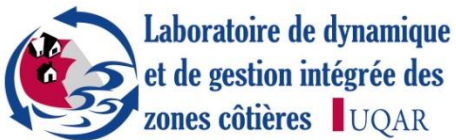


Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC d'Avignon

Présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec

Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph.D.

Août 2012



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

Bernatchez, P., Fraser, C., Dugas, S. et Drejza, S. (2012). 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.

Synthèse

Historiquement, la MRC d'Avignon ne présente pas une grande problématique liée à l'érosion côtière. La majeure partie des côtes montre en effet de faibles taux de recul. La forte proportion de falaise rocheuse et la position abritée du territoire au fond de la baie des Chaleurs diminuent la sensibilité des côtes à l'érosion. Cependant, certaines portions de côtes sont sensibles avec des reculs événementiels pouvant atteindre 2,5 à 17,2 m selon le type de côte. De plus, la forte artificialisation des côtes (23%) 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 quatre fois plus grands que les taux historiques. La distance de recul se situera entre 3 et 35 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 **1380 points de mesures**. Puis, les **156 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 d'Avignon a ensuite été divisée en **183 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 19 % des côtes seront stables ou en accumulation d'ici 2060 alors que **81 % seront en érosion**. Cependant, la moitié des côtes auront un faible taux de recul situé entre -0,2 et -0,01 m/an.

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 183 zones homogènes de la MRC d'Avignon 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 46 cartes au 1:5 000 (format 11"x17").

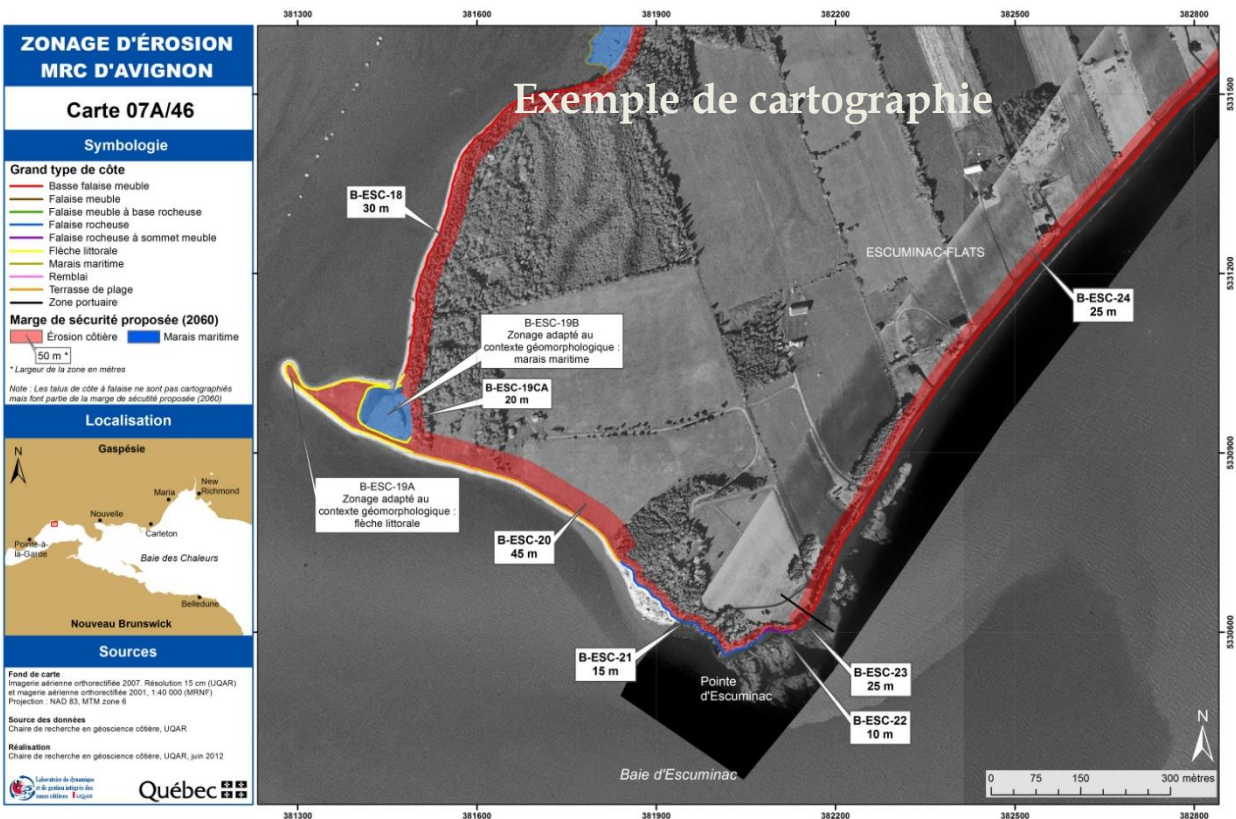


Table des matières

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 SITE.....	22
3.1 CONTEXTE PHYSIQUE	22
3.2 CONDITIONS MARINES	23
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 D'ESCUMINAC	27
4.2 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE MIGUASHA-OUEST.....	30
4.3 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE L'ANSE AUX CORBEAUX	30
4.4 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE LA BAIE TRACADIGACHE.....	31
4.5 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE LA BAIE DE CASCAPÉDIA	34
5. SENSIBILITÉ DE LA CÔTE À L'ÉROSION	37
6. MARGES DE SÉCURITÉ EN ÉROSION CÔTIÈRE.....	40
7. CONCLUSION	43
8. RÉFÉRENCES	44
9. ANNEXES	50

Table des figures

Figure 1. Localisation de la MRC d'Avignon	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 Miguasha	17
Figure 7. Proportion des types de côte de la MRC d'Avignon.....	25
Figure 8. État de la côte de la MRC d'Avignon.	26
Figure 9. Unité hydrosédimentaire de la baie d'Escuminac	29
Figure 10. Unités hydrosédimentaires de Miguasha-Ouest, de l'Anse aux corbeaux et de la baie Tracadigache	33
Figure 11. Unité hydrosédimentaire de la baie de Cascapédia	36
Figure 12. Comparaison des taux de migration historiques avec les taux de migration probables	38
Figure 13. Longueur de côte selon les catégories de taux probable	39
Figure 14. Exemple de carte.....	40
Figure 15. Longueur de côte selon la largeur de la marge de sécurité en érosion côtière	41
Figure 16. Submersion côtière, 6 décembre 2010, Maria	43

Table des tableaux

Tableau 1. Définition des types de côte	7
Tableau 2. Zones homogènes pour la MRC d'Avignon	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 d'Avignon	17
Tableau 5. Marges minimales de sécurité en érosion côtière pour 2060.....	19
Tableau 6. Caractéristiques des marées pour Carleton-sur-Mer.....	23
Tableau 7. Types de côte de l'unité de la baie d'Escuminac.....	28
Tableau 8. Types de côte de l'unité de Miguasha-ouest	30
Tableau 9. Types de côte de l'unité de l'anse aux Corbeaux	30
Tableau 10. Types de côte de l'unité de la baie Tracadigache	32
Tableau 11. Types de côte de l'unité de la baie de Cascapédia.....	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 (Darlymple, 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 égards 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 au fond de la baie des Chaleurs, le littoral de la MRC d'Avignon 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 0,15 m pour l'ensemble des types de côte dans les quatre municipalités touchées par l'érosion. Les mesures sur le terrain entre 2005 et 2011 indiquent plutôt un taux de recul annuel moyen de -0,91 m. Ces taux sont basés sur 156 stations de mesure. Bien que certains secteurs s'avèrent étonnamment stables historiquement, les observations récentes réalisées lors du suivi annuel des côtes montrent plusieurs signes de réactivation dans des secteurs pourtant reconnus pour leur stabilité.

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 leur fonction écosystémique 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 municipalités d'Escuminac, de Nouvelle, de Carleton-sur-Mer et de Maria sont ainsi touchées par le phénomène d'érosion côtière. Le besoin d'améliorer les connaissances et de cartographier le risque d'érosion a été signalé 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 (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 d'Avignon et accompagne un recueil de 46 cartes des marges de sécurité en érosion côtière (Bernatchez *et al.*, 2012c).

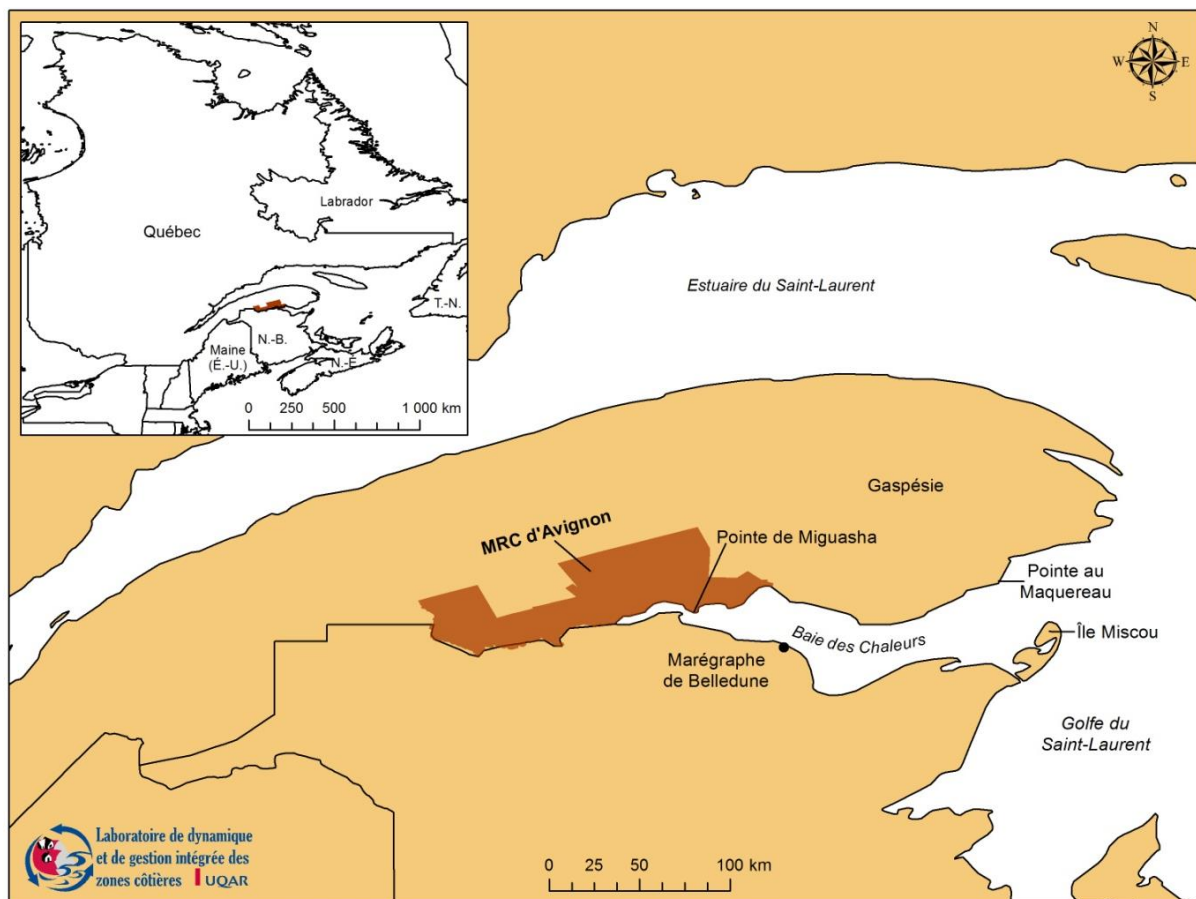
1.4 Objectifs

Les objectifs de ce projet de recherche sont :

- 1- Réaliser un portrait précis des types de côtes et des unités hydrosédimentaires de la MRC d'Avignon;
- 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 d'Avignon 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** linéaires situées dans les municipalités d'Escuminac, de Nouvelle, de Carleton-sur-Mer et de Maria (figure 2). Le territoire à l'étude se limite à l'ouest par la pointe à la Garde et à l'est par la rivière Cascapédia 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 d'Avignon



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 d'Avignon 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 y 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 d'Avignon 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, onze 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 d'Avignon, on retrouve uniquement des roches sédimentaires.
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.
Cordon littoral	Accumulation de sable et/ou de gravier littoral en forme de bourrelet linéaire. Un cordon littoral peut représenter une portion de flèche littorale coupée par une brèche (le cas de l'île Laviolette à Saint-Omer) ou une accumulation qui sépare un marais maritime de la mer.
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.
Îlot sableux	Accumulation de sable et/ou de gravier d'origine côtière ou alluviale qui est entourée d'eau.
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 le secteur à l'ouest d'Escuminac Flats et pour quelques autres petits secteurs comptant 44 zones homogènes sur 183, 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.

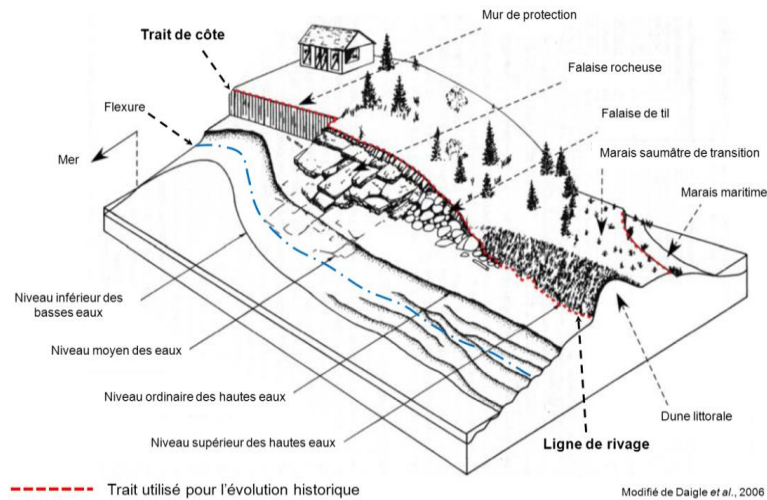


Figure 3. Tracés utilisés pour l'évolution historique du littoral selon différentes configurations de la côte (modifié de Daigle *et al.*, 2006)

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 reliée 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 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 totale maximale à 4,65 m (voir section 2.3.2).

Pour l'ensemble des côtes de la MRC d'Avignon, 1380 transects de mesures ont été réalisés.

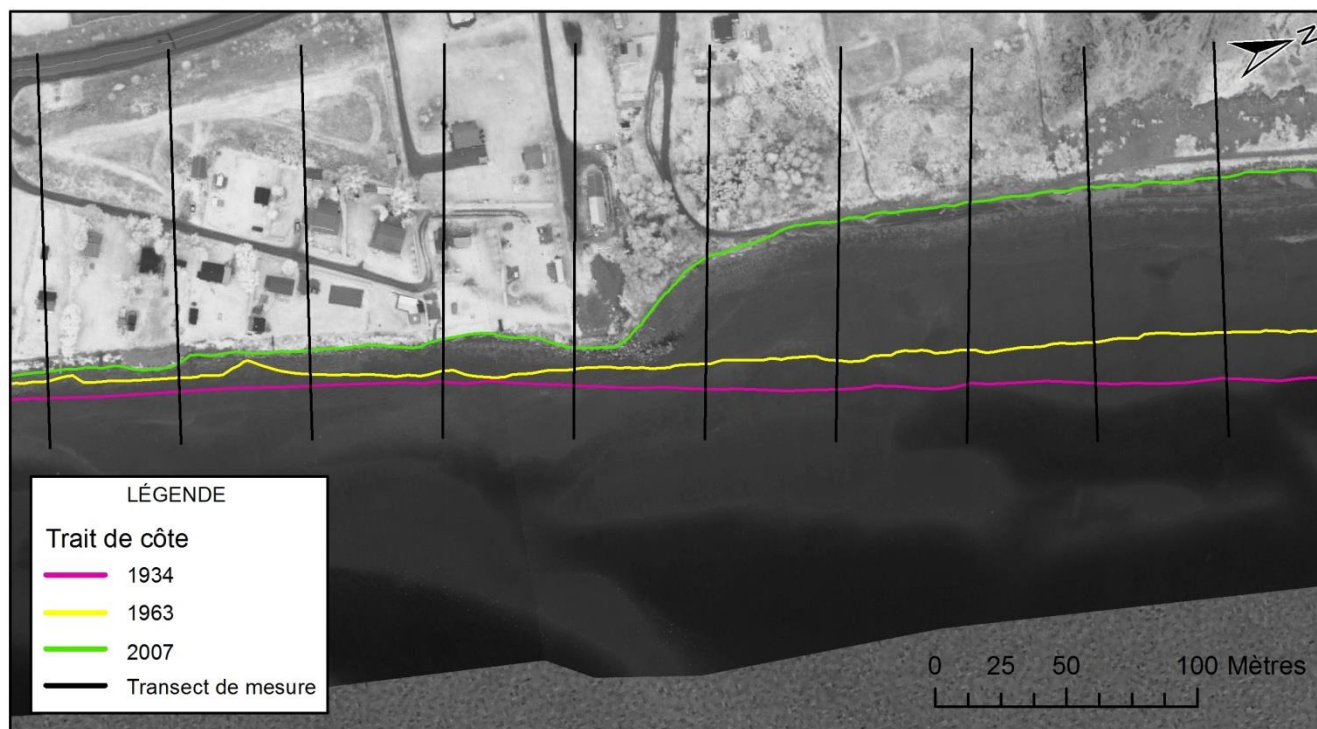


Figure 4. Méthodologie employée pour la mesure de l'érosion

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 d'Avignon était suivi avec 156 stations de mesures. Les données utilisées ici sont celles qui couvrent la période 2005-2011. 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 dans lesquelles seront appliquées les marges appropriées de sécurité en érosion côtière. Le calcul a été effectué pour chacune des **183** zones homogènes de la MRC d'Avignon (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.

Tableau 2. Zones homogènes pour la MRC d'Avignon

Unité hydrosédimentaire	Code	Nombre de zones homogènes
Baie d'Escuminac	B-ESC	57
Miguasha-ouest	MIG	17
L'anse aux Corbeaux	ACOR	06
Baie de Tracadigache	B-TRA	52
Baie de Cascapédia (portion Avignon)	B-CAS	51
TOTAL		183

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'expert en érosion côtière du Québec (Bernatchez *et al.*, 2010) et la chaire de recherche en géoscience côtière de l'UQAR (Bernatchez *et al.*, 2012a ; 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 183 zones homogènes de la MRC d'Avignon (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 44 zones homogènes 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; Winckel *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 77 mesures au total, 48 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.

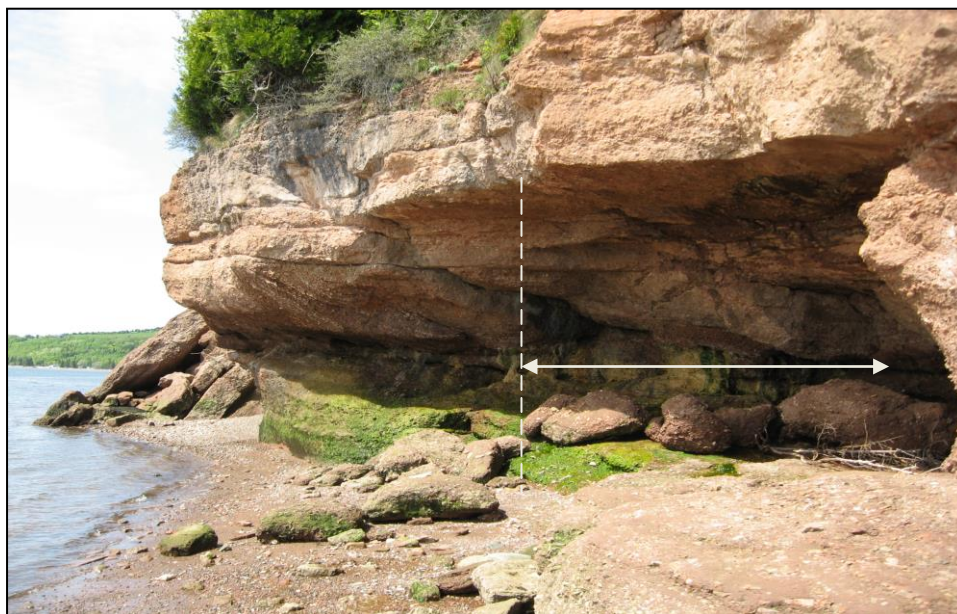


Figure 6. Exemple de mesure d'encoche à Miguasha

Pour la MRC d'Avignon, 11 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'autre 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 d'Avignon

Stations de mesure avec influence sur le trait de côte	
Nombre de stations de mesure	48
Profondeur maximale	11,4 m
Profondeur moyenne des encoches	2,9 m
Écart-type	2 m
Zones d'encoches (égales ou supérieures à 3 m)	
Nombre de zones	11 zones variant de 39 à 625 m de longueur
Longueur totale des zones	2,1 km
Valeur maximale pour une zone	11,4 m
Valeur moyenne des zones d'encoches	5,4 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 géoférencée 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 MRC d'Avignon se forment particulièrement dans les formations de conglomérat et de grès. La majorité des encoches sont taillées dans le conglomérat par les vagues. Près du tiers des encoches est cependant taillé dans une couche de grès altéré à la base des falaises de conglomérat.

Dans les hautes falaises, les encoches sommitales sont plus déterminantes que les encoches basales car dans les falaises de la MRC d'Avignon, 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.

*** 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 d'Avignon, il existe une exception de flèche littorale très stable : le banc de Carleton. C'est la flèche littorale ouest du barachois de Carleton, sur laquelle est installée la zone portuaire. Cette forme est restée parfaitement stable dans son ensemble depuis 1934 et le secteur de la plage municipale a même gagné du terrain (taux de 0,18 m/an). C'est donc la marge minimale de 85 m qui est appliquée au lieu de l'ensemble de la forme. Il en résulte qu'une partie de l'attache de la flèche est exclue de la marge. Cependant, étant donné la faible largeur de la flèche, le reste de la forme fait entièrement partie de la marge de sécurité.

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 (ou 20 pour la référence 2001). 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.

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 événements 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

Plusieurs tronçons de côte forment des avancées artificielles sur la mer, comme par exemple des tronçons de route. 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. Puisque ces côtes présentent des talus meubles inférieurs à 5 m de hauteur, c'est la marge minimale des basses côtes qui leur a été attribuée (marge de 15 m ou 20 m pour la référence 2001).

3. Description du territoire

3.1 Contexte physique

La portion côtière de la MRC d'Avignon offre un paysage unique en Gaspésie, se distinguant par la combinaison de deux composantes principales : les montagnes et les basses-terres. Les **montagnes**, dont les sommets arrondis atteignent plus de 600 m d'altitude dans le secteur Carleton, surplombent les basses-terres. Elles forment la limite sud des monts Notre-Dame, un plateau rocheux qui couvre une grande partie de la Gaspésie. Trois vallées d'importance sont entaillées dans le front montagneux : la vallée de la rivière Escuminac, de la rivière Nouvelle et celle de la rivière Cascapédia. Des cours d'eau de moindre importance ont aussi entaillé des vallées profondes et étroites : la rivière Stewart à Saint-Omer, le ruisseau de l'Éperlan à Carleton, le ruisseau Glenburnie à Maria et la rivière Verte à Maria.

Les **basses-terres** sont constituées en grande partie de matériaux meubles tels l'argile, le sable et le gravier. Les falaises meubles sont donc généralement composées de dépôts sableux et silteux deltaïques et de dépôts grossiers hétérométriques fluvioglaciaux et glaciaires. Le sommet des falaises est souvent composé de sable et gravier littoral ou d'alluvions sablo-graveleux périglaciaires. La roche mère sous-jacente est de type sédimentaire et cinq formations géologiques principales se distinguent sur le territoire. Ces formations rocheuses influencent plus fortement le relief vers l'ouest du territoire à partir de la pointe de Miguasha où l'on retrouve de hautes falaises côtières et plusieurs pointes rocheuses qui s'avancent vers la mer. Les quatre formations à l'ouest du quai de Miguasha sont d'âge dévonien et celle à l'est du quai date du carbonifère. En partant de l'ouest du territoire, on retrouve d'abord la formation de Lagarde entre la pointe à la Garde et la pointe d'Escuminac. Elle est principalement composée de conglomérat avec quelques unités de grès et de mudrock. Ensuite, la formation de Pirate cove affleure sur une petite partie de la pointe d'Escuminac et à l'est d'Escuminac Flats. Elle comprend des conglomérats avec une matrice calcaire incluant quelques unités de mudrock et de grès fin. La formation de Fleurant se situe à la pointe à Fleurant et affleure aussi environ 1 km à l'ouest de la pointe. Elle se compose de conglomérat avec des lits de grès et quelques minces lits de siltstone ou de shale (Rust et al. 1989). Ensuite, dans le secteur du parc de Miguasha, la formation d'Escuminac affleure jusqu'au quai de Miguasha. Elle est principalement constituée de shale, de grès et de siltstone gris clair. On retrouve des argilites et du conglomérat dans une moindre mesure (Cloutier *et al.*, 2011). À partir du quai de Miguasha, c'est la formation de Bonaventure qui affleure dans les côtes rocheuses du restant du territoire. Elle est formée d'assemblages de conglomérats massifs et de grès, siltstone et mudstone plus finement stratifiés (Rust et al., 1989; Jutras, 2001).

La zone côtière est très 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 au fond de 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 d'Avignon 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. À l'ouest de la pointe de Miguasha, on retrouve les conditions estuariennes de la rivière Ristigouche. L'apport d'eau douce est plus élevé et le marnage atteint un maximum à Campbellton pour ensuite rapidement s'estomper en amont (Gauthier, 2005).

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. Les marées moyennes ont un marnage de 1,9 m à Carleton; ce qui est considéré comme la limite entre des marées de faible amplitude (microtidales) et des marées de moyenne amplitude (mésotidales). Durant les grandes marées, la mer peut atteindre jusqu'à 2,7 m de hauteur. Le tableau 6 présente les caractéristiques complètes des marées pour Carleton-sur-Mer. La hauteur augmente légèrement de l'est vers l'ouest du territoire par l'effet d'entonnoir de la baie.

Tableau 6. Caractéristiques des marées pour Carleton-sur-Mer

<i>Type de marée</i>	Mixte semi-diurne		
<i>Marnage</i>	Marée moyenne		1,9 m
	Grande marée		2,7 m
<i>Hauteur de marée</i>	Pleine mer supérieure	Marée moyenne	2,2 m
		Grande marée	2,7 m
	Basse mer inférieure	Marée moyenne	0,3 m
		Grande marée	0,0 m
<i>Niveau moyen de l'eau</i>			1,2 m
<i>Vitesse maximale des courants de marée</i>	Flot		2,0 nœuds
	Jusant		2,0 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 échancrée, 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 d'Avignon. Les caps de Maria ne sont cependant pas à l'abri des vagues de tempête du sud-est qui, avec un fetch de 65 km, peuvent atteindre 1,5 m de hauteur et de 5 à 6 secondes de période (Long, 2006). La pointe de Miguasha est aussi exposée aux vagues de tempête avec un fetch de plus de 100 km à l'est. Les vents dominants sont de l'ouest.

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 MRC d'Avignon 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. La topographie est déterminante puisque l'arrière-pays, avec une topographie de forte amplitude, s'insère dans un climat plus froid.

Selon les données climatiques de la station météorologique de Nouvelle (Environnement Canada, 2004) la température moyenne annuelle est de 3,61°C (données recueillies entre 1970 et 1999) avec des moyennes d'été entre 15 et 20°C et des moyennes d'hiver entre -10 et -15°C. D'après cette série temporelle, il semble exister une oscillation entre des années chaudes, suivi d'années plus froides, selon une période de 2 à 5 ans. Il est à noter que le secteur reçoit un nombre d'heures d'ensoleillement annuel qui se compare avantageusement à des régions situées plus au sud et qu'il bénéficie d'une longue saison de croissance (Gouvernement du Québec, 1977).

La moyenne annuelle de précipitation entre 1970 et 1998 est de 901 mm avec parfois des écarts assez importants entre les années. Au plan des précipitations de neige, d'après les moyennes de 1950 à 1980,

le territoire correspond aux plus faibles précipitations de neige en Gaspésie (Gouvernement du Québec 1988).

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 les vents les plus forts sont enregistrés en novembre et décembre.

3.5 Caractéristiques des côtes

La MRC d'Avignon compte neuf types de côte excluant les côtes artificielles (voir tableau 1 pour définitions). Sur l'ensemble du littoral, on ne distingue pas de côte nettement dominante. Les pourcentages des six principaux types de côtes vont de 11% à 19% (figure 7). En regroupant les types de falaises meubles ensemble, on obtient 30% et en regroupant les types de falaises rocheuses, on obtient 20%. Il y a donc 50% du littoral composé de falaises (forme d'érosion) et l'autre 50% représente presque en totalité des côtes caractérisées par des formes d'accumulation. Ces côtes d'accumulation (flèches littorales, terrasse de plage, marais maritime et îlot sableux) présentent cependant des signes de recul car seulement 7% de l'ensemble des côtes est stable ou en accumulation (figure 8).

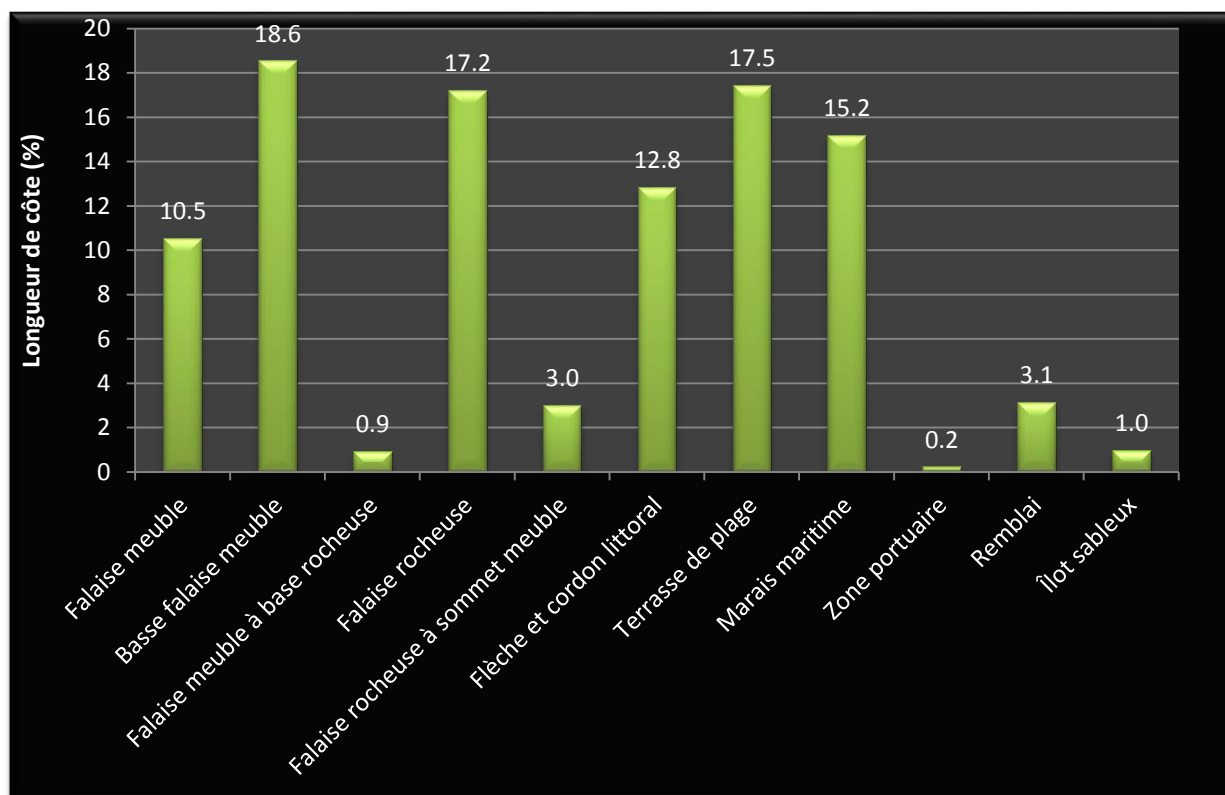


Figure 7. Proportion des types de côte de la MRC d'Avignon

Les côtes sont fortement artificialisées (23%), ce qui est un indicateur de l'importance de la problématique de l'érosion côtière. En jumelant les côtes actives (36%) aux côtes artificielles, on constate que l'aléa d'érosion côtière est important pour 59% de la côte. Les côtes semi-végétalisées (34%) présentent une certaine stabilité malgré quelques processus actifs.

Le littoral de la MRC d'Avignon est très diversifié et les types de côte se succèdent en petits tronçons, sauf pour un secteur de Carleton et de Maria où l'on retrouve de longs tronçons de falaise meuble et de terrasse de plage. Dans l'ensemble, tous les types de côte sont bien répartis géographiquement, mais on remarque que les falaises rocheuses sont plutôt concentrées à l'ouest de la pointe de Miguasha et que les falaises meubles de plus de 5 m sont concentrées à Carleton (voir chapitre 4 pour un portrait plus précis du territoire).

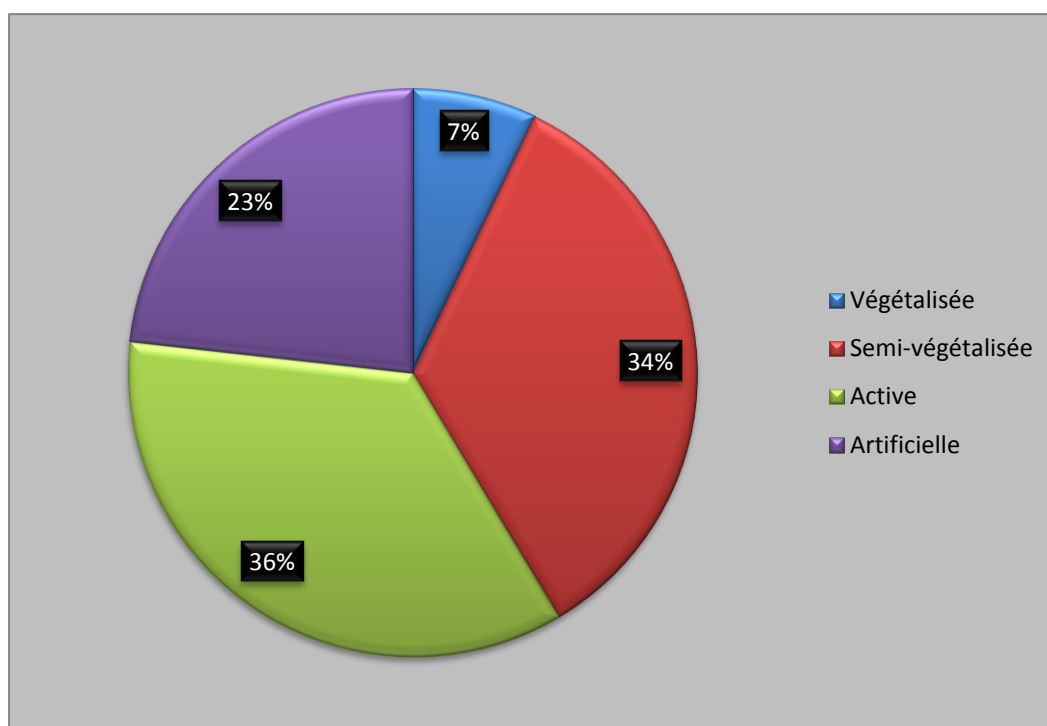


Figure 8. État de la côte de la MRC d'Avignon.

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 maritimes, c'est le front du schorre et non l'arrière du marais qui a été comptabilisé. Pour les flèches et les cordons littoraux, 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 d'Escuminac

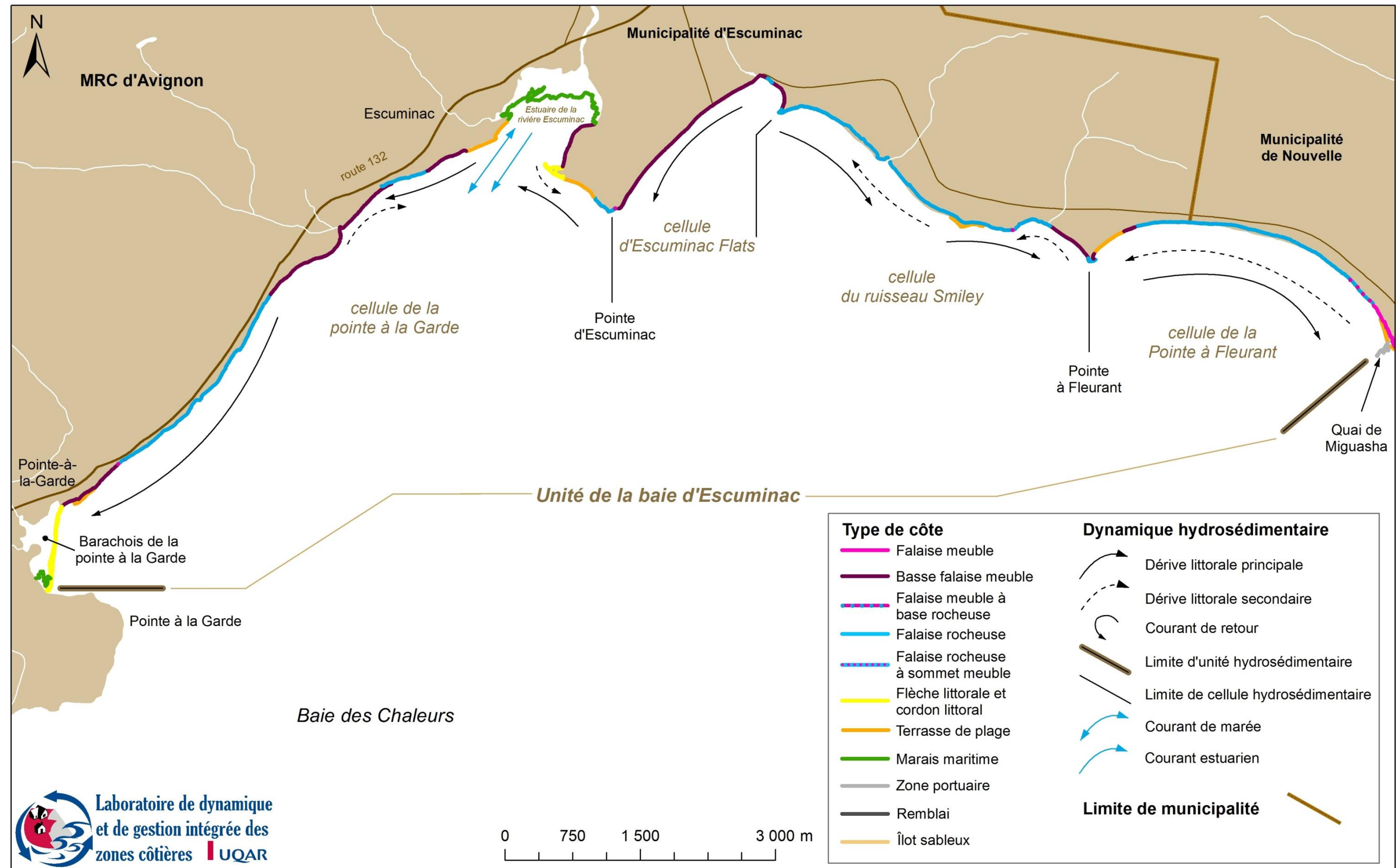
L'unité hydrosédimentaire de la baie d'Escuminac se situe entre la pointe à la Garde et le quai de Miguasha (figure 9) et comprend 24 km de côte. Les trois pointes rocheuses limitent les échanges sédimentaires et divisent l'unité en quatre cellules hydrosédimentaires. La dérive littorale principale se dirige vers l'ouest dans les deux cellules à l'ouest de l'unité et vers l'est dans les deux autres cellules à l'est. Elle est peu perceptible dans la partie centrale de la baie d'Escuminac car en plus des pointes rocheuses qui limitent le transit, la côte est plus abritée des vents dominants d'ouest et des vents de tempête d'est. En effet, la pointe de Miguasha limite la propagation des vagues provenant du golfe du Saint-Laurent et réduit ainsi de beaucoup l'énergie à la côte. Le plus fort transit sédimentaire est visible dans le secteur du barachois de la pointe à la Garde où s'étire une longue flèche littorale vers le sud.

La rivière Escuminac est le seul cours d'eau d'importance qui offre un apport sédimentaire considérable à la côte. Les sédiments de la rivière sont cependant pour la plupart déposés dans l'estuaire, sur un delta émergé à marée basse, au fond d'une échancrure importante du littoral qui piège les sédiments. On compte aussi huit autres petits ruisseaux qui forment de petits deltas dans la zone intertidale.

Les falaises rocheuses dominent nettement l'unité avec 39 % de la longueur totale de la côte (tableau 7). Elles se concentrent surtout dans les cellules du ruisseau Smiley et de la pointe à Fleurant mais occupent aussi un tronçon important de la cellule de la pointe à la Garde. Viennent ensuite les basses falaises meubles avec 29% de la côte. Elles occupent presque entièrement la cellule d'Escuminac Flats. Les autres côtes basses (flèche littorale, terrasse de plage et marais maritime) occupent en tout 28% de la côte et se concentrent surtout dans le secteur de l'embouchure de la rivière Escuminac et du barachois de la pointe à la Garde. Quatre petits tronçons de terrasse de plage sont étalés dans les cellules du ruisseau Smiley et de la pointe à Fleurant.

Tableau 7. Types de côte de l'unité de la baie d'Escuminac

Type de côte	km	%
Falaise meuble	0,18	0,7
Basse falaise meuble	7,05	29,3
Falaise rocheuse	9,32	38,7
Falaise rocheuse à sommet meuble	0,68	2,8
Flèche littorale	1,27	5,3
Terrasse de plage	2,52	10,5
Marais maritime	3,04	12,6
Zone portuaire	0,04	0,2
TOTAL	24,1	100,0



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

Figure 9. Unité hydrosédimentaire de la baie d'Escuminac

4.2 Unité hydrosédimentaire de Miguasha-ouest

L'unité de Miguasha-ouest constitue en soi une cellule hydrosédimentaire. C'est une petite unité qui compte un peu moins de 7 km de longueur entre le quai de Miguasha et la pointe de Miguasha (figure 10). Malgré sa faible longueur, elle est diversifiée et compte huit types de côte (tableau 8). Les falaises rocheuses dominent avec près de 51 % de la longueur de côte tandis que les falaises meubles occupent près de 8 % (tableau 8). L'autre 40 % est concentré autour du barachois de Miguasha, qui comprend une flèche littorale, un marais maritime et un petit tronçon de terrasse de plage. La dérive littorale principale, qui converge vers le barachois, contribue à l'apport sédimentaire et permet le maintien de ce système de côtes basses. Un seul cours d'eau se jette dans cette unité, dans la partie nord-est du barachois de Miguasha.

Tableau 8. Types de côte de l'unité de Miguasha-ouest

Type de côte	km	%
Falaise meuble	0,39	5,8
Falaise meuble à base rocheuse	0,12	1,8
Falaise rocheuse	1,94	29,1
Falaise rocheuse à sommet meuble	1,48	22,2
Flèche littorale	1,60	24,0
Terrasse de plage	0,40	6,0
Marais maritime	0,7	10,5
Zone portuaire	0,04	0,6
TOTAL	6,67	100,00

4.3 Unité hydrosédimentaire de l'anse aux Corbeaux

L'unité de l'anse aux Corbeaux constitue aussi une cellule hydrosédimentaire (figure 10). Elle fait à peine 1,5 km de longueur (tableau 9) et est isolée entre deux pointes rocheuses qui forment l'extrémité de la pointe de Miguasha. Il s'agit d'une falaise rocheuse en totalité sauf une petite partie qui présente un dépôt meuble en haut de falaise. C'est un milieu peu accessible, sans aucune modification anthropique. Une mince plage est présente au fond des deux anses mais la plateforme rocheuse est visible presque partout sur le bas estran. Le transit sédimentaire est très faible et aucun cours d'eau ne se jette à la côte.

Tableau 9. Types de côte de l'unité de l'anse aux Corbeaux

Type de côte	km	%
Falaise rocheuse	1,26	87,5
Falaise rocheuse à sommet meuble	0,18	12,5
TOTAL	1,44	100,00

4.4 Unité hydrosédimentaire de la baie Tracadigache

De la pointe de Miguasha au quai de Carleton se définit l'unité de la baie de Tracadigache qui comprend deux cellules sur une distance de près de 28 km de côte (figure 10). La cellule principale est celle de Nouvelle - Saint-Omer, dont la dérive littorale principale converge vers l'estuaire de la rivière Nouvelle, qui forme une large échancrure. Les sédiments arrachés aux falaises rocheuses de la pointe de Miguasha migrent vers le nord pour alimenter la flèche littorale de la pointe Labillois et les sédiments arrachés aux basses falaises meubles et aux terrasses de plage, ajoutés aux alluvions de la rivière Stewart, sont ainsi transportés vers l'ouest et alimentent les flèches et cordons littoraux dynamiques des barachois de Saint-Omer et de Nouvelle. Un delta de flot est d'ailleurs présent à l'entrée du large goulet.

La cellule de Nouvelle - Saint-Omer est la plus dynamique de la MRC et le transit sédimentaire est important. La configuration du littoral se modifie rapidement dans ce secteur. La flèche littorale, à l'embouchure de la rivière Stewart, avait été coupée par du dragage en 1956 et un enrochement avait été mis en place pour maintenir le chenal perpendiculaire à la côte. Depuis ces interventions, l'ancienne flèche a migré vers la côte et s'est complètement dissipée tandis qu'une nouvelle flèche est apparue à l'embouchure, au même endroit que la flèche originale. En 1989, une brèche permanente s'est formée sur le banc Shoolbred, en formant l'île Laviolette. Depuis cette ouverture, la migration vers l'ouest semble s'être accélérée et le banc recule rapidement vers les terres. Le marais se fait désormais envahir par des lobes de tempêtes.

La construction d'un quai au début du siècle a favorisé l'accumulation d'une terrasse de plage à l'est de l'embouchure de la rivière Stewart (place du Vieux-quai). Depuis son démantèlement en 1968, le transit sédimentaire a repris sa course vers l'ouest et la terrasse montre des signes importants d'érosion.

La cellule du ruisseau de l'Éperlan est plus restreinte et présente une dérive littorale vers l'est, ce qui explique les taux d'accumulation mesurés dans le secteur de la plage municipale. La limite entre les deux cellules se situe devant les caps de Carleton où on note un point de dérive divergente.

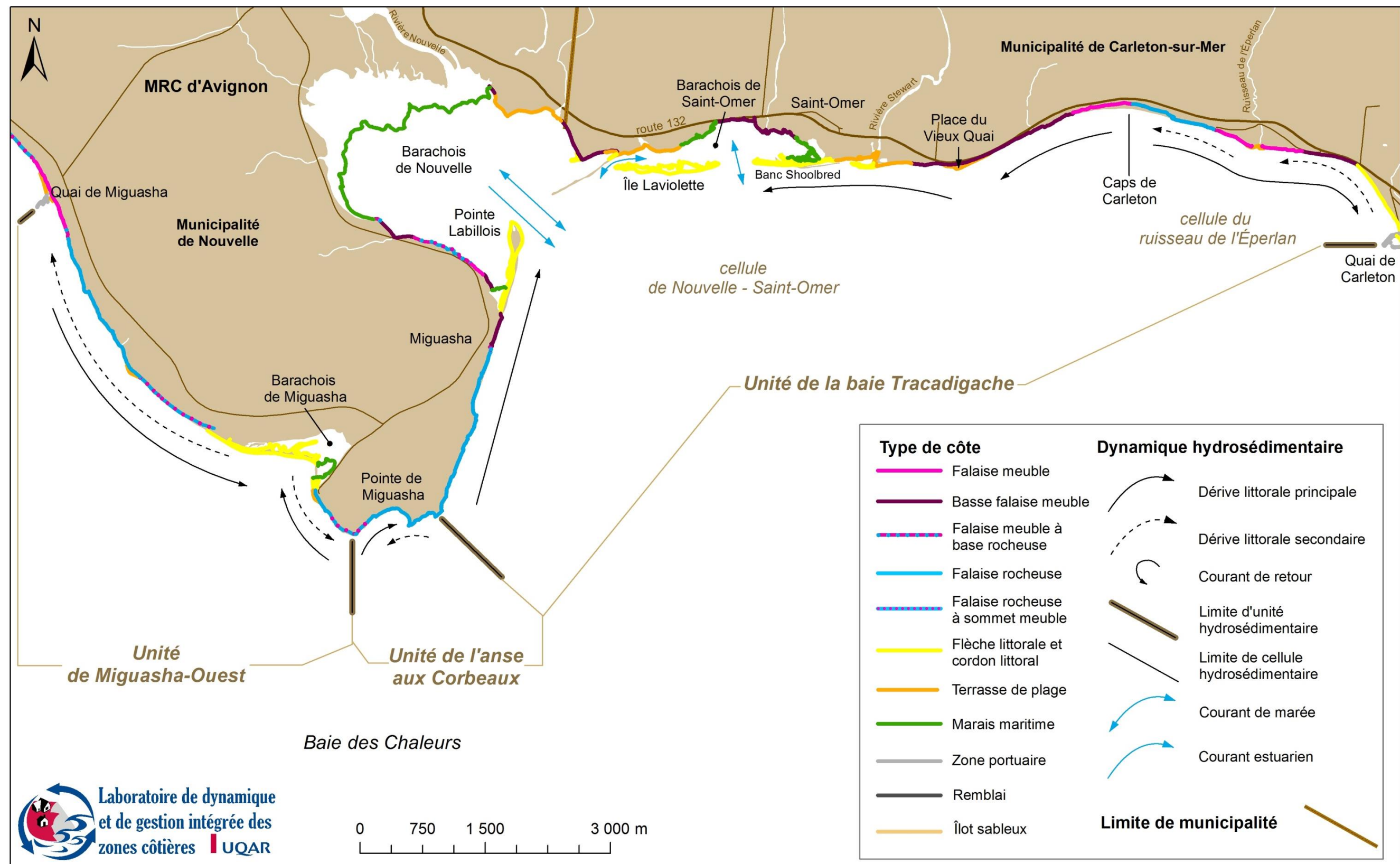
Le cours d'eau le plus important est la rivière Nouvelle qui forme à son embouchure un vaste delta émergé à marée basse et le plus grand marais maritime de la MRC. Ce grand barachois reçoit de plus l'embouchure de 5 autres petits ruisseaux. On retrouve aussi la rivière Stewart et le ruisseau de l'Éperlan qui offrent un apport sédimentaire considérable à la côte en formant chacun un petit delta. On compte finalement deux autres petits ruisseaux qui se jettent dans le barachois de Saint-Omer et un autre à l'est de la place du Vieux-quai.

Les types de côte sont variés et bien distribués dans l'unité (figure 10, tableau 10). Les côtes basses d'accumulation (flèche littorale, terrasse de plage et marais maritime) dominent le littoral de cette unité avec 57 % des côtes. Elles sont surtout concentrées aux environs des barachois de Nouvelle et de Saint-Omer. Les côtes à falaise occupent en tout 42 % de la côte. Les falaises rocheuses se

trouvent à deux endroits. Une section sur la pointe de Miguasha, à l'extrémité ouest de l'unité et l'autre sur les hauts caps de Carleton. Les falaises meubles ont la plus forte proportion avec 29 % de toutes les côtes. On retrouve de petits tronçons de falaises et de basses falaises meubles un peu partout dans l'unité.

Tableau 10. Types de côte de l'unité de la baie Tracadigache

Type de côte	km	%
Falaise meuble	1,76	6,4
Basse falaise meuble	5,69	20,6
Falaise meuble à base rocheuse	0,62	2,2
Falaise rocheuse	3,24	11,7
Falaise rocheuse à sommet meuble	0,40	1,4
Flèche et cordon littoral	5,03	18,2
Terrasse de plage	4,19	15,1
Marais maritime	6,58	23,8
Zone portuaire	0,18	0,6
TOTAL	27,68	100,0



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

Figure 10. Unités hydrosédimentaires de Miguasha-Ouest, de l'Anse aux corbeaux et de la baie Tracadigache

4.5 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 11). À noter que pour des fins administratives, le portrait de la MRC d'Avignon ne comprend pas la cellule de New-Richmond qui fait partie de la MRC de Bonaventure. Les informations relatives à cette cellule se trouvent dans le rapport qui couvre la MRC de Bonaventure (Bernatchez *et al.* 2012b).

La cellule du barachois de Carleton et celle de Maria-Gesgapegiag font 35 km de côte et sont séparés par une zone de divergence du transit sédimentaire, vis-à-vis les caps de Maria. Cette portion de côte est orientée perpendiculairement aux vents de tempête d'est et du sud-est. Presque la totalité du bas de falaise subit une forte érosion et certaines sections sont sensibles aux glissements de terrain. Au milieu de la zone, les courants de retour dirigent les sédiments érodés vers l'avant-côte tandis que les courants de dérive alimentent les plages autant à l'est sur le banc de Maria qu'à l'ouest vers le barachois de Carleton. Ces falaises meubles représentent donc une source de sable et gravier non négligeable pour le maintien des plages environnantes et de l'équilibre des écosystèmes côtiers.

Le barachois de Carleton doit ainsi en partie son existence aux courants de dérive qui transportent les matériaux arrachés aux caps de Maria pour former les flèches littorales. Ce barachois lagunaire présente un goulet étroit qui permet de créer de forts courants de marée. Le grand delta de flot au nord du goulet témoigne de l'influence du courant de marée dans l'évolution du barachois. Le banc Larocque est très dynamique. La première portion est très mince et les vagues de tempête peuvent la franchir et transporter des matériaux (sable, gravier, blocs et débris) vers la lagune. À l'autre extrémité du banc, la pointe Tracadigache s'est élargie de plus de 60 m et s'est allongée de 15 mètres depuis 1934. C'est l'un des seuls endroits du territoire qui est en accumulation sédimentaire. En plus de s'accumuler sur la flèche, une grande partie s'accumule sous l'eau pour former un grand lobe sous-marin à l'extrémité ouest de la flèche. Il se produit donc une perte de sédiments vers le fond marin. Le banc de Carleton est quant à lui plutôt stable. Seulement son extrémité sud en contact avec le goulet change de configuration selon les vents de tempête et les fortes marées.

La cellule de Maria-Gesgapegiag s'allonge jusqu'à l'embouchure de la rivière Cascapédia. La dérive littorale est nettement vers le nord-est jusqu'à Gesgapegiag où elle devient plus diffuse. Bien que l'érosion des caps de Maria au sud-ouest fournisse une certaine quantité de sédiments à la longue terrasse de plage et à la flèche littorale de la pointe Verte, Long (2006) ainsi que Morneau *et al.* (2001) affirment que la source principale du secteur de Maria serait sous-marine. Les analyses des images couleurs à haute résolution spatiale de 2005 montrent effectivement la présence de rides et de dunes de sable dans la zone pré littorale et intertidale qui migrent vers la côte impliquant un apport de sédiments provenant du large (Bernatchez *et al.*, 2011).

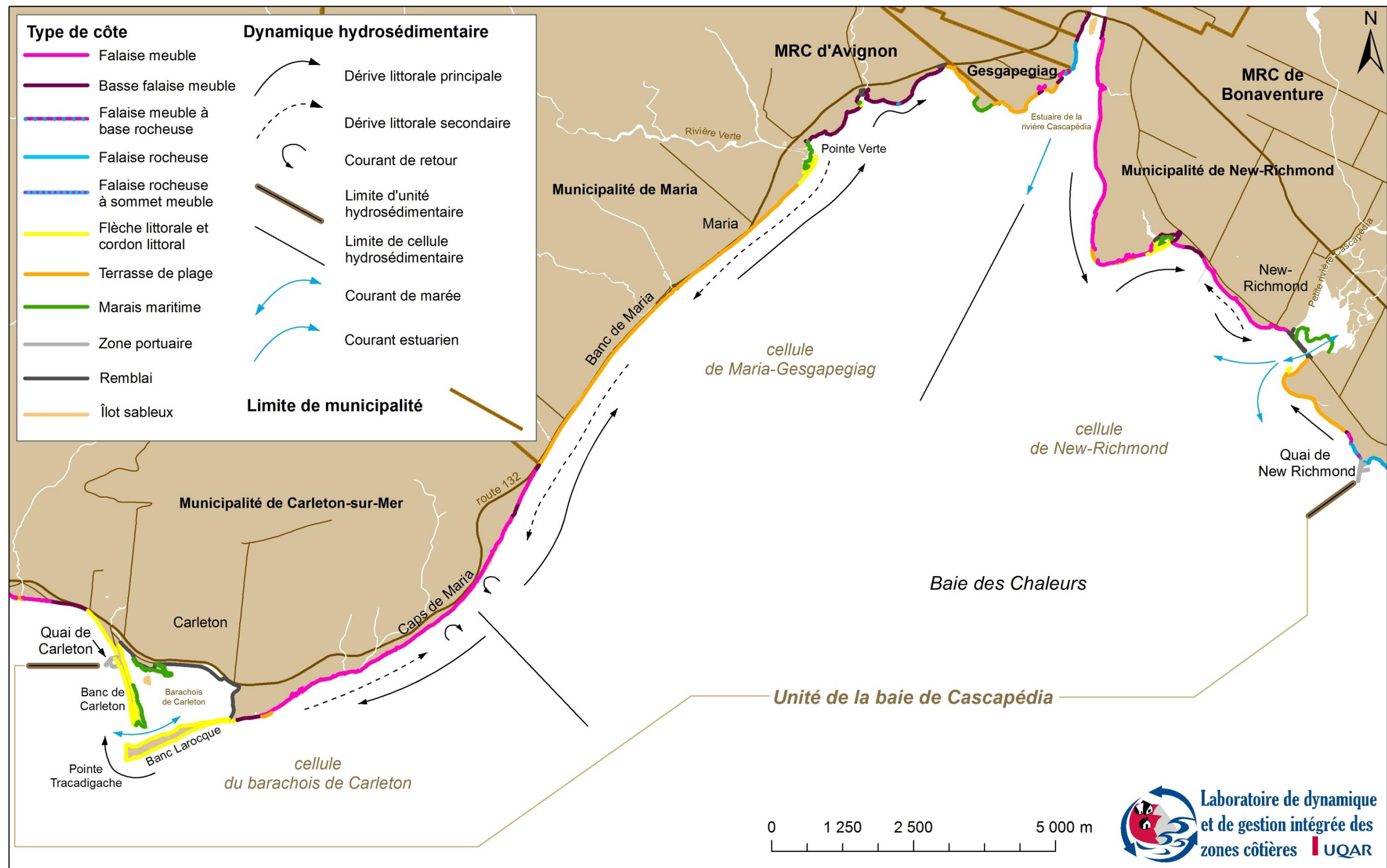
Le principal cours d'eau est la rivière Cascapédia, qui se situe à l'extrémité de la cellule. Bien qu'il s'agisse de la plus grande rivière en Gaspésie et qu'un grand delta est formé à son embouchure, la dynamique et la profondeur des chenaux sur le sommet du delta contribuent à transporter les

sédiments au large, au front du delta, sans que les côtes avoisinantes puissent être alimentées directement. La rivière Verte est le second cours d'eau en importance dans l'unité. Un delta est présent et des bancs d'accumulation en bordure des chenaux indiquent qu'il y a un apport sédimentaire à la côte. Le territoire compte aussi 14 petits ruisseaux dont deux se jettent dans le barachois de Carleton.

Ce sont les terrasses de plage et les falaises meubles qui dominent l'unité avec 53 % de la longueur totale (tableau 11). Les terrasses de plage se concentrent en un long tronçon de près de 7 km entre les falaises meubles de Carleton et la flèche littorale de la pointe Verte. Cette zone est communément appelée banc de Maria. Le secteur de Gesgapegiag comporte aussi une zone de terrasse de plage. Un long tronçon de falaise meuble, nommé les caps de Maria, fait plus de 7 km entre le barachois de Carleton et le banc de Maria. De petits tronçons de basse falaise meuble sont dispersés le long du littoral sauf une zone de près de 3 km à l'est de la pointe Verte. Les 12 % de flèches littorales sont divisées en 2 zones : les deux flèches du barachois de Carleton et celle de la pointe Verte. Le pourcentage élevé de côte à remblai s'explique par la construction de la promenade à l'intérieur du barachois de Carleton qui constitue un empiètement dans le milieu marin.

Tableau 11. Types de côte de l'unité de la baie de Cascapédia

Type de côte	km	%
Falaise meuble	7,63	21,9
Basse falaise meuble	4,82	13,9
Falaise meuble à base rocheuse	0,13	0,4
Falaise rocheuse	0,50	1,4
Falaise rocheuse à sommet meuble	0,10	0,3
Flèche littorale	4,23	12,2
Terrasse de plage	9,31	26,8
Marais maritime	4,02	11,6
Îlot sableux	0,91	2,6
Zone portuaire	0,18	0,5
Remblai	2,95	8,5
TOTAL	34,77	100,0



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

Figure 11. Unité hydrosédimentaire de la baie de Cascapédia

5. Sensibilité de la côte à l'érosion

Dans son ensemble, les côtes de la MRC d'Avignon ne présentent pas de forts taux d'érosion. La moyenne historique des taux de déplacement de toutes les côtes confondues est de -0,07 m/an (figure 12). Cependant, en retenant seulement les taux de recul (taux négatifs), la moyenne augmente de plus du double pour atteindre -0,16 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 -0,66 m (figure 12). Ce sont ensuite les terrasses de plage et les falaises meubles avec des taux respectivement de -0,38 et -0,31 m/an. À l'opposé, les falaises rocheuses sont peu sensibles à l'érosion avec un taux probable de -0,08 m/an. Même les falaises rocheuses avec une composante meuble restent très peu sensibles.

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 4 fois plus élevés que les taux historiques (figure 12). On note cependant que les taux probables des flèches littorales sont 13 fois supérieurs aux taux historiques tandis qu'ils sont en moyenne 3 fois supérieurs pour les autres types de côtes. Ces résultats indiquent que malgré les faibles reculs, la stabilité ou même l'accumulation des flèches littorales dans le passé, les conditions actuelles et futures pourraient faire en sorte de modifier cette tendance. C'est d'ailleurs pour les flèches littorales que les reculs événementiels maximum les plus élevés ont été enregistrés, soit 17,2 m (tableau 3). Les flèches littorales et les terrasses de plage 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 (Koohezare *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 12 met en évidence les zones les plus sensibles du territoire. Il s'agit des zones en rouge et en orange foncé sur la cartographie des taux probables qui représentent des portions de flèche littorale, de terrasse de plage et de basse falaise meuble. Ces zones ont des taux projetés supérieurs à -0,5 m/an. Les zones en rouge indiquent des taux projetés supérieurs à -1 m/an et se retrouvent sur trois flèches littorales.

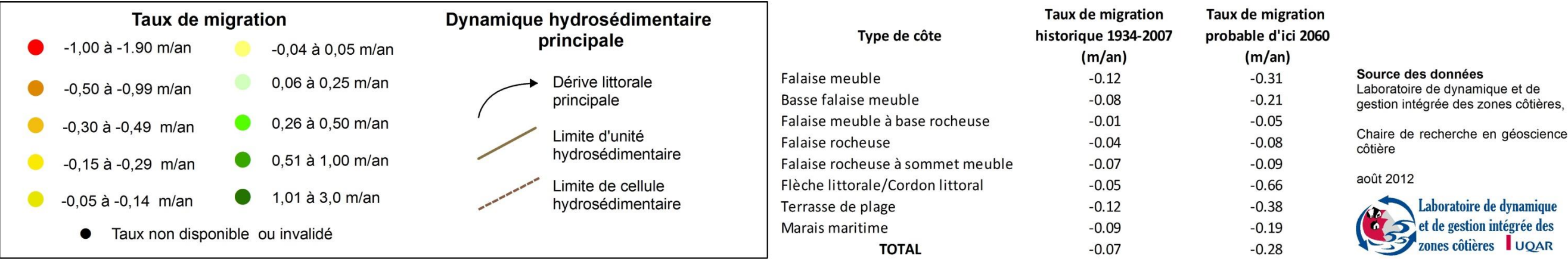


Figure 12. Comparaison des taux de migration historiques avec les taux de migration probables

D'après la classification des taux probables, on note aussi que seulement 19 % des côtes de la MRC d'Avignon seront stables ou en accumulation d'ici 2060 alors que 81 % connaîtront une érosion (figure 13). On remarque cependant que 74 % des côtes en recul présenteront des taux entre -0,6 et -0,01 m/an et que 51 % 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 sur les basses falaises meubles. Les reculs plus importants que -1 m/an correspondent à seulement 2,4 % et sont attribuables uniquement aux flèches littorales.

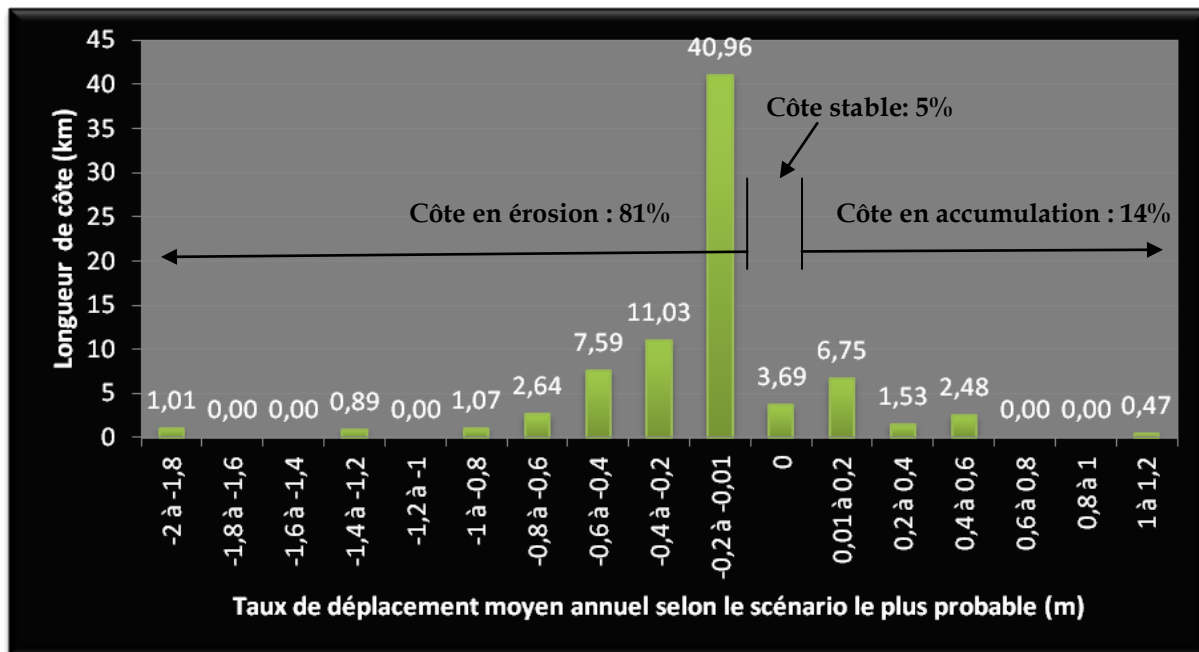


Figure 13. Longueur de côte selon les catégories de taux probable

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 183 zones homogènes de la MRC d'Avignon. 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 14. L'ensemble des cartes est présenté dans un recueil de cartes conjoint à ce document, soit 46 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.

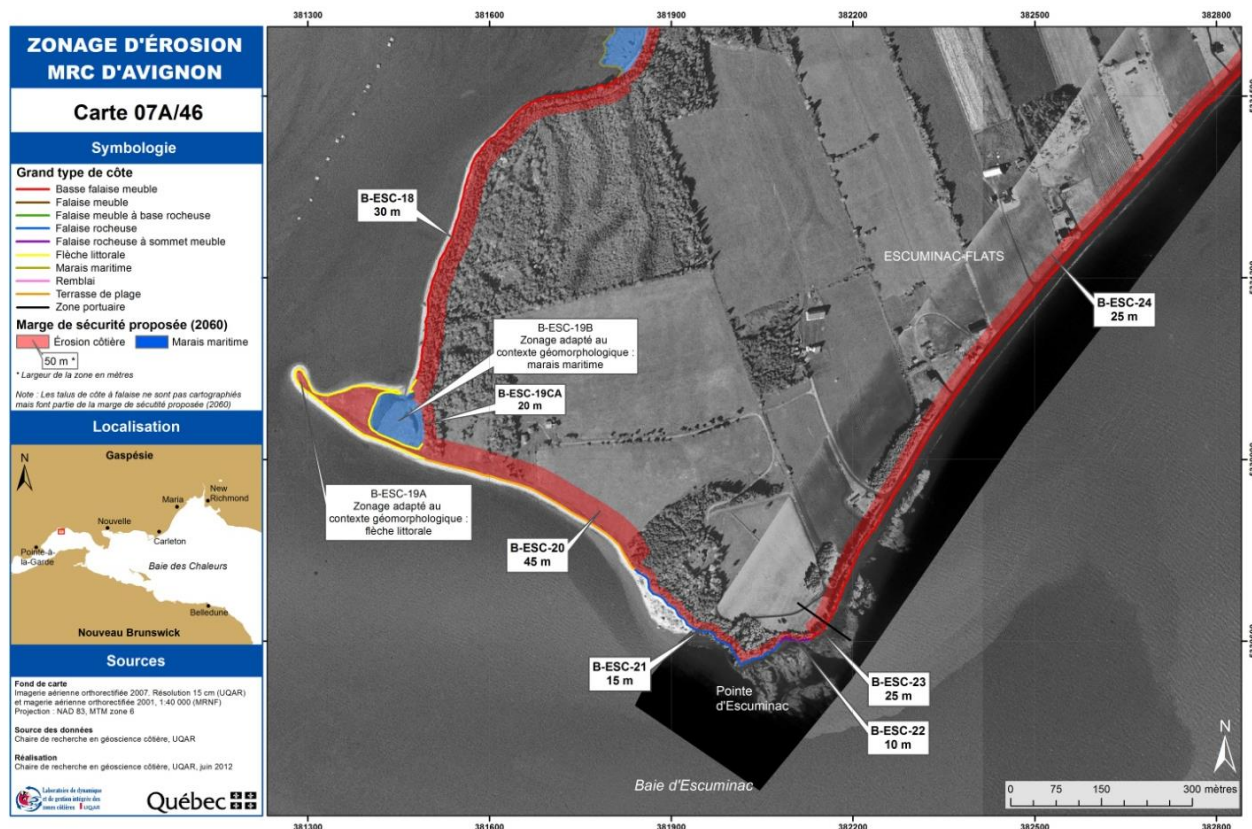


Figure 14. Exemple de carte

Une classification des marges a été effectuée afin d’offrir un portrait d’ensemble des marges proposées (figure 15). Trois grandes catégories de marges ressortent :

- 1) les marges de 10 et de 25m qui font chacune autour de 20 km de longueur de côte;
- 2) les marges de 15, 20, 30, 40 ainsi que les marges variables qui font chacune entre 10 et 12 km de longueur et;
- 3) les marges de 35, 45, 55, 60 et 85 m qui font chacune entre 0 et 3 km de côte.

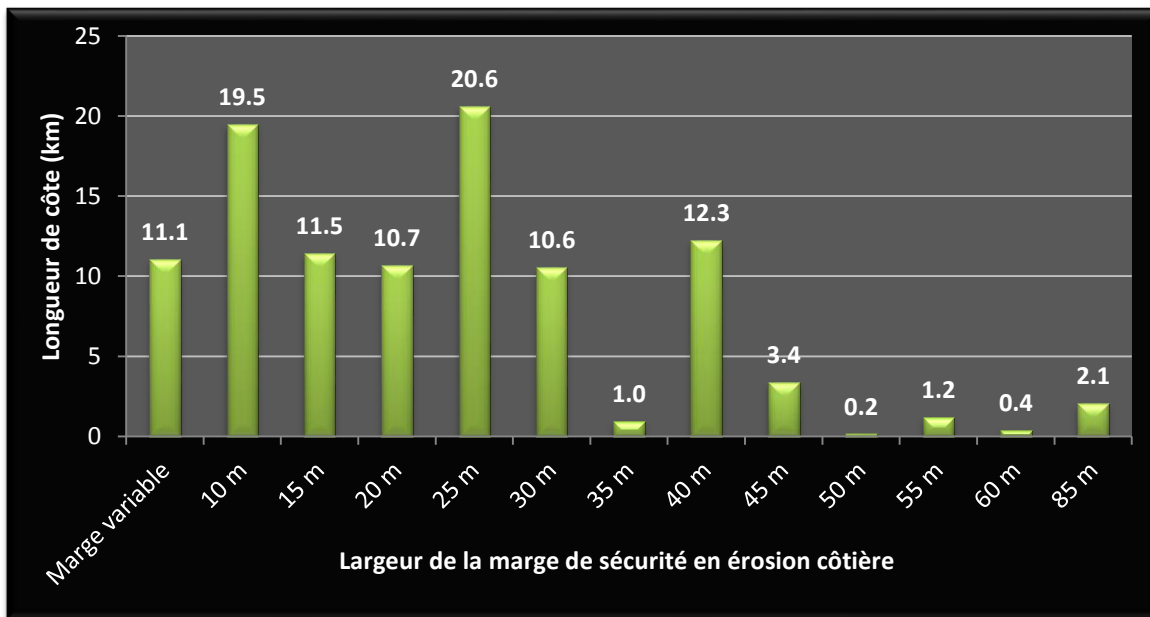


Figure 15. Longueur de côte selon la largeur de la marge de sécurité en érosion côtière

La première catégorie comprend les deux classes de marges qui couvrent le plus de côte (38%). La marge de 10 m est présente sur presque la totalité des falaises rocheuses et constitue la marge minimale pour 40 des 49 zones homogènes concernées. La marge de 25 m est présente sur presque toutes les falaises meubles et sur plus de la moitié des basses falaises meubles. Des marges minimales ont été appliquées sur 39 des 41 zones homogènes.

La deuxième catégorie, qui occupe 54 % des côtes, comprend d’abord les marges variables qui comptent 11 km de côtes divisées en 19 zones homogènes. Elles sont appliquées sur toutes les flèches littorales, les cordons littoraux et les îlots sableux à l’exception de la flèche du banc de Carleton qui fait l’objet d’une marge minimale. Les marges de 15 m, qui se divisent en 18 zones homogènes, sont, dans une faible proportion, situées sur les falaises rocheuses les plus actives et, pour la majorité, appliquées à l’arrière des marais. Les marges de 20 m comptent 7 zones homogènes dont 6 sont situées à l’arrière des marais (pour la référence 2001) et une seule concerne un court tronçon de falaise rocheuse avec une encoche importante. Le fond des marais représente en tout 17,9 km (17% des côtes) divisées en 14 zones homogènes. Les marges de 30 m sont appliquées sur des basses falaises meubles dans 12 des 13 zones homogènes concernées. C’est la marge minimale pour la référence 2001. Seule une zone de 30 m correspond à une falaise meuble.

Les marges de 40 m sont des marges minimales pour des terrasses de plage pour 20 des 22 zones homogènes concernées. Seules deux zones 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 35 et 85 m occupant 14 % de la surface des marges divisée en 15 zones homogènes. La marge de 85 m est appliquée sur deux zones homogènes sur la flèche littorale du banc de Carleton. Toutes les autres marges sont appliquées sur des terrasses de plage plus actives que la moyenne.

Une marge minimale a été appliquée pour 138 des 183 zones homogènes qui représentent 67 % des côtes. Ce fort pourcentage de marge minimale indique que les taux de reculs sont majoritairement inférieurs à la moyenne dans la MRC d'Avignon par rapport à l'ensemble des deux MRC.

Pour les milieux humides côtiers, seulement la marge appliquée à l'arrière du marais est comptabilisée (10, 15 ou 20 m) puisque les marais en soi font parties de la zone de marée. À titre indicatif, les schorres inférieur et supérieur ainsi que la slikke sont notés en bleu sur les cartes et représentent une surface de 2,25 km² au total (voir section 2.6.5).

Sur l'ensemble de la MRC d'Avignon, les marges proposées représentent une superficie totale de 2,76 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 d'Avignon 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 d'Avignon, soit l'aléa de submersion (figure 16). Il affecte les côtes basses (terrasses de plages, flèches littorales, marais maritime ainsi que les basses falaises) et son intensité 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.



Figure 16. Submersion côtière, 6 décembre 2010, Maria

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-Villemare, 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. 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., 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., Fraser, C., Dugas, S. et Drejza, S. (2012b) « 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.
- Bernatchez, P., Fraser, C. et Dugas, S. (2012c) « Marges de sécurité en érosion côtière - MRC d'Avignon - 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, 46 cartes.
- 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.

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.

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

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

Cloutier, R., Proust, J.-N. et Tessier, B. (2011) « The Miguasha Fossil-Fish-Lagerstätte: a consequence of the Devonian land-sea interactions ». *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments* 91, 293-323.

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.

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

Environnement Canada (2004) « Rapport de données mensuelles, station Nouvelle – Québec ». La voie verte d'Environnement Canada, [en ligne].
http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/monthlydata_f.html

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. et Bernatchez, P. (2006) « Caractérisation du littoral et évaluation des risques d'érosion et de submersion côtière pour le secteur de la pointe Verte, Maria, Québec ». Rapport de recherche remis au ministère de la Sécurité publique du Québec. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR, 44 p.

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 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

Jutras, P. (2001) « Tectonostratigraphie du carbonifère de la Gaspésie, Québec, Canada ». Thèse présentée à Chicoutimi comme exigence partielle du doctorat en ressources minérales offert à l'Université du Québec à Montréal en vertu du protocole d'entente avec l'Université du Québec à Chicoutimi, 265 p.

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 Strategies 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.

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.

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 Cascapédia ». 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.

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.

Rust, B.R., Lawrence, D.A. et Zaitlin, B.A. (1989) « The sedimentation and tectonic significance of Devonian and Carboniferous terrestrial successions in Gaspé, Québec ». *Atlantic Geology*, 25:1-13

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/>

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 de la marge de sécurité en érosion côtière

Numéro de la carte	Nom
01A	La Petite Pointe
02A	Pointe-à-la-Garde_1
03A	Pointe-à-la-Garde_2
04A	Ruisseau Mongo
05A	Ruisseau Glenn
06A	Escuminac
07A	Escuminac Flats
08A	Ruisseau McKenzie
09A	Ruisseau des Anglais
10A	Ruisseau Smiley
11A	Pointe à Fleurant
12A	Parc de Miguasha
13A	Miguasha-Ouest_1
14A	Miguasha-Ouest_2
15A	Pointe Yacta
16A	Banc de Miguasha
17A	Pointe de Miguasha
18A	Miguasha_1
19A	Miguasha_2
20A	Pointe Labillois
21A	Bassin de la rivière Nouvelle_1
22A	Bassin de la rivière Nouvelle_2
23A	Bassin de la rivière Nouvelle_3
24A	Bassin de la rivière Nouvelle_4
25A	Île Laviolette
26A	Saint-Omer
27A	Rivière Stewart
28A	Carleton-Ouest
29A	Havre de Carleton
30A	Carleton
31A	Banc de Carleton
32A	Pointe Tracadigache
33A	Banc Larocque
34A	Route Saint-Onge
35A	Pointe-Bourg
36A	Caps de Maria
37A	Route Thibodeau
38A	Ruisseau Martien
39A	Route Audet
40A	Plage des Goélands
41A	Maria
42A	Pointe Verte
43A	Pointe Kilmore
44A	Anse Sainte-Hélène
45A	Gesgapegiag
46A	Rivière Cascapédia