

Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC de Bonaventure

Présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec

Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph.D.

Août 2012



Laboratoire de dynamique
et de gestion intégrée des
zones côtières UQAR



Équipe de réalisation

Direction, recherche et rédaction

Pascal Bernatchez, Ph.D. Géomorphologie côtière et télédétection
Responsable du projet
Professeur titulaire de la Chaire du Québec en géoscience côtière
Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC)
Département de biologie, chimie et géographie
Université du Québec à Rimouski
Courriel : pascal_bernatchez@uqar.qc.ca

Équipe de recherche

Christian Fraser, M.Sc., Professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR
Caractérisation côtière, analyse de l'évolution côtière, rédaction

Steeve Dugas, B.Sc., Professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR
Caractérisation côtière, analyse de l'évolution côtière et géomatique

Susan Drejza, M.Sc., Professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR
Rédaction sur le zonage du risque

Remerciements

L'équipe de recherche tient à remercier le gouvernement du Québec pour son soutien financier.

RÉFÉRENCE COMPLÈTE

Fraser, C., Bernatchez, P., Dugas, S. et Drejza, S. (2012). Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC de Bonaventure. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, août 2012, 50 p. et annexes.

Synthèse

Historiquement, la MRC de Bonaventure ne présente pas une grande problématique liée à l'érosion côtière. La majeure partie des côtes montre en effet de faibles taux de recul. Cependant, certaines portions de côtes sont très sensibles avec des reculs événementiels pouvant atteindre 2,5 à 17,2 m selon le type de côte. De plus, la forte proportion de côtes avec des ouvrages de protection (18%) est un signe que la problématique a pris de l'importance durant les dernières décennies. Avec les changements environnementaux récents et à venir, les prévisions pour 2060 montrent que les taux d'érosion futurs seront en moyenne trois fois plus élevés que les taux historiques. Le littoral reculera entre 11 et 104 m selon les types de côtes.

Une analyse globale de l'ensemble du système côtier a été effectuée tant au niveau de la caractérisation des côtes, de la dynamique hydrosédimentaire que de l'évolution historique et récente. Dans un SIG (ArcGIS), les lignes de rivage et les traits de côte ont été numérisés sur trois séries de photographies aériennes (1934, 1963 et 2007). Ensuite, une quantification des taux de déplacement de la côte a été réalisée à l'aide du logiciel DSAS générant une base de données de **1860 points de mesures**. Puis, les 133 stations d'un réseau de suivi de l'érosion côtière ont été étudiées. Les différentes données d'érosion ont été analysées en fonction d'une caractérisation côtière précise et d'une cartographie des unités et des cellules hydrosédimentaires.

La côte de la MRC de Bonaventure a ensuite été divisée en **251 zones homogènes** ayant une même dynamique hydrosédimentaire, des taux d'érosion semblables et un même type de côte. À la suite de ces analyses détaillées, un **scénario d'érosion le plus probable** pour le futur a pu être déterminé pour chacune des zones homogènes.

D'après l'analyse effectuée, il ressort que seulement 6% des côtes seront en accumulation d'ici 2060 alors que **84% seront en érosion**. Cependant, plus de la moitié des côtes auront un faible taux de recul variant entre -0,2 et -0,01 m/an, étant donné la forte proportion de côte rocheuse (43%) qui sont moins sensibles à l'érosion.

Une formule a été mise au point afin de calculer une **marge de sécurité en érosion côtière**. Une **marge minimale** a également été développée pour les secteurs où 1) les données ne sont pas suffisantes pour calculer un scénario d'évolution fiable, 2) pour les secteurs qui connaissent une accumulation historique (selon le principe de précaution car la tendance pourrait s'inverser à l'avenir en raison des changements climatiques) et 3) si la marge calculée pour une unité homogène est inférieure à la marge minimale (selon le principe de précaution). Cette marge minimale a été développée avec la même équation que la marge de sécurité. L'équation est détaillée ci-dessous :

{Taux de recul du scénario le plus probable} X 53 ans (horizon 2060)
+ {Recul maximum atteint lors d'un événement}

OU

Marge minimale de sécurité en érosion côtière pour 2060

La marge la plus sévère des deux est utilisée et arrondie à 5 m près

Le calcul de la marge de sécurité en érosion côtière a été effectué individuellement pour chacune des 251 zones homogènes de la MRC de Bonaventure à l'horizon 2060 (soit un horizon de gestion d'environ 50 ans). En plus d'une cartographie numérique, les marges de sécurité en érosion côtière ont été cartographiées pour l'ensemble des côtes par le biais de 55 cartes au 1:5 000 (format 11''x17'').

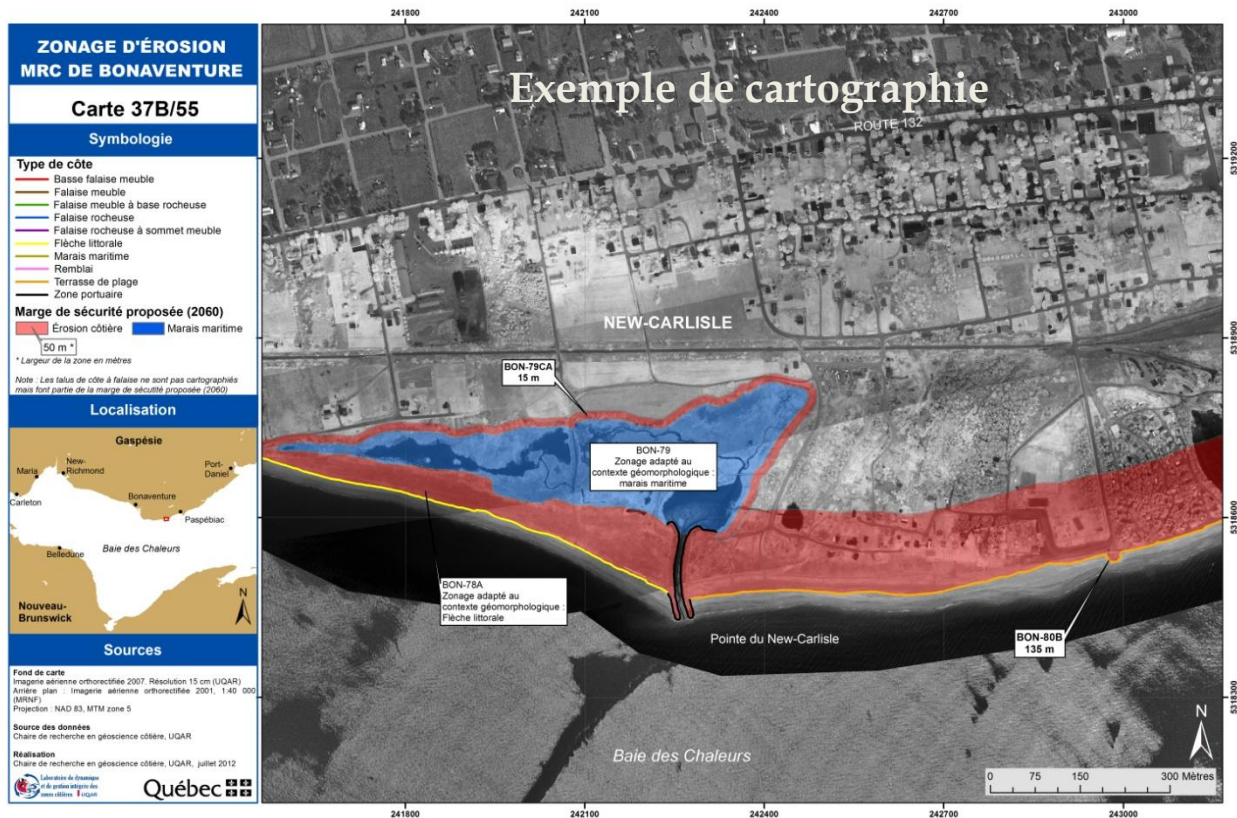


Table des matières

ÉQUIPE DE RÉALISATION	II
REMERCIEMENTS	II
SYNTHÈSE.....	III
TABLE DES MATIÈRES	V
TABLE DES FIGURES.....	VII
TABLE DES TABLEAUX.....	VII
TABLE DES ÉQUATIONS	VII
TABLE DES ENCADRÉS	VII
1. INTRODUCTION	1
1.1 PROBLÉMATIQUE.....	1
1.2 LES ENJEUX.....	1
1.3 LES BESOINS	2
1.4 OBJECTIFS	3
1.5 LOCALISATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	3
2. MÉTHODOLOGIE	5
2.1. DÉFINITION DU TYPE DE ZONAGE POUR LES ALÉAS CÔTIERS	5
2.2 CARACTÉRISATION DE LA CÔTE.....	7
2.2.1 Types de côtes.....	7
2.2.2 Dynamique hydrosédimentaire	8
2.3 ÉVOLUTION HISTORIQUE DE LA ZONE CÔTIÈRE PAR PHOTO-INTERPRÉTATION	9
2.3.1 Intégration des photographies aériennes historiques dans un SIG	9
2.3.2 Traçage du trait de côte et de la ligne de rivage par photo-interprétation.....	9
2.3.3 Calcul de l'évolution historique.....	11
2.4 ÉVOLUTION RÉCENTE DU LITTORAL (2005-2011)	12
2.5 SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION FUTURE DE LA CÔTE	13
2.5.1 Définition des zones homogènes d'évolution côtière	13
2.5.2 Scénarios d'évolution.....	14
2.6 CALCUL DE LA MARGE DE SÉCURITÉ EN ÉROSION CÔTIÈRE	14
2.6.1 Horizon de gestion	15
2.6.2 Recul évènementiel mesuré.....	15
2.6.3 Recul évènementiel appréhendé (falaises rocheuses)	16
2.6.4 Marge minimale de sécurité.....	18
2.6.5 Cas particuliers	19
3. DESCRIPTION DU TERRITOIRE.....	22
3.1 CONTEXTE PHYSIQUE.....	22
3.2 CONDITIONS MARINES	22
3.3 VARIATION DU NIVEAU MARIN RELATIF.....	24
3.4 CONDITIONS CLIMATIQUES	24
3.5 CARACTÉRISTIQUES DES CÔTES	25

4. PORTRAIT DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES	27
4.1 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE LA BAIE DE CASCAPÉDIA	27
4.2 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE LA PLAGE HENDERSON	30
4.3 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DES CAPS NOIRS	30
4.4 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE BONAVENTURE	30
4.5 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE PASPÉBIAC-SHIGAWAKE	34
5. SENSIBILITÉ DE LA CÔTE À L'ÉROSION	37
6. MARGES DE SÉCURITÉ EN ÉROSION CÔTIÈRE.....	41
7. CONCLUSION	44
8. RÉFÉRENCES	45
9. ANNEXES	51

Table des figures

Figure 1. Localisation de la MRC de Bonaventure	3
Figure 2. Territoire côtier à l'étude.....	4
Figure 3. Tracés utilisés pour l'évolution historique du littoral selon	10
Figure 4. Méthodologie employée pour la mesure de l'érosion	12
Figure 5. Station de suivi de l'érosion.....	13
Figure 6. Exemple de mesure d'encoche à Hope Town	17
Figure 7. Proportion des types de côte de la MRC de Bonaventure	25
Figure 8. État de la côte de la MRC de Bonaventure.....	26
Figure 9. Unité hydrosédimentaire de la baie de Cascapédia	29
Figure 10. Unités hydrosédimentaires de la plage Henderson, des Caps Noirs et de Bonaventure (a).....	32
Figure 11. Unité hydrosédimentaire de Bonaventure (b).....	33
Figure 12. Unité hydrosédimentaire de Paspébiac-Shigawake	36
Figure 13. Érosion du barachois de Paspébiac et prolongement de la flèche littorale vers l'ouest	38
Figure 14. Comparaison des taux de migration historiques avec les taux de migration probables.....	39
Figure 15. Longueur de côte selon les catégories de taux probable	40
Figure 16. Exemple de cartographie de marge de sécurité en érosion côtière	41
Figure 17. Longueur de côte selon la largeur de la marge de sécurité en érosion côtière.....	42

Table des tableaux

Tableau 1. Définition des types de côte	7
Tableau 2. Zones homogènes pour la MRC de Bonaventure.....	13
Tableau 3. Recul maximum enregistré entre 2005 et 2011 lors d'un évènement (m)	16
Tableau 4. Statistiques des mesures et des zones d'encoches pour la MRC de Bonaventure	17
Tableau 5. Marges minimales de sécurité en érosion côtière pour 2060.....	19
Tableau 6. Caractéristiques des marées pour Paspébiac	23
Tableau 7. Types de côte de l'unité de la baie de Cascapédia – Cellule de New-Richmond.....	28
Tableau 8. Types de côte de l'unité de la plage Henderson	30
Tableau 9. Types de côte de l'unité de Bonaventure.....	31
Tableau 10. Types de côte de l'unité de Paspébiac-Shigawake	35

Table des équations

Équation 1. Marge de sécurité en érosion côtière.....	14
---	----

Table des encadrés

Encadré 1: Érosion côtière.....	1
Encadré 2 : Termes utilisés pour la dynamique hydrosédimentaire.....	8

1. Introduction

1.1 Problématique

La problématique de l'érosion côtière occupe une place de plus en plus importante dans la gestion des territoires côtiers à l'échelle de la planète. La compilation de résultats sur l'évolution côtière à l'échelle nationale, continentale et même mondiale démontre un constat similaire : les changements climatiques ont un impact direct sur les milieux côtiers (Dalrymple, 2012; USGS, 2012; Allison *et al.*, 2009; GIEC, 2007; EUROSION, 2004; Lozano *et al.*, 2004; Forbes *et al.*, 2004; Neumann *et al.*, 2000).

Au Québec, en plus d'une augmentation mesurée de l'intensité de l'érosion côtière (voir encadré 1) dans plusieurs secteurs (Bernatchez *et al.*, 2008; Bernatchez et Dubois, 2004) le cadre bâti s'est rapidement étendu sans égard à la sensibilité du littoral. Le littoral s'est ainsi fortement artificialisé au rythme de la mise en place de structures de protection pour lutter contre l'érosion (Bernatchez *et al.*, 2008).

Encadré 1: Érosion côtière
Phénomène d'ajustement de la côte qui entraîne une perte de substrat par des processus marins, terrestres ou aériens.

Bien que situé dans la baie des Chaleurs, le littoral de la MRC de Bonaventure subit l'effet des processus d'érosion. Les mesures historiques de l'érosion entre 1934 et 2007 indiquent un taux de recul annuel moyen (seulement les taux de recul) de -0,30 m pour l'ensemble des types de côte. Les mesures sur le terrain entre 2005 et 2011 indiquent plutôt un taux de recul annuel moyen de -0,85 m.

1.2 Les enjeux

La problématique est d'autant plus grande que les enjeux écologiques et économiques sont nombreux et importants. Les habitats côtiers sont très affectés par l'évolution rapide des systèmes côtiers et aussi par l'artificialisation massive des côtes. Le littoral de la baie des Chaleurs comprend des écosystèmes de grande importance pour leurs fonctions écosystémiques non seulement pour la faune, mais aussi pour les communautés côtières, notamment pour l'industrie des pêches. Les grands systèmes de flèches littorales et de marais côtiers servent aussi de zones tampons pour atténuer les géorisques côtiers. La modification et la dégradation des côtes naturelles entraînent ainsi des impacts écologiques et économiques.

Les voies de transport (routes et voie ferrée) qui longent le littoral représentent un enjeu de taille pour l'économie locale et régionale. La route 132 est au cœur du développement touristique et la voie ferrée est un atout important pour le transport de passagers et de produits industriels. Plusieurs tronçons sont menacés et impliquent déjà des dépenses importantes. Les infrastructures portuaires subissent aussi souvent l'assaut des vagues de tempêtes, ce qui occasionne des bris récurrents. Or, l'industrie des pêches, le transport commercial par bateau et le tourisme nautique sont directement liés à la qualité des infrastructures portuaires.

Un enjeu qui touche personnellement les citoyens est le développement résidentiel. Les résidences en bordure de mer sont très prisées par les acheteurs et la valeur des terrains et maisons ont encore une valeur marchande supérieure à la moyenne. Les municipalités obtiennent ainsi une source non négligeable de revenus par l'impôt foncier. Il en est de même pour le domaine commercial où la proximité de la mer est un atout dans un contexte de tourisme maritime. Les enjeux patrimoniaux sont aussi importants lorsque des bâtiments ou des secteurs historiques sont menacés par l'érosion. Devant le nombre et l'importance des enjeux, des réflexions fondamentales sont alors requises afin d'orienter l'aménagement du territoire en intégrant les connaissances sur la dynamique côtière.

1.3 Les besoins

Les besoins d'améliorer les connaissances et de cartographier le risque d'érosion ont été signalés par plusieurs intervenants. Les municipalités, la MRC, plusieurs ministères provinciaux et fédéraux, les comités de gestion intégrée de la zone côtière, le comité ZIP Baie des Chaleurs, ainsi que quelques regroupements de citoyens ont tous signifiés ce besoin par l'entremise de leur plan d'action ou directement lors de plusieurs rencontres de travail durant les quinze dernières années (Leblanc, 2006; Fraser et Desmeules, 2006; Desmeules et Fraser, 2006; Comité ZIP Baie des Chaleurs, 1997).

Plusieurs études ont été commandées par le ministère des Transports du Québec (Leclerc *et al.*, 2008; Long, 2006; Morneau *et al.*, 2001a, 2001b et 2001c; Ministère des Transports du Québec, 2004a et 2004b), par le ministère de la Sécurité publique (Fraser et Bernatchez, 2006), par les MRC (Logimer, 1984), par des municipalités (Technisol, 2004) ou par les comités côtiers (Balard *et al.*, 2005) afin d'analyser les risques ou de proposer une marge de sécurité. Ces études ont cependant été réalisées sur des portions restreintes du territoire et n'offrent pas une méthodologie commune entre elles. La nécessité de mettre en place des marges de sécurité sur l'ensemble du territoire ne fait ainsi plus aucun doute chez l'ensemble des intervenants du milieu côtier. L'élaboration de marges crédibles nécessite cependant l'étude approfondie de la dynamique côtière et de l'évolution de la ligne de rivage. Il importe aussi d'obtenir une information très objective et scientifique qui permettra de prendre des décisions dans une optique collective. C'est pourquoi l'équipe de la Chaire en géoscience côtière de l'UQAR a été mandatée par le gouvernement du Québec pour élaborer ces marges basées sur une méthode scientifique rigoureuse. Le présent rapport présente la méthodologie et les caractéristiques géomorphologiques et hydrosédimentaires du territoire côtier de la MRC de Bonaventure et accompagne un recueil de 55 cartes des marges de sécurité en érosion côtière (Fraser *et al.*, 2012).

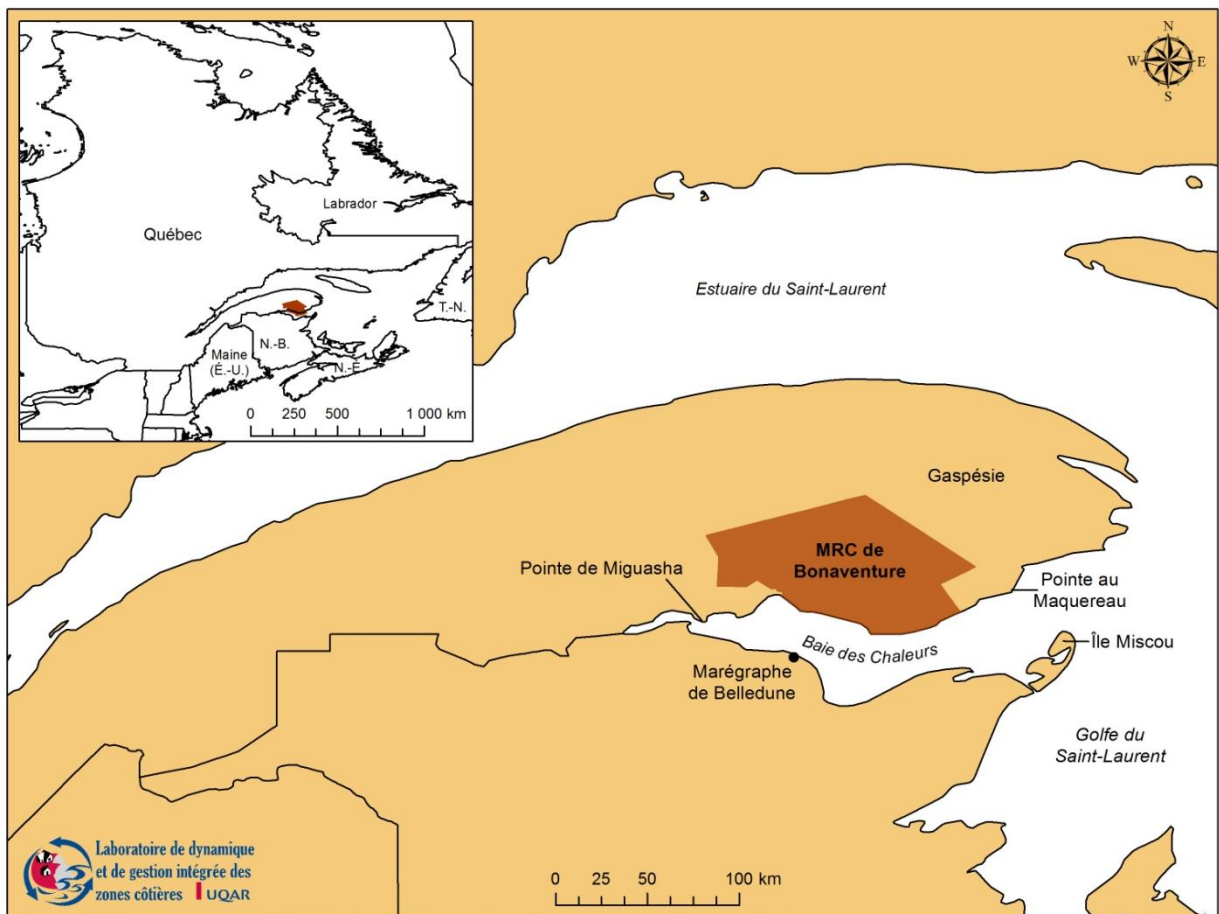
1.4 Objectifs

Les objectifs de ce projet de recherche sont :

- 1- Réaliser un portrait précis des types de côtes et des unités hydrosédimentaires de la MRC de Bonaventure;
- 2- Établir l'évolution côtière historique et récente de l'ensemble du système côtier;
- 3- Réaliser des projections futures de l'évolution côtière pour l'horizon 2060;
- 4- Proposer des marges de sécurité en érosion côtière adaptées pour chaque zone homogène.

1.5 Localisation de la zone d'étude

La MRC de Bonaventure se situe dans le sud-ouest de la Gaspésie, sur la rive nord de la baie des Chaleurs (figure 1). Le territoire de la MRC analysé dans cette étude comprend **94,5 km de côte** linéaire (figure 2) entre la rivière Cascapédia à l'ouest et les limites de Port-Daniel à l'est et comprend cinq unités hydrosédimentaires.



Source: Fond de carte BDTQ 1:20 000. Réalisation: Chaire de recherche en géoscience côtière, mai 2012.

Figure 1. Localisation de la MRC de Bonaventure

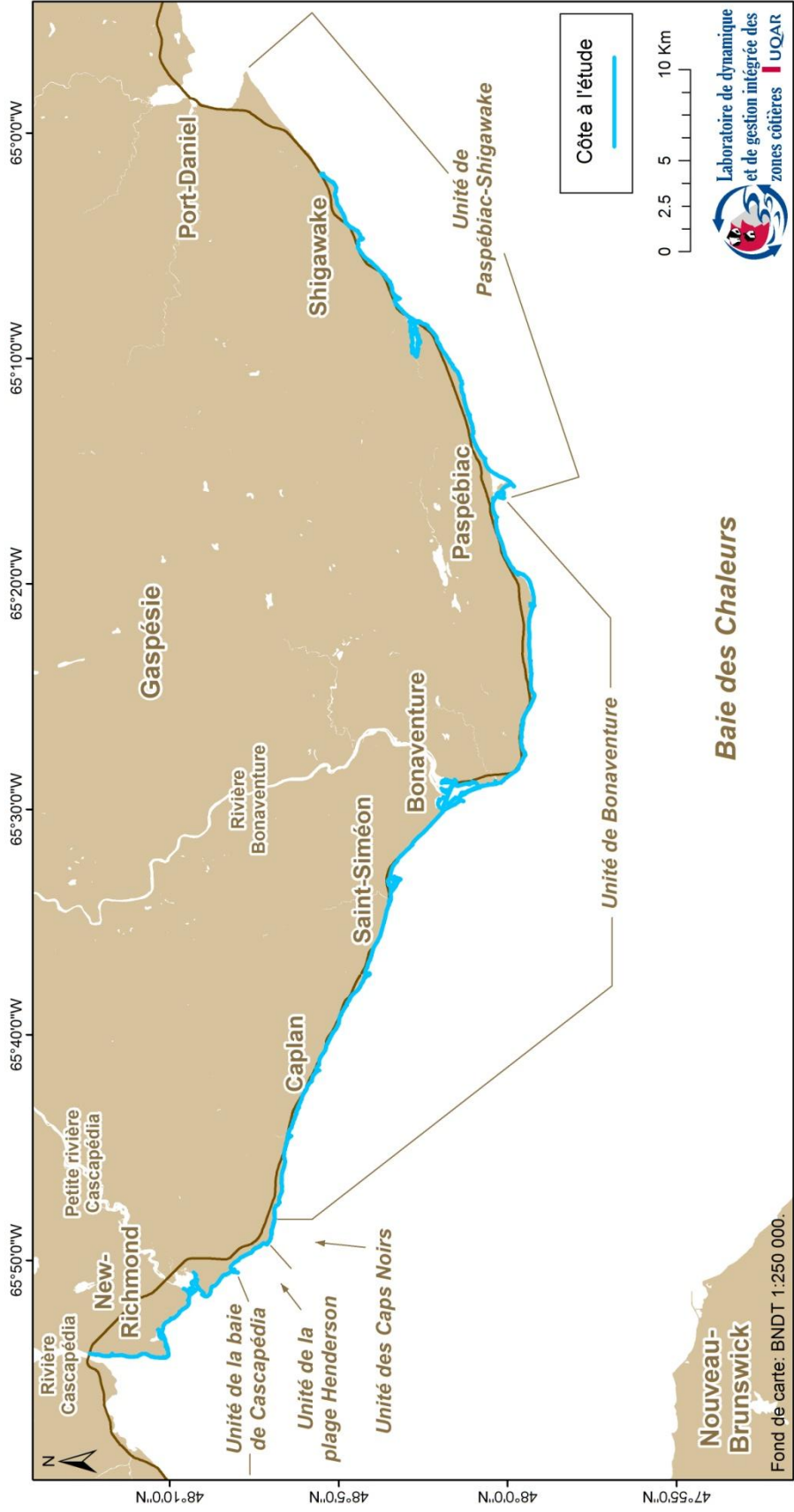


Figure 2. Territoire côtier à l'étude

2. Méthodologie

La méthodologie utilisée afin de définir des marges de recul est celle développée par la Chaire de recherche en géoscience côtière de l'UQAR. Elle consiste à calculer la largeur d'une marge de sécurité en fonction de la sensibilité, de la dynamique hydrosédimentaire et de l'évolution future de la côte. Avant d'aborder en détails la méthodologie, une explication du type de zonage est présentée.

2.1. Définition du type de zonage pour les aléas côtiers

D'un point de vue géomorphologique, la meilleure solution pour limiter les risques côtiers est une approche planifiée préventive (Klein *et al.*, 1999) et basée sur le *zonage* (Paskoff, 2001). « Dans la plupart des situations, les mesures préventives planifiées ont des coûts moins élevés à long terme et sont plus efficaces que les mesures réactives » (Lemmen *et al.*, 2008). Bien qu'il soit complémentaire avec d'autres solutions, le zonage permet ainsi de mieux limiter les coûts et il est plus efficace que les solutions mises en place en urgence.

Le principe du zonage est d'éviter la superposition des zones anthropisées avec les zones d'aléas. Il s'agit alors de créer des bandes *non aedificandi*, soit des « zones non constructibles » (Paskoff, 2004) créant ainsi une zone tampon sécuritaire entre la mer et l'arrière-côte, encore appelée « *setback* » ou « *exclusion zone* » en anglais (Clark, 1996). Les zones tampons permettent non seulement d'augmenter la résilience des écosystèmes côtiers face à des conditions météo-marines extrêmes mais aussi de permettre au système de se réajuster naturellement à la suite des événements de tempête. Plusieurs gouvernements ont déjà adopté cette approche de zonage pour la gestion de leurs zones côtières, notamment en Nouvelle-Zélande (Ballinger *et al.*, 2000), en Écosse (Ballinger *et al.*, 2000), en France (Loi dite Loi littorale, 1986) ou en Caroline du Nord (Division de l'aménagement côtier de la Caroline du Nord, 2009). La loi sur la sécurité civile du Québec de 2001 adopte une optique similaire à celles évoquées par Ballinger *et al.* (2000) qui consiste à délimiter les zones soumises aux aléas afin d'y limiter les nouvelles constructions.

Il existe généralement deux types de zonage pour réduire l'exposition aux aléas côtiers. Le premier type est un *zonage à marge fixe*. Dans ce cas, une largeur de protection est déterminée pour l'ensemble du territoire quelles que soient les particularités locales et la sensibilité du milieu aux aléas. Les marges fixes varient énormément d'un pays à un autre sans qu'il soit toujours possible de connaître les raisons de ces différences (Sorensen et McCreary, 1990). Par exemple, elles sont d'aussi peu que 8 m en Équateur et autant que 3 km en ex-URSS en passant par 100 m pour la France et la Norvège. Ce type de zonage n'a pas été retenu pour la région de la MRC de Bonaventure car le territoire n'est pas homogène et que l'érosion n'est pas constante le long des côtes. L'application d'un tel zonage a pour conséquence de soustraire des territoires non sensibles aux aléas pour le développement tout en négligeant de zoner des milieux fortement sensibles aux aléas côtiers (Drejza, 2010). C'est pourquoi le zonage d'érosion proposé ici est un *zonage à marge variable*. Ce type de zonage se base sur le fait que la côte n'est pas homogène et que les aléas côtiers peuvent donc varier en intensité. Ainsi le zonage est déterminé à partir du taux de changement à long terme de la ligne de rivage de chacun des sous-

secteurs ou zones homogènes, taux qui est multiplié par le nombre d'années considérées dans le plan de gestion. L'intensité de l'érosion côtière historique permet ainsi de prévoir quelle sera l'érosion future.

Cette méthode de zonage est proposée par plusieurs chercheurs (Pugh, 2004; Paskoff, 2004; Dean et Dalrymple, 2004; Sabatier *et al.*, 2008). Elle est également utilisée par certains gouvernements tels qu'en Caroline du Nord (Division de l'aménagement côtier de la Caroline du Nord, 2009). C'est d'ailleurs cette approche qui a été utilisée sur la Côte-Nord du Saint-Laurent dans le cadre de l'entente spécifique sur l'érosion des berges (Dubois *et al.*, 2006). Certains *inconvenients* peuvent malgré tout être imputés au zonage à marge variable car dans le modèle le plus couramment proposé, il n'y a, notamment, pas de prise en compte d'une éventuelle modification de ces taux historiques que ce soit à la hausse (à cause d'un changement de tendance ou des changements climatiques par exemple) ou à la baisse (construction d'une structure de protection rigide figeant le trait de côte ou épis bloquant le transit sédimentaire par exemple). L'utilisation d'un taux historique à long terme calculé entre seulement deux périodes comme il est souvent utilisé pour évaluer la vulnérabilité et la cartographie du risque d'érosion, peut aussi sous-estimer le risque dans les zones où le bilan historique est positif (Bernatchez et Fraser, sous presse). En effet, même dans les secteurs où le littoral est en accumulation, il y a des périodes de forte érosion associées à des événements de tempête qui peuvent faire reculer la côte jusqu'à 50 m en une décennie (Bernatchez *et al.*, 2008). Ainsi, le zonage proposé pour la MRC de Bonaventure est basé sur le taux d'érosion du **scénario futur probable** et tient davantage compte du rythme d'évolution côtière et des changements climatiques appréhendés. Ce taux varie selon les types de milieu et reflète la combinaison des différents facteurs responsables de l'érosion. Cette approche permet donc de quantifier la sensibilité des différents segments côtiers à l'érosion côtière (voir méthodologie, section 2.5). Le taux probable reflète ainsi, au mieux de nos connaissances, ce que sera l'érosion future. Il découle des différents travaux menés par le LDGIZC et la chaire de recherche en géoscience côtière depuis le rapport de Bernatchez *et al.* (2008).

L'approche utilisée pour la cartographie des marges de sécurité en érosion côtière est basée sur les éléments suivants :

- 1) type de côte;
- 2) dynamique hydrosédimentaire;
- 3) rythme de recul historique et récent de la côte;
- 4) scénario d'évolution future de la côte en fonction de zones homogènes.

2.2 Caractérisation de la côte

2.2.1 Types de côtes

Les types de côte ont été déterminés sur le terrain. Au total, neuf types de côte ont été identifiés (tableau 1).

Tableau 1. Définition des types de côte

Type de côte	Définition
Falaise meuble	Escarpement de dépôts non consolidés (argile, sable, gravier, galet, blocs). Les escarpements de moins de 5 m de hauteur sont classifiés comme basse falaise meuble.
Falaise meuble à base rocheuse	Escarpement de dépôts non consolidés (argile, sable, gravier, galet, blocs) qui superposent un affleurement rocheux sur plus de la moitié de la hauteur.
Falaise rocheuse	Escarpement de roche consolidée. Dans la MRC de Bonaventure, on retrouve principalement des roches sédimentaires et un petit tronçon de roches volcanique.
Falaise rocheuse à sommet meuble	Escarpement rocheux surmonté d'un dépôt meuble sur moins de la moitié de la hauteur et qui influence le mode de recul de la falaise.
Flèche littorale	Accumulation de sable et/ou de gravier qui s'attache à la côte et qui s'étire généralement parallèlement à la côte; l'extrémité est libre.
Terrasse de plage	Accumulation de sable et/ou de gravier littoral formée d'un replat généralement végétalisé qui est très rarement submergé par les marées. Le replat est parfois bordé sur sa partie inférieure par un talus d'érosion (microfalaise) de moins de 2 m de hauteur et sa surface est parfois affectée par l'activité éolienne. La terrasse de plage peut être suivie à l'arrière-plage d'une falaise morte ou d'un terrain plat.
Marais maritime	Les marais maritimes sont des zones d'accumulation de sédiments fins colonisées par de la végétation herbacée halophyte ou tolérante à l'eau salée.
Zone portuaire	Portion de côte sur laquelle s'attachent les infrastructures portuaires tels les quais, les rampes de mise à l'eau et les brise-lames.
Remblai	Côte artificielle qui constitue un empiètement dans le milieu marin.

2.2.2 Dynamique hydrosédimentaire

Les systèmes côtiers ont été analysés selon leurs caractéristiques hydrosédimentaires. D'abord, les dérives littorales principale et secondaire (voir encadré 2 pour les définitions) ont été déterminées par l'analyse des zones d'accumulation et des reculs récents et historiques et selon les obstacles au transit sédimentaire. Ensuite, les unités et les cellules hydrosédimentaires ont pu être identifiées.

Encadré 2 : Termes utilisés pour la dynamique hydrosédimentaire

Unité hydrosédimentaire :

- Secteur de côte dans lequel le transit sédimentaire est limité entre deux éléments morphologiques infranchissables (cap rocheux, pointes, rivière, bathymétrie).
- Les unités sont indépendantes du point de vue du transport sédimentaire, c'est-à-dire que toute modification du mouvement de sédiments dans une unité est sans conséquence directe sur les unités voisines.
- Une unité peut être subdivisée en plusieurs cellules hydrosédimentaires.

Cellule hydrosédimentaire :

- Les cellules peuvent parfois être appelées sous-unités hydrosédimentaires.
- Il s'agit de compartiments de côte ayant un fonctionnement relativement autonome par rapport aux compartiments voisins (SDAGE, 2005), mais leur limite peut parfois se déplacer ou encore la cellule peut recevoir ou perdre des sédiments au profit des cellules adjacentes selon les conditions environnementales.
- Du point de vue du transport sédimentaire, les limites de la cellule sont donc perméables par rapport à l'unité hydrosédimentaire qui est imperméable.
- Les limites correspondent généralement à une inversion des dérives littorales ou encore à un cap rocheux.

Dérive littorale principale :

- Les houles obliques, les courants (de marée et autres), les vents et le déferlement causent un courant parallèle à la côte qui déplace les sédiments côtiers (sable, gravier, galets) dans une direction privilégiée.
- Le terme désigne à la fois le *courant parallèle* à la côte et le *déplacement des sédiments* qui est causé par ce courant.

Dérive littorale secondaire :

- Générée par les mêmes facteurs que la dérive littorale principale, la dérive secondaire résulte de conditions environnementales minoritaires dans leur durée ou leur intensité.
- Les conditions de vent, de marées et de courants peuvent changer selon la saison ou les conditions météorologiques (tempête notamment).

2.3 Évolution historique de la zone côtière par photo-interprétation

2.3.1 Intégration des photographies aériennes historiques dans un SIG

Trois couvertures de photographies aériennes ont généralement été utilisées : 1934 (1 : 15 000), 1963 (1 : 15 840) et les images multispectrales acquises par l'UQAR en septembre 2007 (résolution au sol de 15 cm). Toutefois, en l'absence de la couverture de 2007 pour 3 zones homogènes sur 251, les orthophotographies aériennes de 2001 (1 : 40 000) ont été utilisées. Les images multispectrales de 2007 ont été mosaïquées de manière automatisée à l'aide du logiciel C3D Mosaic 4.2 (Geo 3D, Trimble Navigation Limited). Les mosaïques brutes ont par la suite été orthorectifiées à partir des données LiDAR de 2007, qui servent de points de contrôle. Finalement, les mosaïques brutes ont été découpées afin d'éliminer le recouvrement des lignes de vol et converties en format matriciel projeté (UTM NAD83 (SCRS) fuseau 20N), de format TIFF, à l'aide de l'extension Spatial Analyst de ArcGIS.

Les photographies de 1963 ont été numérisées et géoréférencées par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF). La numérisation des photographies a été réalisée directement à partir des rouleaux à une résolution de 1 814 dpi (Rodrigue, comm. Pers., 2012). La dimension du pixel au sol est équivalente à 21 cm. Une orthorectification a été réalisée à l'aide d'un modèle numérique d'altitude (MNA) élaboré à partir des données Laser de 2007. La précision planimétrique relative (de travail) est d'environ 30-50 cm et la précision planimétrique absolue (au niveau du terrain) est d'environ 2 à 3 mètres (Rodrigue, comm. Pers., 2012).

La couverture de 1934 a ensuite été géoréférencée dans un SIG (ArcGIS 9.2) en se basant sur les orthophotographies de 1963 en utilisant un maximum de points d'ancrage présents sur les deux couvertures aériennes et situés le plus près possible de la ligne de rivage. Seule la partie centrale des photographies aériennes a été conservée (sauf exceptions), car cela permet d'éliminer au maximum la distorsion radiale.

2.3.2 Traçage du trait de côte et de la ligne de rivage par photo-interprétation

Le trait de côte et la ligne de rivage ont été tracés sur chaque couverture de photographie. Il existe plusieurs définitions de la ligne de rivage et du trait de côte (Boak et Turner, 2005). Pour la *ligne de rivage*, nous avons choisi la ligne du niveau supérieur des hautes eaux qui correspond généralement à la limite de la végétation stable ou à la bordure d'une microfalaise d'érosion. Cette limite est plutôt constante et stable et constitue la meilleure limite à utiliser pour les côtes sans falaise (terrasse de plage, flèche littorale) dans une optique d'évolution côtière (Grenier et Dubois, 1992). Dans le cas où ces derniers types de côte sont artificialisés, la limite supérieure des ouvrages de protection est utilisée. Lorsqu'il s'agit d'une falaise, c'est la rupture de pente du haut de falaise qui est utilisée comme *trait de côte*. La figure 3 présente un schéma de la ligne utilisée pour le calcul de l'évolution côtière.

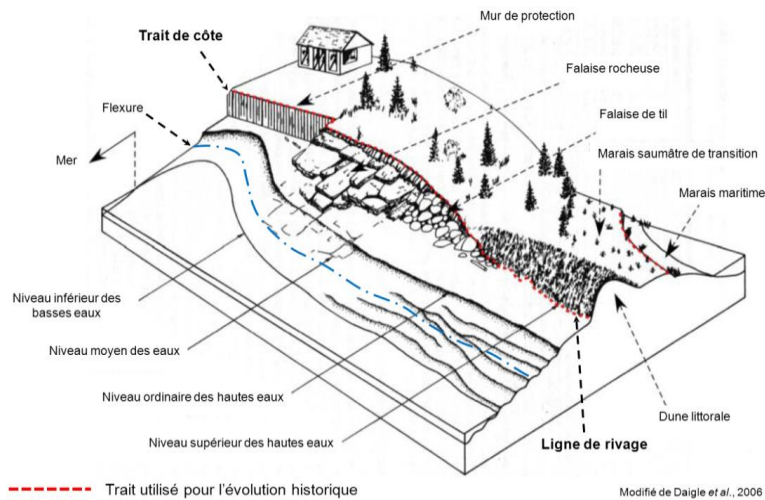


Figure 3. Tracés utilisés pour l'évolution historique du littoral selon différentes configurations de la côte (modifié de Daigle *et al.*, 2006)

La marge d'erreur des mesures sur les photographies aériennes traditionnelles est généralement de 10 m (Morton, 1978). Elle est en bonne partie associée à la largeur du trait de crayon utilisé pour tracer la ligne de rivage et elle est fonction de l'échelle des photographies aériennes utilisées. L'utilisation d'un SIG et la numérisation de la ligne de rivage directement à l'écran et à l'aide d'un pointeur numérique d'une largeur de 0,001 mm, permettent d'éliminer l'erreur associée au « trait de crayon » et de diminuer l'erreur totale à moins de 5 m (Bernatchez, 2003; Dubois *et al.*, 2006; Milligan *et al.* 2011). Une erreur supérieure à 5 m dépend alors surtout du traitement et de la qualité des images (Jolicoeur et O'Carroll, 2007).

L'équipe de la Chaire de recherche en géoscience côtière de l'UQAR a davantage raffiné cette technique afin de réduire la marge d'erreur. D'abord, le traçage sur la partie centrale des images, tel qu'indiqué au point 2.3.1, limite l'erreur dû à la déformation de l'image. Ensuite, la grande résolution des images de 2007 et la numérisation à 600 dpi ou 1 814 dpi des autres couvertures aériennes offre une grande précision et permet le traçage à l'échelle de 1:600. Enfin, le traçage à l'écran a été simultanément validé par stéréoscopie afin d'assurer la position des ruptures de pente, ce qui diminue l'erreur d'interprétation. En somme, le calcul de **l'erreur maximale totale** comprend **a)** une erreur liée à la résolution des images (0,15 m pour 2007, 0,2 m pour 1963 et 1 m pour 1934 et 2001), **b)** une erreur de géoréférencement (entre 1 m pour 2007 et 3 m pour 1963 et 1934) et **c)** une erreur d'interprétation lors du traçage (entre 0 et 0,5 m pour 1963 et 2007 et entre 1 et 2 m pour 1934). En additionnant toutes les sources d'erreur, on obtient **l'erreur maximale totale en absolue** entre deux couvertures de photographies aériennes :

$$(a) 1 \text{ m} + 1 \text{ m} + (b) 1 \text{ m} + 3 \text{ m} + (c) 0,5 \text{ m} + 2 \text{ m} = 8,5 \text{ m}$$

L'erreur absolue est souvent calculée sans tenir compte de l'erreur relative (Milligan *et al.* 2011). Dans la présente étude, le calcul des taux de déplacement a été réalisé de manière **relative** entre chaque ligne de rivage des différentes années, ce qui offre une meilleure précision que les mesures en absolues. A la suite du calcul des taux de déplacement, chaque point de mesure entre deux couvertures est validé manuellement pour y corriger l'erreur de géoréférencement absolue (voir section 2.3.3). Après cette correction, l'erreur relative associée au géoréférencement est d'au plus 1 m. **L'erreur maximale totale en relatif** est ainsi réduite à **5,5 m**. Ensuite, pour obtenir l'erreur à considérer pour les taux annuels, il suffit d'additionner les erreurs reliées aux couvertures de photos utilisées et de diviser par l'intervalle. Par exemple, **l'erreur maximale** sur la période de 1934-2007 (74 ans) se calcule comme suit :

$$(a) 0,15 \text{ m} + 1 \text{ m} + (b) 1 \text{ m} + (c) 0,5 \text{ m} + 2 \text{ m} = 4,65 \text{ m} / 74 \text{ ans} = 0,06 \text{ m/an}$$

2.3.3 Calcul de l'évolution historique

Le calcul de l'évolution historique a été réalisé à l'aide du logiciel « Digital Shoreline Analysis System », version 3.1, développé par la Commission géologique des États-Unis (USGS) (Thieler *et al.*, 2005). Ce logiciel a permis de générer de manière automatique des transects recoupant la ligne de rivage de 2007 à tous les 50 m (figure 4). Ces transects ont ensuite été ajustés manuellement pour qu'ils recoupent de manière perpendiculaire tous les tracés (traits de côte ou lignes de rivage) des différentes années. L'écart entre chacun des tracés est ensuite calculé et rapporté à une variation annuelle, ce qui génère une base de données sur l'évolution historique de la ligne de rivage ou du trait de côte pour chaque sous période puis pour la période entière.

Une étape très importante consiste à valider les taux obtenus pour chaque transect de mesure. Certains transects ont été annulés lorsque jugés imprécis ou mal positionnés par rapport à la ligne de rivage. Certains secteurs de haute falaise ont aussi dû être invalidés dû à l'imprécision causée par l'effet de parallaxe. Enfin, quelques secteurs ont été invalidés du à des erreurs de distorsion dans l'ortho rectification des images de 1963 et de 2007. Une validation manuelle a de plus été effectuée pour chaque transect afin d'ajuster au besoin les mesures automatisées. La méthode consiste à identifier des points de repère situés près de la côte, faciles à identifier et qui n'ont subi aucun déplacement entre deux couvertures de photos aériennes. Lorsqu'une erreur de déplacement est mesurée, elle est directement appliquée aux mesures afin de corriger le taux. Cette méthode constitue ainsi un excellent complément et une bonne validation de la méthode automatisée. Elle permet de réduire l'erreur de géoréférencement et réduit ainsi **l'erreur maximale totale** à 5,5 m (voir section 2.3.2).

Pour l'ensemble des côtes de la MRC de Bonaventure, 1860 transects de mesures ont été réalisés.

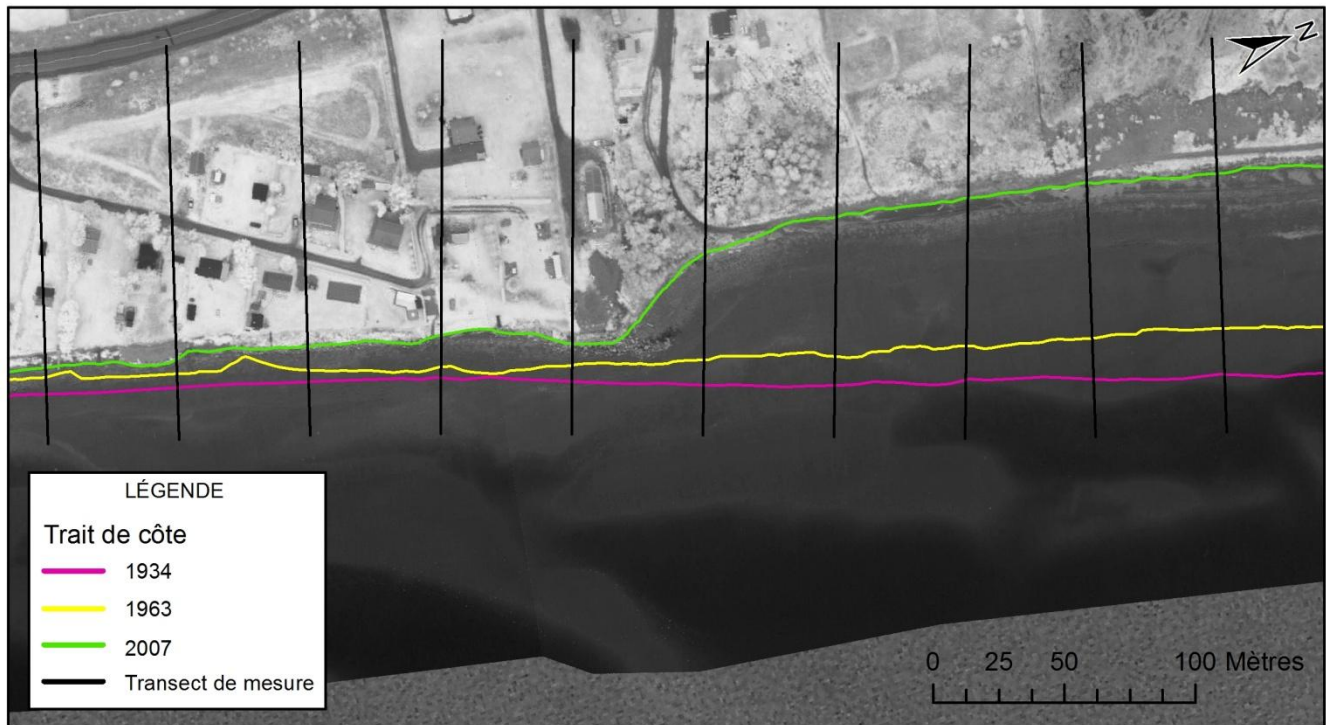


Figure 4. Méthodologie employée pour la mesure de l'érosion

2.4 Évolution récente du littoral (2005-2011)

Sur le terrain, l'érosion est mesurée par le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) à partir des stations de suivi de l'érosion. Celles-ci sont des points fixes géoréférencés qui permettent de réaliser une mesure directe au gallon entre une borne et la ligne de rivage ou le trait de côte (figure 5). Cette mesure permet de quantifier le recul ou l'avancée annuel du trait de côte avec une précision inférieure à 5 cm. Les mesures sont soit prises à partir d'éléments déjà présents (coin de bâtiments, poteaux), soit de piquets d'arpentage installés par l'équipe. Les stations de mesure de l'érosion côtière ont été implantées dans la baie des Chaleurs à partir de 2005 et ont été mesurées annuellement à l'été. Lors des mesures, d'autres observations telles que l'état de la côte, sa hauteur, sa lithostratigraphie, la largeur de la plage et la granulométrie des sédiments de plage sont notés. En 2011, l'ensemble des côtes de la MRC de Bonaventure était suivi avec 133 stations de mesures. Les données utilisées ici sont celles qui couvrent la période de 2005 à 2011. À la suite d'événements climatiques importants (comme la tempête de décembre 2010), des relevés supplémentaires de certains secteurs ont été réalisés afin de connaître avec précision l'impact de l'événement.



Figure 5. Station de suivi de l'érosion

2.5 Scénarios d'évolution future de la côte

2.5.1 Définition des zones homogènes d'évolution côtière

Les scénarios ont été calculés selon des zones homogènes le long du littoral. Ce sont des subdivisions des cellules hydrosédimentaires selon les types de côte et l'homogénéité de l'évolution côtière. Puisqu'une même cellule hydrosédimentaire peut par exemple inclure des zones de forte érosion, des zones de moindre recul ainsi que des zones d'avancée, et ce sur différents types de côte, il importe donc de définir avec précision des zones homogènes pour lesquelles seront appliquées les marges appropriées de sécurité en érosion côtière. Le calcul a été effectué pour chacune des **251** zones homogènes de la MRC de Bonaventure (tableau 2). Chaque zone homogène possède un numéro unique composé de 2 à 4 lettres pour l'unité hydrosédimentaire (permettant de se localiser) puis de 2 chiffres. La mention « CA » (côte abritée) est ajoutée au code lorsqu'il s'agit de l'arrière des marais maritimes ou dans le fond d'une lagune très bien abritée des vagues. La mention « HT » (haut de talus) est ajoutée au code lorsqu'il s'agit d'une falaise avec une terrasse de plage ou une flèche littorale à la base. Certaines zones ont été redécoupées en deux ou plusieurs sections; elles portent le même numéro mais une lettre (A, B, C, etc.) a été ajoutée au code pour les différencier.

Tableau 2. Zones homogènes pour la MRC de Bonaventure

Unité hydrosédimentaire	Code	Nombre de zones homogènes
Baie de Cascapedia (portion Bonaventure)	B-CAS	40
Plage Henderson	P-HEN	07
Caps Noirs	CN	03
Bonaventure	BON	140
Paspebiac-Shigawake	PAS	61
TOTAL		251

2.5.2 Scénarios d'évolution

Deux scénarios ont été calculés afin de projeter l'évolution du littoral. Par la suite, pour chaque zone homogène, le scénario le plus probable a été choisi en fonction de la compréhension de la dynamique côtière et des scénarios climatiques projetés (Bernatchez *et al.*, 2008 et Bernatchez *et al.*, 2010).

Scénario 1 (S1) : moyenne de toutes les mesures effectuées dans la zone homogène, soit le taux de migration moyen pour une période donnée.

Scénario 2 (S2) : moyenne de tous les taux de recul (les taux de migration positifs ou nuls sont exclus) pour la période la plus intense soit 1934-1963 ou 1963-2007 (ou 2001). La période 2005-2011 peut aussi être utilisée lorsque des stations de mesure de l'érosion sont disponibles. Le scénario 2 ne peut pas être calculé si les mesures d'érosion ne sont pas représentatives de la dynamique de la zone homogène (quelques mesures d'érosion dans un grand secteur en accumulation par exemple). Le scénario 2 implique donc une accélération de l'érosion côtière par rapport à la moyenne historique en raison des changements climatiques.

Aucun scénario : si des actions anthropiques ont modifié la côte dans la zone (remblai, zone portuaire, secteur artificialisé sur toute la période d'analyse), aucune mesure ne peut être effectuée. S'il manque des photographies aériennes ou si la distorsion des photographies est trop importante, aucune mesure historique n'a pu être faite, aucun scénario n'est donc élaboré.

Les projections d'évolution sont faites à partir de 2007 (ou 2001), année qui correspond à la date des photographies aériennes les plus récentes sur lesquelles la ligne de rivage et le trait de côte ont été tracés.

2.6 Calcul de la marge de sécurité en érosion côtière

La formule élaborée pour la marge de sécurité en érosion côtière est présentée à l'équation 1. Elle a été élaborée par le comité d'experts en érosion côtière du Québec (Bernatchez *et al.*, 2010) et la chaire de recherche en géoscience côtière de l'UQAR (Bernatchez *et al.*, 2012a et 2012b; Drejza *et al.*, 2012).

Équation 1. Marge de sécurité en érosion côtière

$$\{\text{Taux de recul du scénario le plus probable}\} \times 53 \text{ ans (59 ans pour 2001)} \\ + \{\text{Recul événementiel maximum}\}$$

Le calcul de la marge de sécurité a été effectué individuellement pour chacune des 251 zones homogènes de la MRC de Bonaventure (voir section 2.5.1). Les marges d'érosion sont arrondies aux 5 mètres.

Dans les marges de sécurité proposées dans ce travail, il est préférable d'éviter toute nouvelles constructions permanentes afin de limiter l'augmentation du risque. Cependant, certaines installations devraient faire exceptions soit parce qu'elles nécessitent la proximité de l'eau (infrastructures liées à la pêches ou au nautisme par exemple), soit parce qu'elles sont légères et déplaçables au fur et à mesure des changements côtiers (bancs, panneaux d'interprétations, barrières, petits kiosques, escaliers légers). La détermination exacte des autorisations et des exclusions est laissée à l'appréciation des autorités gouvernementales.

2.6.1 Horizon de gestion

L'horizon de temps utilisé est de **53 ans** car nous considérons l'évolution probable de la côte en 2060 (soit 53 ans par rapport aux images les plus récentes utilisées pour l'étude soit 2007). Pour 3 zones homogènes (sur 251) où l'imagerie 2007 n'était pas disponible, c'est le trait de côte de 2001 qui a été utilisé. Dans ce cas, on calcule 59 ans pour obtenir l'horizon de 2060. Cet horizon est recommandé et jugé acceptable par plusieurs auteurs car il permet d'assurer une durée de vie d'au moins 50 ans pour les futures infrastructures qui seront implantées dans la zone côtière (Clark, 1996; Winkel *et al.*, 2008). Cet horizon est également celui qui a été utilisé sur la Côte-Nord à la suite de l'entente spécifique sur l'érosion des berges (Dubois *et al.*, 2006). C'est aussi l'horizon qui a été choisi suite aux échanges avec trois municipalités du Québec dans le cadre d'une étude sur les impacts des changements climatiques sur les communautés côtières (Bernatchez *et al.*, 2008). Enfin, cet horizon a aussi été utilisé en raison de sa concordance avec la période utilisée dans plusieurs modèles de prévision climatique (Bernatchez *et al.*, 2008).

L'autorité responsable, pourrait choisir de zoner certains terrain selon un horizon plus lointain (2100 ou 100 ans par exemple) si cela s'inscrit dans son plan de développement à long terme. Il faudra alors ajuster les marges selon le même calcul (équation 1).

Au besoin, les marges ainsi établies peuvent être réajustées périodiquement (par exemple à chaque révision du schéma d'aménagement) ou au fur et à mesure des nouvelles connaissances du recul de la côte et des modifications des conditions naturelles (Paskoff, 2004; Clark, 1996). Sur la Côte-Nord, une révision des marges de sécurité en érosion au 15 ans a été proposée (Dubois *et al.*, 2006).

2.6.2 Recul évènementiel mesuré

Au taux d'érosion probable, s'ajoute le recul maximum atteint lors d'un événement selon le type de côte, ce qui correspond à une **marge de sécurité** où l'aléa est le plus sévère et où un recul risque de survenir dans un horizon très court (tableau 3). Ces valeurs de recul par type de côte sont basées sur les mesures des stations de suivi de l'érosion côtière du LDGIZC de l'UQAR (section 2.4). Cette marge de recul maximum correspond au seuil d'imminence, c'est-à-dire une limite à partir de laquelle un bâtiment peut être déclaré à risque imminent. Cette valeur est indispensable pour protéger les infrastructures d'un recul soudain et imprévisible qui pourrait se produire lors d'un seul événement.

En sécurité civile, aucun bâtiment ou infrastructure ne pourrait être toléré sous le seuil d'imminence. La bande de terrain ainsi identifiée correspond aussi à un espace de liberté, ou espace de mobilité, pour le littoral afin de faire face aux événements extrêmes et ainsi laisser la possibilité au système de se rééquilibrer naturellement (Bernatchez *et al*, 2010).

Tableau 3. Recul maximum enregistré entre 2005 et 2011 lors d'un évènement (m) selon les types de côte de la baie des Chaleurs

Type de Côte	Recul (m)
Basse falaise meuble	-3,3
Falaise meuble	-8,4
Falaise meuble à base rocheuse	-2,5
Falaise rocheuse	-3
Falaise rocheuse à sommet meuble	-3,7
Flèche littorale	-17,2
Terrasse de plage	-12,2
Marais maritime	-4,3

2.6.3 Recul évènementiel appréhendé (falaises rocheuses)

Dans le cas de certaines falaises rocheuses, une valeur d'encoche maximale a été ajoutée. Les encoches sont causées par les vagues à la base des falaises (encoches basales) ou encore causées par la météorisation ou des processus hydrogéologiques sur des couches plus friables de la paroi rocheuse (encoches sommitales ou de mi-falaise). Une encoche peut prendre plusieurs années voire plusieurs décennies à se former selon les processus et la lithologie, mais un effondrement se produit en un instant. Il est donc important d'ajouter cette valeur pour assurer une protection adéquate.

Un repérage a d'abord été fait à l'aide des photographies aériennes obliques haute résolution de 2010 acquise par la Chaire de recherche en géoscience côtière de l'UQAR afin de déterminer les secteurs où des encoches et/ou des blocs d'effondrement sont visibles. Chaque secteur a par la suite été visité sur le terrain et toutes les encoches supérieures à 1 m ont été mesurées. Les zones où les encoches sont continues, une mesure a été prise tous les 50 m. Les encoches ont été mesurées du point le plus profond jusqu'à la bordure du surplomb à l'aide d'un ruban à mesurer rigide (figure 6). La profondeur totale a été notée, mais seulement la valeur par rapport au trait de côte (bordure du sommet de l'escarpement) est utilisée pour les calculs, car dans certains cas, l'effondrement d'un surplomb n'affecte pas le trait de côte. En effet, lorsque la partie supérieure de la falaise, au-dessus de l'encoche, est en pente, l'effondrement vient simplement redonner un profil vertical à la falaise sans provoquer un recul soudain du trait de côte. Sur les 162 mesures au total, 134 ont un impact potentiel sur le trait de côte (tableau 4) et seules ces stations de mesure ont été considérées pour le calcul d'une marge de recul évènementiel.

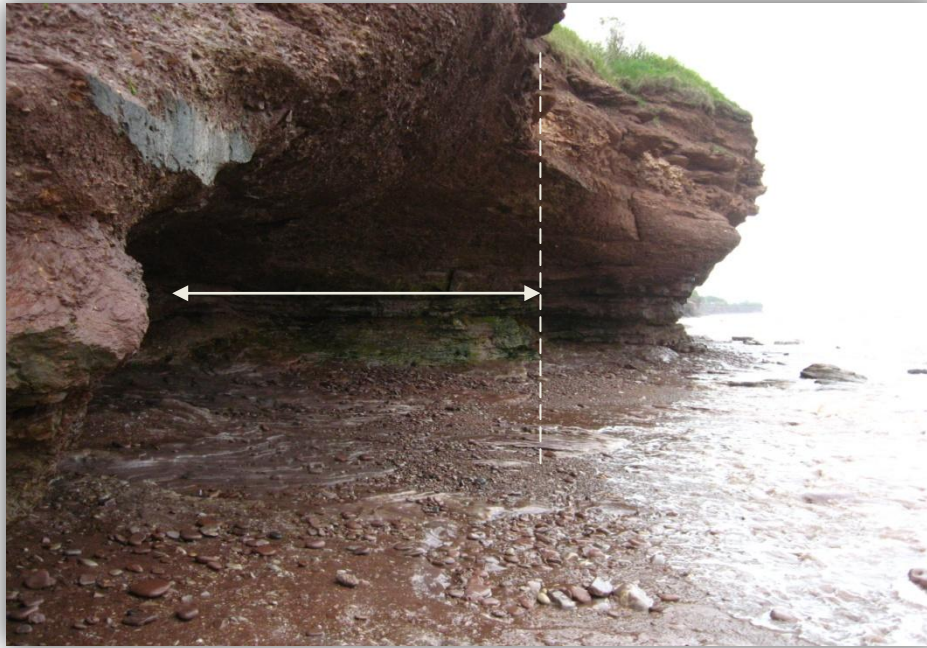


Figure 6. Exemple de mesure d'encoche à Hope Town

Pour la MRC de Bonaventure, 21 zones d'encoches ont été déterminées selon la position des stations de mesure (tableau 4). Seules les zones comprenant une valeur supérieure à 3 m ont été retenues car une valeur de recul événementiel de 3 m est déjà appliquée aux falaises rocheuses (voir section 2.6.2). Dans ces zones, le recul maximal de 3 m est ainsi remplacé par la valeur d'encoche maximale. Lorsqu'une encoche est isolée, la zone s'étend 50 m de part et d'autres de l'encoche afin d'assurer une marge de sécurité. Ces encoches isolées sont pour la plupart situées sur des pointes ou avancées rocheuses. Lorsqu'une zone comprend plus d'une station de mesure, c'est la valeur de l'encoche la plus profonde qui est retenue pour établir la valeur de la zone en raison du principe de précaution.

Tableau 4. Statistiques des mesures et des zones d'encoches pour la MRC de Bonaventure

Stations de mesure avec influence sur le trait de côte	
Nombre de station de mesures	134
Profondeur maximale	11,4 m
Profondeur moyenne des encoches	3,8 m
Écart-type	2,2 m
Zones d'encoches (égales ou supérieure à 3 m)	
Nombre de zones	21 zones variant de 61 à 2743 m de longueur
Longueur totale des zones	7,9 km
Valeur maximale pour une zone	11,4 m
Valeur moyenne des zones d'encoches	5,5 m
Écart-type	2,5 m

Lors de la prise de données, plusieurs informations ont aussi été notées et intégrées dans une base de données : lithologie de la falaise, lithologie de l'encoche, pendage, hauteur de la falaise et facteurs clés de la formation de l'encoche (vagues, météorisation, diaclases, pendage, etc.). Chaque station de mesure a été géoréférencée et quelques photographies ont été prises. Les encoches sommitales et de mi-falaise ont été estimées au mètre près lorsque l'accès n'était pas possible. La précision des mesures d'encoches basales est de 0,1m.

Les encoches mesurées dans la formation de Bonaventure se forment autant dans les unités de conglomérat, de grès et de mudrock. On retrouve aussi des encoches dans les roches volcaniques du secteur des Caps Noirs. Plus de la moitié des encoches sont basales. Dans les hautes falaises, les encoches sommitales sont plus déterminantes que les encoches basales car dans les falaises de la MRC de Bonaventure, il est peu fréquent qu'un effondrement affecte l'ensemble de la paroi d'une falaise de plus de 10 m. Les facteurs clés sont alors plutôt liés à l'altération, la météorisation ou à des processus hydrogéologiques.

2.6.4 Marge minimale de sécurité

Une marge minimale de sécurité a été déterminée pour chaque type de côte des MRC d'Avignon et de Bonaventure (tableau 5). Les données des deux MRC ont été jumelées afin de calculer des marges qui seront applicables régionalement. Ces marges ont pour fonction d'appliquer le principe de précaution dans les secteurs :

- a) qui connaissent une accumulation historique (car la tendance pourrait s'inverser à l'avenir);
- b) dans lesquels il y a un manque de données;
- c) où la marge calculée pour une unité homogène est inférieure à la marge minimale.

Pour le calcul de la marge minimale, la même équation 1 est utilisée. Le taux de recul prévu localement est par contre remplacé par la moyenne des taux d'érosion probables du type de côte considéré compris dans les deux MRC.

Tableau 5. Marges minimales de sécurité en érosion côtière pour 2060

Type de côte	Moyenne des taux de déplacement du scénario probable (m/an)*	Recul maximum enregistré	Marge minimale de sécurité en érosion côtière (arrondie au 5 m) pour 2060**
Falaise meuble	-0,30	-8,4	25
Basse falaise meuble	-0,45	-3,3	25 (30 pour 2001)
Falaise meuble à base rocheuse	-0,16	-2,5	10
Falaise rocheuse	-0,13	-3 ***	10
Falaise rocheuse à sommet meuble	-0,13	-3,7***	10
Flèche et cordon littoraux	-1,24	-17,2	85 (90 pour 2001) ou ensemble de la forme géomorphologique
Terrasse de plage	-0,54	-12,2	40 (45 pour 2001)
Marais maritime	-0,24	-4,3	15 (20 pour 2001) ensemble de la forme géomorphologique + marge arrière

* Moyenne des MRC d'Avignon et de Bonaventure ensemble.

** Lorsque l'imagerie récente (2007) n'est pas disponible, les données sont basées sur les images de 2001, ce qui augmente le nombre d'année pour la projection de 2060. Seulement 3 zones homogènes sur 251 sont concernées.

*** Pour les falaises rocheuses et les falaises rocheuses à sommet meuble, le recul maximum mesuré est remplacé par une valeur d'encoche maximale lorsque celle-ci dépasse respectivement 3 et 3,7 m.

2.6.5 Cas particuliers

Toutes les marges de sécurité en érosion côtière ont été ajustées en fonction des connaissances géomorphologiques, de l'évolution historique, des prévisions climatiques, de l'environnement et des infrastructures anthropiques qui viennent modifier les conditions hydrosédimentaires. Certains cas particuliers et exceptions sont énumérés et expliqués ci-bas. Au besoin, l'information complémentaire est inscrite dans les colonnes « commentaires » de la table d'attribut de la cartographie numérique.

Flèche littorale

Étant donné la faible topographie et la grande mobilité des flèches littorales, c'est l'ensemble de la forme géomorphologique qui fait partie de la marge de sécurité. Même si une portion large d'une flèche littorale montre parfois une étonnante stabilité ou même de l'accrétion, d'autres portions de la

flèche sont minces et sont sujettes à des brèches de tempête, ce qui peut soudainement isoler un cordon littoral et ainsi fragiliser l'accès.

Dans la MRC de Bonaventure, il existe une exception de flèche littorale très stable : la pointe de Beaubassin. C'est la flèche littorale ouest du barachois de Bonaventure, sur laquelle sont implantés le camping municipal et la zone portuaire. Cette forme s'est élargie jusqu'à presque tripler sa largeur entre 1934 et 2007 avec un taux d'accumulation historique de 1,49 m/an. C'est la construction du quai au début du siècle qui a permis cette accumulation. Donc, au lieu d'appliquer une marge variable qui comprend l'ensemble de la forme géomorphologique, c'est plutôt la marge minimale des flèches littorales de 85 m qui est appliquée sur la côte extérieure et la marge minimale des côtes basses de 15 m qui est appliquée sur la côte intérieure abritée.

Marais maritime et côte abritée

Les marais maritimes, par définition, sont entièrement situés dans la zone de marée. L'ensemble de la forme, incluant les schorres inférieur et supérieur, est considérée inconstructible. La portion amont des marais dans les estuaires et les barachois, zone souvent caractérisée par plusieurs chenaux, est plus affectée par une dynamique d'inondation et de submersion que par des processus d'érosion littorale. Ces systèmes sont souvent complètement abrités par des flèches ou des cordons littoraux. Aucune caractérisation détaillée n'a été effectuée pour ces secteurs. Cependant, par mesure de précaution advenant l'érosion complète du marais, une marge minimale de sécurité est ajoutée en bordure du marais et ce sans égard au type de côte qui borde le marais. Lorsqu'il s'agit d'une côte basse, on applique la plus petite marge minimale des côtes basses soit 15 m. Lorsqu'il s'agit d'une falaise (meuble ou rocheuse), on applique la plus petite marge minimale des falaises, soit 10 m. Cette marge est appliquée le long d'un tracé qui suit le début de la végétation arbustive à l'arrière du marais. Ces marges minimales sont aussi appliquées lorsqu'une côte est complètement abritée (ex. fond d'une lagune fermée) et n'est pas directement exposée aux vagues. Dans la cartographie, la mention « CA » (côte abritée) est ajoutée au code de l'unité. Les schorres supérieur et inférieur ainsi que la slikke ont été ombragés sur les cartes finales à titre indicatif et ne constitue donc pas une marge en soi. Ils sont de toute manière inconstructibles car ils font partie du domaine hydrique.

Marais maritime protégé artificiellement

Trois zones de marais maritime sont protégées artificiellement par un remblai de route qui traverse l'estuaire. Il s'agit du marais situé à l'embouchure de la Petite rivière Cascapédia, celui situé à l'embouchure de la rivière Bonaventure et celui situé à l'embouchure de la rivière Paspebiac. Puisque cette infrastructure limite les processus côtiers et en particulier l'action des vagues, aucune marge de recul n'a été ajoutée derrière le marais.

Talus côtiers

Il est à noter que pour des raisons de clarté cartographique, la pente des talus côtiers n'est pas incluse dans les marges de sécurité qui sont cartographiées à partir du trait de côte (c'est à dire le sommet du talus). Cependant, il est évident que ces secteurs sont soumis à des aléas et ne devraient pas abriter d'infrastructures. En fait, tout terrain qui se situe du côté mer de la ligne tracée pour l'évolution historique (trait de côte ou ligne de rivage), est considéré inconstructible que ce soit le talus côtier, un

talus d'éboulis, un lobe de glissement de terrain, un ravinement, un replat à son pied (haut de plage ou terrasse de plage), un marais maritime ou autre.

Zones portuaires

Dans les zones portuaires et les havres de pêche les marges de sécurité sont adaptées à la condition particulière de ces environnements très fortement anthropisés. Lorsque toute la zone est artificielle, alors aucune marge n'est proposée. Par contre si des terrains naturels subsistent dans les havres de pêche alors une marge leur sera appliquée selon le type de côte et les données d'érosion disponibles.

Terrasse de plage au pied d'une falaise morte

Lorsqu'il y a présence d'une terrasse de plage de moins de 40 m (ou 45 m pour la référence 2001) (marge minimale) au pied d'une falaise morte ou encore si la prévision pour 2060 indique l'érosion complète de celle-ci, une marge de sécurité est également appliquée au sommet de la falaise. La marge au sommet dépend du type de côte. Elle correspond à 53 ans d'érosion mais sans inclure de recul évènementiel car la terrasse de plage joue un rôle de protection du pied du talus contre un évènement extrême. Si la terrasse de plage n'est pas suffisamment large pour assurer une protection contre les évènements extrêmes, alors le recul évènementiel est ajouté dans la marge au sommet du talus. Dans la cartographie, la mention « HT » (haut de talus) est ajoutée au code de l'unité.

Ouvrages de protection

Dans les zones où des ouvrages de protection sont en place depuis longtemps et qu'il n'a pas été possible de calculer un scénario probable, c'est la marge minimale du type de côte qui est appliquée. Les ouvrages résistent généralement bien contre les événements réguliers mais les événements de tempête des dernières années ont permis de constater que même les protections les plus fortes peuvent céder et entraîner des reculs majeurs. Les reculs sont même parfois plus importants aux endroits où un mur ou un enrochement a cédé. Par principe de précaution, une marge minimale de sécurité a ainsi été attribuée aux zones avec des ouvrages de protection et ce sans égard aux types de protection.

Remblai

Quelques tronçons de côte forment des avancées artificielles sur la mer. Aucune mesure d'évolution n'a pu être calculée sur ces types de côte car ils sont parfois récents et sont entretenus rapidement lorsque l'érosion les affectent. Il existe trois situations particulières dans la MRC de Bonaventure :1) pour les remblai inférieurs à 5 m de hauteur, c'est la marge minimale des basses côtes qui leur a été attribuée (marge de 15 m); 2) pour les remblais inférieurs à 5 m de hauteur et qui forment une digue entourée d'eau, comme c'est le cas pour des tronçons de route qui traversent une baie, c'est une marge variable qui couvre l'ensemble de la forme qui est appliquée et 3) un seul remblai de plus de 5 m de hauteur a été identifié dans le secteur de la plage Burton (P-HEN-05B) pour le passage de la voie ferrée. La plus petite marge minimale de falaise (10 m) lui a été attribuée car cette unité comprend une base rocheuse qui offre plus de résistance contre l'érosion des vagues et que la marge appliquée sur le haut de talus couvre toute la largeur de la voie ferrée et de son emprise.

3. Description du territoire

3.1 Contexte physique

Le relief côtier de la MRC de Bonaventure est principalement caractérisé par une large plateforme de roches sédimentaires présentant des moyennes et hautes falaises. Ces roches font partie de la Formation de Bonaventure qui date du Carbonifère et elles sont composées d'assemblages de conglomérats massifs avec des grès, siltstone et mudstone rouges plus finement stratifiés (Rust *et al.*, 1989; Jutras, 2001; Lachambre et Brisebois, 1990). Le pendage des couches sédimentaires est horizontal et sub horizontal.

Le relief est plus accentué dans le secteur des Caps Noirs, entre New-Richmond et Caplan, où l'on retrouve six formations du Groupe de Chaleurs composées d'assemblages de sédiments marins (grès, conglomérat, mudstone, siltstone et calcaire,) et de roches volcaniques (lave mafique, brèche et conglomérat volcanique) qui date du Silurien (Lachambre et Brisebois, 1990; Brisebois *et al.*, 1991; MERQ, 1987; Gosselin, 1985; Bourques et Lachambre, 1980). Le pendage des couches sédimentaires est sub vertical et c'est pourquoi plusieurs formations se succèdent le long du littoral. Trois formations se situent à l'ouest du quai de New-Richmond et les trois autres à l'est du quai. Le toponyme Caps-Noirs tire d'ailleurs son origine de la couleur foncée des roches volcaniques que l'on retrouve dans l'unité hydrosédimentaire des Caps Noirs (figure 2 pour localisation). Des roches siluriennes (conglomérat et mudrock) à pendage sub vertical sont aussi présentes à New-Carlisle immédiatement à l'est de la vaste terrasse de plage.

Sur l'ensemble de la zone côtière de la MRC, le roc est principalement recouvert de minces dépôts glaciaires et de sédiments littoraux anciens (sable et gravier) (Veillette et Cloutier, 1993).

Trois rivières d'importance se jettent à la mer dans la MRC : la rivière Cascapédia qui forme un vaste estuaire à son embouchure, la Petite rivière Cascapédia et la rivière Bonaventure. Ces deux dernières présentent d'importants milieux humides côtiers à leur embouchure. La zone côtière est diversifiée en raison de plusieurs facteurs tels que les conditions climatiques, les conditions marines, la composition du littoral ainsi que de nombreux processus géomorphologiques qui ont modelé et continuent à modifier le relief côtier.

3.2 Conditions marines

Bien que sa situation géographique dans la baie des Chaleurs limite l'effet des vagues de tempêtes venant du golfe du Saint-Laurent, les côtes sont tout de même soumises à des conditions climatiques et océanographiques qui contribuent à l'évolution parfois rapide du littoral. La zone côtière de la MRC de Bonaventure s'inscrit dans un plus grand système hydrologique et océanographique. Baignée par les eaux du golfe du Saint-Laurent, la baie des Chaleurs se situe entre la pointe de Miguasha à l'ouest et la pointe au Maquereau à l'est. Ce plan d'eau a une largeur moyenne de 30 km. La profondeur de la baie varie entre 25 m au large du secteur Carleton et 90 m entre la pointe au Maquereau et l'île Miscou au Nouveau-Brunswick.

La marée dans la baie des Chaleurs est de type mixte semi-diurne, c'est-à-dire deux marées hautes et deux marées basses par jour. Durant les grandes marées, la mer peut atteindre jusqu'à 2,3 m de hauteur à Paspébiac. Le tableau 6 présente les caractéristiques complètes des marées pour Paspébiac. Le marnage augmente légèrement de l'est vers l'ouest du territoire par l'effet d'entonnoir de la baie. Les marées moyennes ont ainsi un marnage de 1,5 m à Paspébiac et de 1,7 à New-Richmond.

Tableau 6. Caractéristiques des marées pour Paspébiac

<i>Type de marée</i>	Mixte semi-diurne		
<i>Marnage</i>	Marée moyenne	1,5 m	
	Grande marée	2,2 m	
<i>Hauteur de marée</i>	Pleine mer supérieure	Marée moyenne	1,8 m
		Grande marée	2,3 m
	Basse mer inférieure	Marée moyenne	0,3 m
		Grande marée	0,1 m
<i>Niveau moyen de l'eau</i>	1,0 m		
<i>Vitesse maximale des courants de marée</i>	Flot	1,0 nœuds	
	Jusant	1,0 nœuds	

Source : Pêches et Océans Canada, 2012

Durant les hivers froids, le secteur est recouvert de glace de la mi-janvier à la fin-mars. La présence de glace ralentit l'action des vagues et protège la zone littorale. Avec les températures hivernales plus clémentes des dernières années, la banquise tarde à se former, un phénomène attestant du réchauffement climatique global.

La baie des Chaleurs, étant relativement étroite et échanquée, limite la propagation des fortes houles du golfe du Saint-Laurent. Le régime des houles à l'entrée de la baie des Chaleurs est caractérisé par des houles significatives moyennes de 2,1 m et de 9 secondes de période (Long, 2006). Par diffraction, elles peuvent pénétrer dans la baie mais sont atténuées au niveau du littoral de la MRC de Bonaventure. Le littoral à l'est de Bonaventure est plus affecté par les vagues tandis que l'extrémité ouest, dans la baie de Cascapédia, est plus protégée.

3.3 Variation du niveau marin relatif

La variation du niveau marin relatif est le principal facteur qui influence l'évolution à long terme des littoraux alors que les événements de tempête provoquent des changements morphosédimentologiques soudains et importants à la côte.

Les données disponibles pour la baie des Chaleurs proviennent de la station marégraphique de Belledune sur la rive sud de la baie des Chaleurs et indiquent une hausse du niveau de la mer de 1,09 mm/an (Koohzare *et al.*, 2006). Les modèles géophysiques les plus récents indiquent une subsidence de 1 à 2 mm/an pour la région d'étude (Koohzare *et al.*, 2008). Dans le contexte où les études les plus récentes indiquent une hausse du niveau marin mondial de 0,5 à 1,8 m pour 2100 (Dalrymple *et al.*, 2012; Vermeer et Rahmstorf, 2009; Pfeffer *et al.*, 2008; Allison *et al.*, 2009), le littoral de la baie des Chaleurs y sera donc particulièrement sensible.

3.4 Conditions climatiques

De façon générale, les conditions climatiques qui prévalent dans la baie des Chaleurs sont caractérisées par le microclimat le plus clément de la péninsule gaspésienne. Les eaux relativement chaudes et peu profondes de la baie des Chaleurs, comparativement à celles du golfe du Saint-Laurent, adoucissent le climat en bordure des côtes. Le secteur reçoit un nombre d'heures d'ensoleillement annuel qui se compare avantageusement à des régions situées plus au sud; il bénéficie ainsi d'une longue saison de croissance (Gouvernement du Québec, 1977). La MRC de Bonaventure fait d'ailleurs partie de la région écoclimatique tempérée froide (Gouvernement du Canada, 1989) qui forme une bande entre les Grands Lacs et les provinces maritimes, incluant la région de Montréal.

Selon les données climatiques de la station météorologique de New-Carlisle, la température moyenne annuelle est de 3,7°C (selon la normale 1971-2000) avec des moyennes d'été entre 11 et 15°C et des moyennes d'hiver entre -7 et -15°C (Environnement Canada, 2012). Pour fins de comparaison, les données de la station de Gaspé indiquent une moyenne annuelle est de 2,9°C. La pointe et le nord de la Gaspésie font d'ailleurs partie d'une autre région écoclimatique : la région boréale (Gouvernement du Canada, 1989).

La moyenne annuelle de précipitation entre 1971 et 2000 est de 1156 mm, ce qui est supérieur à la station de Nouvelle (953 mm), semblable à la station de Gaspé (1117 mm) et inférieur à la station de Québec (1230 mm) (Environnement Canada, 2012).

Les vents dominants sont d'ouest avec une variation saisonnière du sud-ouest l'été et du nord-ouest l'automne et l'hiver. Les vents de tempête proviennent généralement de l'est et du sud-est et les vents les plus forts sont enregistrés en novembre et décembre.

3.5 Caractéristiques des côtes

La MRC de Bonaventure compte huit types de côte excluant les côtes artificielles (voir tableau 1 pour définitions). Les falaises rocheuses dominent nettement le littoral en comptant 43% de la longueur totale de côte et, en incluant les falaises rocheuses à sommet meuble et les falaises meubles à base rocheuse, elles atteignent 50%. La formation de Bonaventure ainsi que les roches volcaniques des Caps Noirs composent ainsi la moitié des côtes de la MRC. Les falaises meubles, incluant les basses falaises meubles, comptent pour 17% des côtes. Il y a donc 67% du littoral composé de falaises (forme d'érosion) et 29% qui représente des côtes caractérisées par des formes d'accumulation. Ces côtes d'accumulation (flèches littorales, terrasse de plage, marais maritime) présentent cependant des signes de recul car seulement 7% de l'ensemble des côtes est stable ou en accumulation (figure 8).

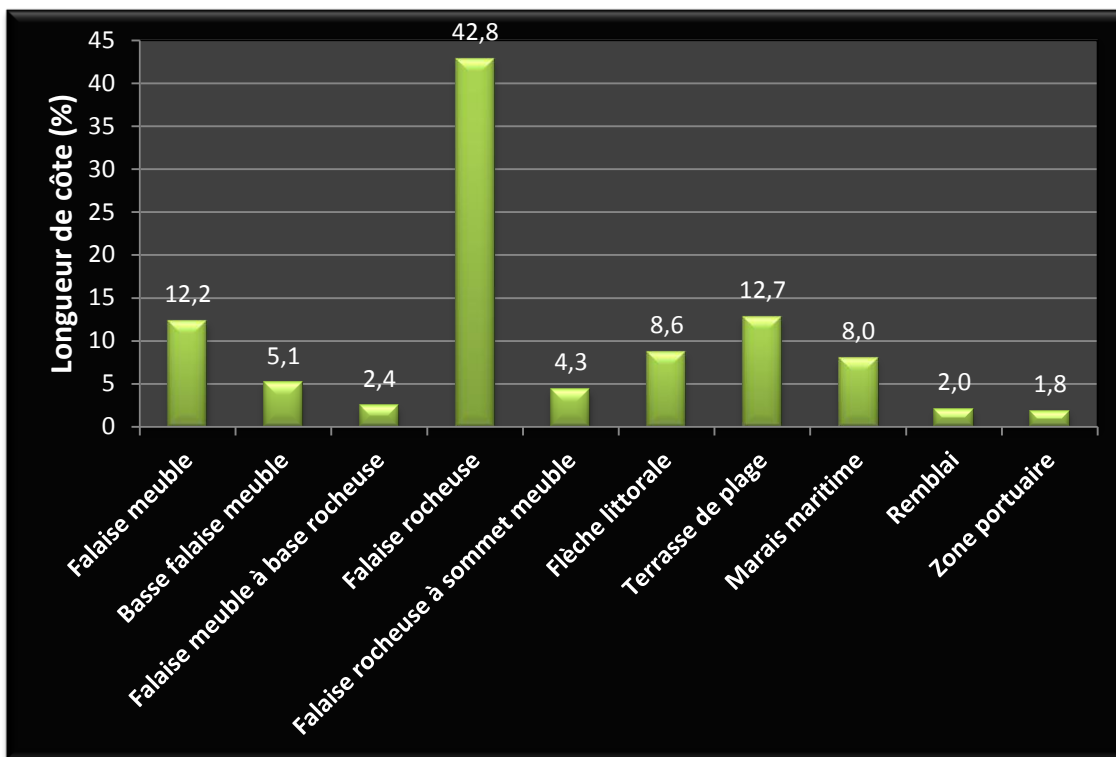


Figure 7. Proportion des types de côte de la MRC de Bonaventure

Les côtes sont fortement artificialisées (18%), ce qui est un indicateur de l'importance de la problématique de l'érosion côtière. En jumelant les côtes actives (53%) aux côtes artificielles, on constate que l'aléa d'érosion côtière est important pour 71% de la côte. Les côtes semi-végétalisées (22%) présentent une certaine stabilité malgré quelques processus actifs.

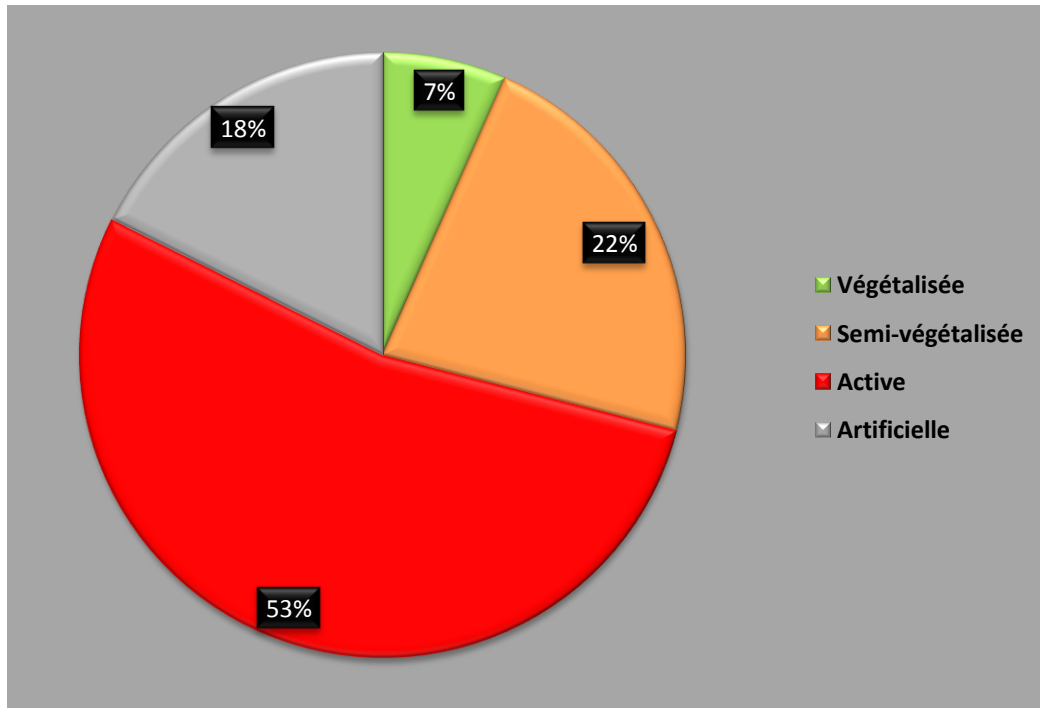


Figure 8. État de la côte de la MRC de Bonaventure.

Les calculs sur la proportion des types de côte ont été faits à partir d'un tracé détaillé de la ligne de rivage (pour les côtes basses) et du trait de côte (pour les côtes à falaise). Pour les marais maritime, c'est le front du schorre et non l'arrière du marais qui a été comptabilisé. Pour les flèches littorales, seulement le côté extérieur a été pris en compte. La longueur des zones portuaires ne compte pas le pourtour des infrastructures mais plutôt la portion de littoral linéaire sur lequel s'appuient les infrastructures.

4. Portrait des unités hydrosédimentaires

Le territoire comprend cinq unités hydrosédimentaires. Pour chacune, une carte et une description sont présentées afin de préciser le portrait du territoire. Les principaux faits concernant la dynamique sédimentaire et les types de côtes sont présentés, ainsi que toute autre information utile pour comprendre la gestion côtière et les impacts des actions anthropiques à la côte. Étant donné le transit sédimentaire quasi-inexistant entre les unités, chacune peut être vue comme un secteur de gestion différent. Par contre, au sein de chaque unité hydrosédimentaire, les actions faites en un point peuvent, par le biais de la dynamique hydrosédimentaire (dérives littorales notamment), entraîner des répercussions sur le reste de l'unité. C'est pourquoi la gestion du risque, l'analyse et la mise en œuvre de solutions d'adaptation nécessitent une approche basée sur les unités et les cellules hydrosédimentaires (SDAGE, 2005; De la Vega-Leinert et Nicholls, 2008; Dawson *et al.*, 2009).

4.1 Unité hydrosédimentaire de la baie de Cascapédia

L'unité de la baie de Cascapédia s'étend du quai de Carleton au quai de New-Richmond et comprend trois cellules hydrosédimentaires (figure 9). À noter que pour des fins administratives, le portrait de la MRC de Bonaventure ne comprend pas les cellules du barachois de Carleton et de Maria-Gesgapegiag qui font partie de la MRC d'Avignon. Les informations relatives à ces cellules se trouvent dans le rapport qui couvre la MRC d'Avignon (Bernatchez *et al.* 2012b).

La cellule de New-Richmond s'étend sur 15 km de côte entre l'embouchure de la rivière Cascapédia à l'ouest et le quai de New-Richmond à l'est. La dérive littorale se dirige vers l'est sur l'ensemble de la cellule jusqu'à l'embouchure de la Petite rivière Cascapédia. Cependant, entre cette dernière et le quai de New-Richmond, la dérive est de direction ouest. Il y a donc une convergence des dérives vers l'embouchure de la Petite rivière Cascapédia.

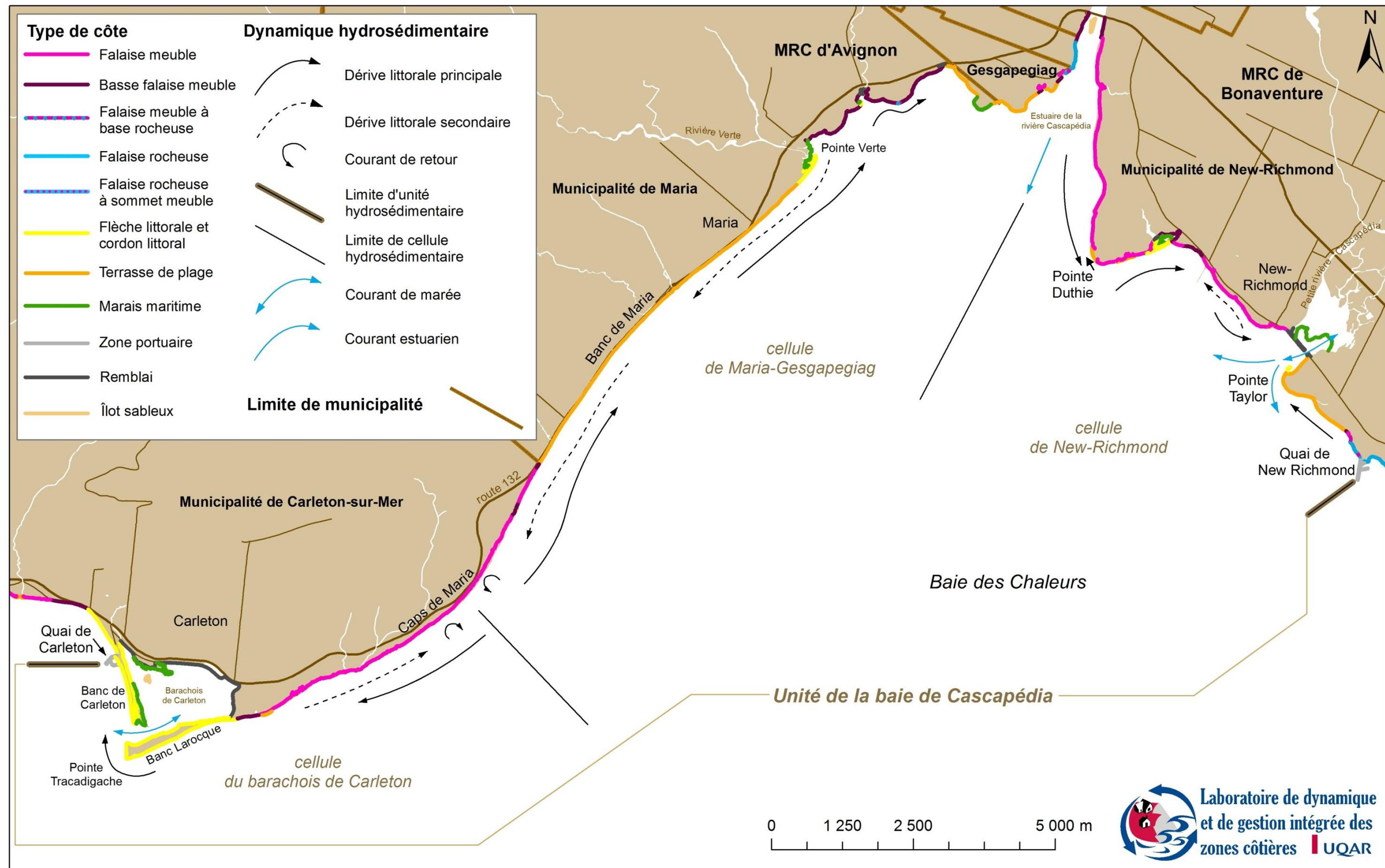
Le principal cours d'eau est la rivière Cascapédia, qui se situe à l'extrémité ouest de la cellule. Bien qu'il s'agisse de la plus grande rivière en Gaspésie et qu'un grand delta est formé à son embouchure, la dynamique et la profondeur des chenaux sur le sommet du delta contribuent à transporter les sédiments au large, au front du delta, sans que les côtes avoisinantes puissent être alimentées directement. Le delta de la Petite rivière Cascapédia est beaucoup moins vaste mais présente une plus grande dynamique avec des chenaux mobiles, des dunes sous-marines et des barres d'avant-côte qui migrent au front du delta. Un cordon littoral est aussi très dynamique au large de la pointe Taylor et sa forme est en constante évolution.

Les taux d'érosion sont importants sur la falaise meuble de la pointe Duthie et atteignent jusqu'à -0,48 m/an sur la période 1934-2007. Les sédiments érodés profitent autant à la flèche littorale du barachois de la pointe Duthie qu'à la terrasse de plage située immédiatement à l'ouest de la pointe. On note effectivement des taux d'accumulation historiques jusqu'à 0,89 m/an sur la flèche et jusqu'à 0,39 m/an sur la terrasse de plage.

Près de 46% du littoral est composé de falaises meubles (tableau 7). Elles sont concentrées à l'ouest de la Petite rivière Cascapédia. Les terrasses de plage sont le deuxième type de côte en importance avec 20% et se retrouvent principalement dans un long tronçon à l'est de l'embouchure de la Petite rivière Cascapédia. Les marais viennent ensuite avec 16% de la côte et se distribuent en deux secteurs, soient le barachois de la pointe Duthie et l'embouchure de la Petite rivière Cascapédia. Les autres types de côte occupent ensemble 18% de la côte et sont distribués en très petits tronçons.

Tableau 7. Types de côte de l'unité de la baie de Cascapédia - Cellule de New-Richmond

Type de côte	km	%
Falaise meuble	7,00	45,5
Basse falaise meuble	0,88	5,7
Falaise meuble à base rocheuse	0,12	0,8
Falaise rocheuse	0,30	1,9
Falaise rocheuse à sommet meuble	0,05	0,3
Flèche littorale	0,67	4,4
Terrasse de plage	3,07	19,9
Marais maritime	2,49	16,2
Zone portuaire	0,14	0,9
Remblai	0,66	4,3
TOTAL	15,38	100



Source: Fond de carte BDTQ 1:20 000. Réalisation: Chaire de recherche en géoscience côtière, août 2012.

Figure 9. Unité hydrosédimentaire de la baie de Caspédia

4.2 Unité hydrosédimentaire de la plage Henderson

L'unité de la plage Henderson compte seulement 3 km de côte et constitue en soit une cellule hydrosédimentaire. Elle est limitée à l'ouest par le quai de New-Richmond et à l'est par la pointe rocheuse des Caps Noirs (figure 10). Bien que peu perceptible, la dérive littorale se dirige vers l'est sur l'ensemble de l'unité. Un seul petit ruisseau se jette à la mer, environ au milieu de l'unité, à côté de l'accès public de la plage Henderson et n'est pas assez compétent pour former un delta. Les plages au pied des falaises sont ainsi très minces et étroites.

La côte est constituée d'une falaise rocheuse à 89% (tableau 8). Près de 10 % a une composante meuble et une composante rocheuse et enfin un remblai de 50 m de longueur occupe une petite vallée pour le passage du chemin de fer. Les formations rocheuses présentent toutes un pendage sub vertical.

Tableau 8. Types de côte de l'unité de la plage Henderson

Type de côte	km	%
Falaise meuble à base rocheuse	0,13	4,3
Falaise rocheuse	2,67	88,8
Falaise rocheuse à sommet meuble	0,16	5,3
Remblai	0,05	1,7
TOTAL	3,01	100

4.3 Unité hydrosédimentaire des Caps Noirs

Cette unité ne comprend qu'une cellule hydrosédimentaire. C'est un tronçon de 2 km de falaise rocheuse volcanique sans estran et sans cours d'eau qui s'étend à l'est de la pointe rocheuse des Caps Noirs (figure 10). Il n'est donc pas possible de déterminer la dérive littorale de ce segment. C'est le seul segment de roche volcanique de la MRC qui est très distinctif par la couleur foncée des parois, par la texture poreuse de la roche et par le trait de côte en dents de scie.

4.4 Unité hydrosédimentaire de Bonaventure

L'unité de Bonaventure est la plus longue de la MRC et s'étend sur 59 km entre les Caps Noirs et le quai de Paspébiac (figures 10 et 11). Elle comprend 6 cellules hydrosédimentaires et, malgré quelques zones de dérive secondaire ponctuelle vers l'ouest à Bonaventure et à New-Carlisle, la dérive littorale principale est de direction est pour toutes les cellules. Ainsi, toutes les structures anthropiques perpendiculaires à la côte (quai, brise lame, épis rocheux) créent une accumulation du côté ouest formant souvent une terrasse de plage et une accélération de l'érosion dans la zone immédiate à l'est. Ce sont d'ailleurs ces structures anthropiques qui délimitent toutes les cellules.

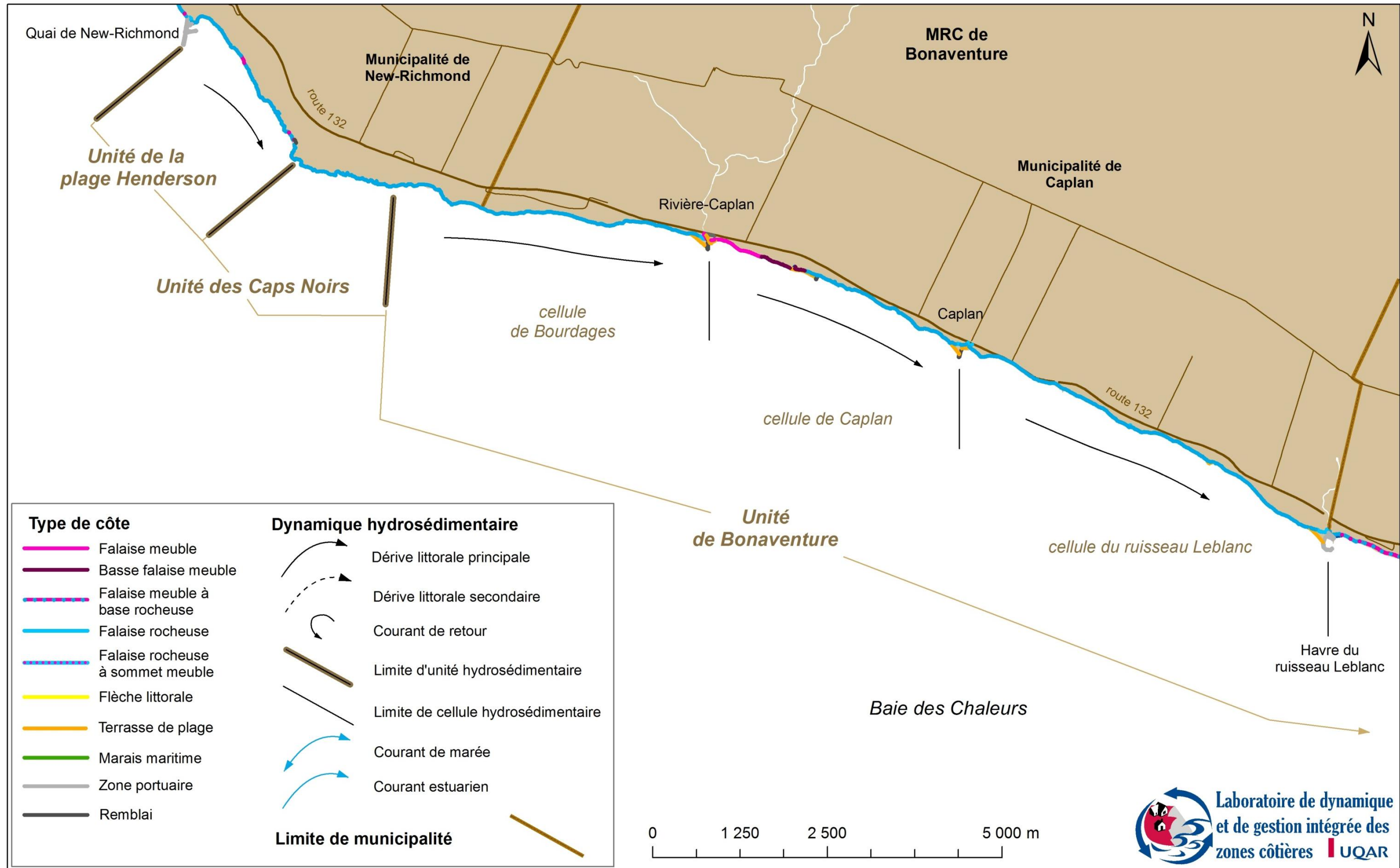
Au barachois de Bonaventure et au site de l'Île de Saint-Siméon, un quai a anciennement été construit au bout d'une flèche littorale et il demeure aujourd'hui un épis rocheux pour maintenir la dynamique. Ces structures ont eu pour effet de créer une forte accumulation sur la flèche jusqu'à tripler la largeur dans le cas de la pointe de Beaubassin à Bonaventure. Cependant, les côtes meubles en érosion qui ont alimenté ces flèches littorales sont aujourd'hui fortement artificialisées, ce qui limite l'apport sédimentaire. En effet, sur les 13,47 km entre le havre du ruisseau Leblanc et la pointe de Beaubassin, on compte 58% de côte artificielle.

La rivière Bonaventure est le seul cours d'eau d'importance sur le territoire. A son embouchure, elle a formé un large delta émergé à marée basse sur lequel on retrouve un marais maritime et de nombreux chenaux. Deux flèches littorales abritent une lagune formant le barachois de Bonaventure et le courant de la rivière, jumelé aux courants de marée, maintient un goulet entre l'extrémité des deux flèches. On compte aussi quatre cours d'eau secondaires sur le territoire qui forment un petit delta à l'embouchure : la rivière Caplan, le ruisseau Leblanc, la rivière Saint-Siméon et le ruisseau Cullens à Bonaventure-Est. On retrouve aussi une dizaine de petits ruisseaux sans accumulation notable à l'embouchure, sauf parfois un petit delta sur l'estran.

L'unité de Bonaventure compte 8 types de côte naturelle (tableau 9). Les **falaises rocheuses** dominant nettement avec 38% de la longueur totale. Seules les cellules de Saint-Siméon et de Bonaventure ne comptent aucune falaise rocheuse ainsi qu'une portion de côte à New-Carlisle. Les **terrasses de plage** se présentent principalement en deux longs tronçons à Bonaventure et à New-Carlisle et en plusieurs très petits tronçons, souvent des terrasses créent par la présence d'une structure perpendiculaire à la côte. Les **falaises meubles** se retrouvent à trois endroits. D'abord dans la cellule de Caplan, immédiatement à l'est de la plage de la Rivière, ensuite devant le village de Saint-Siméon et enfin à Bonaventure-Est incluant une portion de la côte intérieure du barachois de Bonaventure. On compte quatre **flèches littorales** qui totalisent plus de 5 km de longueur: une au site de l'Île, deux au barachois de Bonaventure et une à New-Carlisle.

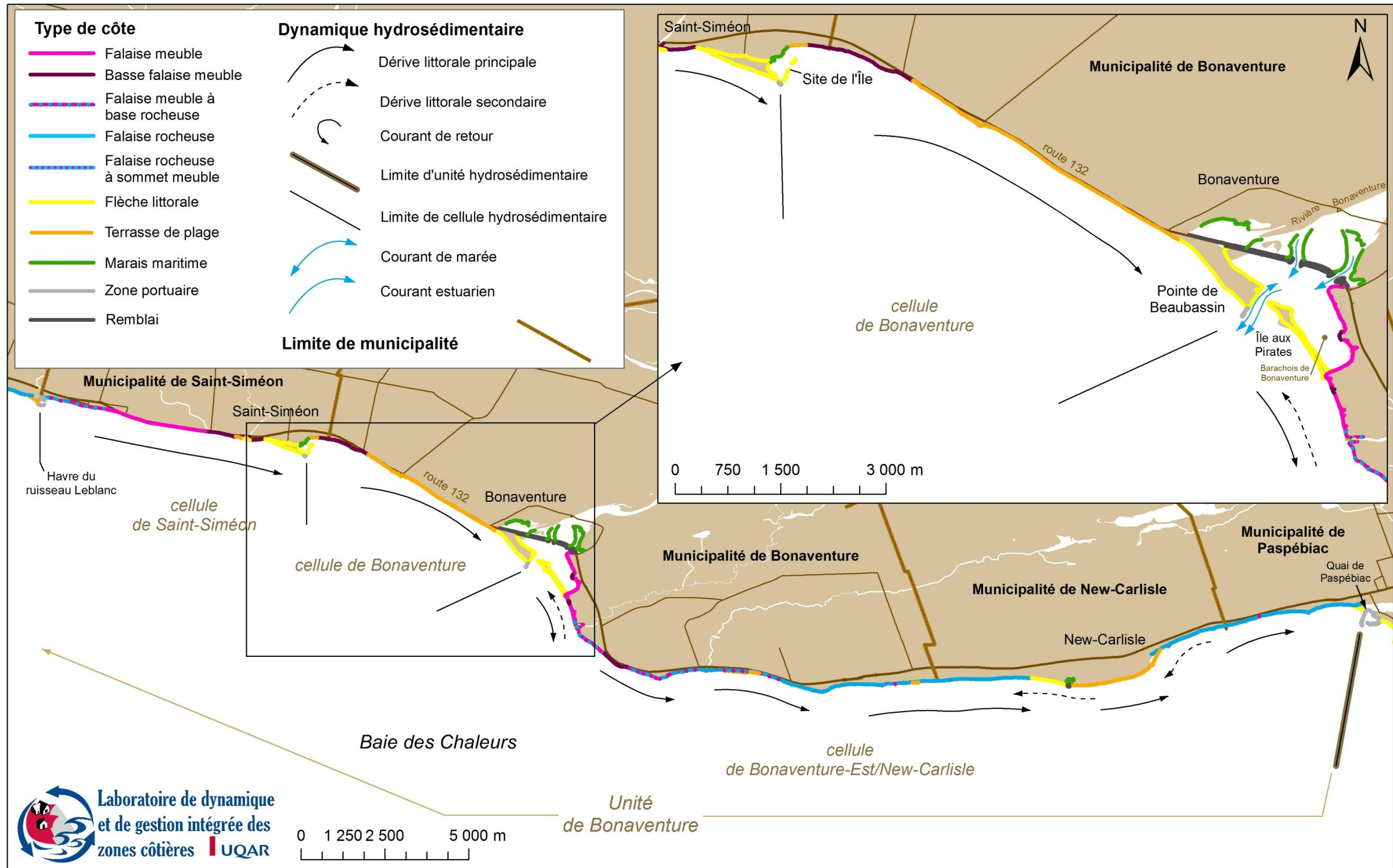
Tableau 9. Types de côte de l'unité de Bonaventure

Type de côte	km	%
Falaise meuble	5,29	9,0
Basse falaise meuble	3,73	6,3
Falaise meuble à base rocheuse	1,88	3,2
Falaise rocheuse	22,41	38,1
Falaise rocheuse à sommet meuble	3,45	5,9
Flèche littorale	5,18	8,8
Terrasse de plage	8,78	14,9
Marais maritime	4,10	7,0
Zone portuaire	0,75	1,3
Remblai	3,22	5,5
TOTAL	58,79	100



Source: Fond de carte BDTQ 1:20 000. RÉalisation: Chaire de recherche en géoscience côtière, août 2012.

Figure 10. Unités hydrosédimentaires de la plage Henderson, des Caps Noirs et de Bonaventure (a)



Source: Fond de carte BDTQ 1:20 000. Réalisation: Chaire de recherche en géoscience côtière, août 2012.

Figure 11. Unité hydrosédimentaire de Bonaventure (b)

4.5 Unité hydrosédimentaire de Paspébiac-Shigawake

L'unité de Paspébiac-Shigawake se situe entre le barachois de Paspébiac et la baie de Port-Daniel et compte 6 cellules hydrosédimentaires (figure 12). À noter que pour des fins administratives, le portrait de la MRC de Bonaventure ne comprend pas la cellule de Port-Daniel-Ouest qui fait partie de la MRC du Rocher-Percé. Les informations relatives à cette cellule seront présentées dans un autre rapport qui couvrira la MRC du Rocher-Percé. Les cinq cellules à l'étude comptent 26 km de côte et leurs limites sont toutes déterminées par la présence d'une structure anthropique perpendiculaire au littoral (quai ou épis rocheux). La dérive littorale principale est de direction ouest sur toutes les cellules de l'unité, ce qui crée une accumulation de sédiments à l'est des structures, formant de minces terrasses de plage.

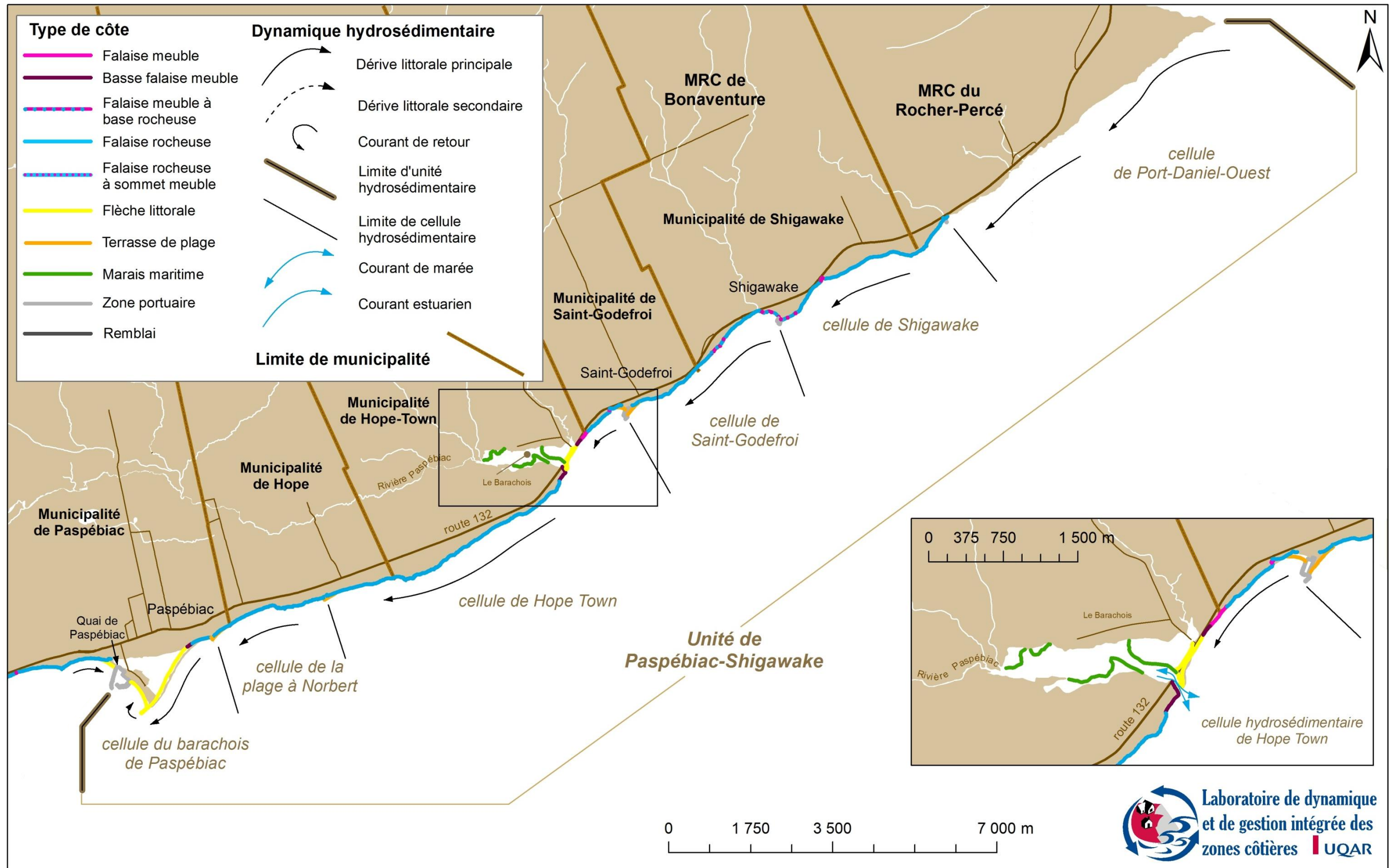
La dérive littorale principale est donc à l'inverse de l'unité de Bonaventure. Le barachois de Paspébiac marque ainsi un point d'inversion majeur dans la dynamique hydrosédimentaire de la côte entre New-Richmond et Port-Daniel. En effet, les dérives principales convergent toutes vers le barachois de Paspébiac, ce qui a contribué en partie à sa formation mais surtout à sa forme en triangle. Force est de constater que cette dérive convergente ne permet pas d'alimenter les flèches et de maintenir une stabilité car la flèche exposée à l'est recule à des taux historiques de plus de 6 m/an à son extrémité (plus de 350 m entre 1934 et 2007), ce qui constitue les plus forts taux de recul des MRC d'Avignon et de Bonaventure. La principale source sédimentaire du barachois est sous-marine, non renouvelable et quasi complètement épuisée; il s'agit d'un ancien dépôt deltaïque érodé en surface par les vagues (Renaud, 2000).

L'unité ne comprend aucun cours d'eau d'importance. Seulement deux petites rivières se jettent dans le barachois de Hopetown qui est fermé par une flèche littorale. La rivière Paspébiac se jette au fond de la lagune, à près de 2 km de distance du littoral et l'autre arrive juste derrière la flèche littorale. Les deux rivières n'ont pas la capacité de transport pour alimenter un delta à la sortie du goulet. Un autre petit cours d'eau qui se jette un peu à l'ouest du quai de Shigawake, passant dans une calvette, sous la route 132.

Ce sont les falaises rocheuses qui dominent largement l'unité avec 66% de la longueur totale (tableau 10). Elles sont omniprésentes et laissent place à des flèches littorales (12%) seulement aux barachois de Paspébiac et de Hopetown. Le front du marais maritime du barachois de Hope-Town compte plus de 2 km de longueur. Les autres types de côte occupent un peu moins de 4 km de côte et sont réparties en très petits tronçons.

Tableau 10. Types de côte de l'unité de Paspébiac-Shigawake

Type de côte	km	%
Falaise meuble	0,42	1,6
Basse falaise meuble	0,63	2,4
Falaise meuble à base rocheuse	0,38	1,5
Falaise rocheuse	17,13	65,9
Falaise rocheuse à sommet meuble	0,77	2,9
Flèche littorale	3,02	11,6
Terrasse de plage	1,26	4,9
Marais maritime	2,14	8,2
Zone portuaire	0,27	1,0
TOTAL	26,00	100



Source: Fond de carte BDTQ 1:20 000. Réalisation: Chaire de recherche en géoscience côtière, août 2012.

Figure 12. Unité hydrosédimentaire de Paspébiac-Shigawake

5. Sensibilité de la côte à l'érosion

Dans son ensemble, les côtes de la MRC de Bonaventure ne présentent pas de forts taux d'érosion. La moyenne historique des taux de déplacement de toutes les côtes confondues est de -0,16 m/an (figure 14). Cependant, en retenant seulement les taux de recul (taux négatifs), la moyenne augmente du double pour atteindre -0,31 m/an, ce qui indique que certaines portions de côte ont subi des reculs importants dans le passé, malgré l'accumulation à d'autres endroits. La sensibilité de la côte à l'érosion se reflète plus spécifiquement dans le scénario probable qui a été déterminé pour chaque zone homogène. Le choix de ce scénario, tel qu'expliqué à la section 2.5.2, se base sur l'analyse de plusieurs facteurs afin de faire une projection plus réaliste de chaque unité de gestion.

Les résultats indiquent que les flèches littorales sont les côtes les plus sensibles avec une moyenne probable de -1,97 m (figure 13). Ce sont ensuite les marais maritimes et les basses falaises meubles avec des taux respectivement de -1,59 et -0,99 m/an. À noter que pour les marais maritimes, il s'agit d'un seul secteur localisé au site de l'Île à Saint-Siméon (BON-27). Les terrasses de plage sont aussi moyennement sensibles avec un taux de -0,70 m/an. À l'opposé, les falaises rocheuses sont peu sensibles à l'érosion avec un taux probable de -0,14 m/an. Même les falaises rocheuses avec une composante meuble restent peu sensibles avec des taux de -0,14 et de -0,20 m/an.

La comparaison entre les taux historiques et les taux probables est un indicateur intéressant de la variation de la sensibilité des côtes. Pour l'ensemble des côtes, les taux probables sont 3 fois plus élevés que les taux historiques (figure 14). On note cependant que les taux probables des terrasses de plage et des flèches littorales sont entre 2 et 4 fois supérieurs aux taux historiques tandis qu'ils sont en moyenne 0,4 fois supérieurs pour les autres types de côtes. Ces résultats indiquent que malgré les faibles reculs, la stabilité ou même l'accumulation de certaines portions de ces côtes dans le passé, les conditions actuelles et futures pourraient faire en sorte de modifier cette tendance. C'est d'ailleurs pour les terrasses de plage et les flèches littorales que les reculs événementiels maximum les plus élevés ont été enregistrés, soit respectivement 12,2 m et 17,2 m (tableau 3). C'est sur le barachois de Paspébiac que l'on retrouve les plus forts taux de recul de toute la MRC (figure 13). La flèche littorale exposée à l'est recule à des taux historiques de plus de 6 m/an à son extrémité.

Les côtes basses sont très sensibles aux événements de tempête. Or avec la réduction appréhendée du couvert de glace et la hausse du niveau marin relatif, le littoral sera davantage exposé aux événements de vagues de tempête pour les décennies à venir. La baie des Chaleurs constitue avec la région des îles de la Madeleine, la région qui sera la plus sensible à la hausse future du niveau marin en raison du contexte de subsidence de la côte (Koohzare *et al.*, 2008). Les falaises meubles, en plus d'être sensibles aux vagues de tempête, sont aussi sensibles aux processus cryogéniques qui seront plus intenses pour le futur ainsi qu'aux processus hydrogéologiques. Le réchauffement des températures entraînera l'augmentation des cycles de gel-dégel, du nombre de redoux hivernaux et de pluies hivernales, ce qui aura pour conséquence de favoriser le recul des falaises (Bernatchez *et al.*, 2008).

La figure 14 met en évidence les zones les plus sensibles du territoire. Il s'agit des zones en rouge sur la cartographie des taux probables qui représentent des portions de flèches littorales, de basses falaises meubles et de marais maritimes. Ces zones ont des taux projetés supérieurs à -1 m/an. Les zones en orange foncé sont moyennement sensibles et représentent des unités de terrasses de plage, de falaises meubles, de basses falaises meubles, de flèches littorales et une unité de basse falaise rocheuse à Paspébiac.



Figure 13. Érosion du barachois de Paspébiac et prolongement de la flèche littorale vers l'ouest

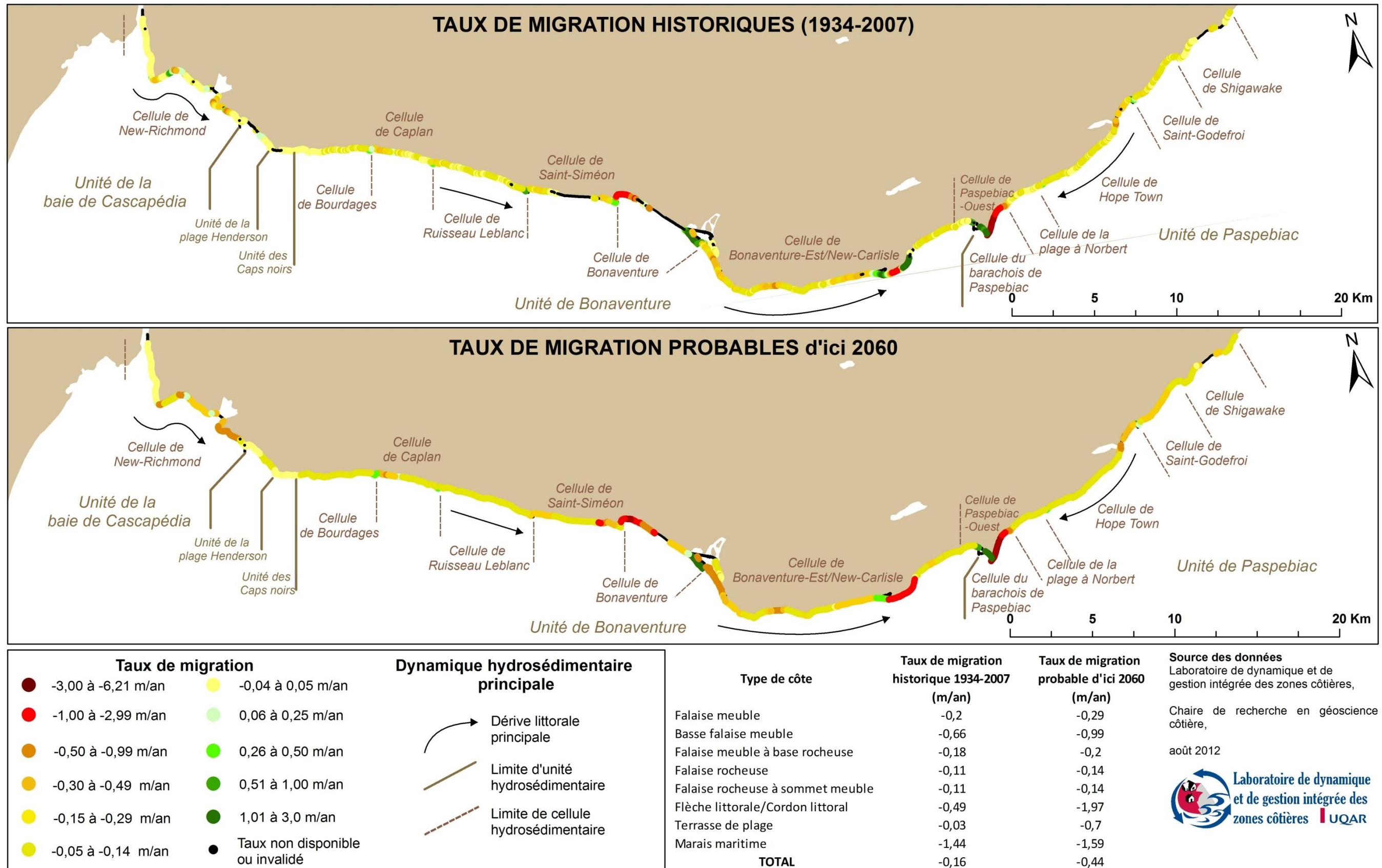
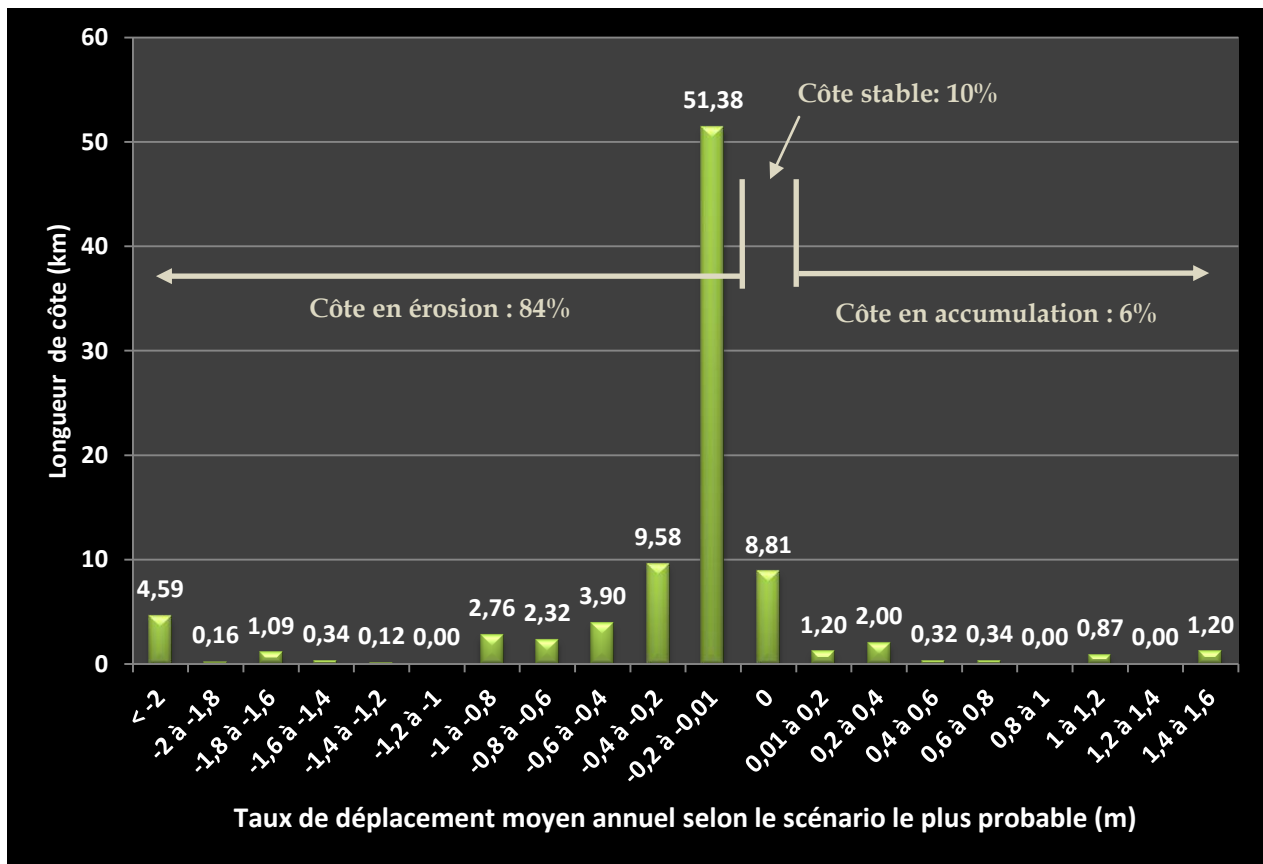


Figure 14. Comparaison des taux de migration historiques avec les taux de migration probables

D'après la classification des taux probables, on note aussi que seulement 16% des côtes de la MRC de Bonaventure seront stables ou en accumulation d'ici 2060 alors que 84% connaîtront une érosion (figure 15). On remarque cependant que 67% des côtes en recul présenteront des taux entre -0,4 et -0,01 m/an et que 56% des côtes présenteront des taux entre -0,2 et -0,01 m/an, ce qui représente des taux d'érosion faibles. Les taux faibles sont principalement mesurés sur les côtes à falaise rocheuse et, dans une moindre mesure, sur des côtes à falaise meuble. Les reculs plus importants que -1 m/an correspondent à 5% des côtes et sont attribuables en ordre d'importance aux flèches littorales (1 zone homogène), aux basses falaises meubles (3 zones), aux terrasses de plage (4 zones), aux falaises rocheuses (1 zone) et aux marais maritimes (1 zone).



Longueur de côte avec mesures d'évolution côtière: 90,96 km (ce qui exclut les îles, les zones portuaires, les remblais et certaines zones où les données sont manquantes)

Figure 15. Longueur de côte selon les catégories de taux probable

6. Marges de sécurité en érosion côtière

Une cartographie des marges de sécurité en érosion côtière à une échelle de 1 :5 000 a été effectuée individuellement pour chacune des 251 zones homogènes de la MRC de Bonaventure. Cela pour permettre aux responsables de l'aménagement de visualiser au mieux la localisation et l'étendue des secteurs exposés à l'érosion côtière. Un exemple est présenté sur la figure 16. L'ensemble des cartes est présenté dans un recueil de cartes conjoint à ce document, soit 55 cartes en format 11" x 17" avec chacune une légende et une localisation. Pour une utilisation plus précise à des fins de réglementation et d'aménagement du territoire, l'utilisation des données numériques est conseillée pour leur plus grande précision.

Tel qu'expliqué à la section 2.6, les marges de sécurité sont issues d'une équation (équation 1) basée sur la moyenne des taux de déplacement probables et sur les valeurs de recul événementiel pour chaque zone homogène.

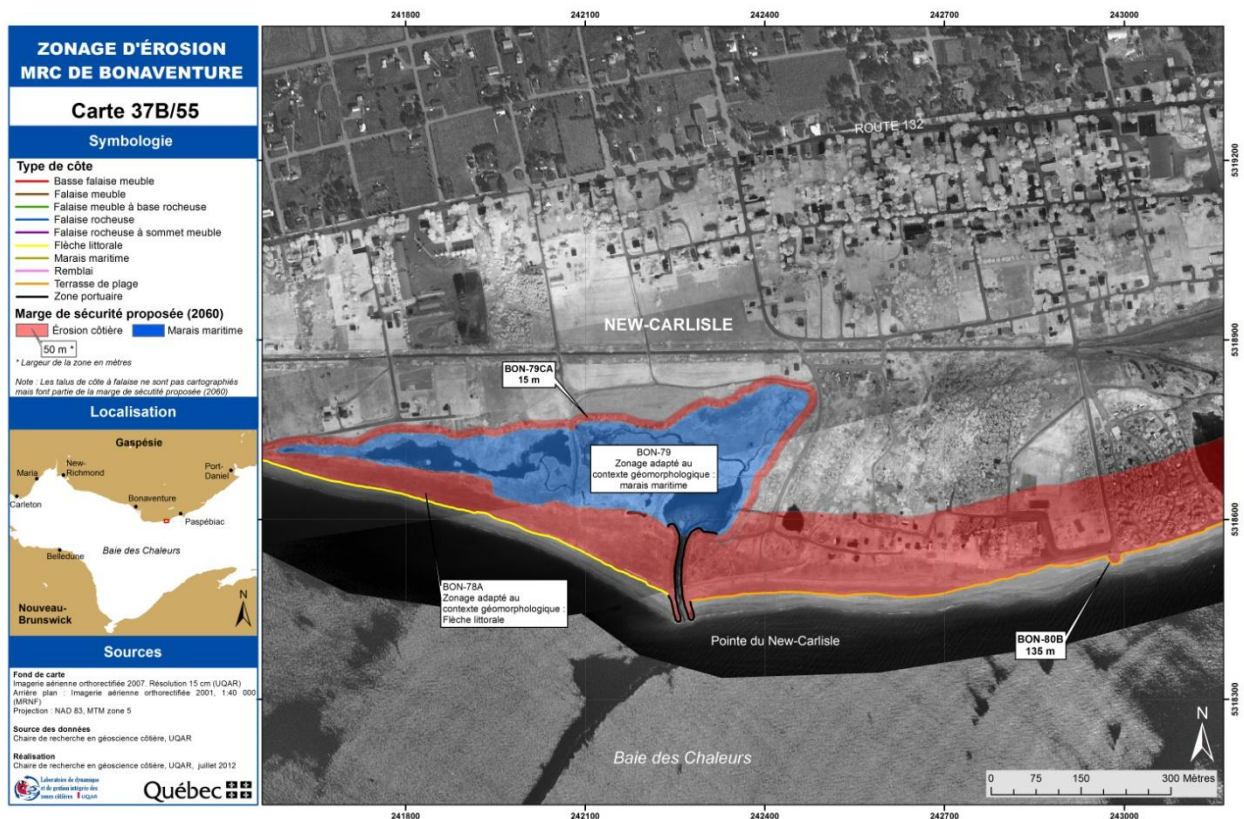


Figure 16. Exemple de cartographie de marge de sécurité en érosion côtière (carte 37B - New-Carlisle-2)

Une classification des marges a été effectuée afin d’offrir un portrait d’ensemble des marges proposées (figure 17). Trois grandes catégories de marges ressortent :

- 1) la marge de 10 m qui fait près de 40 km de longueur de côte;
- 2) les marges de 15, 25, 40 ainsi que les marges variables qui font chacune entre 9 et 19 km de longueur;
- 3) les marges de 20, 30, 35 et entre 45 et 155 qui font en moyenne 1 km de côte.

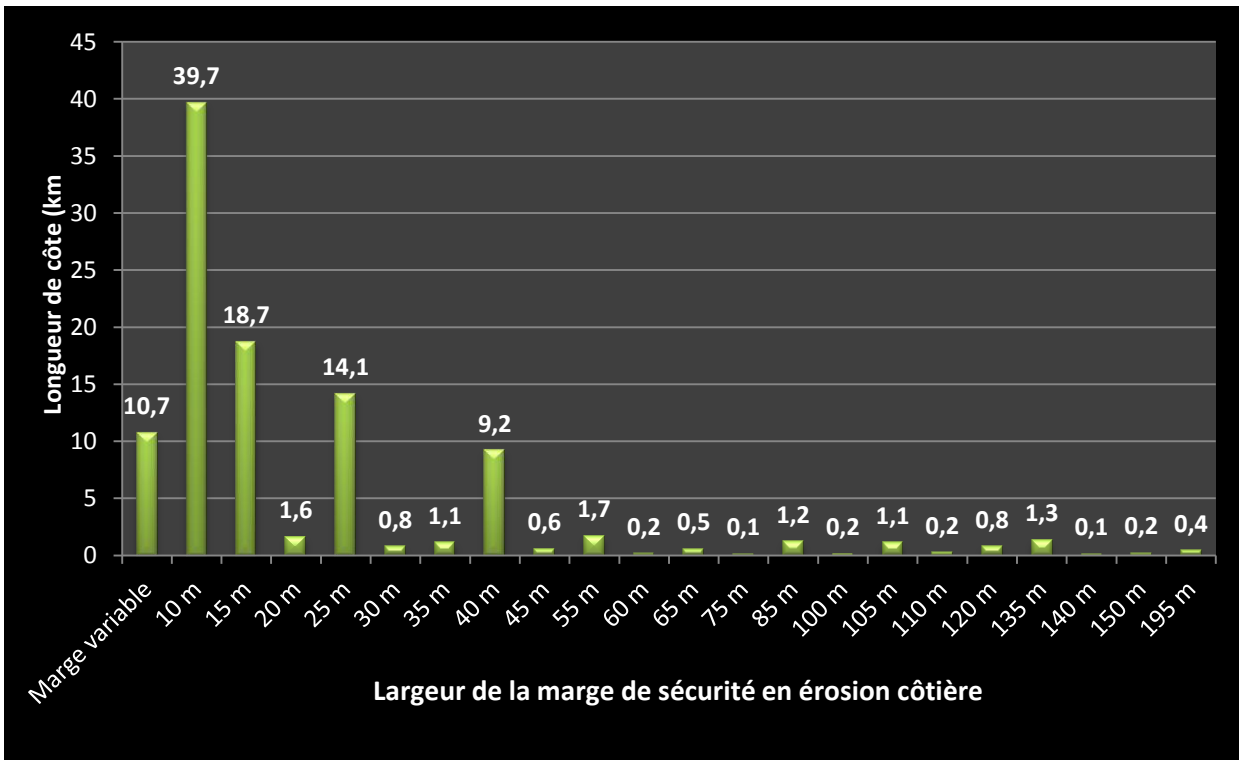


Figure 17. Longueur de côte selon la largeur de la marge de sécurité en érosion côtière

La première catégorie comprend la classe de 10 m qui couvre le plus de côte (38%). Elle est présente sur presque la totalité des falaises rocheuses et constitue la marge minimale pour 67 des 103 zones homogènes concernées.

La deuxième catégorie, qui occupe 53% des côtes, comprend d’abord les **marges variables** qui se répartissent en 27 zones homogènes. Elles comptent pour 10% de la longueur des côtes mais couvrent 20% de l’ensemble de la superficie des marges. Elles sont appliquées sur toutes les flèches littorales, à l’exception de la flèche de la pointe Beaubassin, au barachois de Bonaventure, qui fait l’objet d’une marge minimale. Une marge variable est aussi appliquée sur 11 zones homogènes de remblai qui sont principalement des routes qui traversent une baie et des digues qui avancent dans la mer. Les marges de **15 m**, qui se divisent en 33 zones homogènes, couvrent en majorité des falaises rocheuses dont l’érosion a été plus forte que la moyenne. Six zones homogènes sur 33 représentent une marge minimale pour des basses côtes abritées. La marge de **25 m** est présente sur environ la moitié des basses falaises meubles et sur la moitié des falaises meubles. Des marges

minimales ont été appliquées sur 28 des 31 zones homogènes. Les marges de **40 m** sont des marges minimales pour des terrasses de plage pour 23 des 27 zones homogènes concernées. Seules deux zones de terrasse de plage ont une marge calculée de 40m et deux zones de falaise meuble et de basse falaise meuble ont une marge de 40 m.

La troisième catégorie n'occupe pas beaucoup de longueur de côte linéaire mais présente des marges plus profondes entre 45 et 195 m, ainsi que des marges de 20, 30 et 35. Ces marges occupent seulement 12% de la longueur de côte et couvrent 30% de la surface totale des marges divisée en 30 zones homogènes. Les marges de 20 m comptent 4 courtes zones homogènes dont 2 dans les falaises rocheuses, une dans une falaise rocheuse à sommet meuble et une dans une falaise meuble à base rocheuse. Ce sont des falaises à composante rocheuse plus actives que la moyenne. Les marges de **30 m** sont appliquées sur deux zones de falaises meubles et deux zones de basses falaises meubles un peu plus actives que la moyenne. Ensuite, les marges de 45 à 195 m comptent 18 zones homogènes dont seulement une est une marge minimale; c'est la flèche littorale de la pointe Beaubassin. Les basses falaises meubles comptent 4 zones, les falaises meubles 3 zones, les terrasses de plage 8 zones et les falaises rocheuses 2 zones. Il est peu commun dans la MRC de Bonaventure que des falaises rocheuses aient des marges si élevées (55 et 100 m). Elles sont situées immédiatement à l'est du barachois de Paspébiac (PAS-04 et 05).

Le fond des marais où une marge est appliquée représente 2,6 km divisées en 2 zones homogènes : une au site de l'Île à Saint-Siméon (BON-27CA) et l'autre à New-Carlisle (BON-79CA). À titre indicatif, les schorres inférieur et supérieur ainsi que la slikke sont notés en bleu sur les cartes et représentent une surface de 3,1 km² au total (voir section 2.6.5).

Une marge minimale a été appliquée pour 133 des 251 zones homogènes qui représentent 56% des côtes. Ce pourcentage, qui est moins élevé que pour la MRC d'Avignon (67%), indique que les taux de reculs sont plus élevés dans la MRC de Bonaventure.

Sur l'ensemble de la MRC de Bonaventure, les marges proposées représentent une superficie totale de 2,62 km². Considérant l'étendue de territoire de la MRC, cette surface demeure très faible, mais puisqu'elle est soumise à l'aléa d'érosion côtière, il importe d'éviter toute nouvelle construction ou infrastructure à l'intérieur des marges de sécurité. Ces mesures auront pour effet d'éviter beaucoup de problèmes futurs liés au déménagement de bâtiments et à l'artificialisation du littoral.

7. Conclusion

Un zonage en fonction de l'érosion côtière est une excellente mesure à mettre en place afin d'assurer un développement adapté à l'aléa naturel de l'érosion côtière. Les marges de sécurité en érosion côtière proposées dans cette étude pourront ainsi être appliquées afin de réduire le nombre de nouvelles constructions dans les secteurs exposés à l'érosion côtière.

Cependant, il est important de noter qu'un zonage seul n'est pas forcément efficace, il devra donc être accompagné de mesures de sensibilisation au risque à long terme ainsi qu'au risque évènementiel. De plus, cette proposition devra être jumelée à d'autres pistes de solutions pour les infrastructures actuellement à risque d'érosion. Dans cette optique, au cours de la prochaine année, la Chaire de recherche en géoscience côtière de l'UQAR va réaliser une cartographie et une analyse de la vulnérabilité à l'érosion côtière pour la MRC de Bonaventure en fonction de divers horizons de temps. Cet outil permettra d'identifier à partir de quand les infrastructures seront vulnérables afin que les responsables de l'aménagement du territoire puissent préciser les secteurs prioritaires d'intervention et planifier les stratégies d'adaptation.

L'analyse effectuée dans le cadre de cette étude s'est attardée à l'érosion des côtes, cependant, un autre aléa important est présent sur les côtes de la MRC de Bonaventure, soit l'aléa de submersion. Bien que les falaises occupent une grande partie du littoral de la MRC, la submersion affecte les côtes basses qui comptent près du tiers des côtes (terrasses de plages, flèches littorales, marais maritime ainsi que certaines basses falaises). L'intensité de l'aléa submersion va aller en augmentant du fait de la subsidence du sud de la Gaspésie (affaissement de la terre) et de la hausse du niveau marin. Ceci soulève le besoin d'une analyse détaillée reliée à la submersion sur les côtes de l'ensemble du Québec maritime afin que le développement et la gestion effectués puissent tenir compte de l'ensemble des aléas côtiers présents.

8. Références

Allison, I. dir. (2009) *The Copenhagen Diagnosis. 2009: Updating the world on the Latest Climate Science*. Université de New South Wales. Climate Change Research Centre, Sydney, Australie, 60 p.

Balard, B., Bernier, S., Boyer-Villemaire, U., Demers, S., Guèvremont, R. et Kourio, A. (2005) *Plan de gestion intégrée de la zone côtière de Nouvelle à New Richmond : les caractéristiques physiques de la zone côtière*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. 35 pages + annexes.

Ballinger, R. C., Potts, J. S., Bradly, N. J. et Pettit, S. J. (2000) « A comparison between coastal hazard planning in New Zealand and the evolving approach in England and Wales », *Ocean & Coastal Management*, vol. 43, p. 905-925.

Bernatchez, P. (2003) « Évolution littorale holocène et actuelle des complexes deltaïques de Betsiamites et de Manicouagan-Outardes : synthèse, processus, causes et perspectives ». Thèse de doctorat, Université Laval, 460 p.

Bernatchez, P., Bouchard, J-D., Dugas, S., Drejza, S., Fraser, C., Morneau, F., Nicorici, C. et Jolivet, Y. (2010) *Principes et fondements méthodologiques appuyant l'évaluation des marges de recul d'érosion en zone côtière*. Document de travail remis au ministère de la Sécurité Publique du Québec, avril 2010, 42 p.

Bernatchez, P., Drejza, S. et Dugas, S. (2012a) « Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des îles de la Madeleine ». Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, juillet 2012, 71 p. et annexes

Bernatchez, P. et Dubois, J.-M.M. (2004) « Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 58, no 1, p.45-71.

Bernatchez, P. et Fraser, C. (sous presse) « Evolution of Coastal Defence Structures and Consequences for Beach Width Trends, Quebec, Canada ». *Journal of Coastal Research*, disponible en ligne.

Bernatchez, P., Fraser, C., Dugas, S. et Drejza, S. (2012b). *Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC d'Avignon*. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, août 2012, 49 p. et annexes.

Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S. et Morissette, A. (2008) « Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques ». Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 256 pages.

Bernatchez, P., Fraser, C., Lefavre, D. et Dugas, S. (2011) *Integrating anthropogenic factor, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards*. *Ocean & Coastal Management*, 54 : 621-632.

Boak, E.H. and Turner, I.L., (2005) « Shoreline Definition and Detection: A Review ». *Journal of Coastal Research* 21 (4) pp. 688-703

Bourques, P.A. et Lachambre, G. (1980) « Stratigraphie du Silurien et du Dévonien basal du sud de la Gaspésie ». Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, ES 30, 123 p.

Brisebois, D., Lachambre, G. et Piché, G. (1991) « Carte minérale de la Gaspésie, feuillet Gaspé 22A ». Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec.

Clark, J. R. (1996) « Coastal zone management handbook », Lewis Publisher, 694 p.

Comité ZIP Baie des Chaleurs (1997) « Plan d'action et de réhabilitation écologique ». En ligne : <http://www.zipbaiedeschaleurs.ca/pare.asp>

Daigle, R., dir. (2006) Les impacts du changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick., Environnement Canada, 646 p.

Dalrymple R.A. dir (2012) « Sea-Level Rise for the Coasts of California, Oregon, and Washington: Past, Present, and Future » Committee on Sea Level Rise in California, Oregon, and Washington; Board on Earth Sciences and Resources; Ocean Studies Board; Division on Earth and Life Studies; National Research Council. National Academy of Sciences. 260 p.

Dawson, R. J. dir (2009) « Integrated analysis of risks of coastal flooding and cliff erosion under scenarios of long term change », *Climatic Change*, 95:249-288

Dean, R. G. et Dalrymple, R. A. (2004) « Coastal processes: with engineering applications », 475 p., Cambridge University Press.

De la Vega-Leinert, A.C. et Nicholls, R.J. (2008) « Potential Implications of Sea-Level Rise for Great Britain ». *Journal of Coastal Research*, Volume 24 (2): 342-357.

Desmeules, P. et Fraser, C. (2006) « Plan de gestion intégrée de la baie de Cascapédia : Outil pour le développement durable du territoire ». Comité des usagers de la baie de Cascapédia, Comité ZIP Baie des Chaleurs. 78 pages + annexes.

Division de l'aménagement côtier de la Caroline du Nord (2009) Département de l'environnement et des ressources naturelles, USA, CAMA (coastal area management act) - Handbook for Development in Coastal North Carolina, disponible en ligne sur : <http://dcm2.ehnr.state.nc.us/index.htm>, dernière consultation mai 2009

Drejza, S. (2010) « Impacts et efficacité des zonages des risques côtiers dans un contexte de changements climatiques : exemple de Percé, Québec », Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Rimouski, 2010, 193 p.

Drejza, S., Bernatchez, P. et Dugas, S. (2012) « Vers une prévention du risque d'érosion littorale aux îles de la Madeleine ». Affiche présentée à la conférence Zone Côtières Canada, 12 juin 2012.

Dubois, J.-M.M., Bernatchez, P., Bouchard, J.-D., Daigneault, B., Cayer, D. et Dugas, S. (2006) « Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du Saint-Laurent pour la période 1996-2003 ». Conférence régionale des élus de la Côte-Nord, 291 p. + annexes.

Environnement Canada (2012) « Normales climatiques au Canada, station de New-Carlisle - Québec ». Archives nationales d'information et de données climatologiques, [en ligne].
http://www.climate.weatheroffice.gc.ca/climate_normals

EuroSION (2004) « Vivre avec l'érosion côtière en Europe - Sédiments et Espace pour la Durabilité ». Luxembourg: Office pour les Publications Officielles des Communautés Européennes - 40 pp. - 21 x 29,7 cm. ISBN 92-894-7496-3

Forbes, D.L., Parkes, G.S., Manson, G.K. et Ketch, L.A. (2004) « Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence ». *Marine Geology*, 210 : pp. 169-204.

Fraser, C., Bernatchez, P. et Dugas, S. (2012) « Marges de sécurité en érosion côtière - MRC de Bonaventure - Recueil de cartes ». Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Recueil de cartes remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, août 2012, 55 cartes.

Fraser, C. et Desmeules, P. (2006) « Plan de gestion intégrée de la zone côtière de Carleton et de Saint-Omer, Québec, Canada ; Outil pour le développement durable du territoire ». Comité côtier Carleton - Saint-Omer, Conseil régional de l'environnement Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine, 88 pages.

Gauthier, B. (2005) « L'estuaire de la baie des Chaleurs - Ristigouche ». *Le Naturaliste Canadien*, Vol. 129, N° 2., pp. 51-56.

GIEC (2007) « Climate change 2007 : The physical science basis ». Cambridge University Press, Cambridge.

Grenier, A., Dubois, J.-M.M. (1992) Évolution littorale récente par télédétection: synthèse méthodologique. Photo-interprétation. n. 1990-6. p. 3-16.

Gouvernement du Canada (1989) « Régions écoclimatiques du Canada ». Environnement Canada, Conservation et protection, document cartographique en série, 1:7 500 000.

Gouvernement du Québec (1977) « Carte climatique du Québec - Degrés jours de croissance, carte 2 ». Ministère de l'Agriculture du Québec, Direction générale de la Recherche et de l'Enseignement, document cartographique, échelle 1: 4 000 000.

Gouvernement du Québec (1988) « Précipitation nivale annuelle, Québec méridional ». Ministère des Transports du Québec, document cartographique, échelle 1:1 000 000.

Jolicoeur, S. et O'Carroll, S. (2007) « Sandy barriers, climate change and long-term planning of strategic coastal infrastructures, Îles-de-la-Madeleine, Gulf of St. Lawrence (Québec, Canada) ». *Landscape and Urban Planning*, 81, pp. 287-298

Klein, R. J.T., Nicholls, R. J. et Mimura, N. (1999) « Coastal adaptation to climate change: can the IPCC technical guidelines be applied? », *Mitigation and Adaptation Stratégies for Global Change*, vol. 4, p. 239-252.

Koohzare, A., Vaníček, P. et Santos, M. (2006) « Compilation of the map of recent vertical crustal movements in eastern Canada using GIS ». *Journal of Surveying Engineering*, ASCE 132(4), 160-167.

Koohzare, A., Vaníček, P. et Santos, M. (2008) « Pattern of recent vertical crustal movements in Canada », *Journal of Geodynamics*, vol 45, p. 133-145.

Lachambre, G. et Brisebois, D. (1990) « Géologie de la Gaspésie, Feuillet 22 A4 » Ministère des Ressources naturelles du Québec.

Leblanc, J. (2006) « Plan de gestion intégrée de la zone côtière de Bonaventure ». Table de concertation du littoral de Bonaventure, 51 pages.

Leclerc, A.-M., Coutu, M., Bernatchez, P., Nozais, C. (2008) « Effets de l'artificialité du littoral sur les écosystèmes côtiers de la région de Saint-Siméon-Bonaventure, Baie des Chaleurs : Rapport final ». Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, 100 p.

Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J. et Bush, E. (éditeurs) (2008) « Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007 », Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 448 p.

Logimer (1984) « Étude du littoral de la MRC de Bonaventure ». Étude présentée à la Municipalité régionale de comté de Bonaventure. 33 pages + annexes.

Loi dite loi littorale (France) (1986) Loi n° 86-2 du 3 janvier 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral, <http://www.legifrance.gouv.fr>, d'après le journal officiel, 28 février 2002

Long, B. (2006) « Étude hydrodynamique, sédimentologique et biologique des sites de Maria, Saint-Siméon, Bonaventure, Newport et Cap d'Espoir dans la baie des Chaleurs, Québec, Canada ». Ministère des Transports du Québec.

Lozano, I., Devoy, R.J.N., May, W. et Anderson, U. (2004) « Storminess and vulnerability along the Atlantic coastlines of Europe : Analysis of storm records and of a greenhouse gases induced climate scenario ». *Marine geology*, 210, pp. 205-225.

MERQ (Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec) (1987) « Carte minérale de la région du Bas-Saint-Laurent et de la péninsule de Gaspé ». Direction générale de l'exploitation géologique et minérale, Service de la promotion et de l'aide à l'exploration minière, 1 carte (à env. 1/1 800 000).

Milligan, D, A., Wilcox, C. et Hardaway Jr, C.S. (2011) « Shoreline evolution : Surry County, Virginia, James River shorelines ». Shoreline Studies, Department of Physical Sciences, Virginia Institute of Marine Science, College of William & Mary, Gloucester Point, Virginia.

Ministère des Transports du Québec (2004a) « Étude d'impact sur l'environnement : Programme de protection des berges en Gaspésie. Résumé ». 37 p., annexes.

Ministère des Transports du Québec (2004b) « Étude d'impact sur l'environnement : Programme de protection des berges en Gaspésie. Addenda ». 83 p., annexes.

Morneau, F., Michaud, M., Lecours, Côté, F.L. et Roy, D. (2001a) « Étude d'impact sur l'environnement : Projets de protection des berges le long de la route 132 autour de la péninsule gaspésienne ». Gouvernement du Québec, ministère des Transports du Québec. 84 pages + annexes.

Morneau, F., Michaud, M., Lecours, Côté, F.L. et Roy, D. (2001b) « Étude d'impact sur l'environnement : Protection de la route 132 le long du littoral des municipalités de Saint-Siméon et de Bonaventure ». Gouvernement du Québec, ministère des Transports du Québec, 59 page, annexes.

Morneau, F., Michaud, M., Lecours, Côté, F.L. et Roy, D. (2001c) « Étude d'impact sur l'environnement: reconstruction d'un mur le long de la route 132 municipalité de Maria, Baie de Cascafé ». Gouvernement du Québec, ministère des Transports du Québec, 36 pages + annexes

Morton, R.A. (1978) « Standards for measuring shoreline changes ». Report of a Workshop on coastal research, Department of Geology. Florida State University, Tallahassee (Florida), 43 p.

Neumann J.E., Yohe G., Nicholls, R. et Manion, M., (2000) « Sea-Level Rise & Global Climate Change: A Review of Impacts to U.S. Coasts ». Prepared for the Pew Center on Global Climate Change

Paskoff, R. (2001) compilateur. « Le changement climatique et les espaces côtiers : « l'élévation du niveau de la mer : risques et réponses ». Actes du colloque d'Arles, 12 et 13 octobre 2000, la documentation française éditeur, 97 p.

Paskoff, R. (2004) « Côtes en danger, 2ème édition », Paris, L'Harmattan, 250 p.

Pêches et océans Canada (2012) Marées, courants et niveaux d'eau. Service hydrographique du Canada, [en ligne] <http://www.niveauxdeau.gc.ca/french/Canada.shtml>

Pfeffer, W.T., Harper, J.T., O'Neel, S. (2008) « Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea level rise ». *Science* 321: 1340-1343.

Pugh, D. (2004) « Changing sea levels: effects of tides, weather and climate », Cambridge University Press éditeur, 265 p.

Renaud, L. (2000) « Évolution et dégradation du barachois de Paspébiac ». Mémoire de maîtrise en océanographie, Université du Québec à Rimouski, 246 p.

Rodrigue D. (2012) Direction de la référence géodésique, Direction générale adjointe de l'information géographique, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, communication personnelle.

Sabatier, P., Dezileau, L., Condomines, M., Briquieu, L., Colin, C., Bouchette, F., Le Duff, M. et Blanchemanche, P. (2008) « Reconstruction of paleostorm events in a coastal lagoon (Hérault, South of France) ». *Marine Geology*, 251, p. 224–232.

SDAGE (2005) « Guide technique n°9, Connaissance et gestion de l'érosion du littoral », 51 p.

Sorensen, J.C. et McCreary, S.T. (1990) « Institutional Arrangements for Managing Coastal Resources and Environments, revised second edition », Renewable Resources Information Series, Coastal publication n°1, United States National Park Service, 194 p.

Technisol (2004) « Érosion des berges de la Ville de Carleton – Saint-Omer; étude géotechnique ». 22 pages + annexes.

Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Miller, T.L. (2005) « Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change ». U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1304.

USGS (United States Geological Survey) (2012), « National Assessment of Shoreline Change Project ». En ligne: <http://coastal.er.usgs.gov/shoreline-change/>

Veillette, J.J. et Cloutier, M., (1993) « Géologie des formations de surface, Gaspésie, Québec. Commission géologique du Canada, Carte 1804A, échelle 1:250 000

Vermeer, M. et Rahmstorf, S. (2009) « Global sea level linked to global temperature », Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 22 décembre 2009, vol. 106, n° 51, page 21527-21532.

Winckel, P.R., Vrijling, J. K. et Van de Graaff, J. (2008) « Developing a building policy for the erosion zone – Solutions to some key (Dutch) questions », *Coastal Engineering*, vol. 55, p 79-92.

9. Annexes

Annexe 1. Glossaire des principaux termes géomorphologiques

- **Bas estran** : Partie inférieure de la plage s'étirant de la flexure vers la limite inférieure des basses mers.
- **Flexure** : La flexure est la limite géomorphologique entre le haut estran et le bas estran. Elle correspond à un changement de la pente de la plage (point d'inflexion), parfois accompagné d'un changement de granulométrie (texture). Elle correspond approximativement au niveau moyen des eaux.
- **Haut estran** : Partie supérieure de la plage allant de la ligne de rivage à la flexure.
- **Ligne de rivage** : Cette limite géomorphologique correspond à la limite de végétation herbacée dense, à la base d'une structure de protection rigide ou à la base d'une falaise active. Elle correspond approximativement à la limite des hautes mers maximales.
- **Plage** : Portion d'un rivage, de faible pente, constituée de sédiments fins (limons, sables) ou plus grossiers (galets, blocs) où les vagues déferlent. Aussi appelée estran ou zone intertidale, la plage comprend le haut et le bas estran.
- **Trait de côte** : Sommet du talus côtier. Limite entre la côte et l'arrière côte, limite de la zone d'influence des processus côtiers.

Annexe 2. Cartographie des marges de sécurité en érosion côtière

Numéro de la carte	Nom
01B	Rivière Cascapédia
02B	Estuaire de la rivière Cascapédia
03B	New-Richmond-West
04B	Pointe Duthie
05B	New-Richmond_1
06B	New-Richmond_2
07B	Petite rivière Cascapédia
08B	Pointe Taylor
09B	Chemin du Port
10B	Plage Henderson
11B	Caps Noirs
12B	Careys Hill
13B	Bourdages
14B	Route Bourdages
15B	Rivière-Caplan
16B	Plage du Camping
17B	Caplan
18B	Robichaud
19B	Chemin des Mélèzes
20B	Ruisseau-Leblanc
21B	Saint-Siméon-Ouest
22B	Saint-Siméon_1
23B	Saint-Siméon_2
24B	Saint-Siméon-Est
25B	Route Forest
26B	Bonaventure
27B	Pointe de Beaubassin
28B	Rivière Bonaventure
29B	Banc de l'Est
30B	Bonaventure-Est
31B	Route Fournier
32B	Pointe Bonaventure
33B	Route Marsh
34B	Pointe Sawyer
35B	Route McGrath
36B	New-Carlisle_1
37B	New-Carlisle_2
38B	New-Carlisle_3
39B	New-Carlisle-East
40B	Route Scott
41B	Paspébiac-Ouest
42B	Pointe de Paspébiac
43B	Paspébiac
44B	Paspébiac-Est
45B	Route McGee
46B	Pointe Huntington
47B	Hope-Town
48B	Pointe à Ritchie
49B	Chemin de la Rivière
50B	Route du Moulin
51B	Saint-Godefroi
52B	Route de la Traverse
53B	Shigawake
54B	Shigawake-Est
55B	Port-Daniel-Ouest