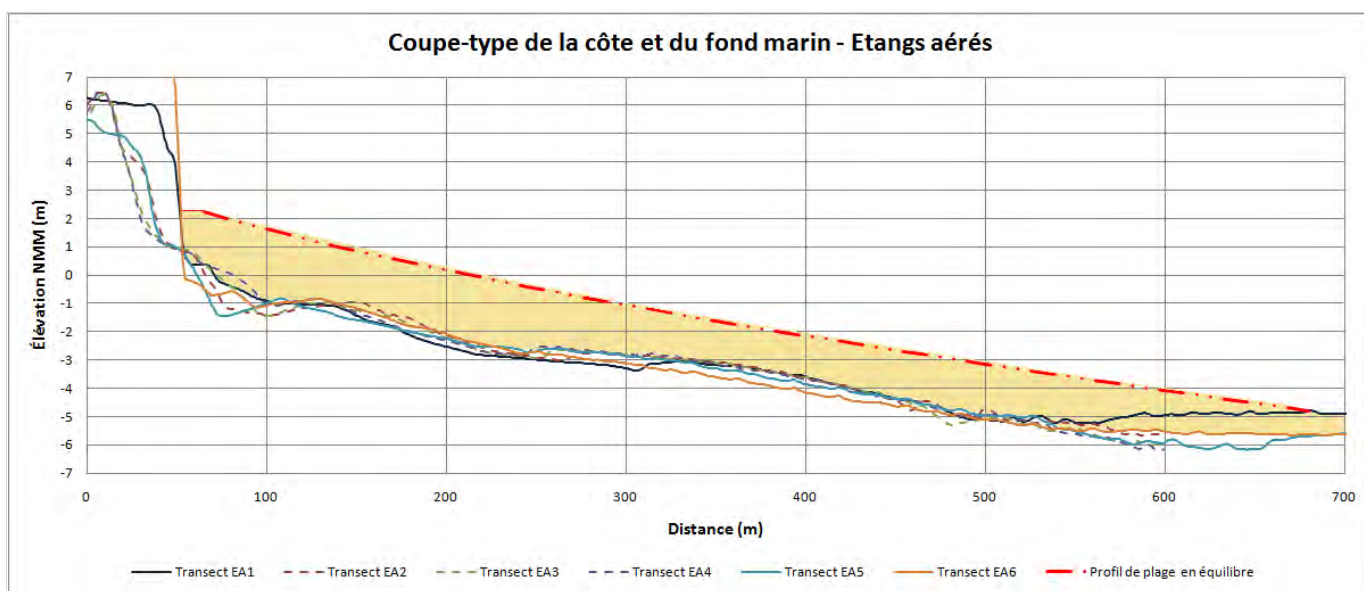


Figure 9.15 Coupe-type d'une plage en équilibre de part et d'autre des bassins des étangs aérés

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.

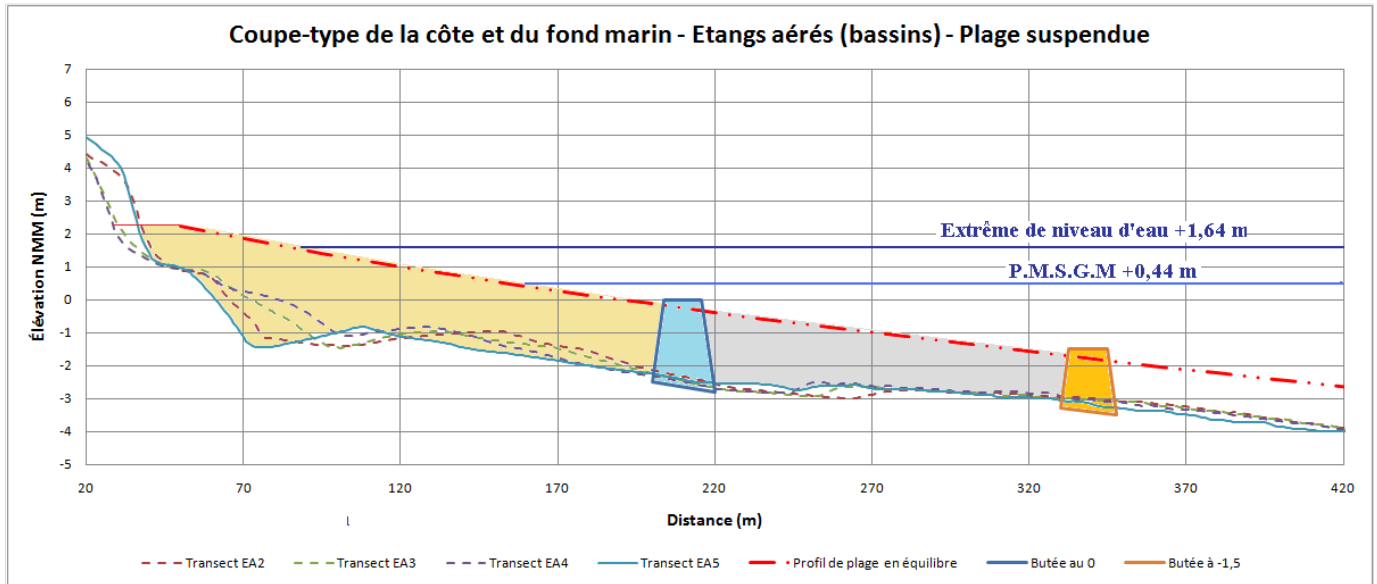


Figure 9.16 Coupe type d'une plage suspendue devant les étangs aérés

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 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.

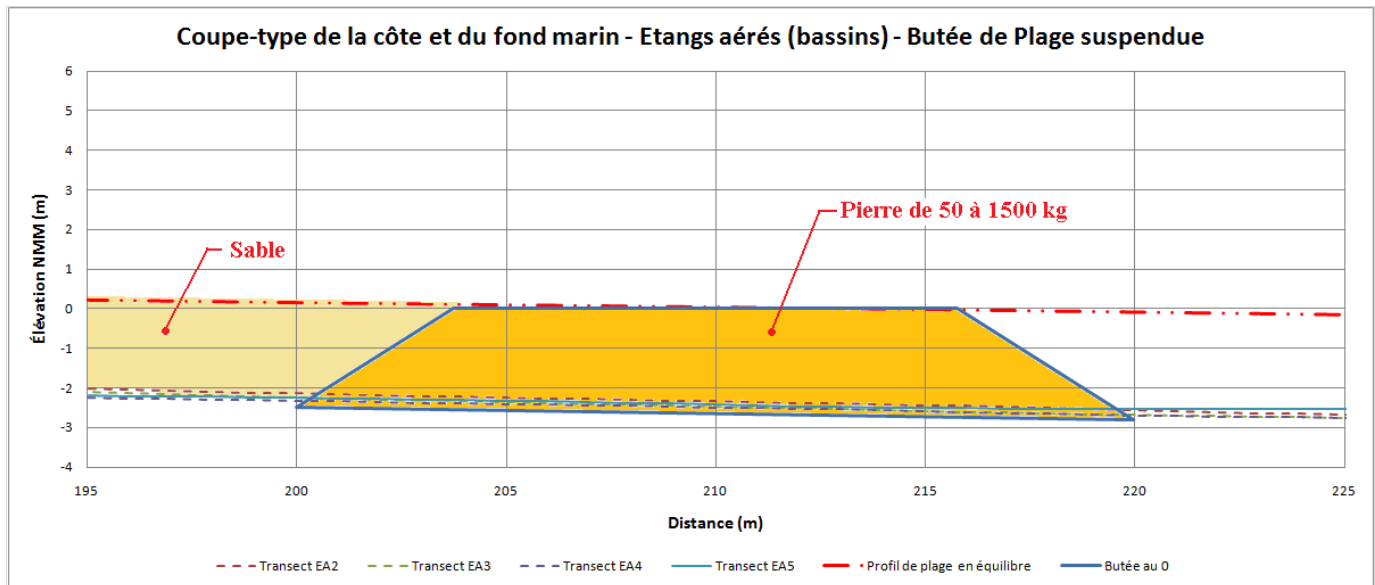


Figure 9.17 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en enrochement au zéro NMM

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-violets (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 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.

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

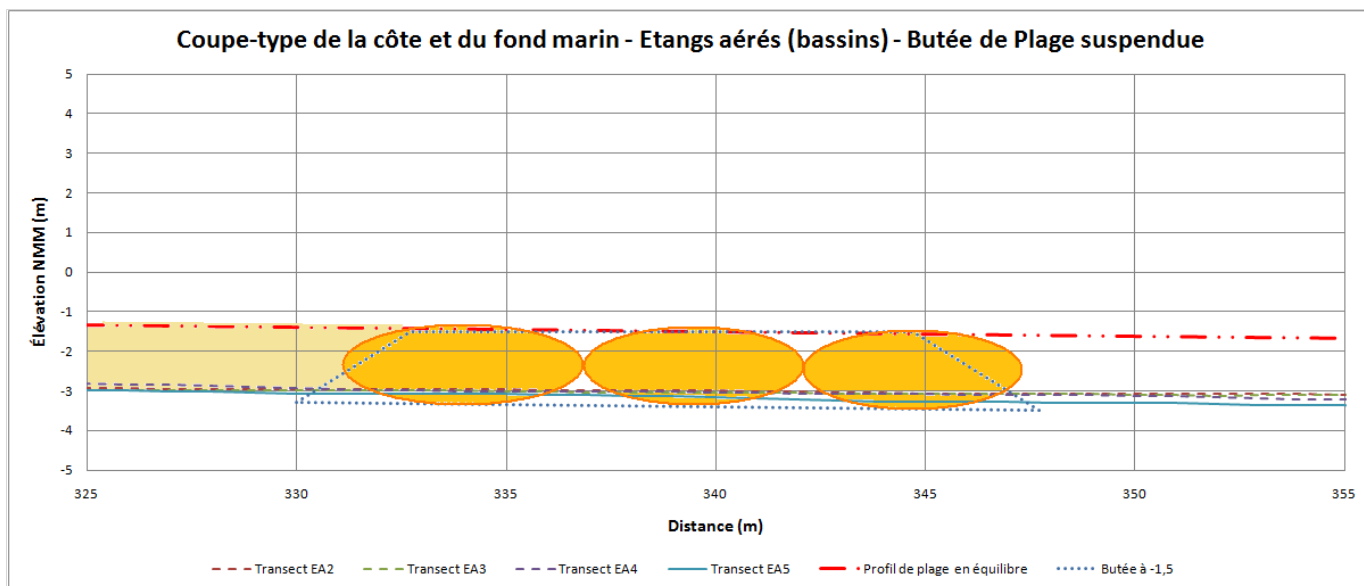


Figure 9.18 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en géotubes à -1,5 m NMM

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.

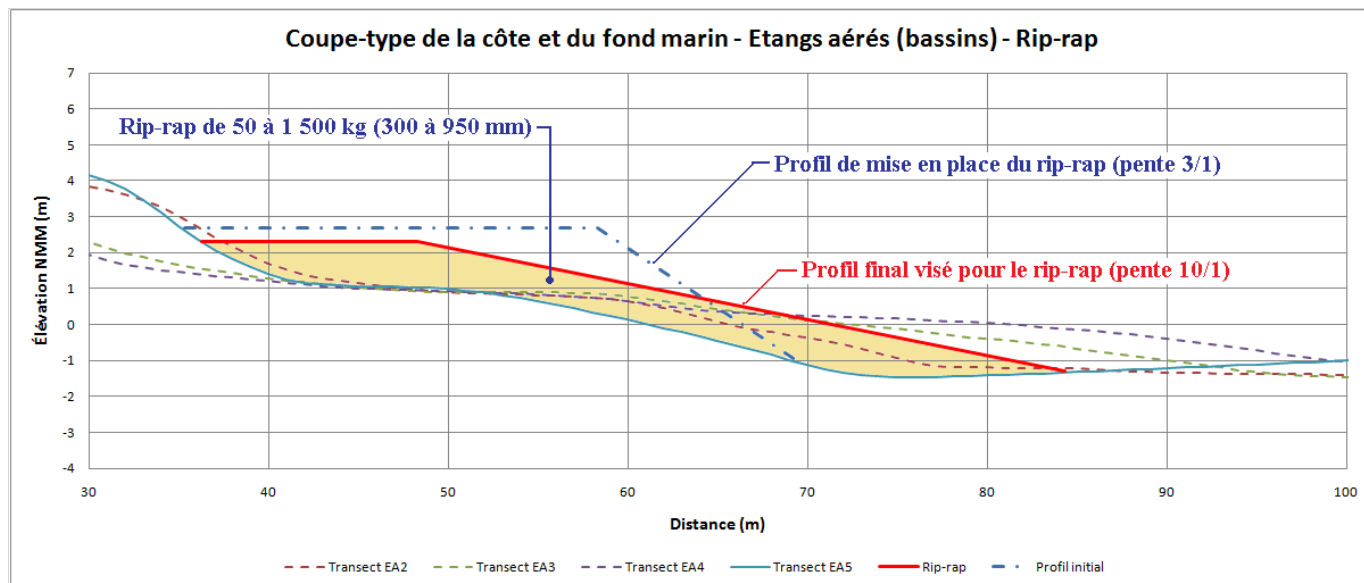


Figure 9.23 Coupe type d'une protection de berge en matériaux grossiers devant les étangs aérés

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

Érosion côtière baie de Plaisance

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.

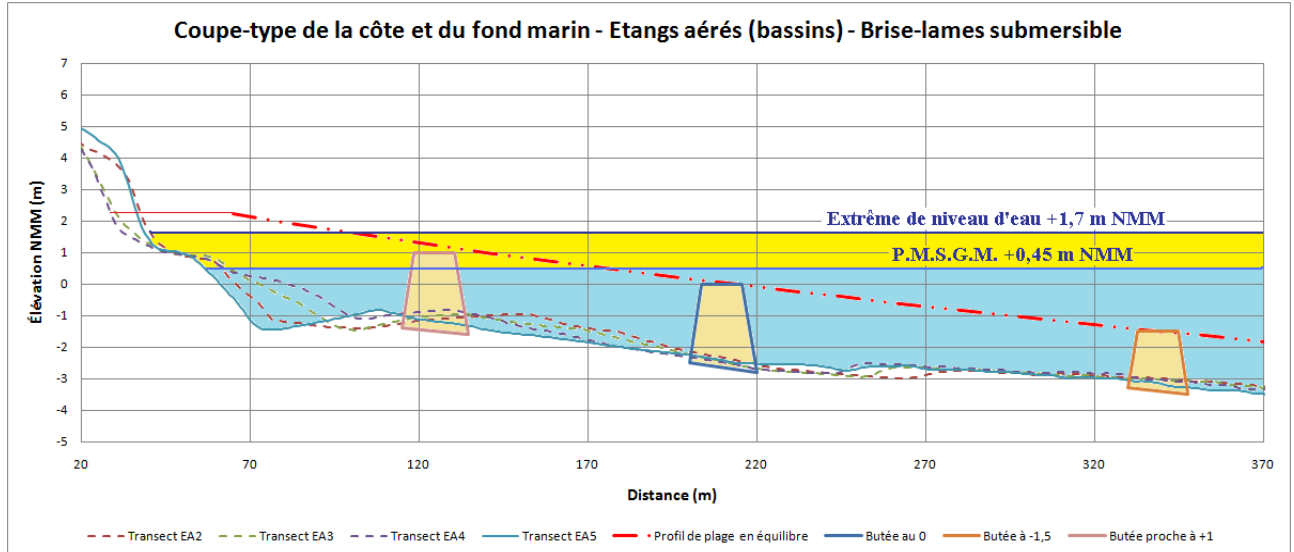


Figure 9.24 Positions possibles pour un brise-lames submersible devant les étangs aérés

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 \$ Rechargements périodiques : <u>2 103 000 \$</u> Coût total : 6 227 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 7-8 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans)
Solution 3 – Rechargement de la plage avec matériaux grossiers	Coût initial : 908 000 \$ Rechargements périodiques : <u>454 000 \$</u> Coût total : 1 362 000 \$	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.

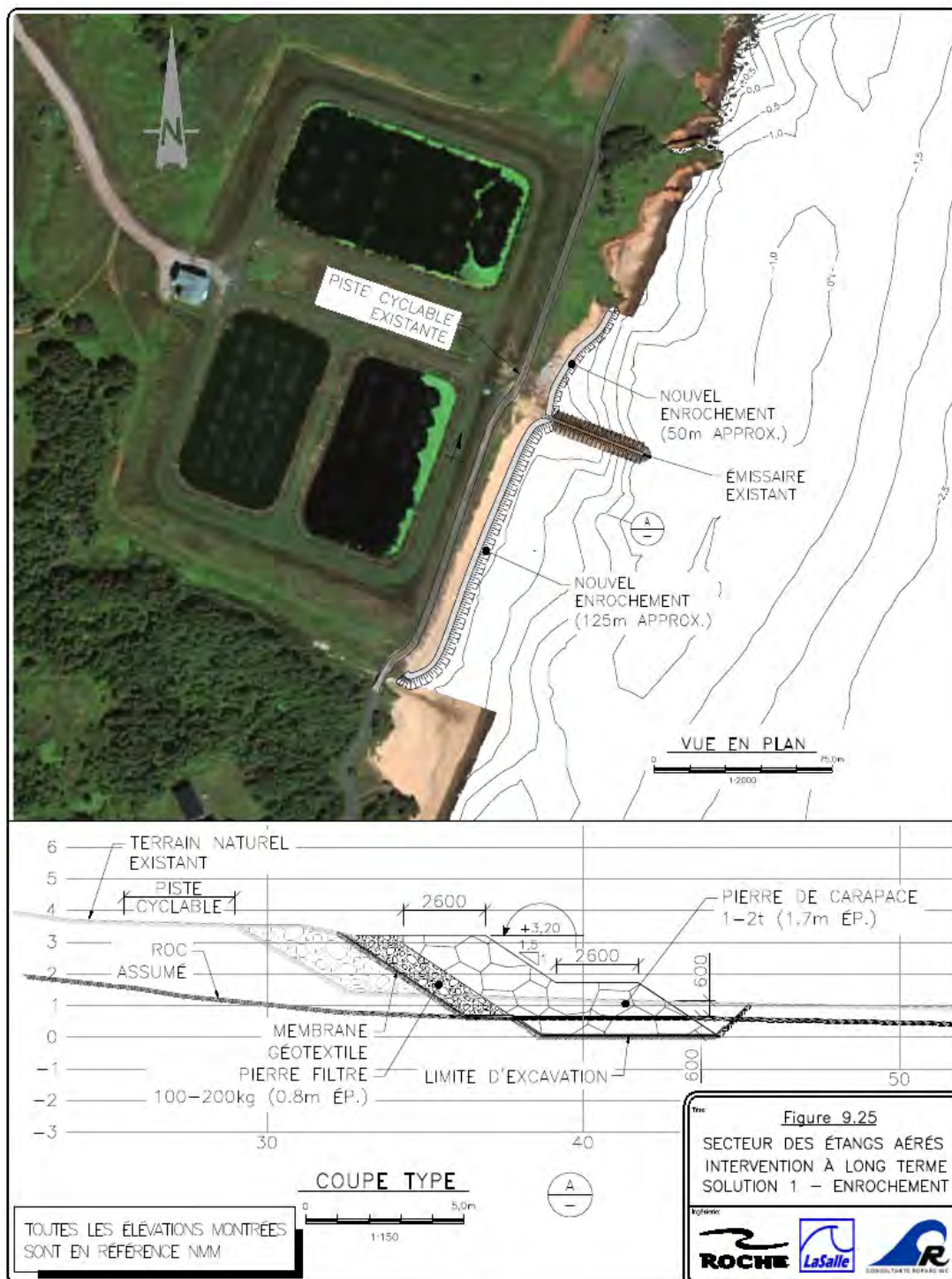


Figure 9.25 – Intervention à long terme - Solution 1 - Enrochement

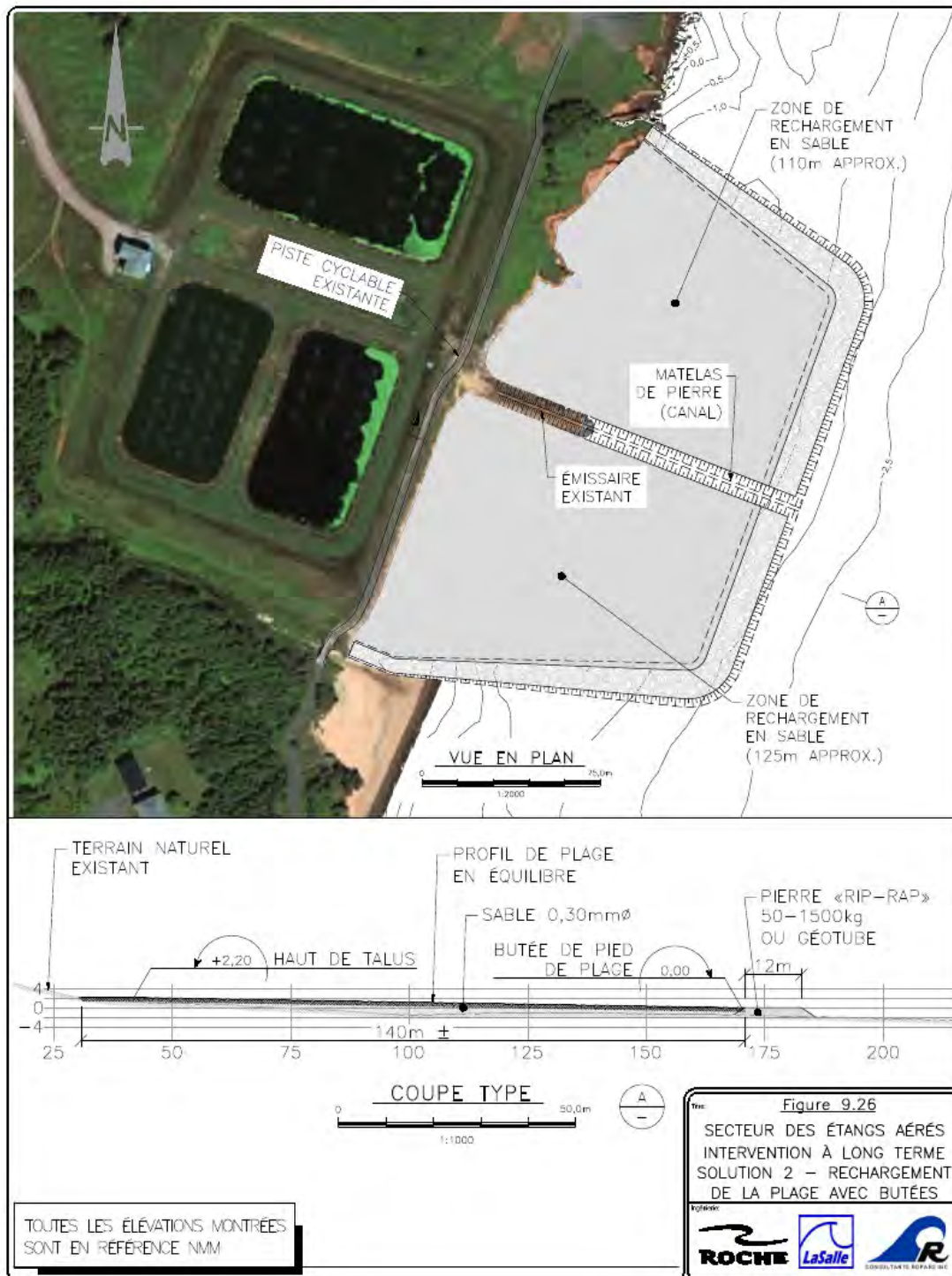
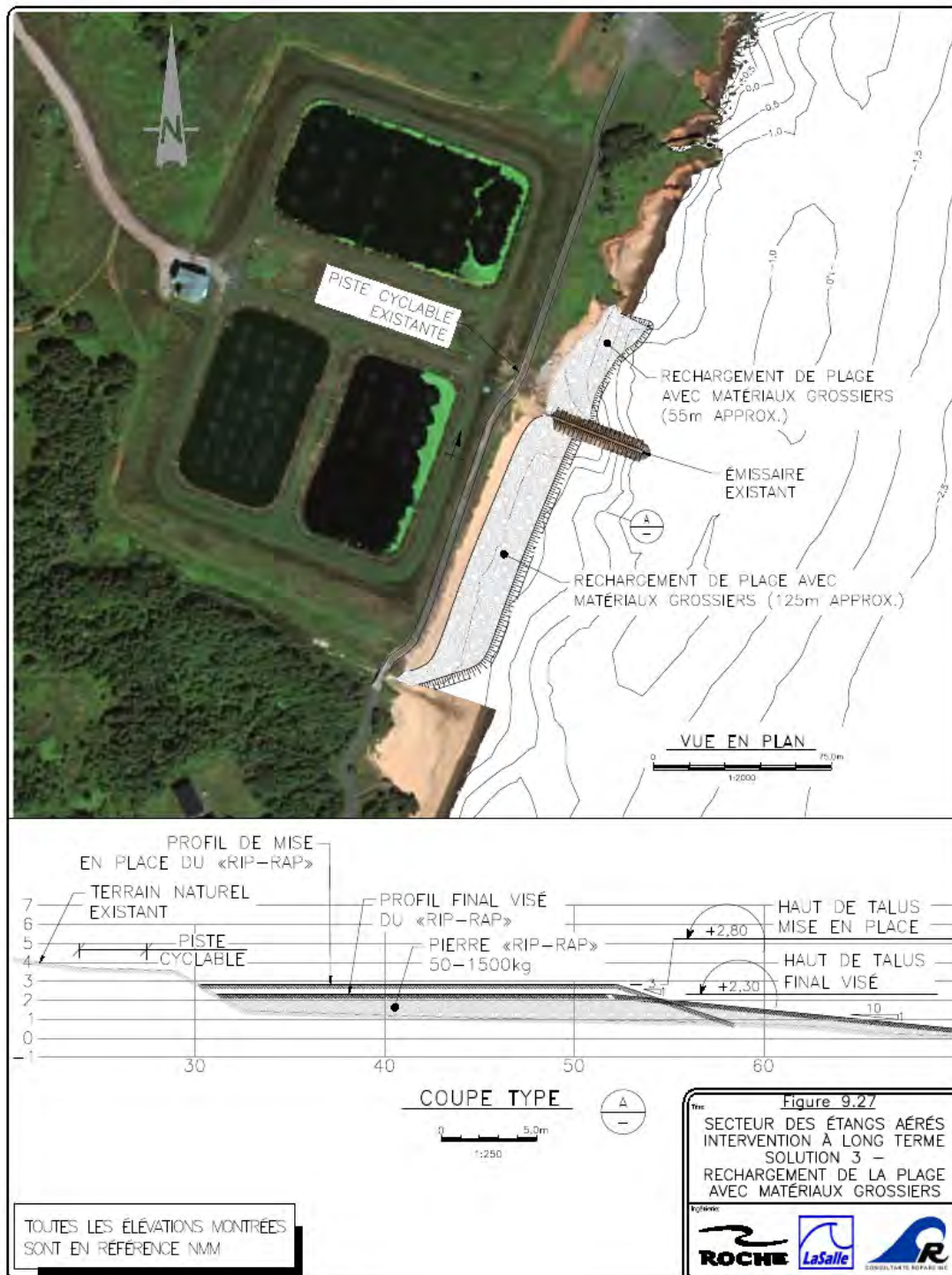


Figure 9.26 – Intervention à long terme - Solution 2 - Rechargement de la plage avec butées



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 boueur 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.).

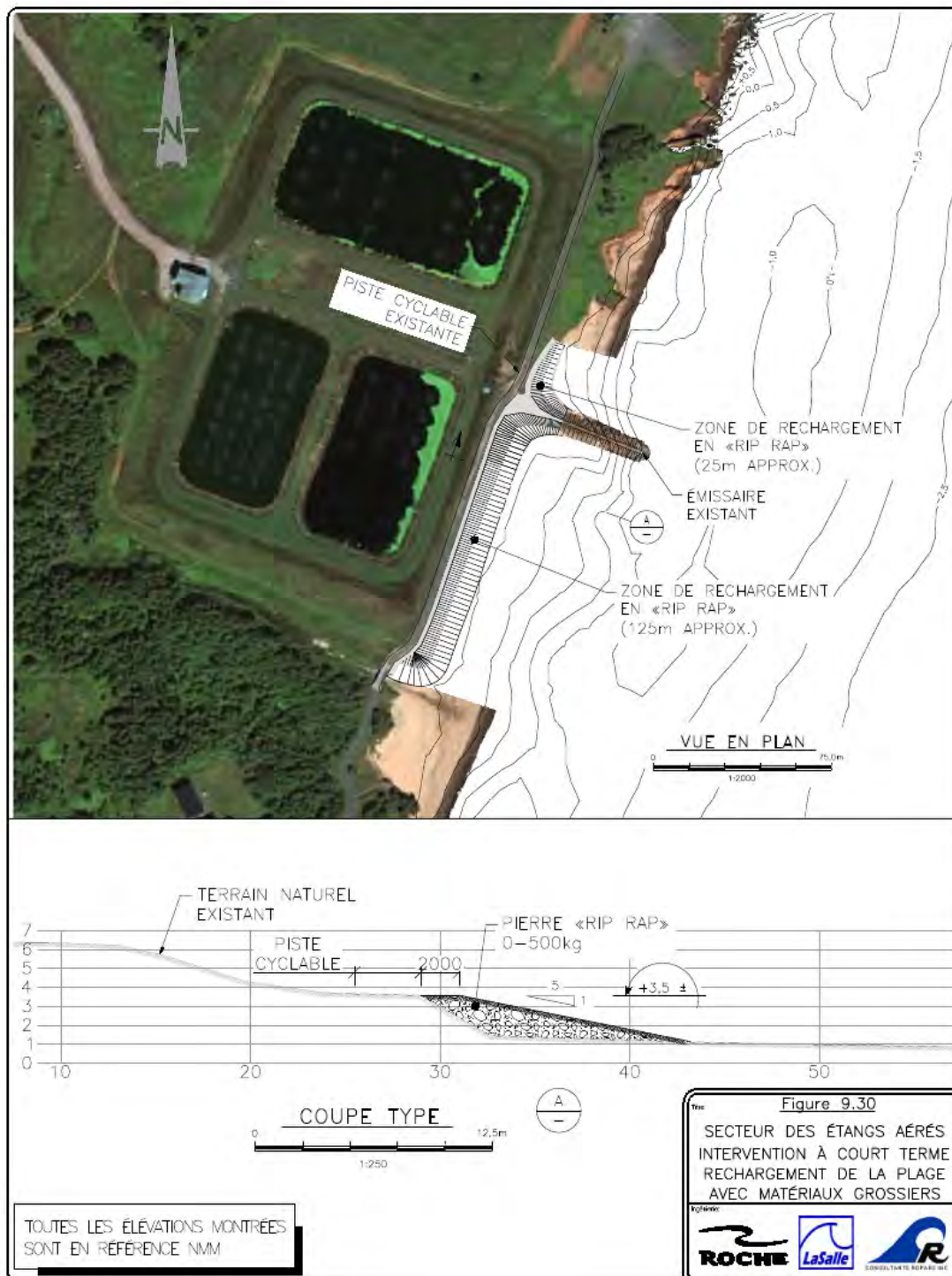


Figure 9.30 – Intervention à court terme - Rechargement de la plage avec matériaux grossiers

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

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.

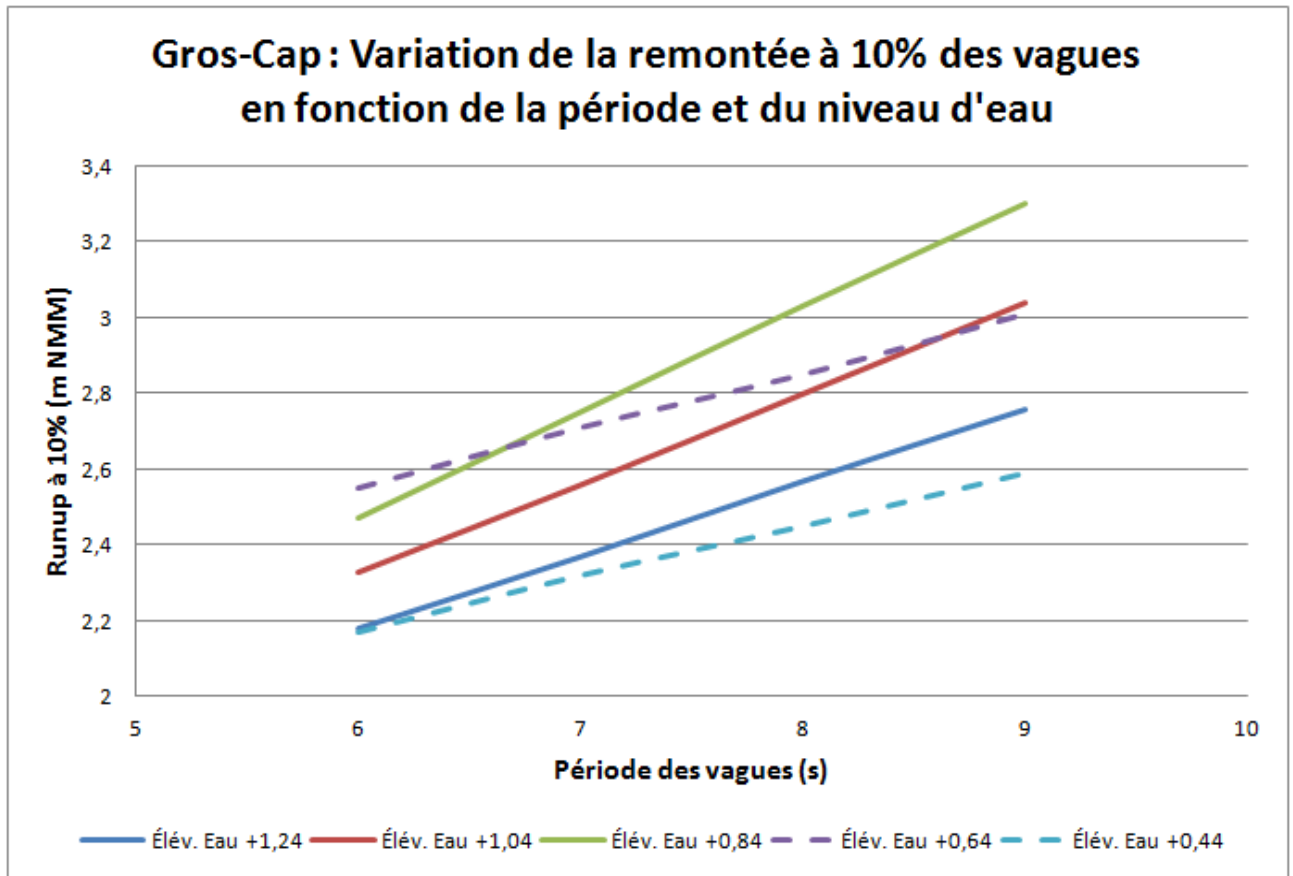


Figure 10.1 Remontée des vagues sur un enrochement à Gros-Cap

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.

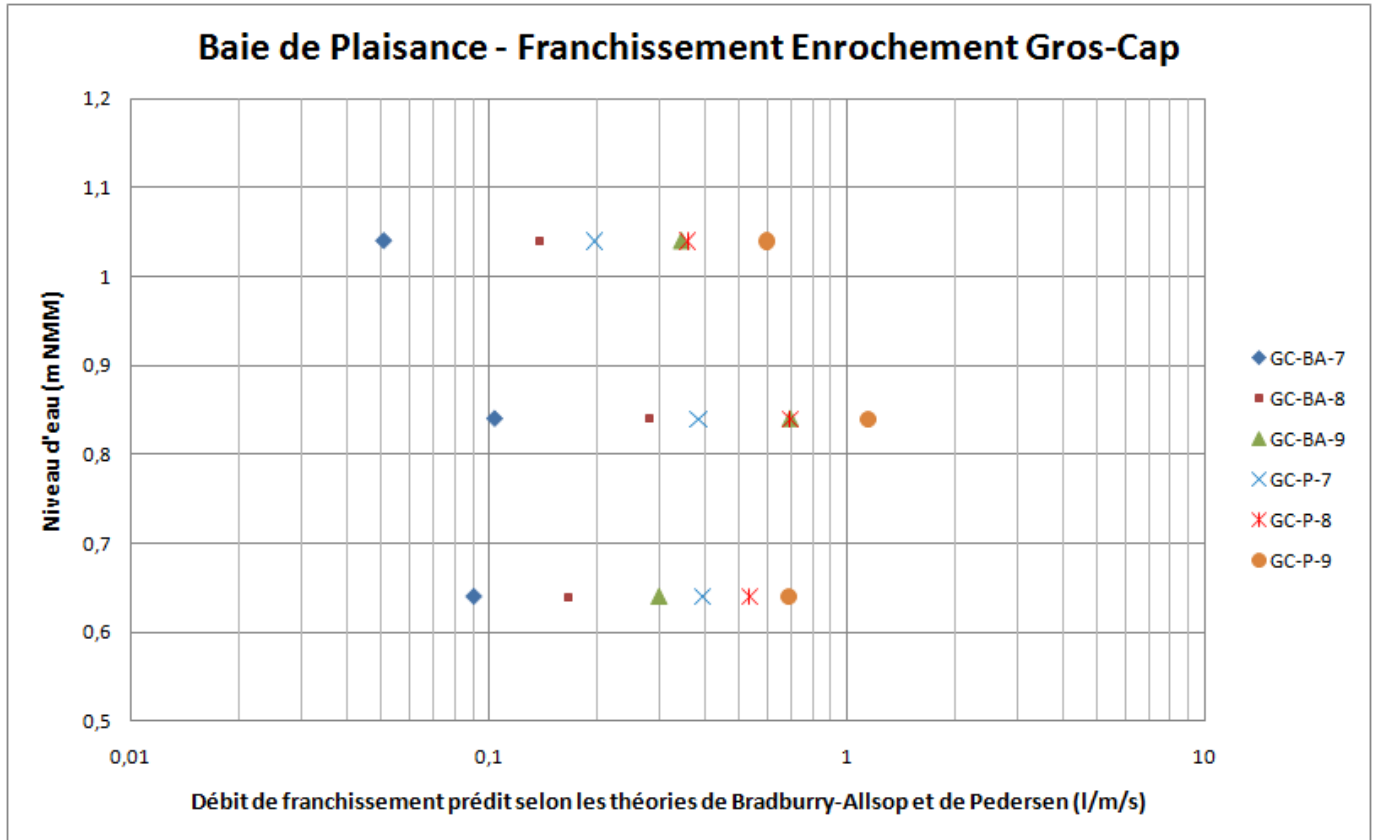


Figure 10.2 Débit de franchissement d'un enrochement dont la crête est à +3,3 m NMM

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.

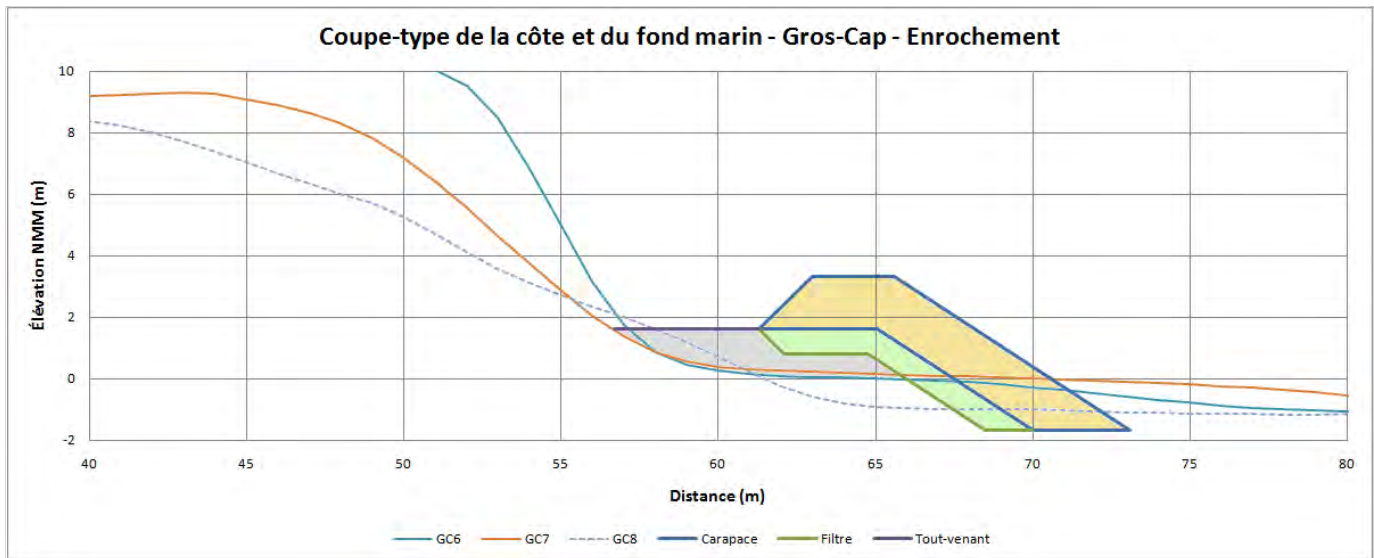


Figure 10.3 Coupe type d'une protection en enrochement à Gros-Cap

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.

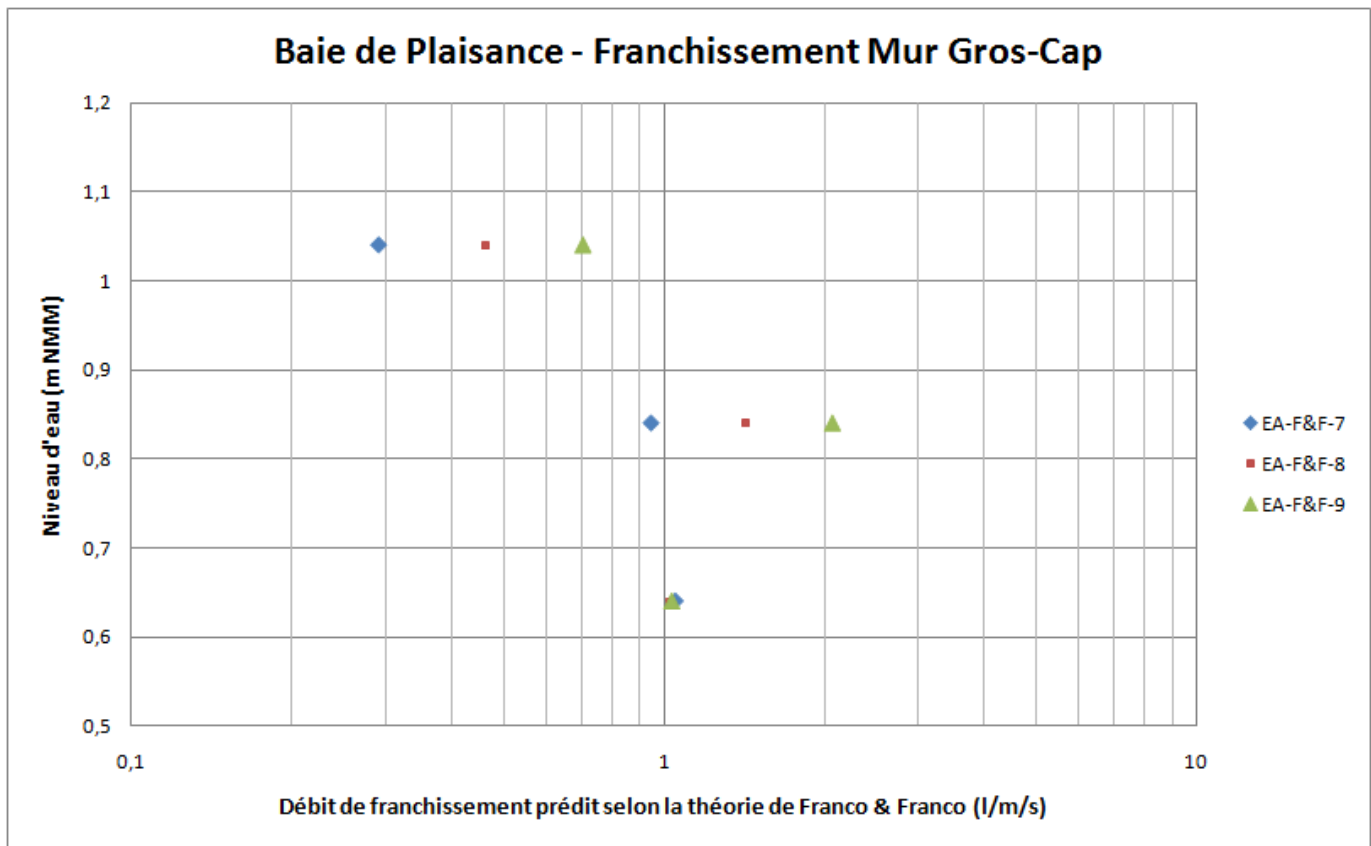


Figure 10.4 Débits de franchissement d'un mur dont la crête est située à +3,7 m NMM

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.

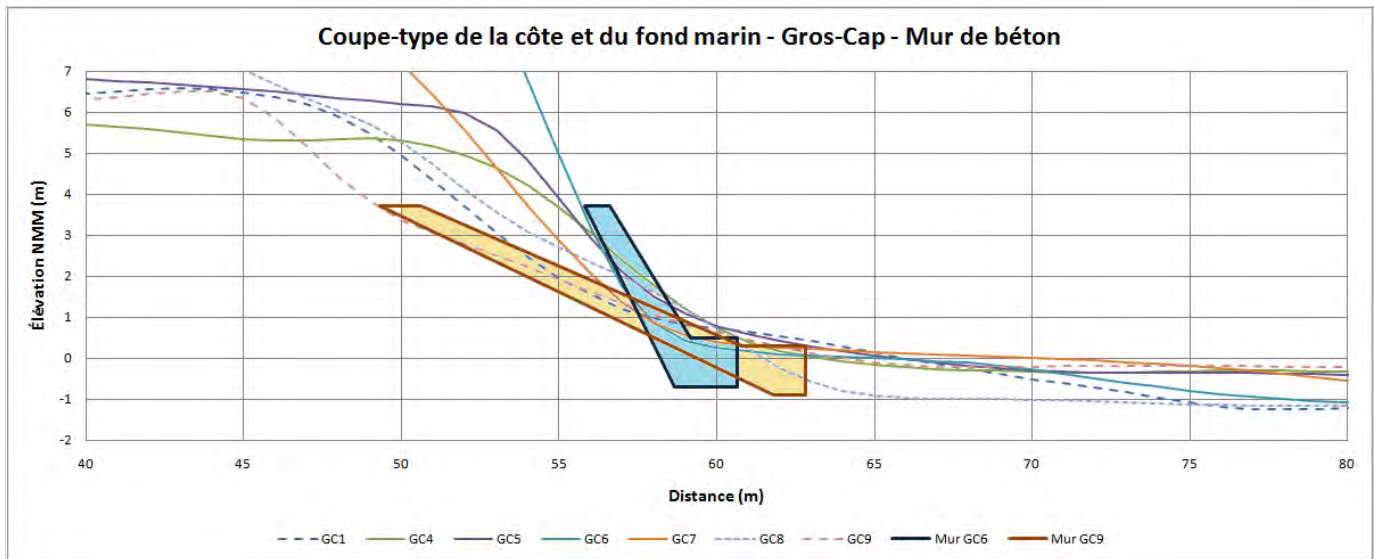


Figure 10.5 Coupe type d'une protection en béton armé du pied des falaises de Gros-Cap

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.

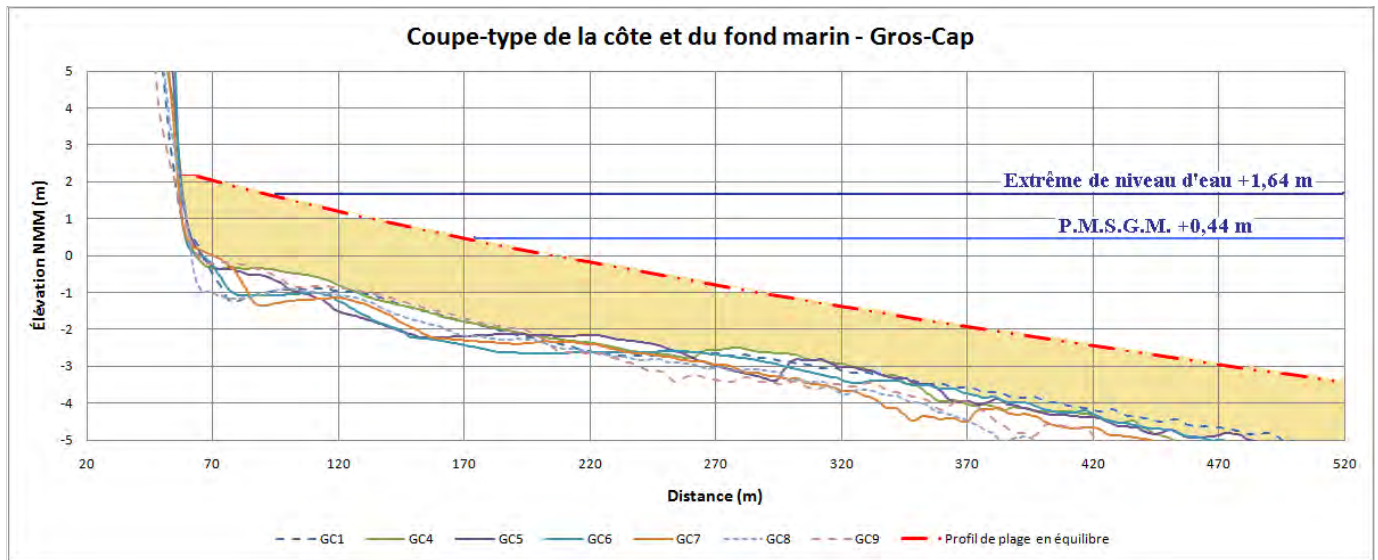


Figure 10.6 Coupe type d'une plage en équilibre devant les falaises de Gros-Cap

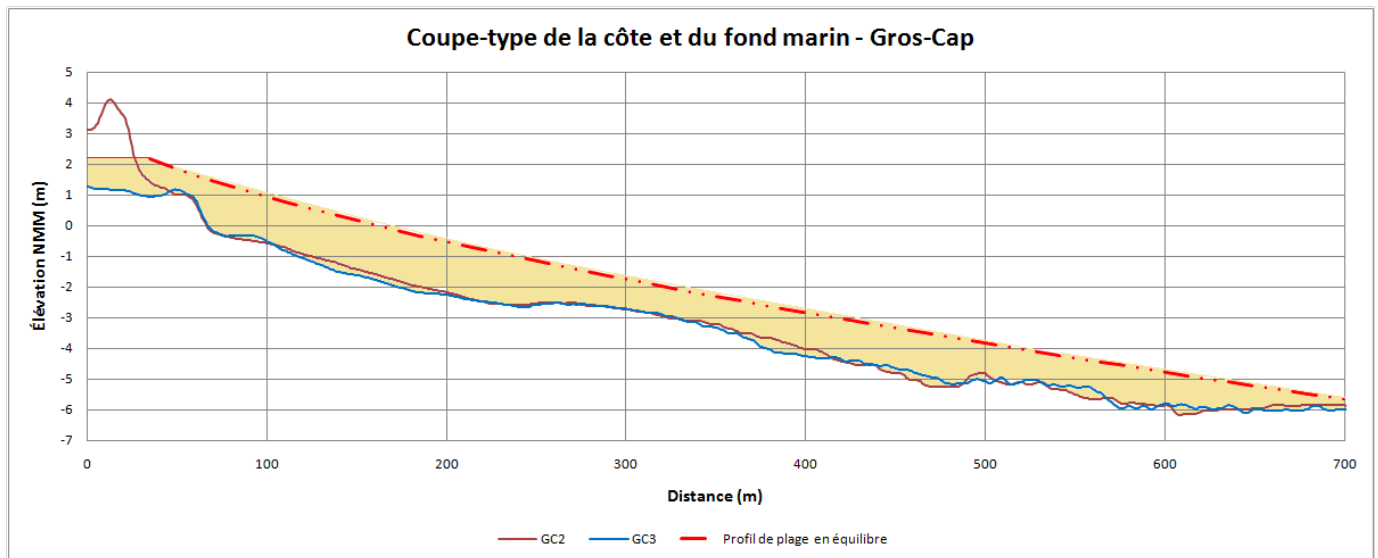


Figure 10.7 Coupe type d'une plage en équilibre au niveau de la plage de la Garderie

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.

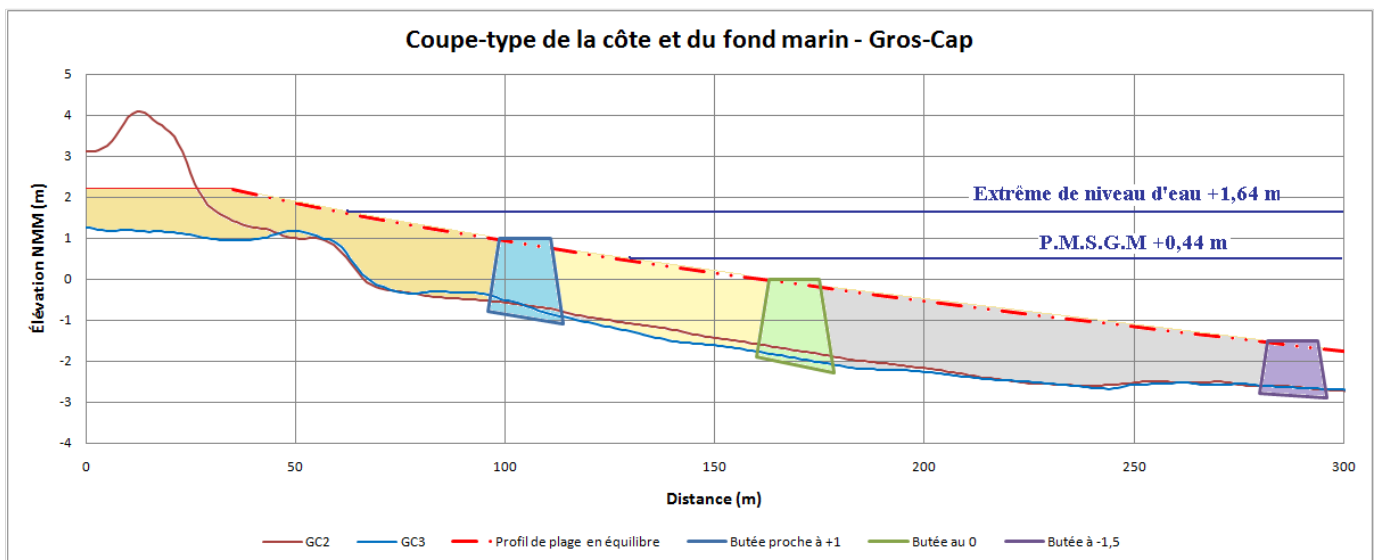


Figure 10.8 Coupe type d'une plage suspendue devant la plage de la Garderie

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.

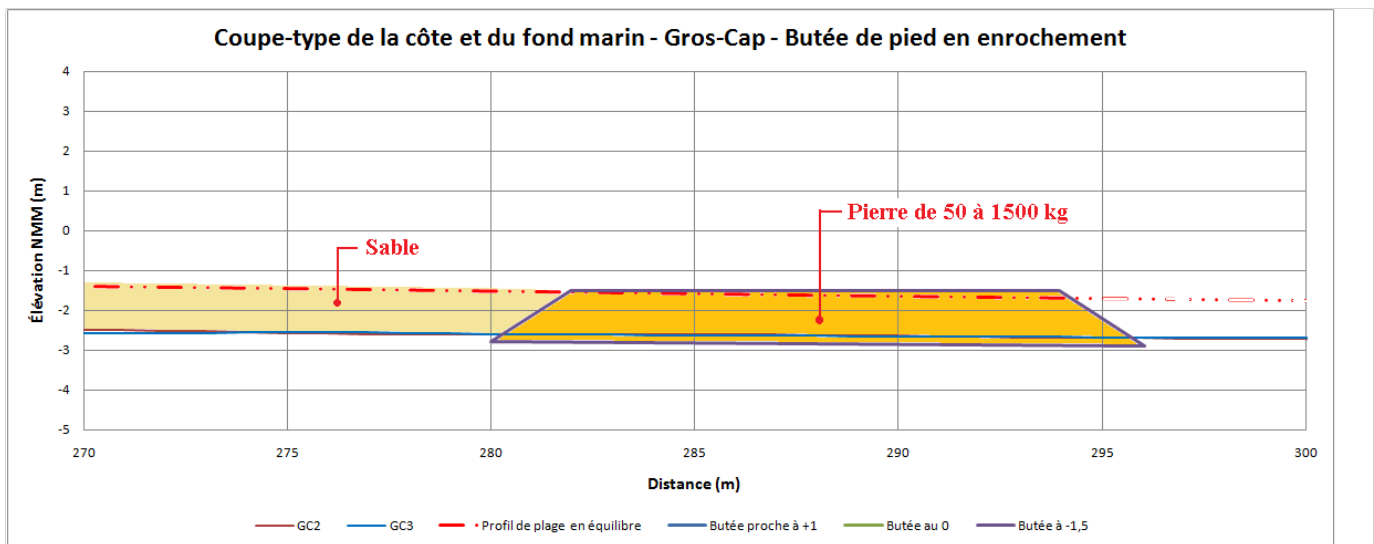


Figure 10.9 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en enrochement à -1,5 m NMM

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)

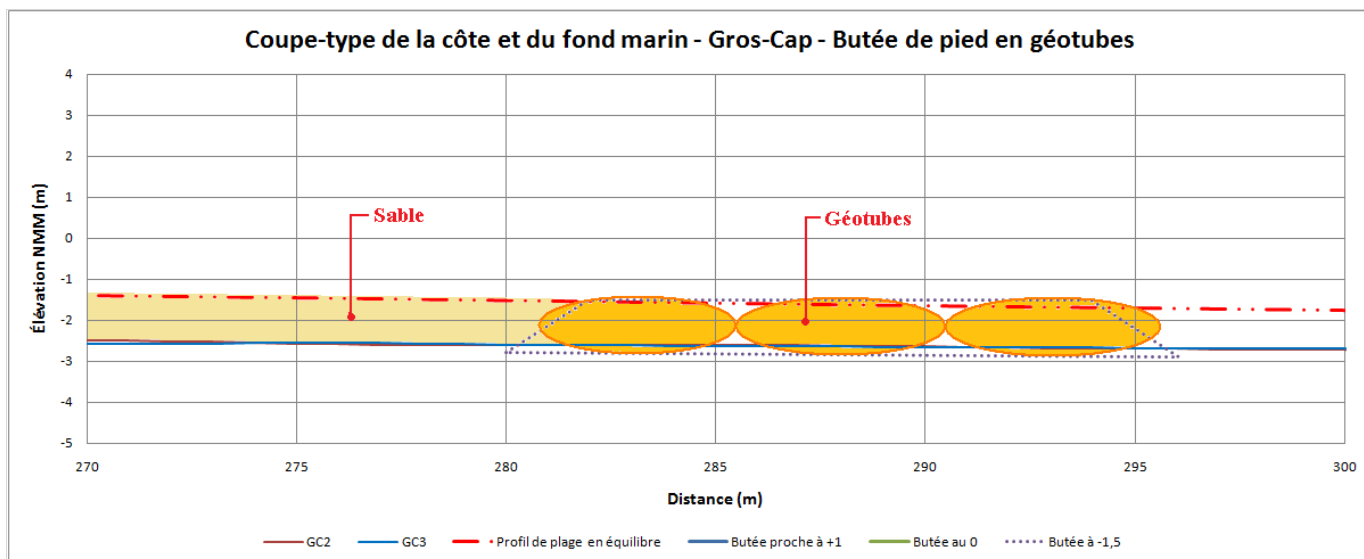


Figure 10.11 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en géotubes à -1,5 m NMM

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).

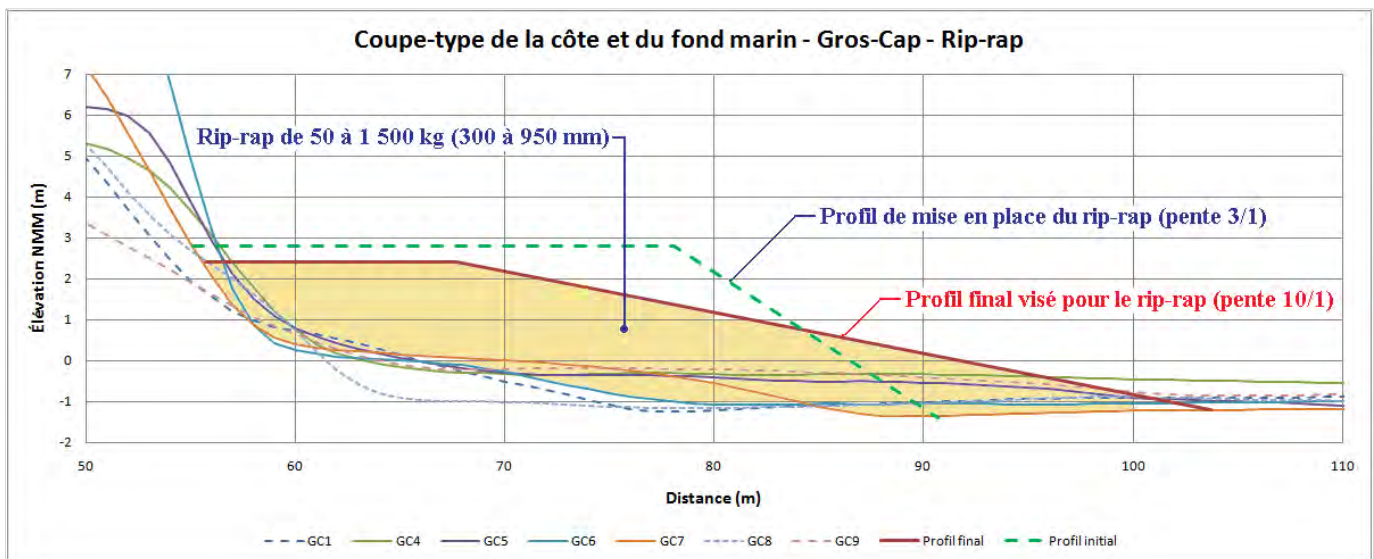


Figure 10.12 Coupe type d'une protection en matériaux grossiers devant les falaises de Gros-Cap

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 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. 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.

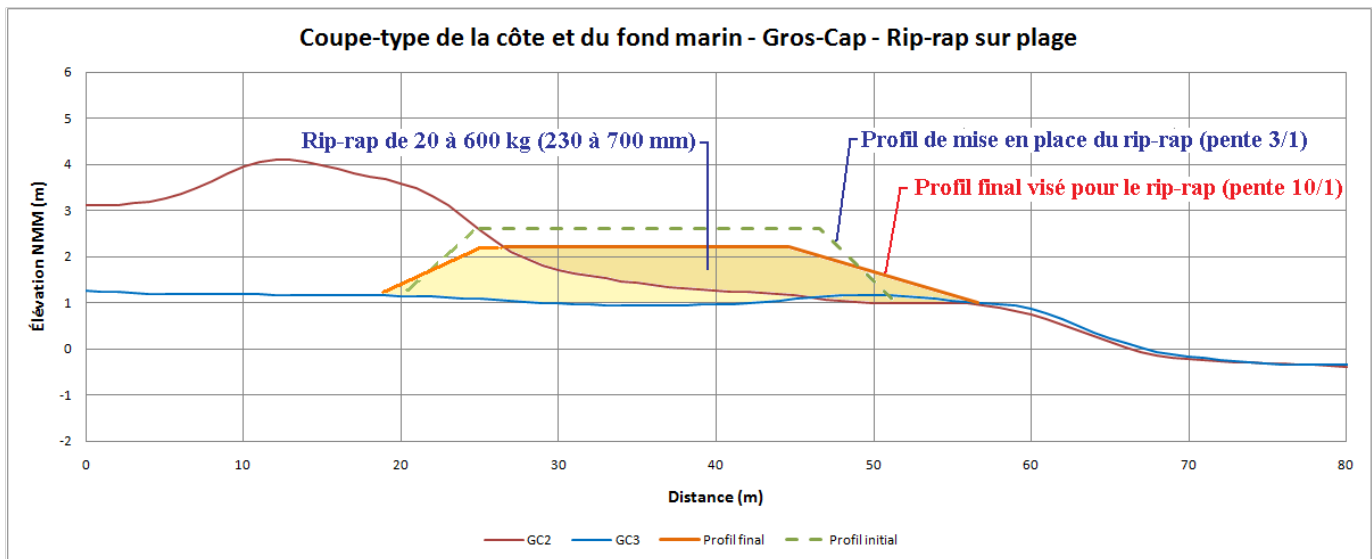


Figure 10.13 Coupe type d'une protection de berge en matériaux grossiers sur la plage de Gros-Cap

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

Érosion côtière baie de Plaisance

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 \$ Rechargements périodiques : <u>6 697 000 \$</u> Coût total : 19 606 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 15 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans)
Solution 3 – Rechargement de la plage avec butée de pied (350 m.l.; plage de la Garderie seulement)	Coût initial : 11 167 000 \$ Rechargements périodiques : <u>6 323 000 \$</u> Coût total : 17 490 000 \$	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.



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

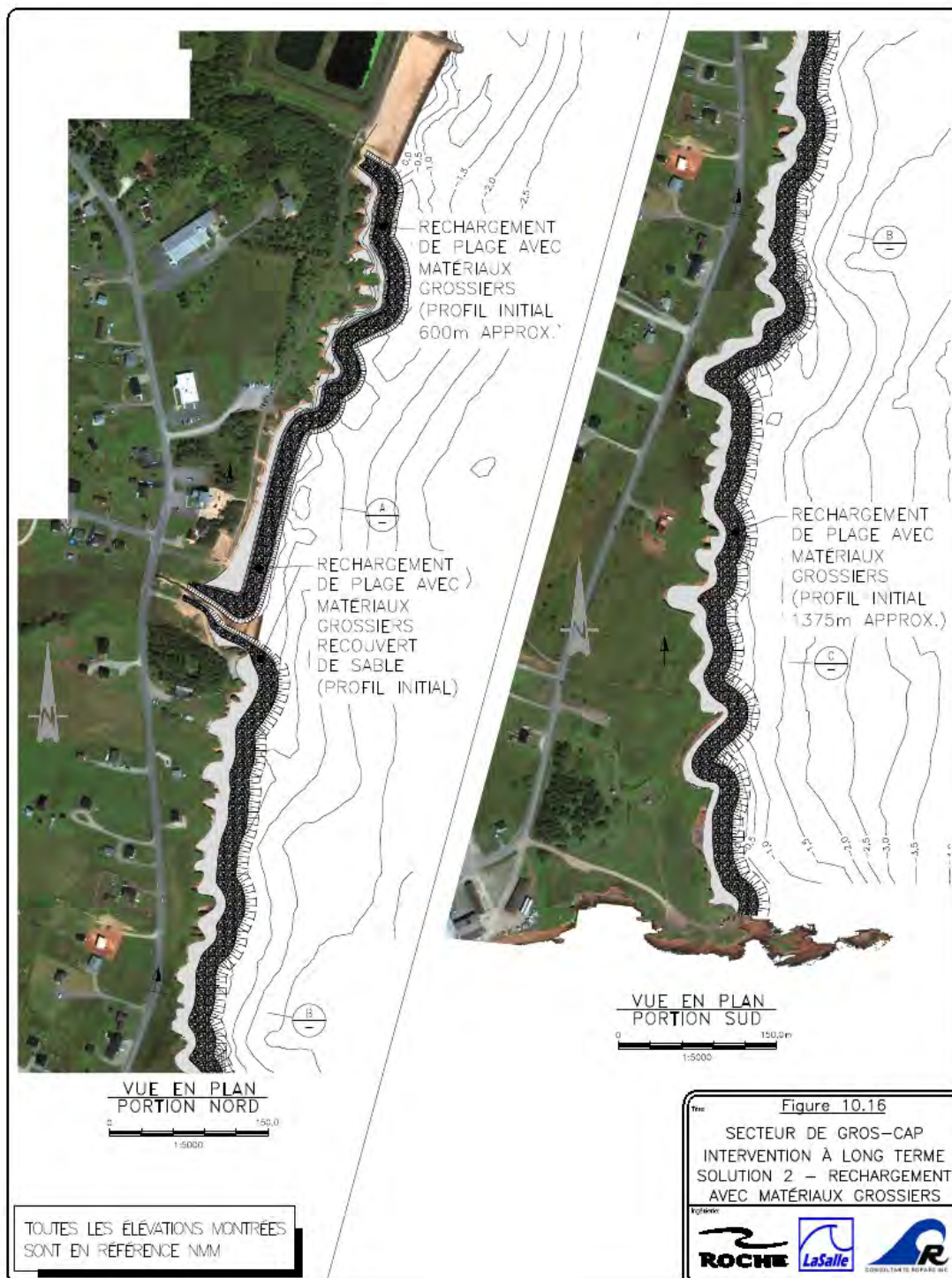


Figure 10.16 – Intervention à long terme – Solution 2 – Rechargement avec matériaux grossiers–
Vue en plan

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

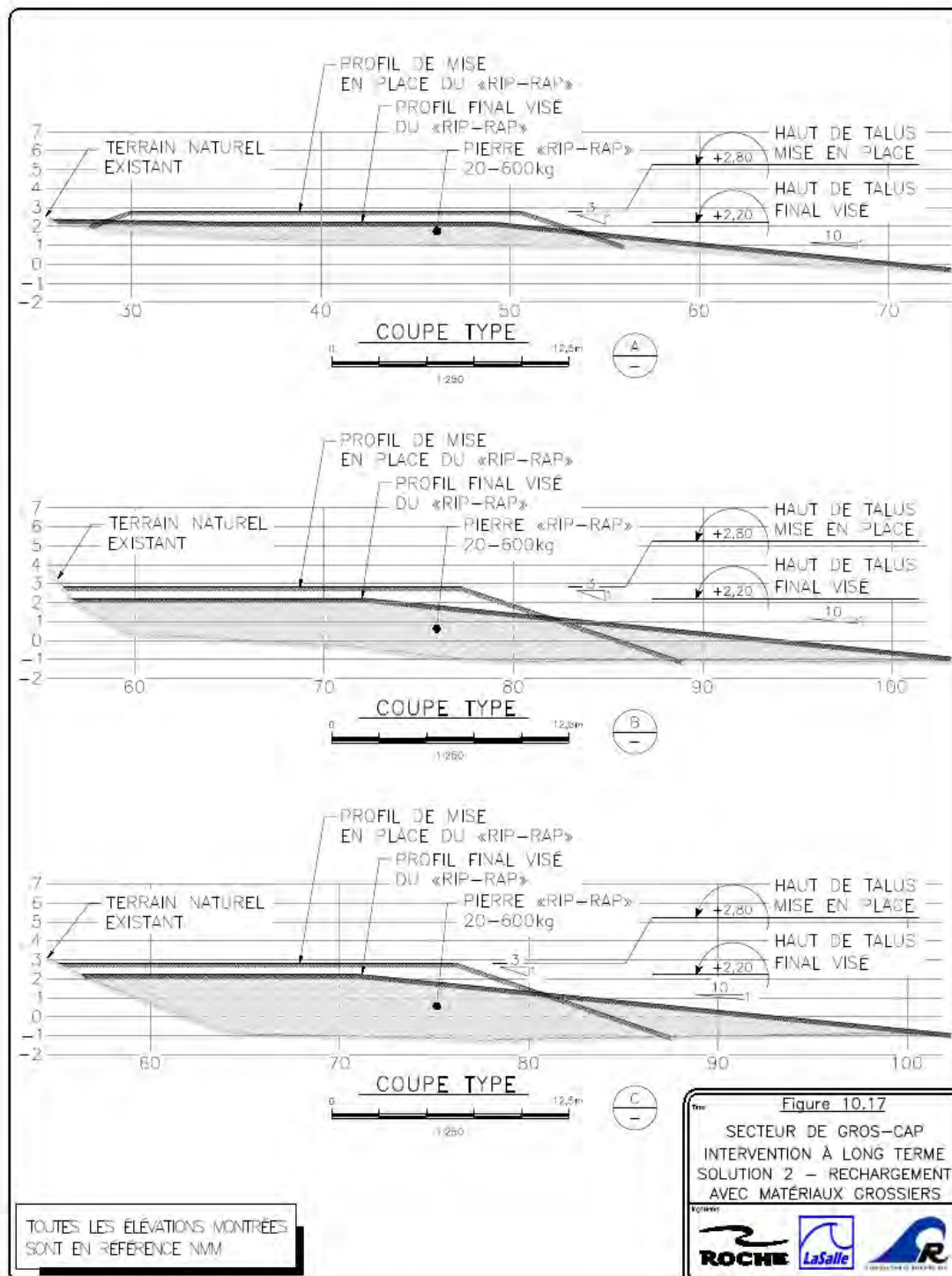


Figure 10.17 – Intervention à long terme – Solution 2 – Rechargement avec matériaux grossiers – Coupes types

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

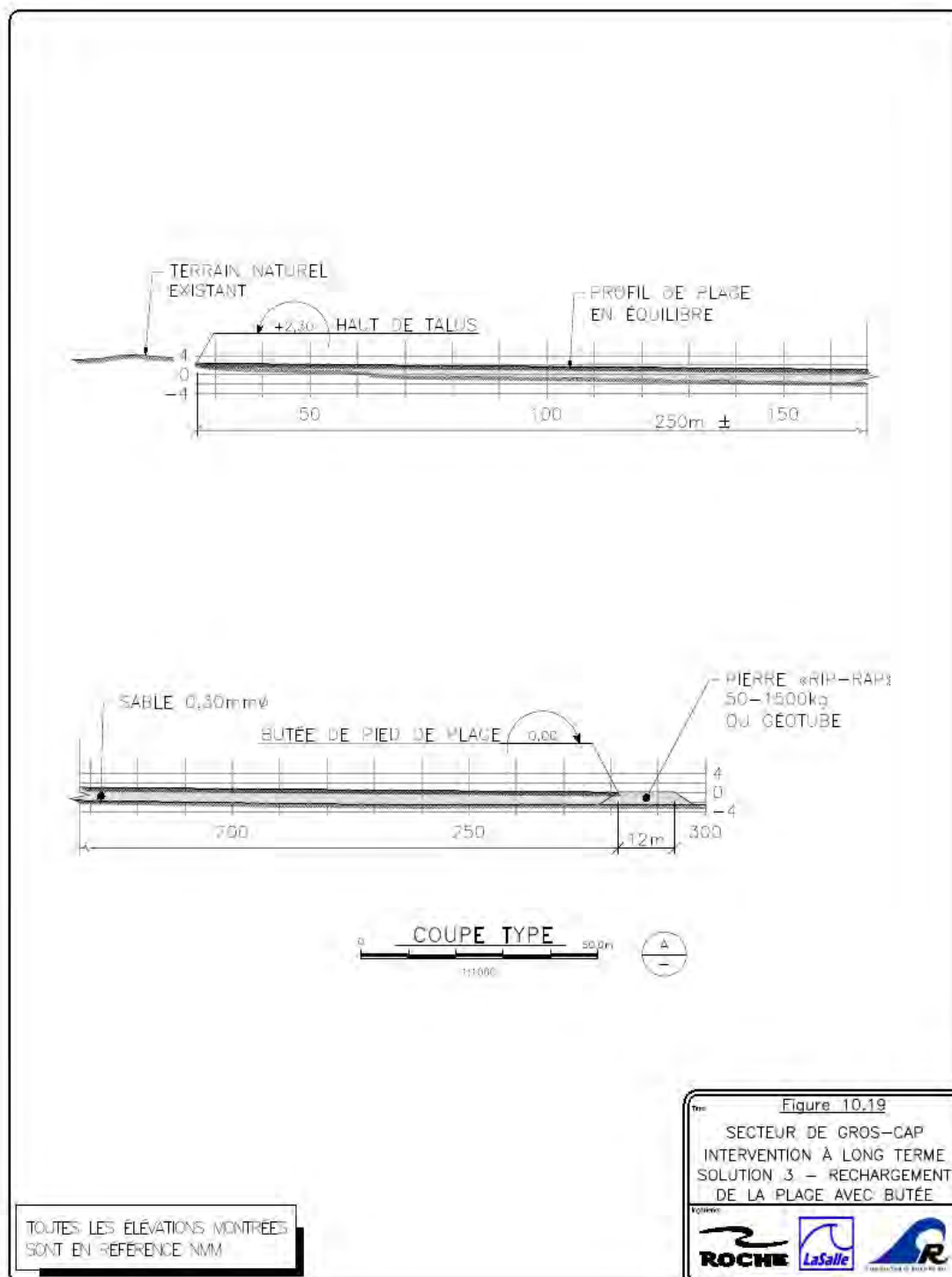


Figure 10.19 – Intervention à long terme – Solution 3 – Rechargement de la plage avec butées – Coupes types

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.

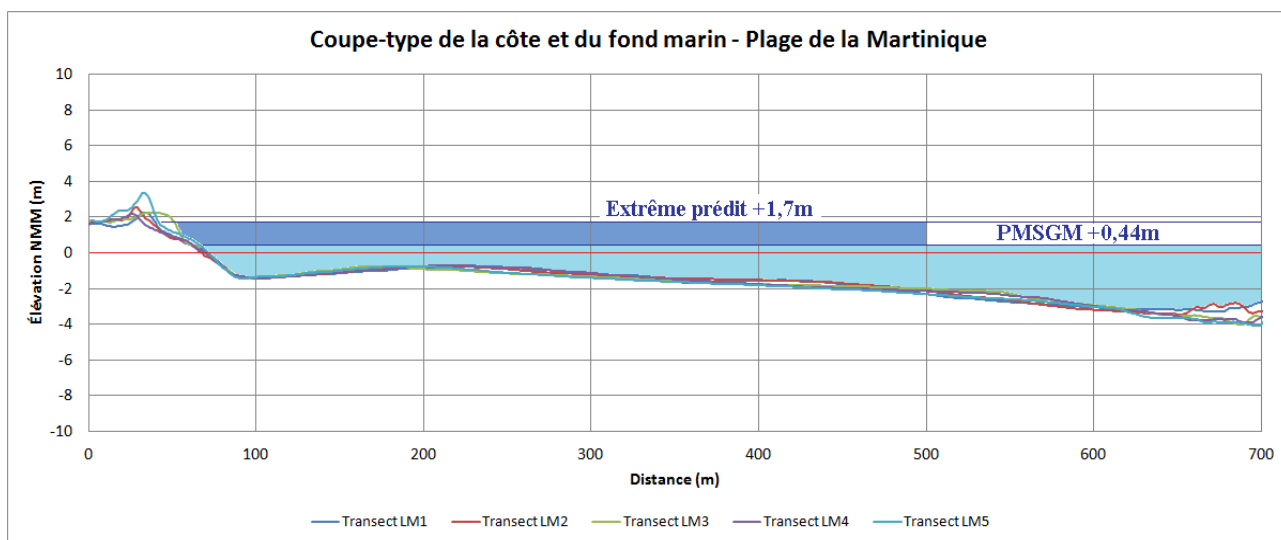


Figure 11.1 Coupe type de la plage de la Martinique

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.

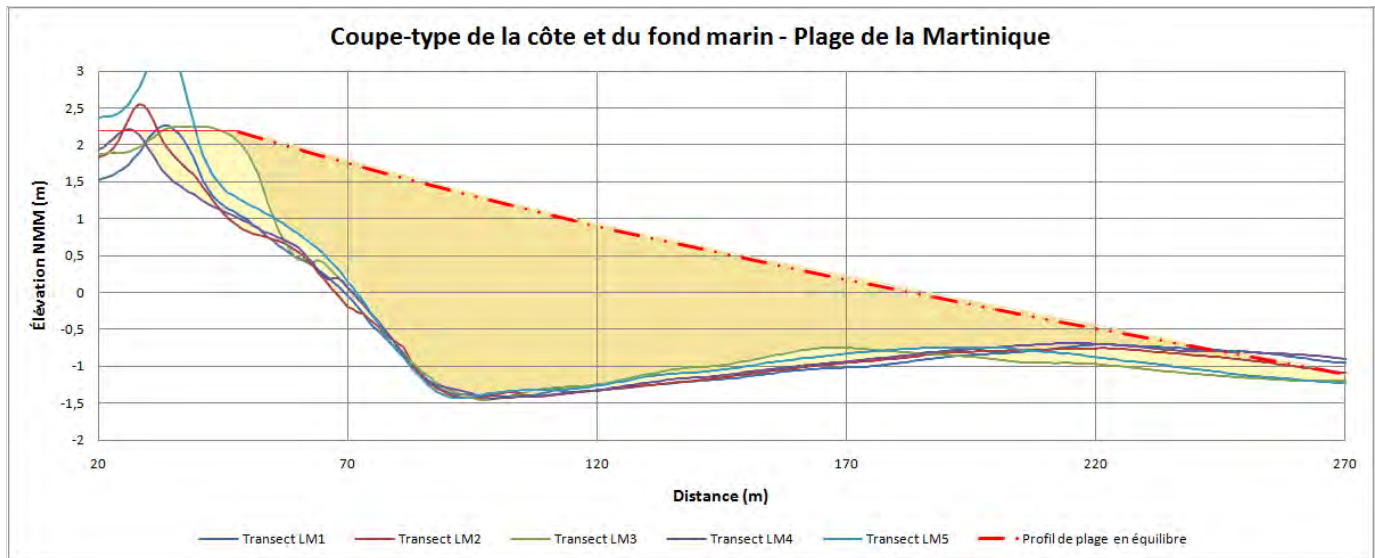


Figure 11.2 Coupe type d'une plage de la Martinique rechargée

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.

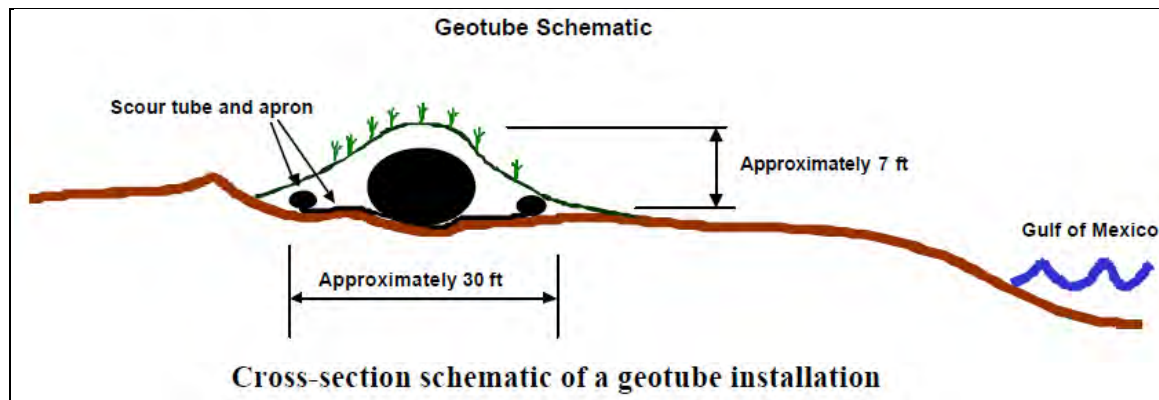


Figure 11.3 Exemple d'installation de géotube en haut de plage

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'éléments 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.

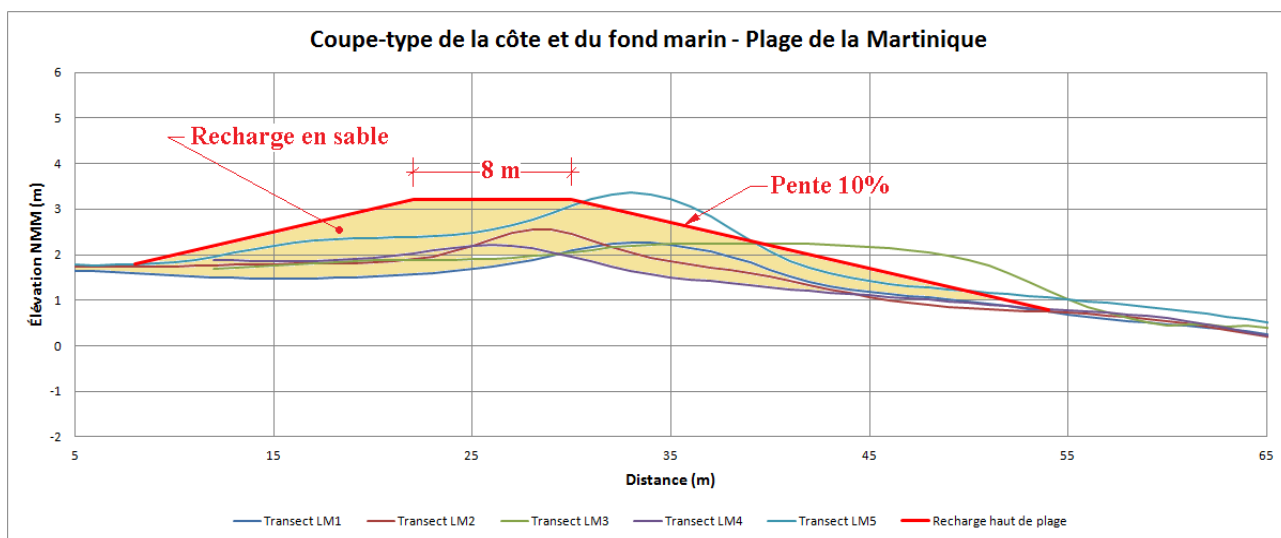


Figure 11.4 Principe de rechargement du haut de plage de la Martinique

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.

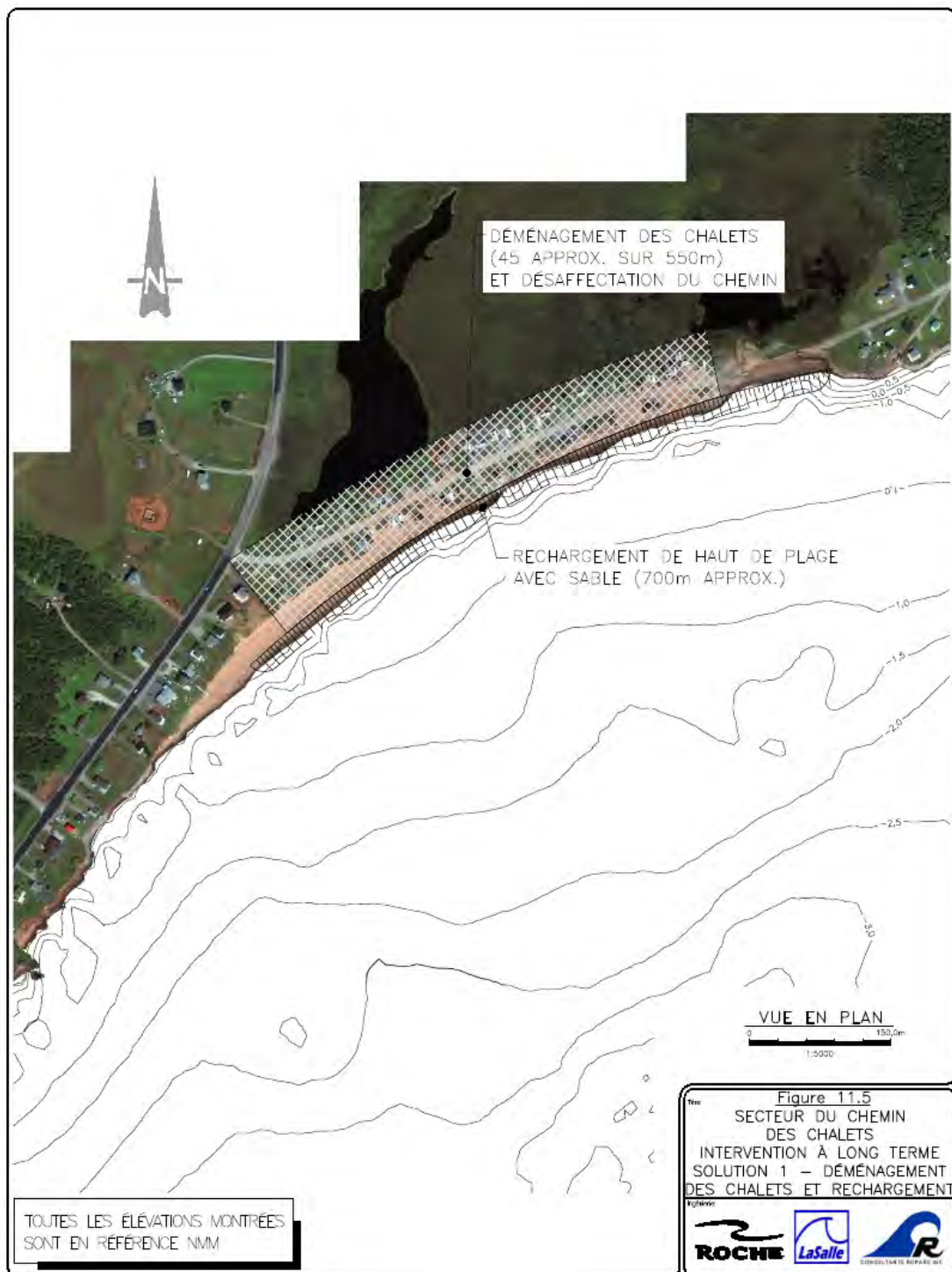


Figure 11.5 – Intervention à long terme – Solution 1 – Déménagement des chalets et rechargement

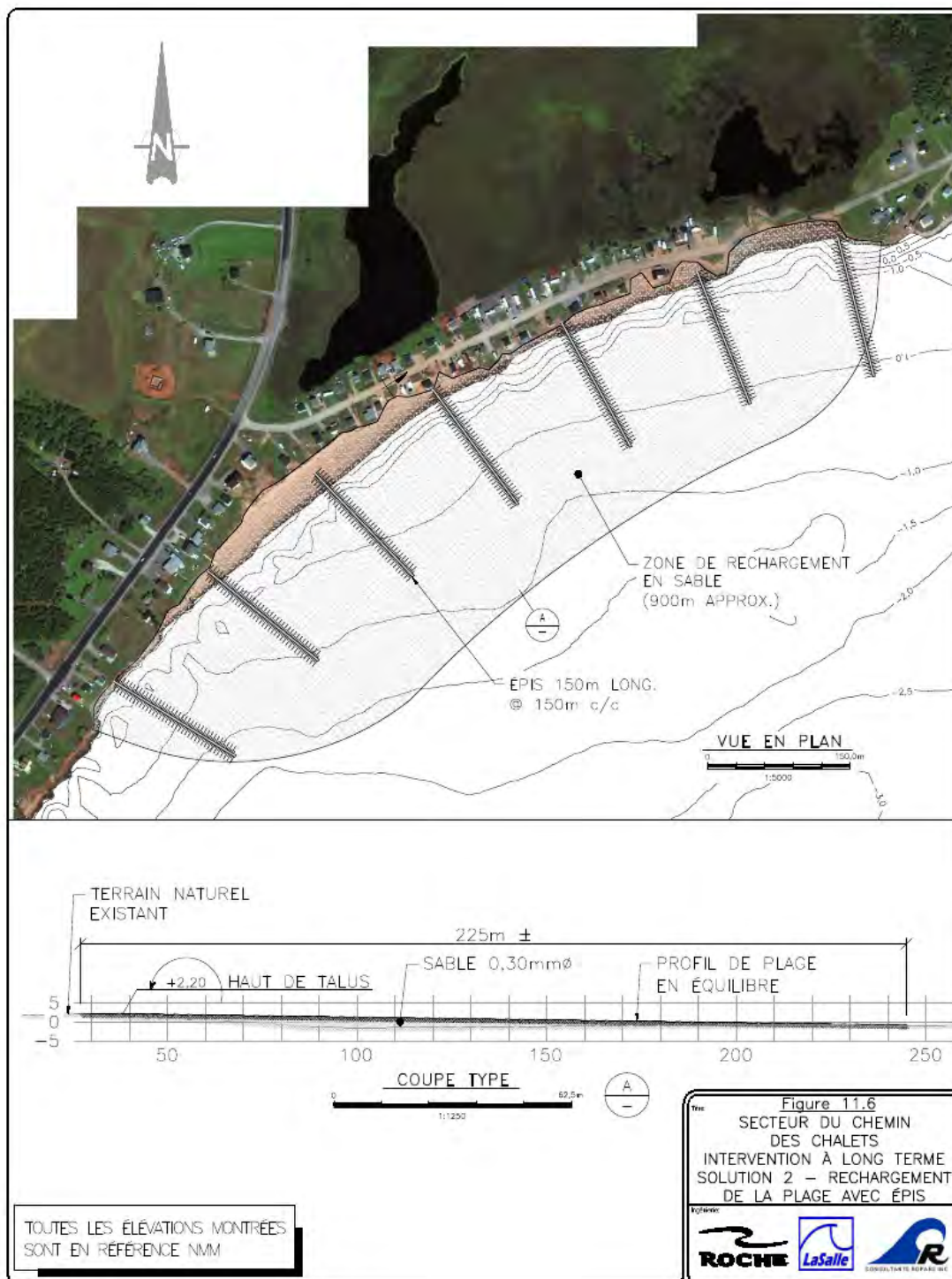


Figure 11.6 – Intervention à long terme – Solution 2 – Rechargement de la plage avec épis

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.

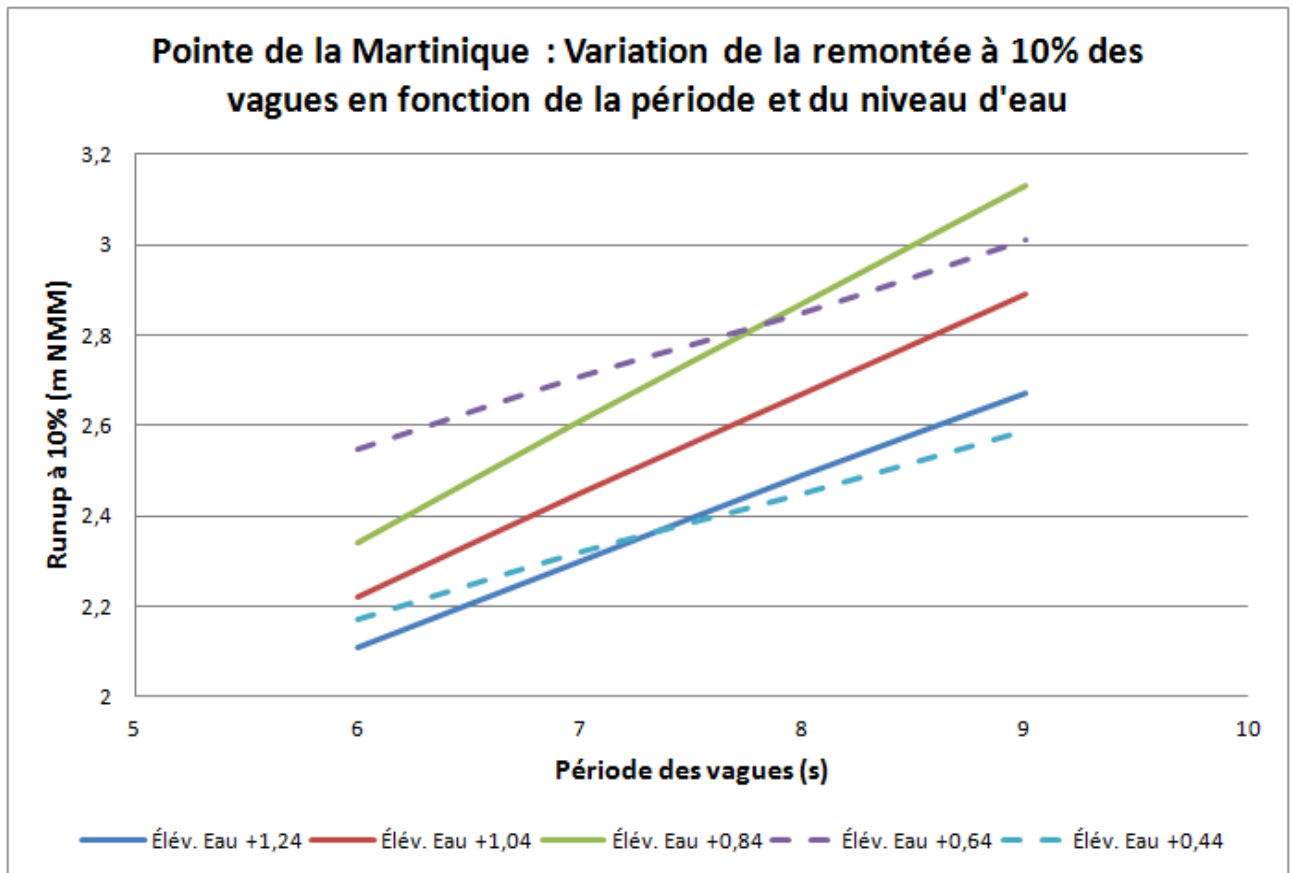


Figure 12.1 Remontée des vagues sur un enrochement à la Pointe de la Martinique

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.

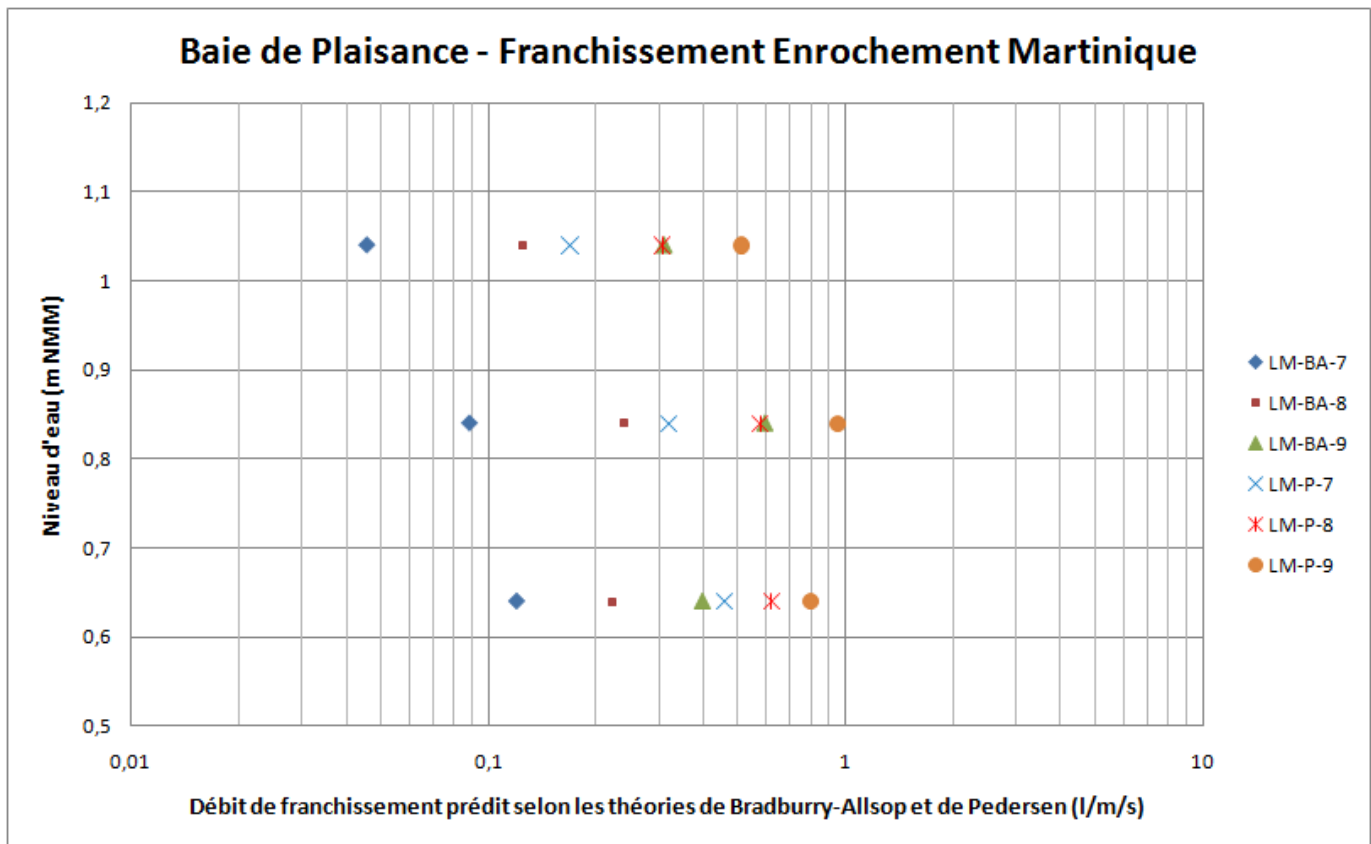


Figure 12.2 Débit de franchissement d'un enrochement dont la crête est à +3,2 m NMM

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 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, 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.

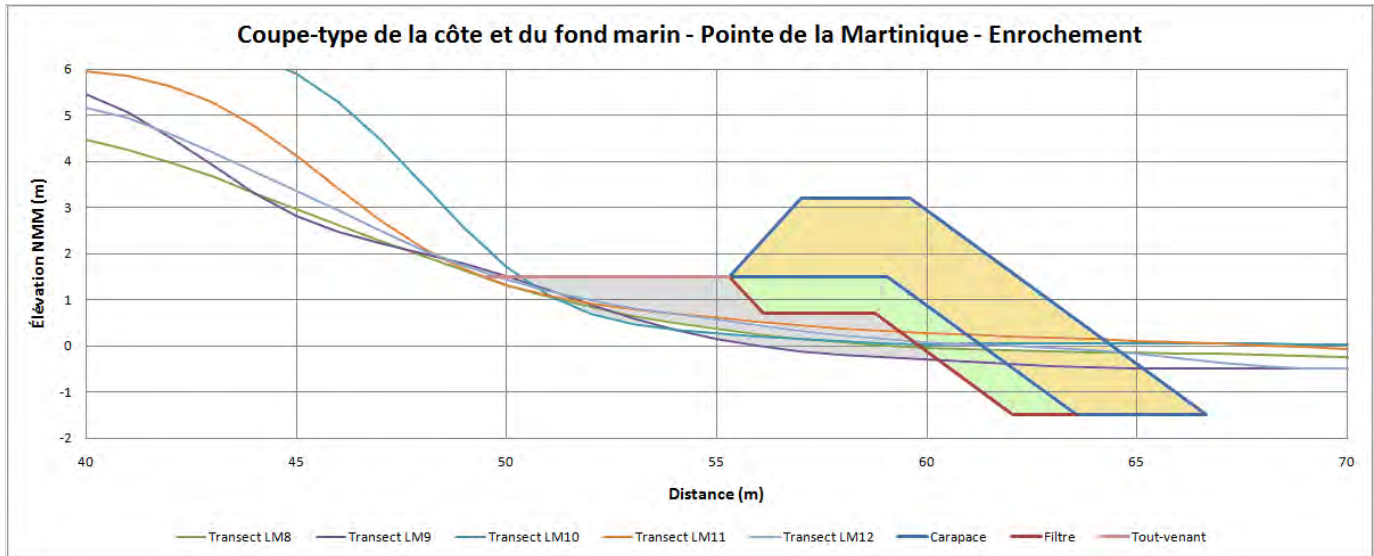


Figure 12.3 Coupe type d'une protection en enrochement de la pointe de la Martinique

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.

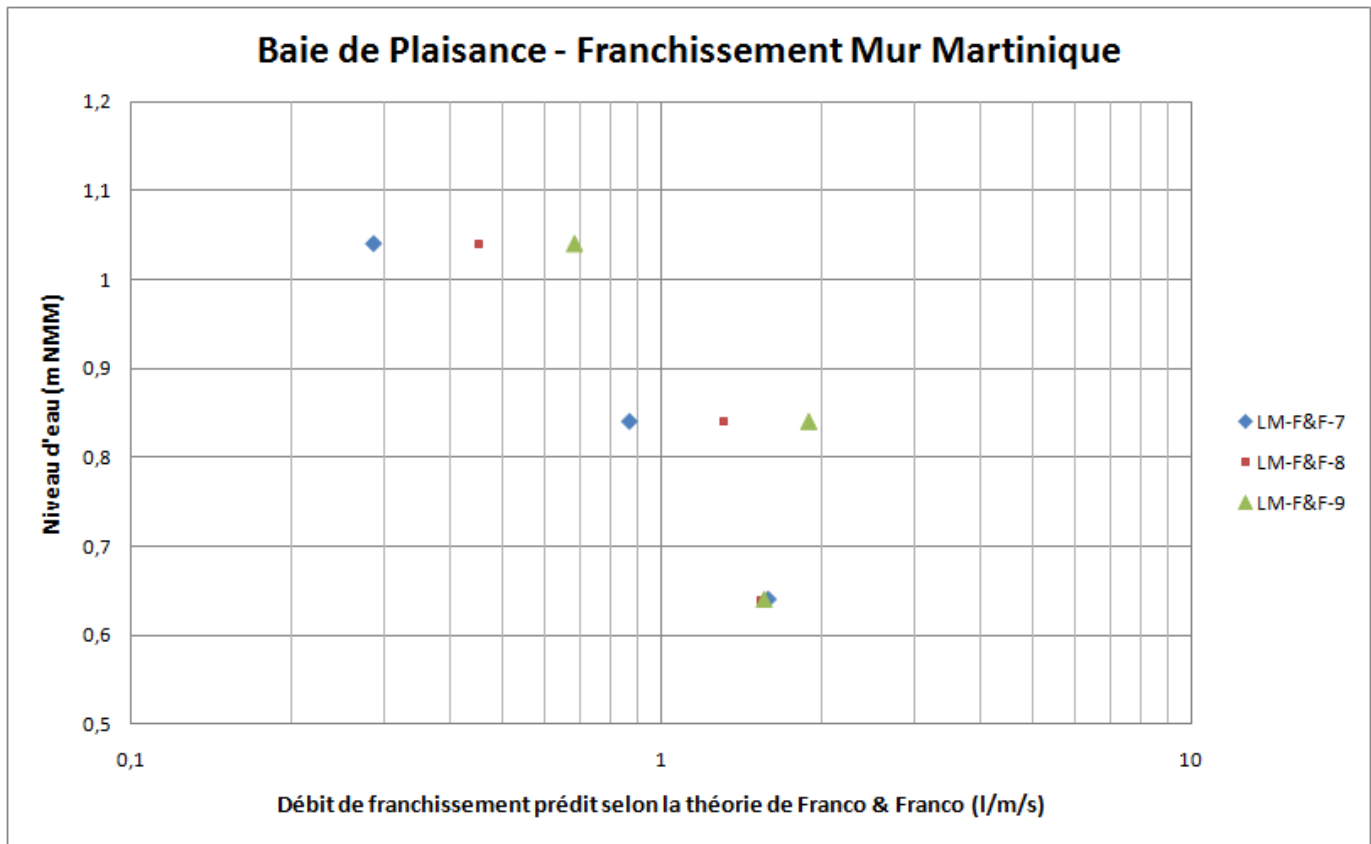


Figure 12.4 Débits de franchissement d'un mur dont la crête est située à +3,5 m NMM

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.

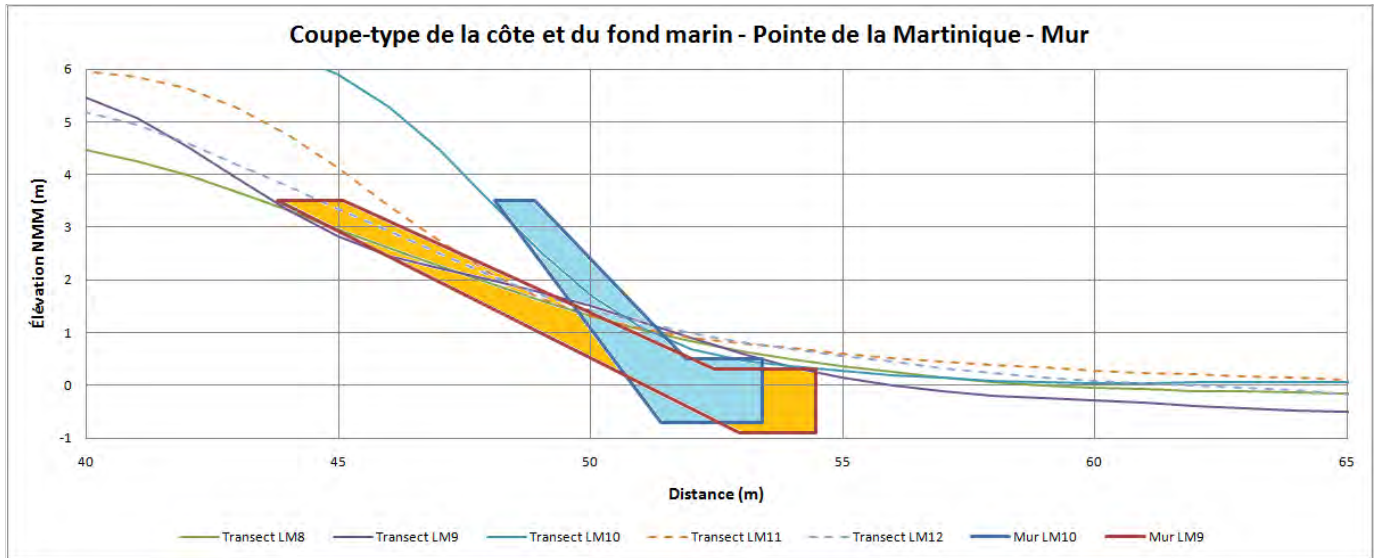


Figure 12.5 Coupe type d'une protection en béton armé du pied des falaises de la Pointe de la Martinique

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.

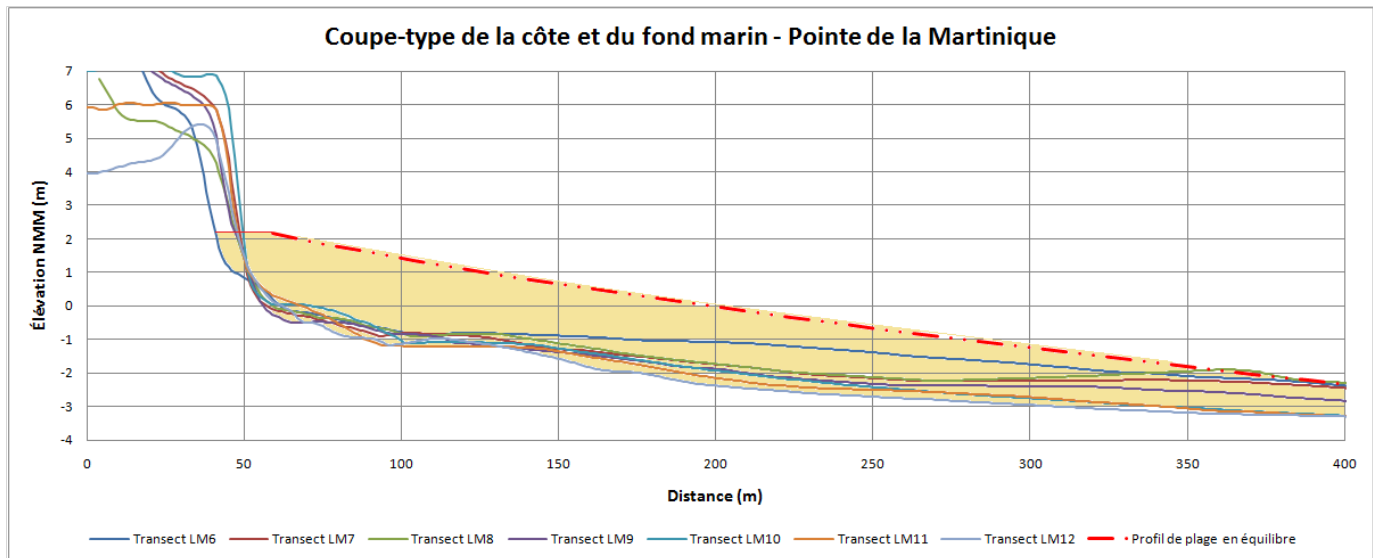


Figure 12.6 Coupe type d'une plage en équilibre devant les falaises de la Pointe de la Martinique

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.

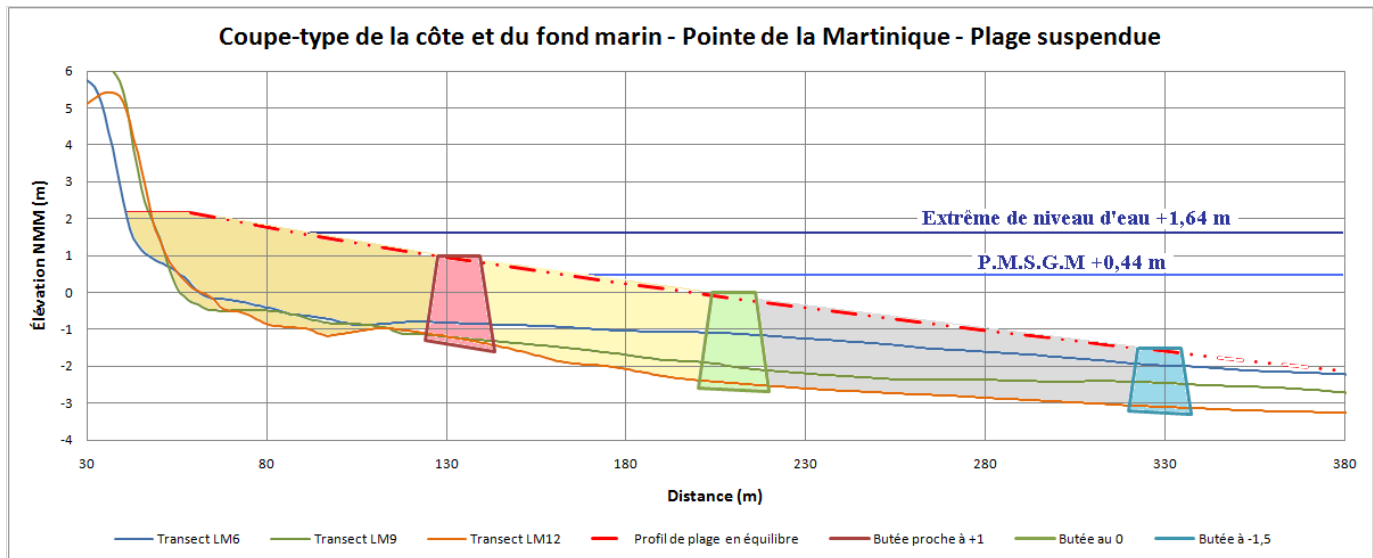


Figure 12.7 Coupe type d'une plage suspendue devant la Pointe de la Martinique

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 $170 \text{ m}^3/\text{m}$ 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 $120\,000 \text{ m}^3$ 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.

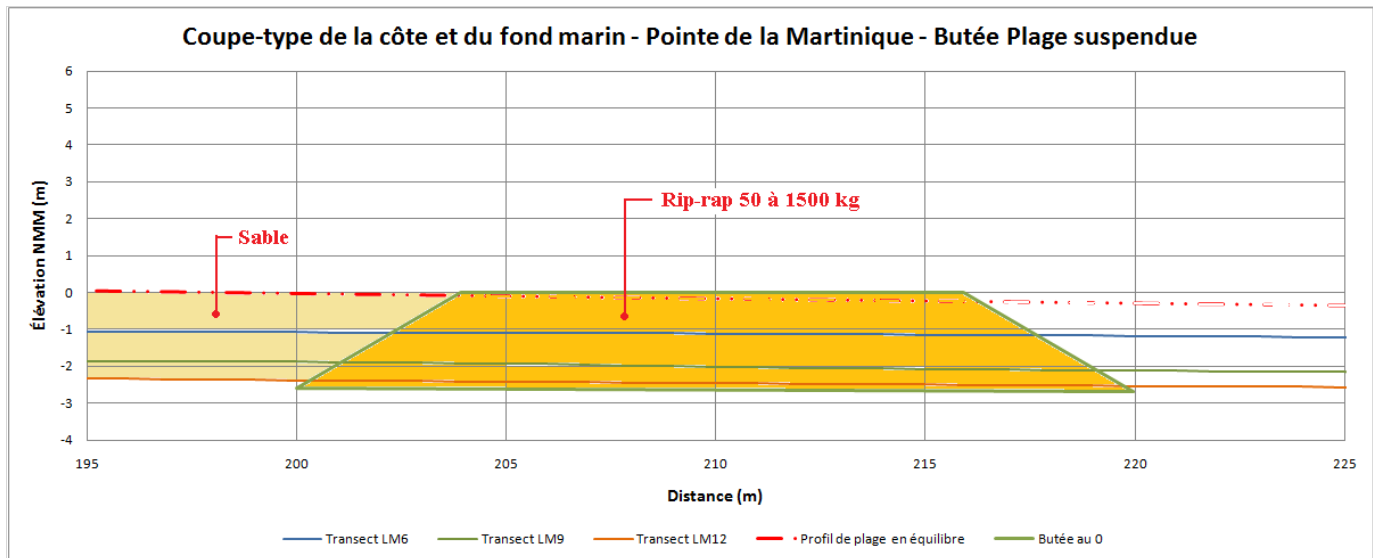


Figure 12.8 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en enrochement à 0,0 m NMM

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 $340 \text{ m}^3/\text{m}$ 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.

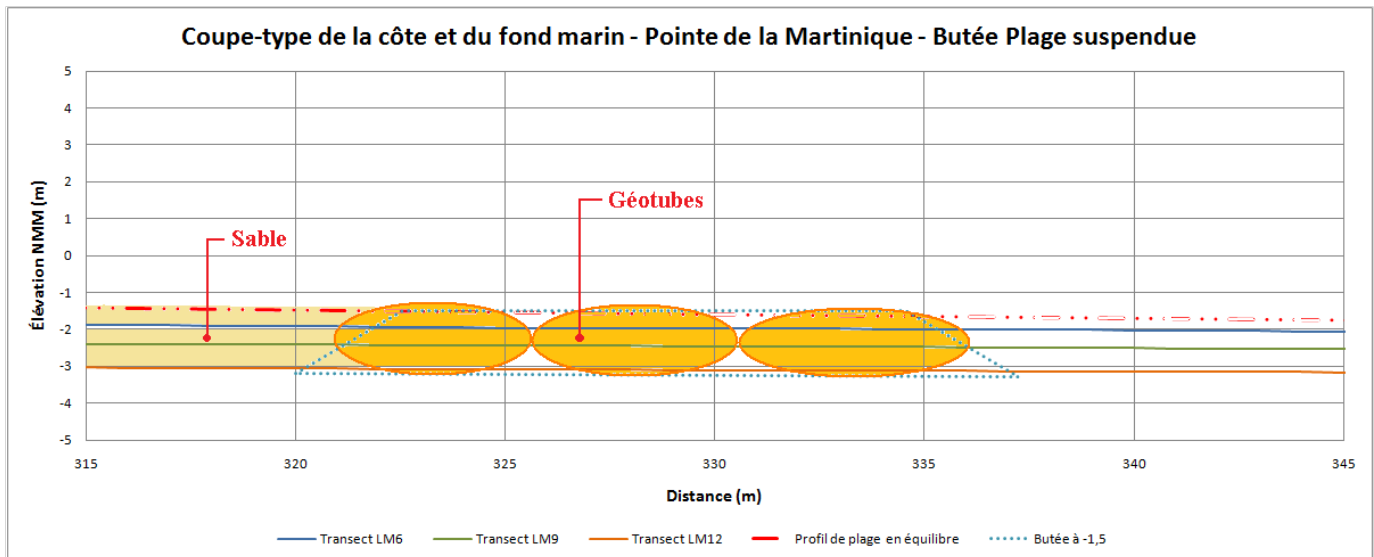


Figure 12.9 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en géotubes à -1,5 m NMM

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 H_s , 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).

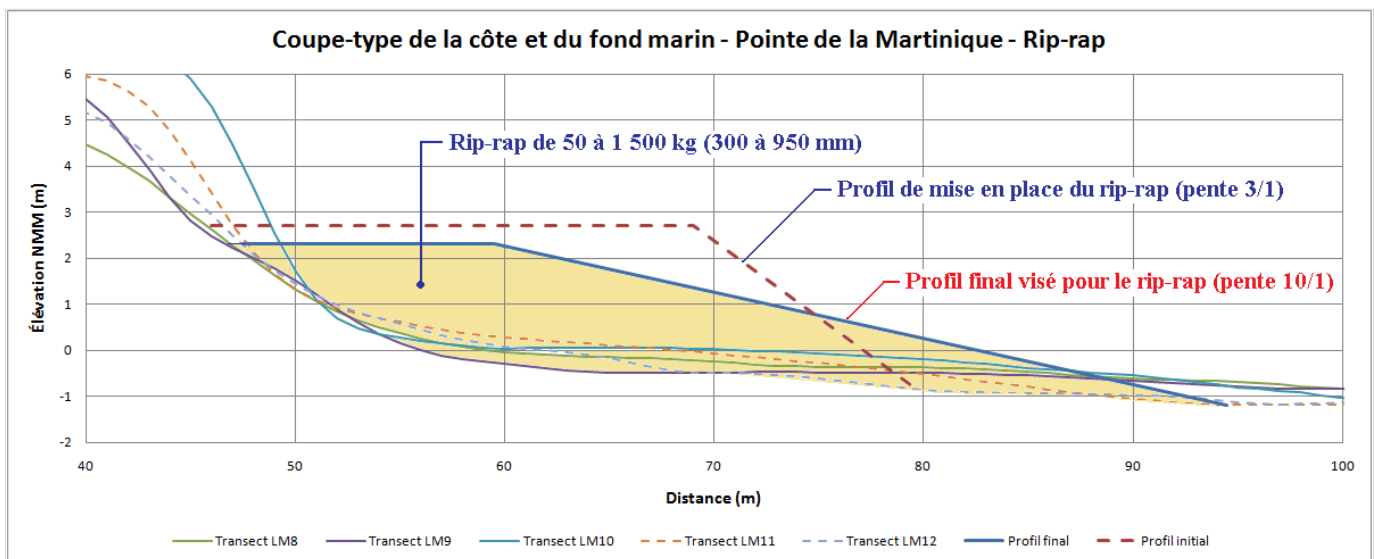


Figure 12.10 Coupe type d'une protection de berge en matériaux grossiers devant la Pointe de la Martinique

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.

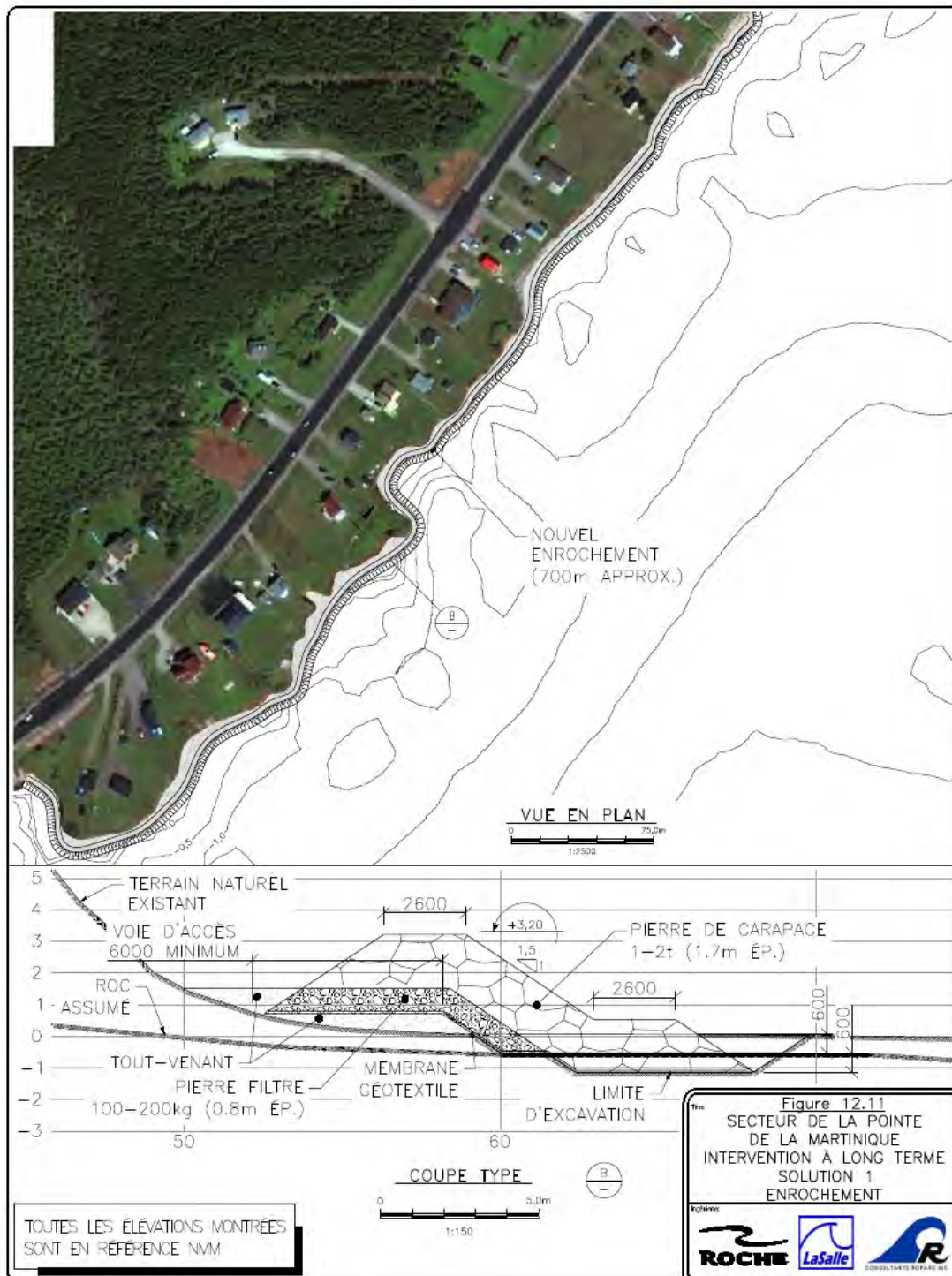


Figure 12.11 – Secteur de la Pointe de la Martinique – Intervention à long terme – Solution 1 - Enrochement

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

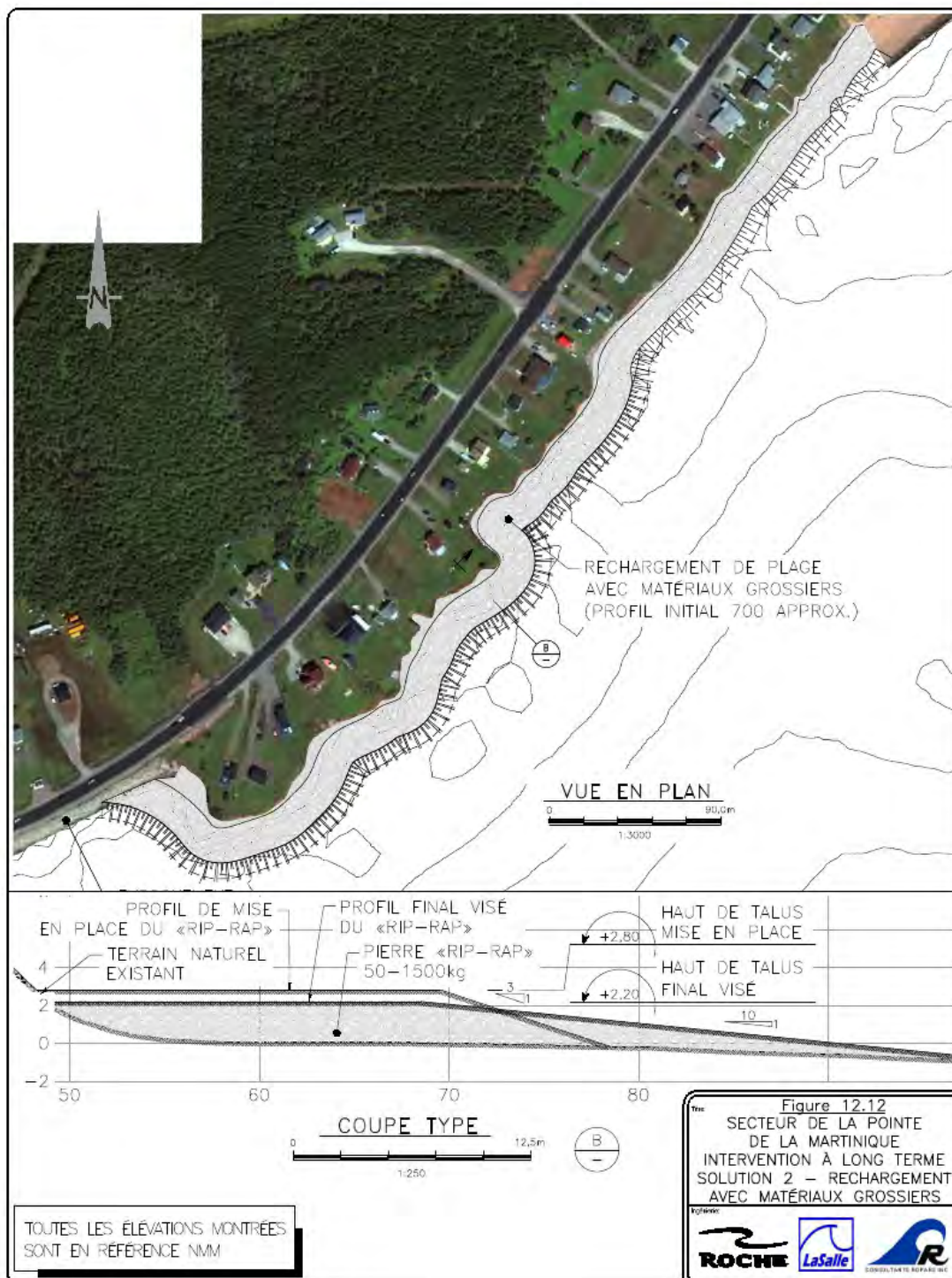


Figure 12.12 – Secteur de la Pointe de la Martinique – Intervention à long terme – Solution 2 – Rechargement de plage avec matériaux grossiers

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

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

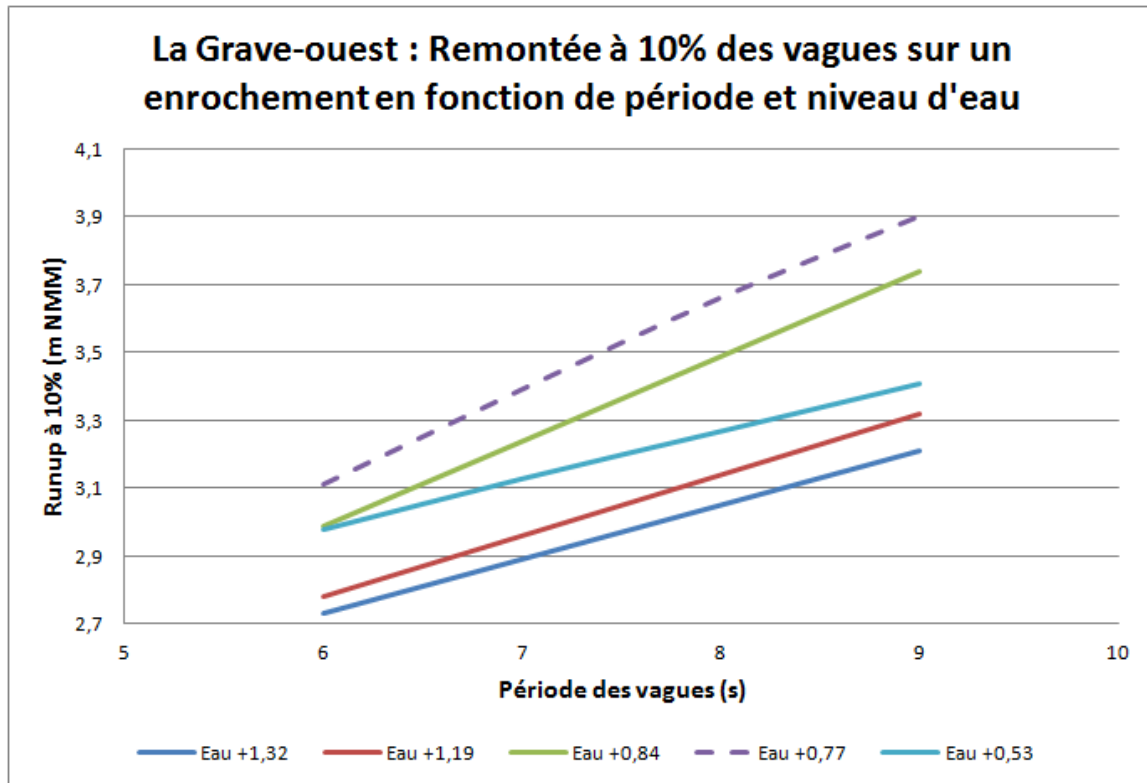


Figure 13.1 Remontée des vagues sur un enrochement dans la partie ouest de La Grave

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.

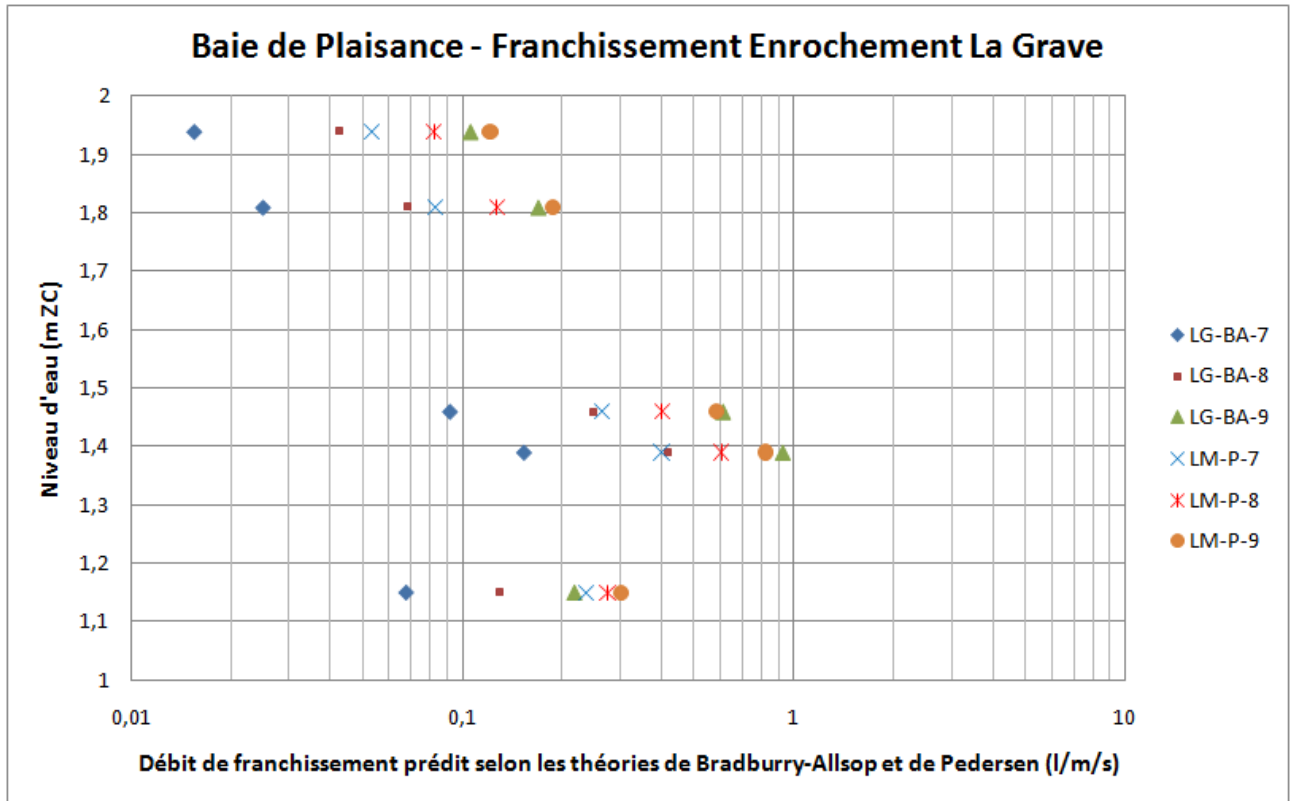


Figure 13.2 Débit de franchissement d'un enrochement dont la crête est à +3,1 m NMM

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.

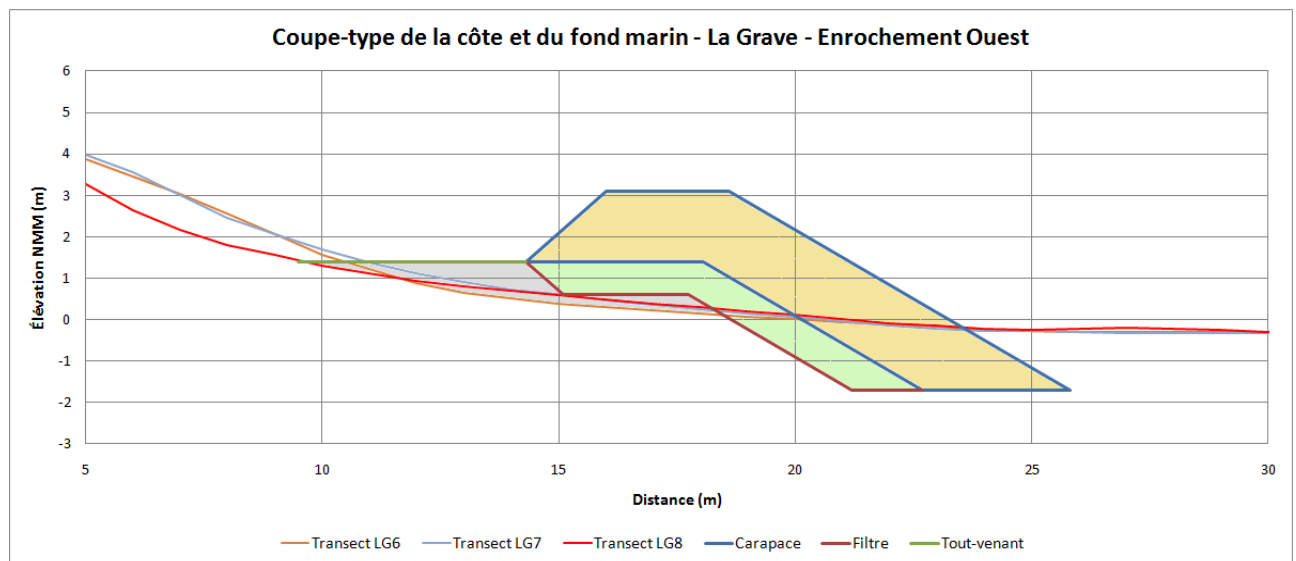


Figure 13.3 Coupe type d'une protection en enrochement de la partie ouest de La Grave

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).

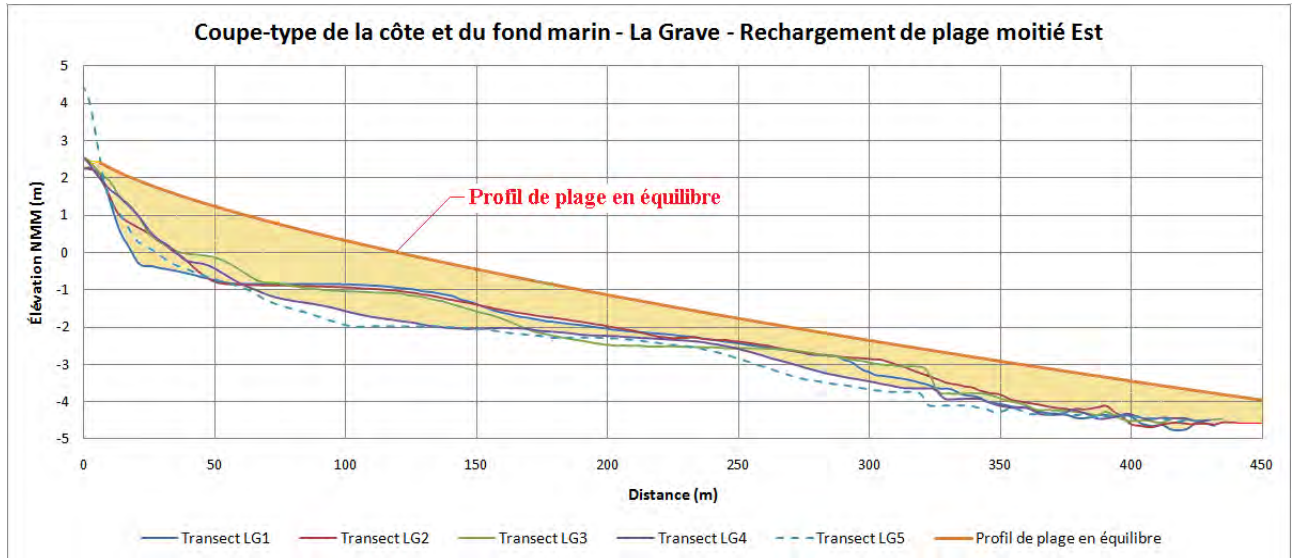


Figure 13.4 Coupe type d'une plage en équilibre devant la partie est de La Grave (plage)

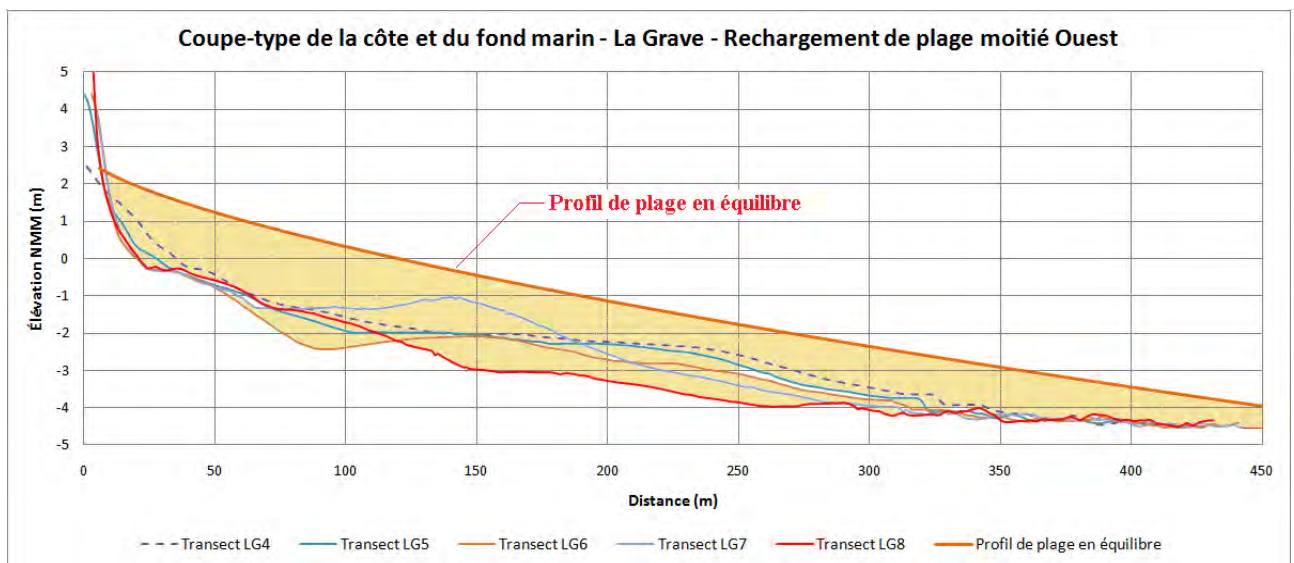


Figure 13.5 Coupe type d'une plage en équilibre devant la partie ouest de La Grave (falaise)

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.

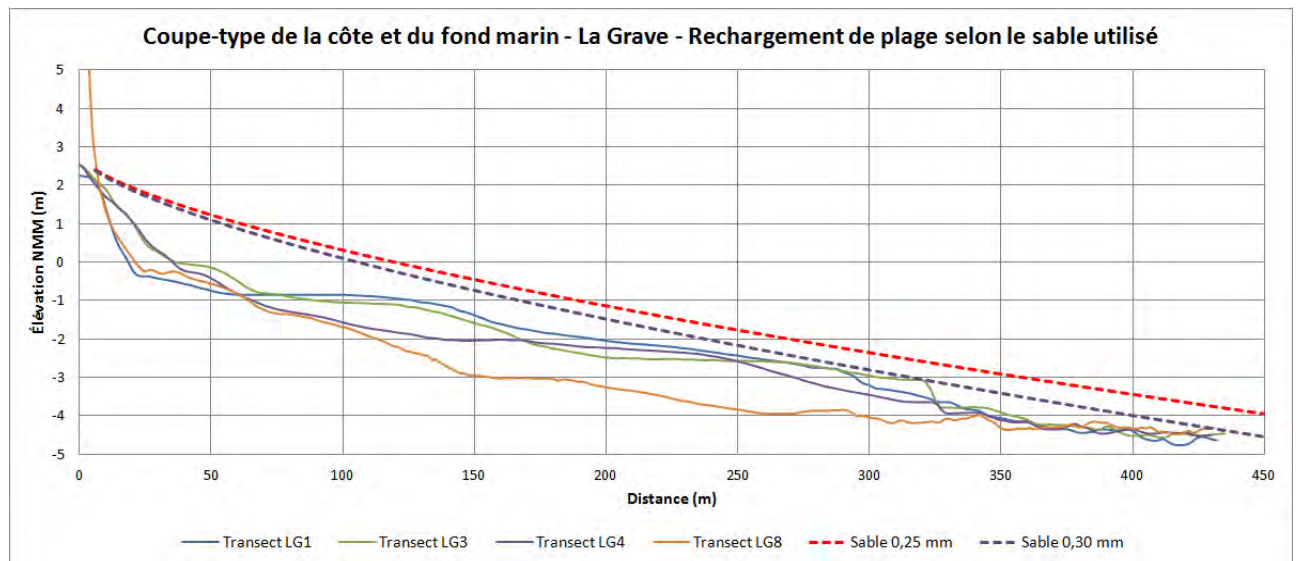


Figure 13.6 Coupe type d'une plage en équilibre devant La Grave selon le diamètre du sable

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 $650 \text{ m}^3/\text{m}$ de sable de rechargement sur une largeur minimale de 350 m de la partie est de la plage de La Grave, on parle de $230\,000 \text{ m}^3$ de sable plus grossier que le sable de la Baie de Plaisance à installer devant la partie la plus touristique de la plage.

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

13.4 Rechargement de plage avec butée de pied

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

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

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

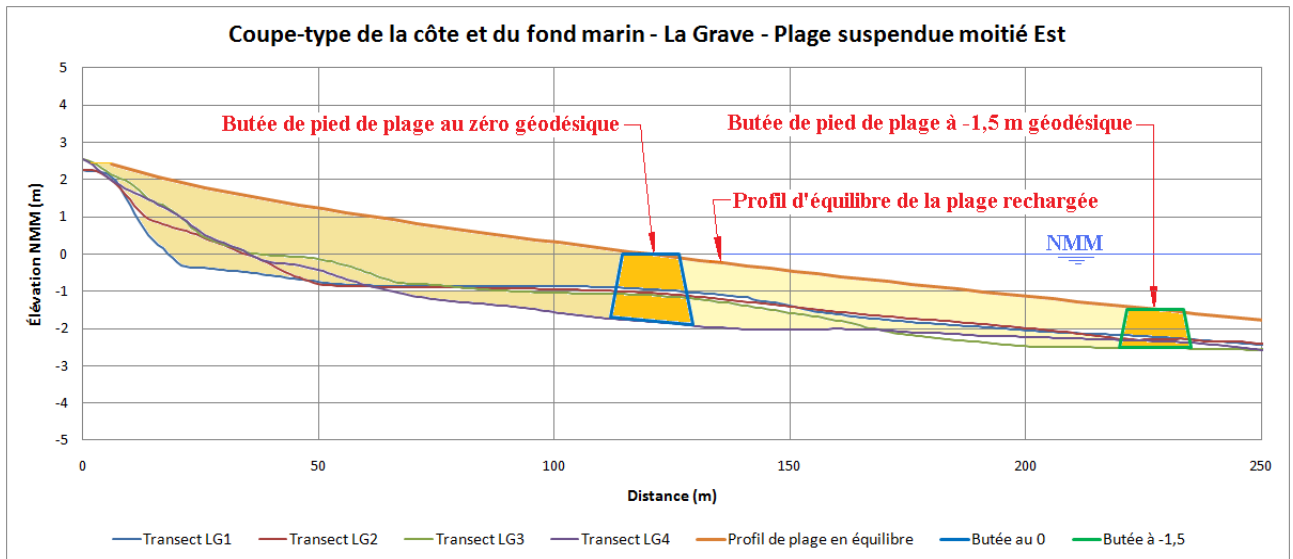


Figure 13.7 Coupe type d'une plage suspendue devant la plage de La Grave – partie est

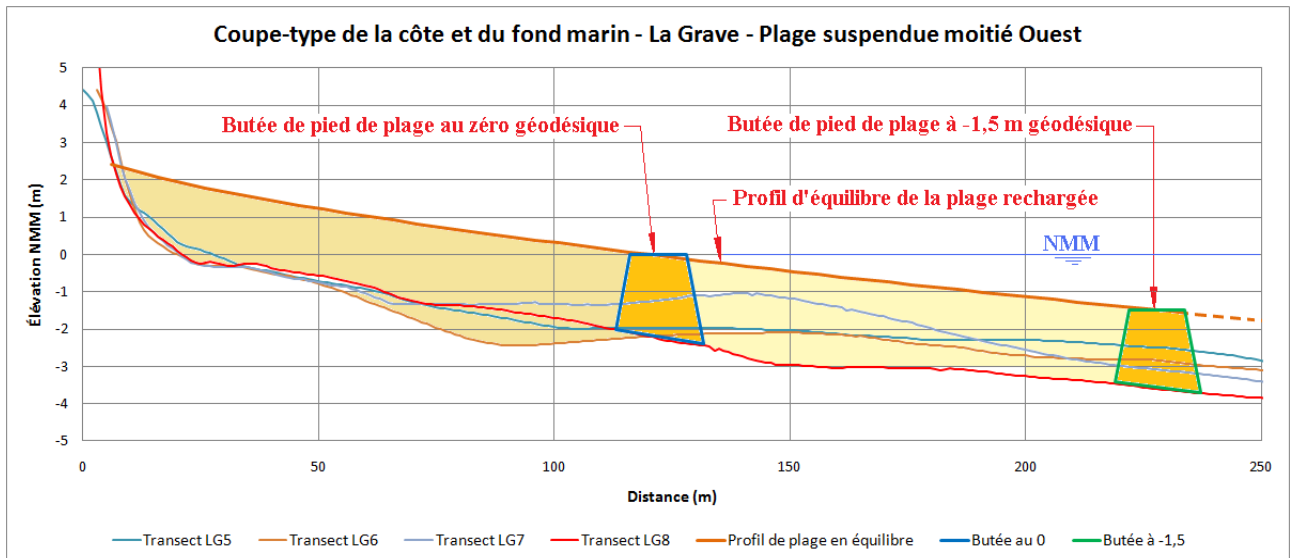


Figure 13.8 Coupe type d'une plage suspendue devant la plage de La Grave – partie ouest

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

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

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

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

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

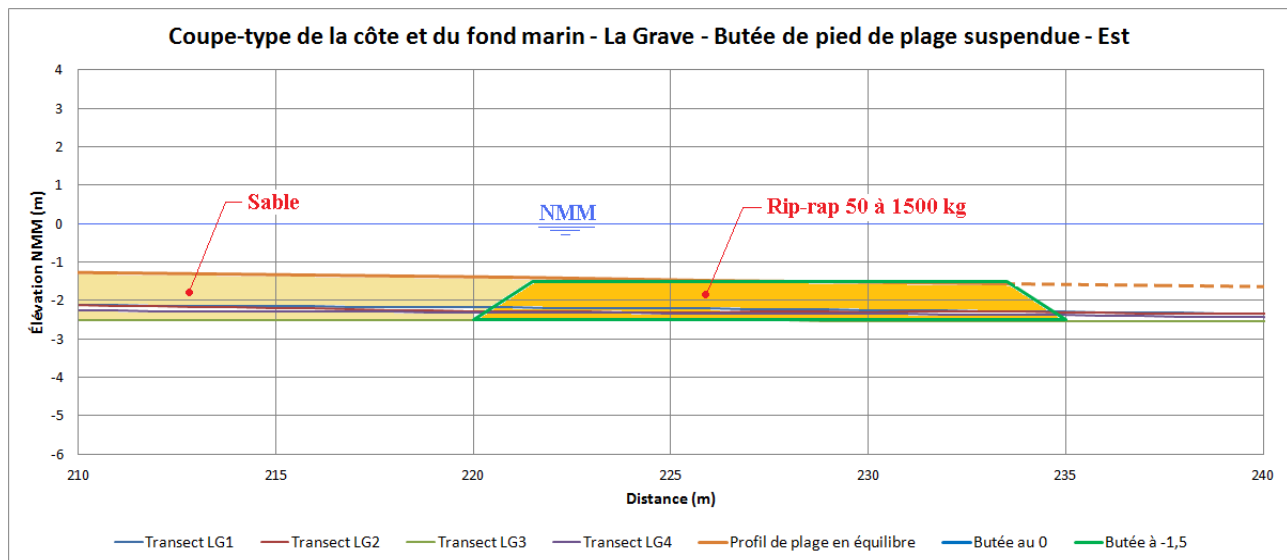


Figure 13.9 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en enrochement à -1,5 m NMM

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

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

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

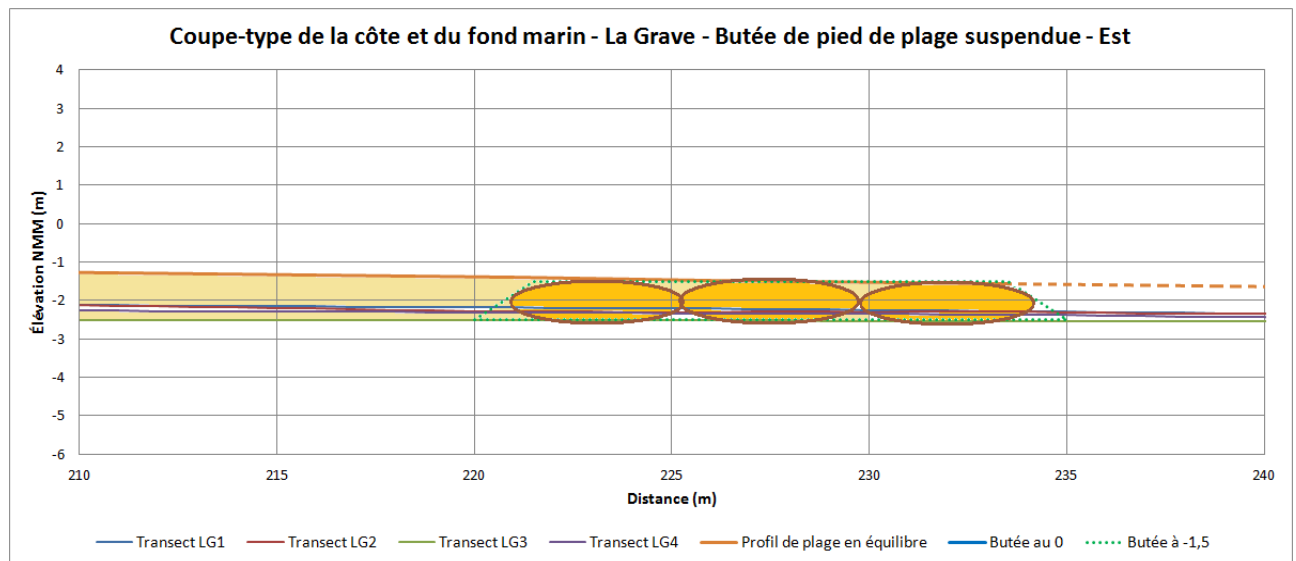


Figure 13.10 Coupe type d'une butée de pied de plage suspendue en géotubes à -1,5 m NMM

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

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

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

13.5 Rechargement de bas de falaise en matériaux grossiers

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

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

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

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

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

D'autres avantages de ce concept par rapport à l'enrochement sont la diminution des risques 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 bousseurs (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.

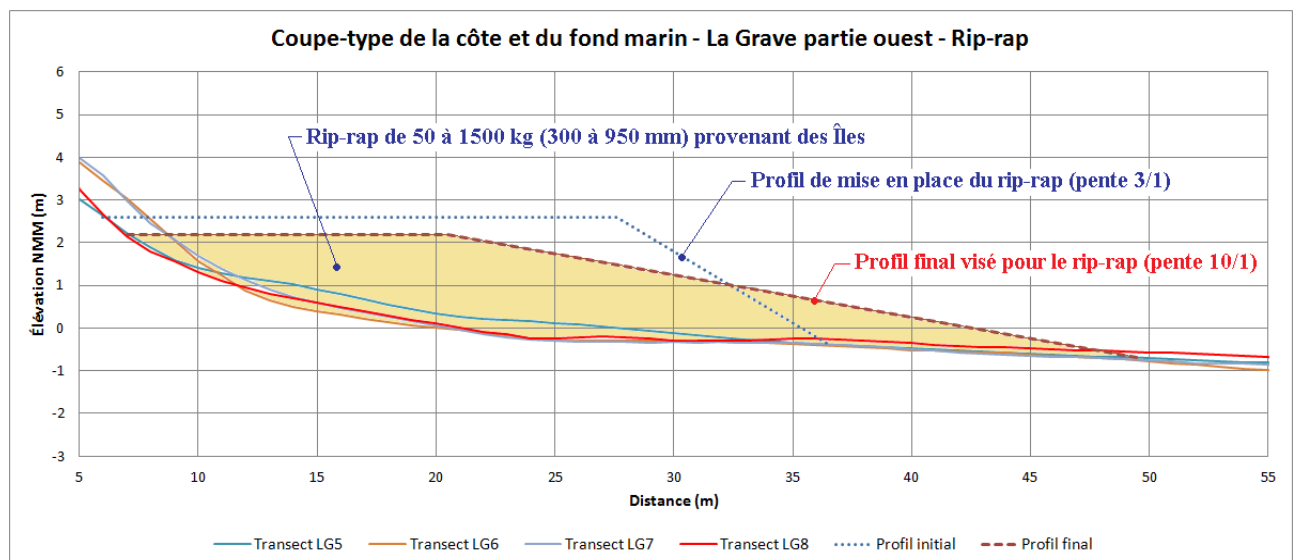


Figure 13.11 Coupe type d'une protection de berge en matériaux grossiers devant la partie ouest de la plage de La Grave

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).

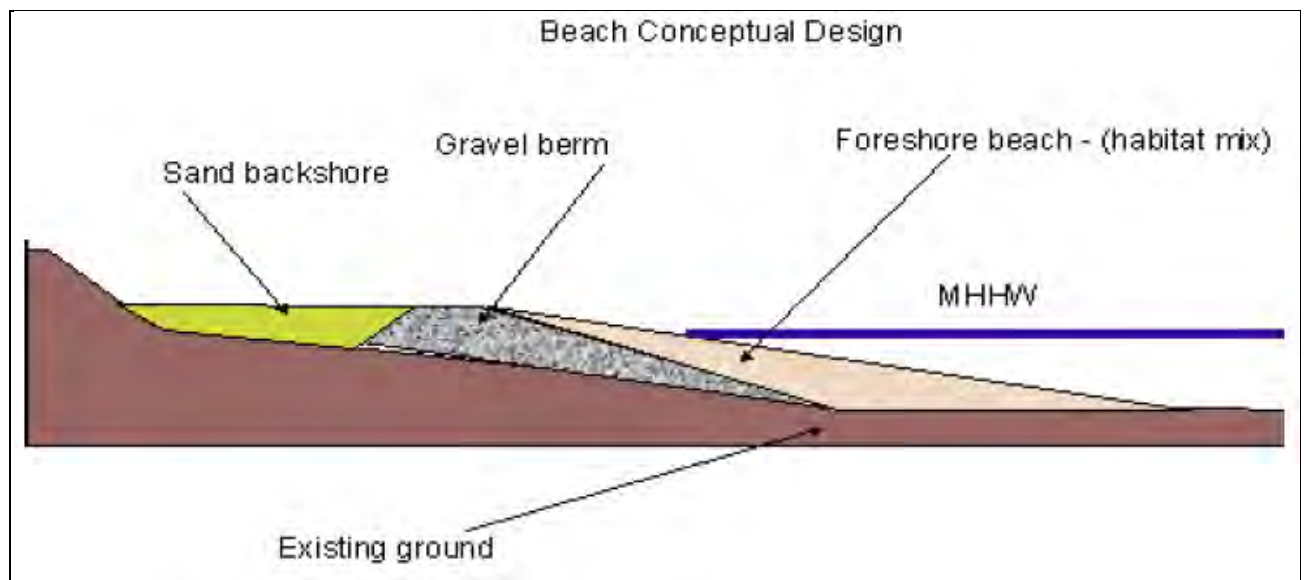


Figure 13.12 Exemple de concept de rechargement de plage mixte dans l'état de Washington USA

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 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 15 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans). À valider par des études complémentaires, y inclus modélisation physique.

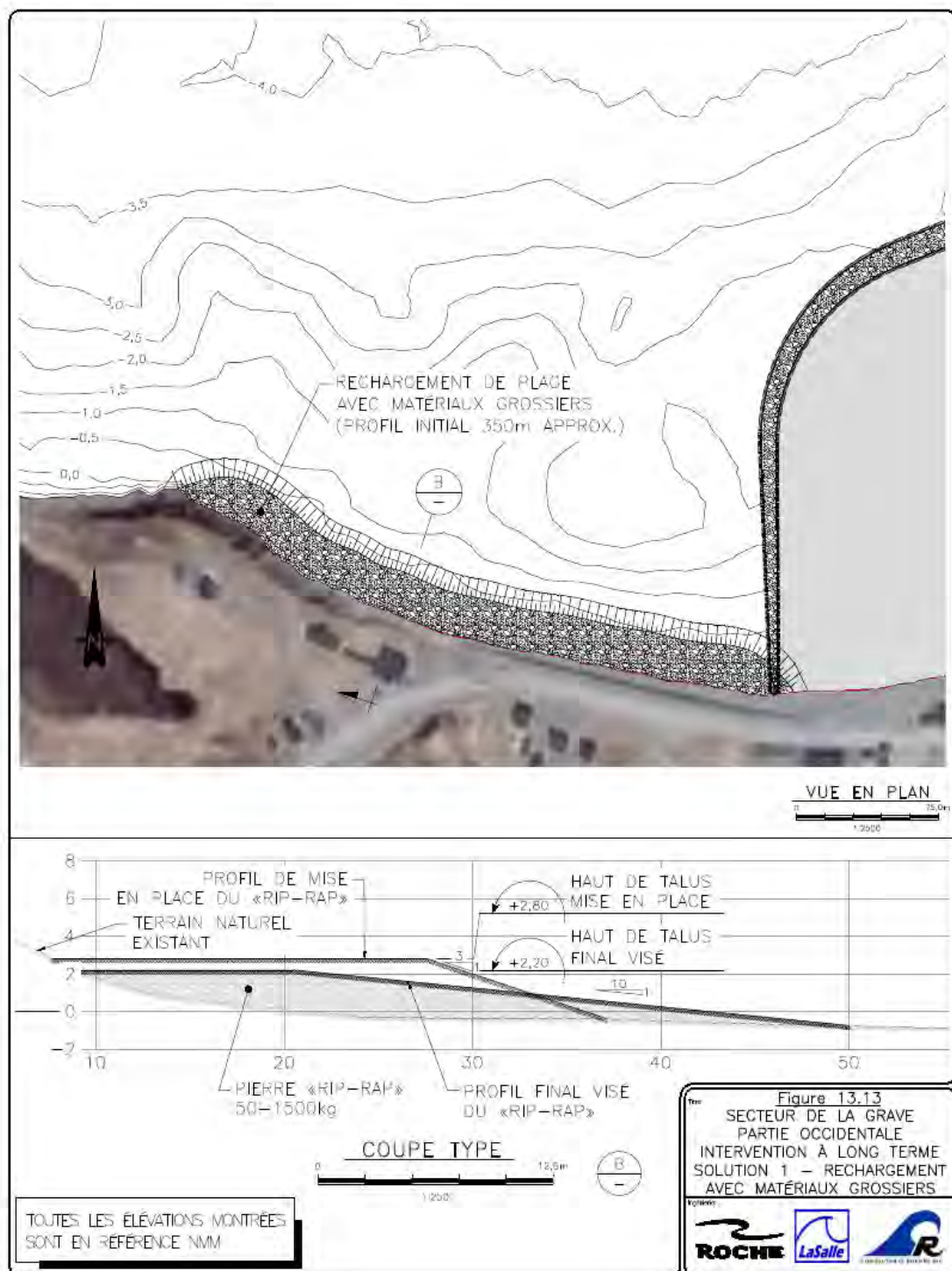


Figure 13.13 Secteur de La Grave – Partie ouest – Rechargement de la plage avec matériaux grossiers

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

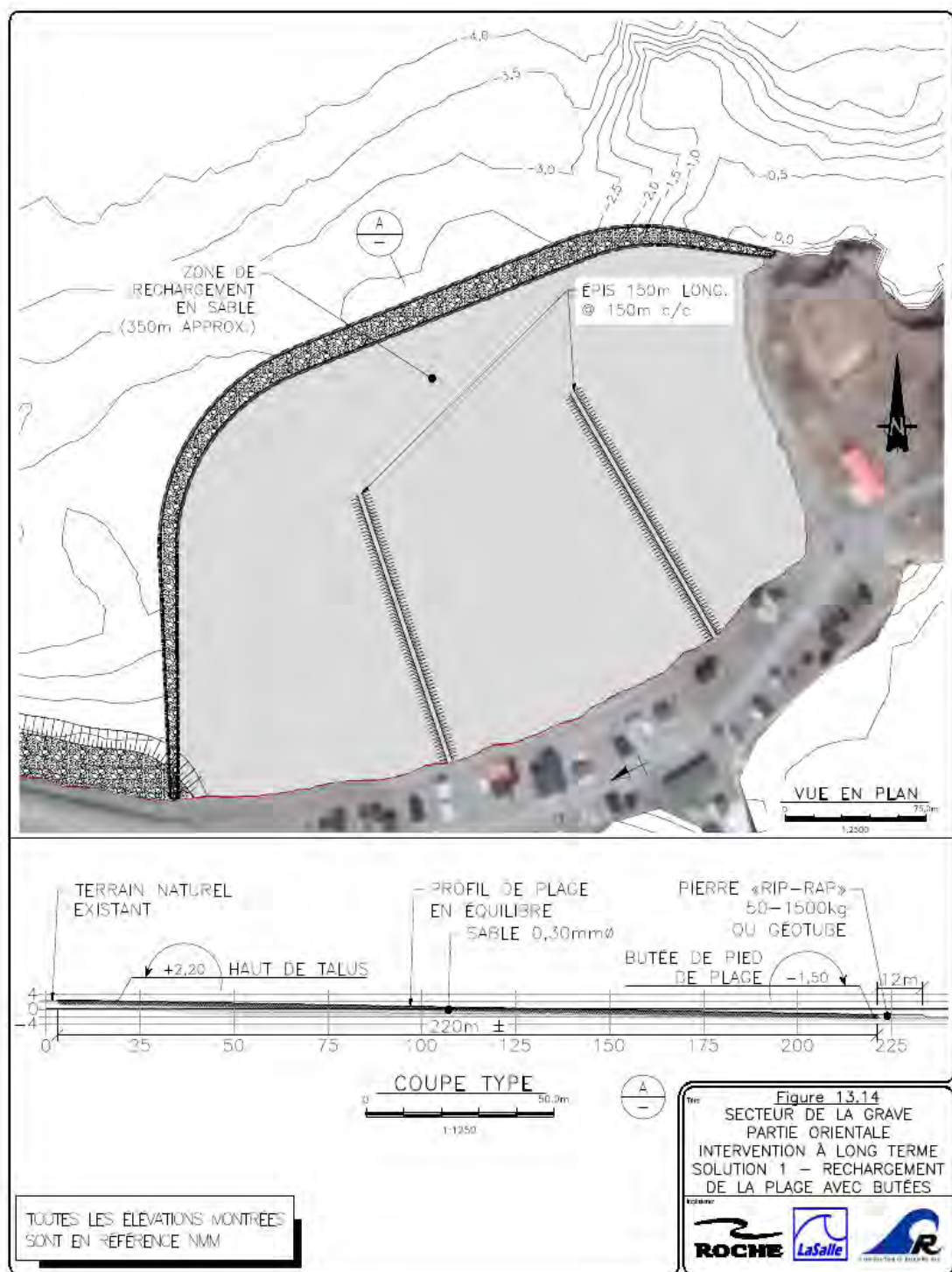


Figure 13.14 Secteur de La Grave – Partie est – Rechargement de la plage avec épis et butées

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

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 \$ Rechargements périodiques : <u>2 103 000 \$</u> Coût total : 6 227 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 7-8 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans)
Solution 3 – Rechargement de la plage avec matériaux grossiers	Coût initial : 908 000 \$ Rechargements périodiques : <u>454 000 \$</u> Coût total : 1 362 000 \$	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.
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 \$ Rechargements périodiques : <u>6 697 000 \$</u> Coût total : 19 606 000 \$	Nécessite des rechargements périodiques, soit 25% du volume initial à tous les 15 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans)
Solution 3 – Rechargement de la plage avec butée de pied (350 m.l.; plage de la Garderie seulement)	Coût initial : 11 167 000 \$ Rechargements périodiques : <u>6 323 000 \$</u> Coût total : 17 490 000 \$	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.

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 \$ 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 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 15 ans, pendant la vie utile du projet (35 ans). À valider par des études complémentaires, y inclus modélisation physique.

14.2 Recommandations

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

14.2.1 Secteur des étangs aérés

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

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

14.2.2 Chemin du Gros Cap, près de la garderie

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

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

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

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 \$

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

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	m³	20	1 360 000 \$
3	Pierre RIP-RAP (50 - 1500 kg)	10 900	m³	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	m³	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 (50-1500 kg)	9000	m ³	60	540 000 \$
	SOUS-TOTAL				607 000 \$
3	Contingences			20%	121 000 \$
4	Études (environnement, géotechnique, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			25%	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%	22 000 \$
2	Pierre de rechargement grossier (50-1500 kg)	4500	m ³	60	270 000 \$
	SOUS-TOTAL				292 000 \$
3	Contingences			20%	61 000 \$
4	Études (environnement, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			25%	61 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				454 000 \$

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

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine

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	m³	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	m³	20	252 000 \$
3	Pierre Rip-Rap (50 - 1500 kg)	135 000	m³	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)s

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	m³	20	252 000 \$
3	Pierre Rip-Rap (50 - 1500 kg) Rechargement à tous les 15 ans)	68 000	m³	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
Rechargement de la plage (900 m) avec épis (7 x 150 m)

Item	Description	Quantité	Unité de mesure	Coût unitaire (\$)	Coût (\$)
1	Organisation de chantier	1 objet		12%	1 255 000 \$
2	Sable 0,50mm d'a.	270 000	m³	30	8 100 000 \$
3	Pierre R.P.-RAP (30 - 1500 kg)	40000	m³	120	4 800 000 \$
	SUB-TOTAL				14 155 000 \$
4	Contingences			20%	2 945 000 \$
5	Études (environnement, géotechnique, modélisation physique, topographique, autres), ingénierie, surveillance des travaux			20%	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	1 objet		12%	845 000 \$
2	Sable 0,50mm d'a.	270 000	m³	30	8 100 000 \$
	SUB-TOTAL				8 945 000 \$
4	Contingences			20%	1 789 000 \$
5	Études (environnement, géotechnique, modélisation physique, topographique, autres), ingénierie, surveillance des travaux			20%	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	m³	30	21 000 \$
3	Excavation roc	6 300	m³	100	630 000 \$
4	Pierre filtre 100 - 200 kg	4 550	m³	100	455 000 \$
5	Pierre de carapace 1 - 2 tonnes	14 700	m³	120	1 764 000 \$
6	Membrane géotextile	11 200	m²	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	m³	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	m³	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	m³	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	m³	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	m³	20	2 170 000 \$
3	Pierre RIP-RAP (50 - 1500 kg)	16 000	m³	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	m³	20	2 170 000 \$
	SOUS-TOTAL				2 430 000 \$
4	Contingences			20%	486 000 \$
5	Études (environnement, topo-bathymétrie, autres), ingénierie, surveillance des travaux			12%	350 000 \$
	TOTAL (Taxes en sus)				3 266 000 \$

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

Érosion côtière baie de Plaisance

Îles-de-la-Madeleine