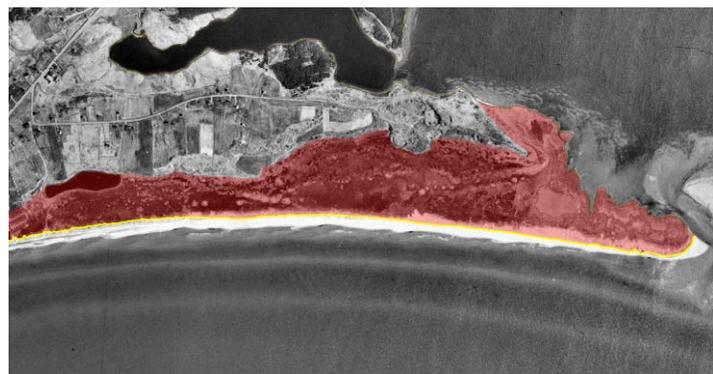


Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des îles de la Madeleine

Présenté au ministère de la Sécurité Publique du Québec

Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph.D.

Juillet 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

Susan Drejza, M.Sc., Professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR
Caractérisation côtière, analyse de l'évolution côtière, rédaction et géomatique

Steeve Dugas, B.Sc., Professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR
Géomatique et évolution côtière

Madeleine Ménard, B.Sc., Professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR
Géomatique

Marie-Noëlle Juneau, M. Sc., Professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR
Géomatique

Remerciements

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

RÉFÉRENCE COMPLÈTE

Bernatchez, P., Drejza, S. et Dugas, S. (2012) Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des îles de la Madeleine. 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

Photographie de la page de couverture : Susan Drejza

Synthèse

Les îles de la Madeleine, sont aux prises avec une **sérieuse problématique d'érosion côtière**. En 2006, 68 % des côtes de l'archipel étaient affectées par des processus d'érosion, ce qui en faisait la région avec la plus forte proportion de côtes en érosion de l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. C'est pourquoi les **235,5 km de côtes** extérieures ont été jugés comme étant prioritaires pour évaluer les risques d'érosion côtière.

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 (1963, 1983 et 2008). 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 **4 614 points de mesures**. Puis les 794 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 des îles de la Madeleine a ensuite été divisée en **251 zones homogènes** ayant une même dynamique hydrosédimentaire, d'érosion 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 14 % des côtes des îles de la Madeleine seront en accumulation d'ici 2060 alors que **81 % seront en érosion**.

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

{Taux de recul du scénario le plus probable} X 52 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
Arrondie à 5 m près*

Le calcul de la marge de sécurité en érosion côtière a été effectué individuellement pour chacune des 251 zones homogènes des îles de la Madeleine 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 des îles de la Madeleine par le biais de 90 cartes au 1 :5 000 et 10 cartes au 1 :20 000 (format 11''x17'').

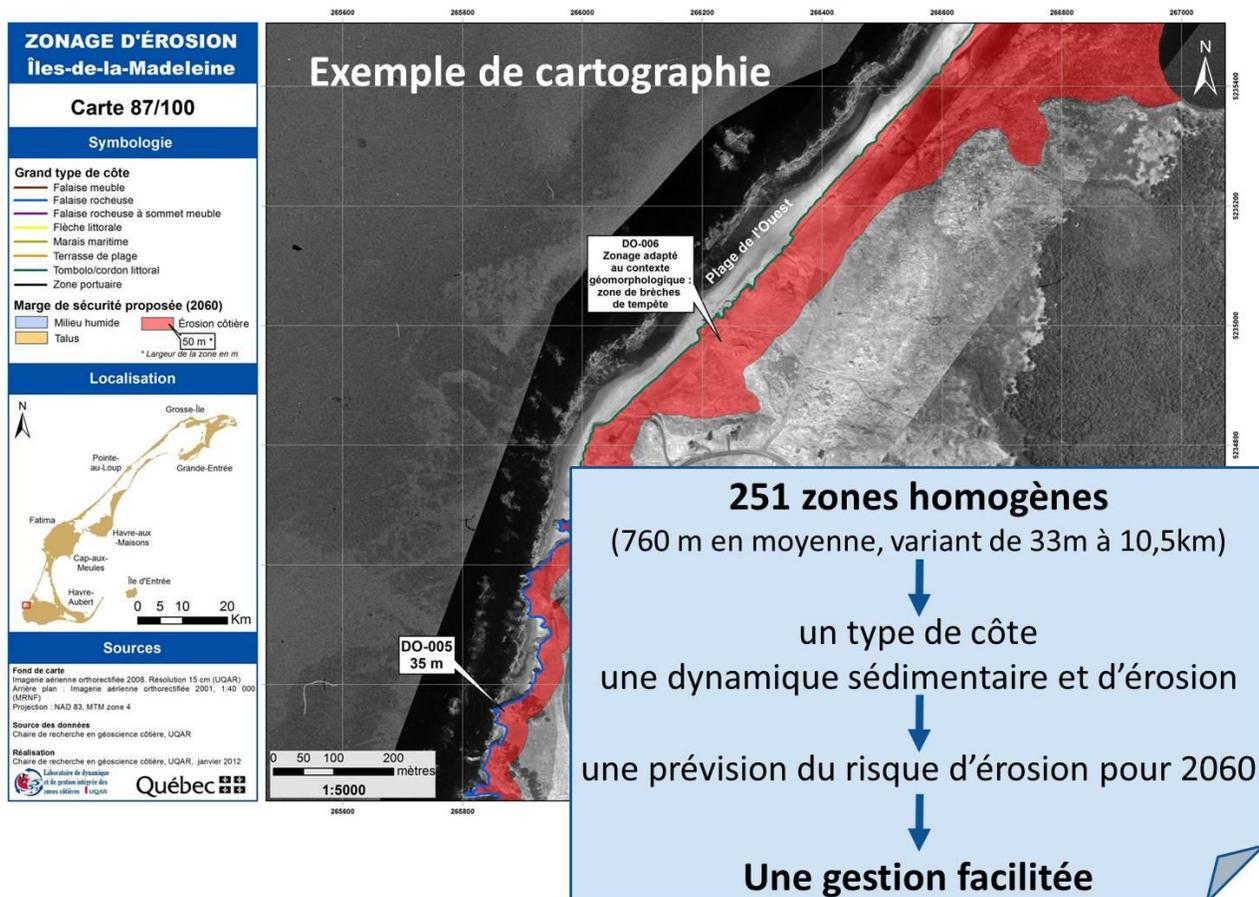


Table des matières

ÉQUIPE DE RÉALISATION	II
REMERCIEMENTS	II
SYNTHÈSE.....	III
TABLE DES MATIÈRES	V
TABLE DES FIGURES.....	VII
TABLE DES TABLEAUX.....	VIII
TABLE DES ÉQUATIONS	VIII
TABLE DES ENCADRÉS	VIII
1. INTRODUCTION	9
1.1 MISE EN CONTEXTE	9
1.2 OBJECTIFS.....	10
1.3 LOCALISATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	10
2. MÉTHODOLOGIE	12
2.1. DÉFINITION DU TYPE DE ZONAGE POUR LES ALÉAS CÔTIERS	12
2.2 CARACTERISATION DE LA COTE.....	14
2.2.1 Types de côtes.....	14
2.2.2 Dynamique hydrosédimentaire	14
2.3 ÉVOLUTION HISTORIQUE DE LA ZONE CÔTIÈRE PAR PHOTO-INTERPRÉTATION	16
2.3.1 Intégration des photographies aériennes historiques dans un SIG	16
2.3.2 Traçage du trait de côte et de la ligne de rivage par photo-interprétation.....	17
2.3.3 Calcul de l'évolution historique.....	18
2.5 SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION FUTURE DE LA CÔTE	22
2.5.1 Définition des zones homogènes d'évolution côtière	22
2.5.2 Scénarios d'évolution.....	22
2.5.3 Choix du scénario le plus probable	23
2.6 CALCUL DE LA MARGE DE SÉCURITÉ EN ÉROSION CÔTIÈRE.....	24
2.6.1 Pourquoi utilise-t-on un horizon de gestion d'environ 50 ans ?.....	24
2.6.2 Pourquoi ajouter une mesure de recul évènementiel ?	25
2.6.3 Marge minimale de sécurité pour les îles de la Madeleine.....	26
2.6.4 Cas particuliers	27
3. DESCRIPTION DU SITE.....	28
3.1 CONTEXTE PHYSIQUE	28
3.2 CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES ET CLIMATIQUES	31
3.2.1 Hydrographie.....	31
3.2.2 Océanographie	31
3.2.3 Climat.....	32
3.2.4 Variation du niveau marin relatif et évènements extrêmes	32
3.3 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU MILIEU CÔTIER	34
4. PORTRAIT DES UNITÉS HYDROSÉDIMENTAIRES DES ÎLES DE LA MADELEINE	37
4.1 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE LA POINTE AUX LOUPS.....	37
4.2 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE LA POINTE DE L'EST.....	40
4.3 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE LA GRANDE ENTRÉE	42
4.4 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE LA DUNE DU SUD.....	44
4.5 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DU CAP AUX MEULES / HAVRE AUX MAISONS	46
4.6 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE LA BAIE DE PLAISANCE.....	48

4.7 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DU HAVRE AUBERT/SANDY HOOK.....	50
4.8 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE LA DUNE DE L'OUEST	52
4.9 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE L'ÉTANG DU NORD	54
4.10 UNITÉ HYDROSÉDIMENTAIRE DE L'ÎLE D'ENTRÉE.....	56
5. GESTION DE L'ÉROSION CÔTIÈRE AUX ÎLES DE LA MADELEINE.....	58
5.1 SENSIBILITÉ DE LA CÔTE À L'ÉROSION	58
5.2 CLASSIFICATION DES MARGES DE SÉCURITÉ EN ÉROSION CÔTIÈRE	63
6. CONCLUSION	67
7. RÉFÉRENCES	68
8. ANNEXES	72
ANNEXE 1. GLOSSAIRE DES PRINCIPAUX TERMES GÉOMORPHOLOGIQUES	72
ANNEXE 2. LISTE DES CARTES DE LA MARGE DE SÉCURITÉ EN ÉROSION CÔTIÈRE	73
ANNEXE 3. FICHES EXPLICATIVES DE LA MARGE DE SÉCURITÉ EN ÉROSION CÔTIÈRE SELON LE TYPE DE CÔTE	76

Table des figures

Figure 1. Localisation générale (A) et régionale (B) des îles de la Madeleine.....	10
Figure 2. Archipel des îles de la Madeleine.....	11
Figure 3. Tracés utilisés pour l'évolution historique du littoral selon différentes	17
Figure 4. Méthodologie employée pour la mesure de l'érosion.....	19
Figure 5. Mesure d'une station de suivi de l'érosion.....	20
Figure 6. Localisation des stations de suivi de l'érosion aux Îles de la Madeleine	21
Figure 7. Environnement maritime des îles de la Madeleine.....	28
Figure 8. Géologie des îles de la Madeleine.....	30
Figure 9. Répartition du nombre de tempête selon les mois (avec des vitesses initiales et finales de 60 km/h ou plus) ..	33
Figure 10. Localisation des unités hydrosédimentaires des îles de la Madeleine	34
Figure 11. Répartition des principaux types de côte aux îles de la Madeleine	35
Figure 12. Unité hydrosédimentaire de la Pointe aux Loups : cellules, dérives littorales et type de côte.....	39
Figure 13. Cellules hydrosédimentaires et type de côte de l'unité de la Pointe de l'Est	41
Figure 14. Type de côtes et cellules hydrosédimentaires de l'unité hydrosédimentaire de la Grande Entrée	43
Figure 15. Cellules hydrosédimentaires et type de côte de l'unité de la Dune du Sud.....	45
Figure 16. Cellules hydrosédimentaires et types de côtes de l'unité du Cap aux Meules / Havre aux maisons.....	47
Figure 17. Cellules hydrosédimentaires de l'unité de la baie de Plaisance	49
Figure 18. Cellules hydrosédimentaires et types de côte de l'unité du Havre Aubert/SandyHook	51
Figure 19. Carte des cellules hydrosédimentaires et des types de côte de l'unité hydrosédimentaire de la Dune de l'Ouest.....	53
Figure 20. Unité hydrosédimentaire de l'Étang du Nord : dérives littorales et types de côte.....	55
Figure 21. Cellules hydrosédimentaires et type de côte de l'unité de l'île d'Entrée.....	57
Figure 22. Évolution côtière historique et probable des îles de la Madeleine.....	60
Figure 23. Longueur de côtes selon les catégories de taux probable.....	61
Figure 24. Zones portuaires des îles de la Madeleine.	62
Figure 25. Exemple de cartographie de marge de sécurité en érosion proposée (carte 87 - Étangs des Caps).....	64
Figure 26. Longueur de côte (km) selon la largeur de la marge de sécurité en érosion côtière	65
Figure 27. Tempête d'octobre 2000 sur la flèche littorale de La Digue	67

Table des tableaux

Tableau 1. Définition des principaux types de côte	14
Tableau 2. Identifiants des zones homogènes	22
Tableau 3. Recul maximum enregistré lors d'un événement (m) selon les types de côte.....	25
Tableau 4. Taux d'érosion probables moyens selon les types de côte (m/an).....	26
Tableau 5. Marge minimales de sécurité en érosion côtière pour 2060.....	26
Tableau 6. Résultats des simulations de l'impact des variations de température sur les conditions de glace pour la période 1996-2003 et des projections futures.....	33
Tableau 7. Nature des côtes des îles de la Madeleine	35
Tableau 8. Principaux types de côtes des îles de la Madeleine.....	36
Tableau 9. Types de côtes de l'unité de la Pointe aux Loups	38
Tableau 10. Type de côte de l'unité hydrosédimentaire de la Pointe de l'Est.....	40
Tableau 11. Types de côte de l'unité hydrosédimentaire de la Grande Entrée.....	42
Tableau 12. Types de côte de l'unité hydrosédimentaire de la Dune du Sud.....	44
Tableau 13. Types de côte de l'unité hydrosédimentaire du Cap aux Meules/Havre aux Maisons	46
Tableau 14. Types de côtes de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance.....	48
Tableau 15. Types de côte de l'unité hydrosédimentaire du Havre Aubert/Sandy Hook.....	50
Tableau 16. Types de côtes de l'unité de la Dune de l'Ouest.....	52
Tableau 17. Types de côte de l'unité de l'Étang du Nord.....	54
Tableau 18. Types de côte de l'unité de l'Île d'Entrée.....	56
Tableau 19. Taux de migration historique et probable selon les types de côte.....	58
Tableau 20. Taux de migration historiques et probables selon les unités hydrosédimentaires.....	59

Table des équations

Équation 1. Marge de sécurité en érosion côtière	24
---	----

Table des encadrés

Encadré 1. Définition des aléas côtiers	9
Encadré 2 : Termes utiles pour la dynamique hydrosédimentaire	15

1. Introduction

1.1 Mise en contexte

Les îles de la Madeleine, sont aux prises avec une sérieuse problématique d'érosion côtière. En 2006, 68 % des côtes de l'archipel étaient affectées par des processus d'érosion, ce qui en faisait la région avec la plus forte proportion de côtes en érosion de l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (LDGIZC, 2006). De plus, dans un contexte de changements climatiques, les taux d'érosion devraient s'accroître au Québec (Bernatchez *et al.*, 2008; Savard *et al.*, 2009). L'érosion côtière affecte tant l'occupation résidentielle du territoire que la route 199, seule route reliant les sept îles habitées de l'archipel. Plusieurs cas de résidences à risque imminent d'érosion ont été documentés après le passage de tempêtes, obligeant parfois les propriétaires à reculer ou à déménager leur habitation. De plus, l'érosion a déjà conduit le ministère des Transports du Québec (MTQ) à effectuer plusieurs travaux de protection tels que des enrochements et des recharges en sables et à réaliser plusieurs études sur les secteurs les plus sensibles en ce qui a trait au transport. La problématique de l'érosion est exacerbée dans l'archipel par la particularité insulaire qui ne permet pas le recours à l'arrière-pays pour s'éloigner de la côte. C'est pour l'ensemble de ces constats que l'archipel des îles de la Madeleine a été choisi comme secteur prioritaire pour la réalisation d'une étude sur l'érosion. La Chaire de recherche en géoscience côtière de l'Université du Québec à Rimouski a été mandatée par le ministère de la Sécurité publique du Québec pour réaliser cette étude et ainsi fournir des outils de gestion du littoral.

Pour cela, une analyse globale de l'ensemble du système côtier des îles de la Madeleine est nécessaire tant au niveau de la caractérisation des côtes, de la dynamique hydrosédimentaire que de l'évolution historique et récente. En effet, la gestion du risque, l'analyse et la mise en œuvre de solutions d'adaptation nécessitent une nouvelle approche basée sur les unités et les cellules hydrosédimentaires (SDAGE, 2005; De la Vega-Leinert et Nicholls, 2008; Dawson *et al.*, 2009); ceci afin que les actions d'aménagement soient appropriées selon la dynamique côtière et qu'elles n'aient pas d'impacts négatifs sur des secteurs avoisinants. Il est à noter que les deux principaux aléas d'origine marine qui affectent les côtes du Québec maritime sont l'érosion et la submersion (encadré 1). L'aléa de submersion est présent sur les côtes basses des îles de la Madeleine et il est important d'en tenir compte, cependant, cette étude s'est concentrée sur l'aléa d'érosion seulement.

Encadré 1. Définition des aléas côtiers

Érosion : Phénomène d'ajustement de la côte qui entraîne une perte de substrat par des processus marins, terrestres ou aériens. L'érosion peut être verticale (abaissement de la plage) ou horizontale (perte de terrain côtier).

Submersion : Inondation des terrains côtiers par la mer. La submersion peut être temporaire (due aux vagues de tempête ou à une surcote par exemple) ou permanente (due à la hausse du niveau de la mer). Aussi appelée *submersion marine*.

1.2 Objectifs

Les objectifs de ce projet de recherche sont :

- 1- réaliser un portrait précis des types de côtes et des unités hydrosédimentaires des îles de la Madeleine;
- 2- Établir un bilan de l'évolution côtière de l'ensemble du système côtier directement exposé aux vagues;
- 3- Proposer des marges de sécurité en érosion côtière adaptées pour chaque zone homogène.

1.3 Localisation de la zone d'étude

Les îles de la Madeleine forment un archipel situé dans le golfe du Saint-Laurent (figure 1).

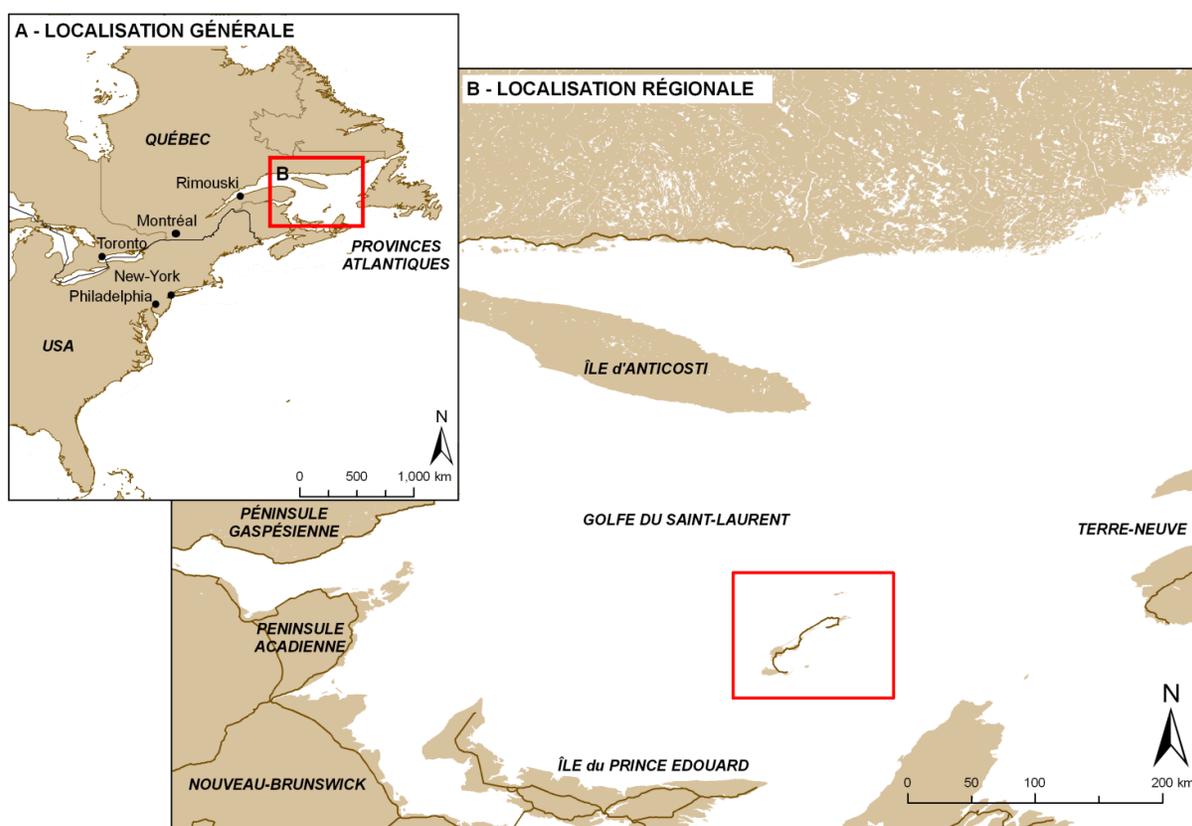


Figure 1. Localisation générale (A) et régionale (B) des îles de la Madeleine

Huit îles sont habitées en permanence mais seules sept de ces îles (l'île de la Grande Entrée, l'île de l'Est, la Grosse Île, l'île au Loup, l'île du Havre aux Maisons, l'île du Cap aux Meules et l'île du Havre Aubert) sont reliées entre elles par d'étroits cordons de sable dunifiés (figure 2). L'île d'Entrée est la seule île habitée non reliée aux autres. La côte à l'étude est longue de 235,5 km (figure 2). Cela n'inclus pas l'intérieur des lagunes, le Bassin, Bassin aux Huîtres ni les îles non habitées telles que l'île Brion ou le Corps Mort. Par contre, l'île d'Entrée est incluse dans cette étude. La superficie de l'archipel est de 202 km² mais l'espace habitable est d'environ 140 km² une fois les cordons dunaires exclus car non constructibles (Municipalité des Îles, 2012).

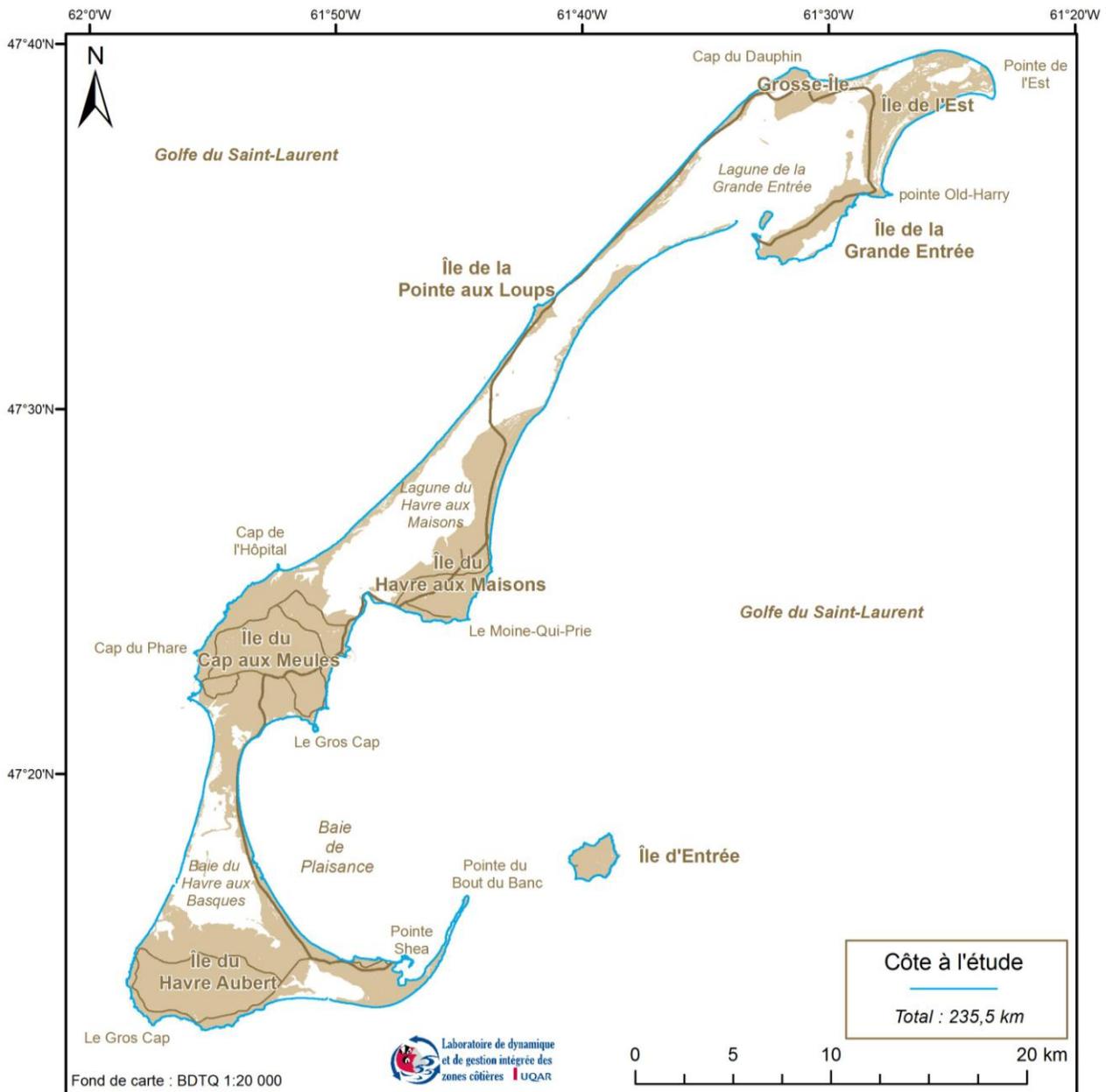


Figure 2. Archipel des îles de la Madeleine

Les îles de la Madeleine font partie de la région administrative de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine (région 11). Deux instances municipales existent sur le territoire, soit la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine et la Municipalité de Grosse-Île. Depuis le 1^{er} janvier 2006, elles sont regroupées au sein de l'agglomération des Îles-de-la-Madeleine qui possède des pouvoirs équivalents à une municipalité régionale de comté (MRC).

2. Méthodologie

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 des Îles-de-la-Madeleine car le territoire n'est pas homogène et que l'érosion n'est pas constante le long des côtes. L'application d'un tel zonage a pour conséquence de soustraire des territoires non sensibles aux aléas pour le développement tout en négligeant de zoner des milieux fortement sensibles aux aléas côtiers (Drejza, 2010). C'est pourquoi le zonage d'érosion proposé ici est un **zonage à marge variable**. Ce type de zonage se base sur le fait que la côte n'est pas homogène et que les aléas côtiers peuvent donc varier en intensité. Ainsi le zonage est déterminé à partir du taux de changement à long terme de la ligne de rivage de chacun des sous-secteurs ou zones homogènes, taux qui est multiplié par le nombre d'années considérées dans le plan de gestion. L'intensité de l'érosion côtière historique permet ainsi de prévoir quelle sera l'érosion future. Cette méthode de zonage est proposée par plusieurs chercheurs (Pugh, 2004; Paskoff, 2004; Dean et Dalrymple, 2004; Sabatier *et al.*, 2008). Elle est également utilisée par certains gouvernements tels qu'en Caroline du Nord (Division de l'aménagement côtier de la Caroline du Nord, 2009). C'est d'ailleurs cette approche qui a été utilisée sur la Côte-Nord du Saint-Laurent dans le cadre de l'entente spécifique sur l'érosion des berges (Dubois *et al.*, 2006). Certains *inconvenients* peuvent malgré tout être imputés au zonage à marge variable car dans le modèle le plus couramment proposé, il n'y a, notamment, pas de prise en compte d'une éventuelle modification de ces taux historiques que ce soit à la hausse (à cause d'un changement de tendance ou des changements climatiques par exemple) ou à la baisse

(construction d'une structure de protection rigide figeant le trait de côte, épis bloquant le transit sédimentaire). 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, 2012). 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 les îles de la Madeleine est basé sur le taux d'érosion du **scénario 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 (voir méthodologie, section 2.5). Le taux probable reflète ainsi, au mieux de nos connaissances, ce que sera l'érosion future aux îles de la Madeleine. 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 processus d'érosion et leur intensité sont variables selon les types de côte. La mesure de l'évolution côtière est donc réalisée en fonction des types de côte (tableau 1).

Tableau 1. Définition des principaux types de côte

Type de côte	Définition
Marais maritime	Les marais maritimes sont des zones d'accumulation de sédiments fins colonisées par de la végétation herbacée.
Flèche littorale	Accumulation de sable et/ou de gravier qui s'attache à la côte et qui s'étire généralement parallèlement à la côte; l'extrémité est libre.
Terrasse de plage	Accumulation de sable et/ou de gravier littoral formée d'un replat généralement végétalisé qui est très rarement submergé par les marées. Le replat est parfois bordé sur sa partie inférieure par un talus d'érosion (microfalaise) de moins de 2 m de hauteur et sa surface est parfois affectée par l'activité éolienne. La terrasse de plage peut être suivie à l'arrière-plage d'une falaise morte ou d'un terrain plat.
Tombolo et cordon littoral	Accumulation basse de sable et/ou de gravier qui relie la côte à un îlot souvent rocheux ou deux îlots rocheux entre eux. Ce type de côte est souvent bordé d'une lagune.
Falaise meuble	Escarpement de dépôts non consolidés (argile, sable, gravier, galet, blocs). Les escarpements de moins de 5 m de hauteur sont parfois classifiés comme basse falaise meuble.
Falaise rocheuse	Escarpement de roche consolidée. Aux îles de la Madeleine, on retrouve des roches sédimentaires et volcaniques. Les escarpements de moins de 5 m de hauteur sont parfois classifiés comme basse falaise rocheuse.
Falaise rocheuse à sommet meuble	Escarpement rocheux surmonté d'un dépôt meuble sur moins de la moitié de la hauteur mais qui influence le mode de recul de la falaise.

2.2.2 Dynamique hydrosédimentaire

Une caractérisation hydrosédimentaire de l'ensemble des îles de la Madeleine a été effectuée. Ont été identifiés (voir définition des termes dans l'encadré 2) :

- les limites des cellules et des unités hydrosédimentaires
- le sens de la dérive littorale principale et secondaire
- les obstacles artificiels à la dérive (ports, jetées,...)
- les autres éléments liés à la dynamique hydrosédimentaire (courants de marée, courants de retour)

Encadré 2 : Termes utilisés pour la dynamique hydrosédimentaire

Définitions

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.
- Également nommées « Unité géomorphologique naturelle » selon Mercier (1987).

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

L'évolution historique de la zone côtière entre 1963 et 2008 a été effectuée. Cette étape est primordiale dans l'analyse des changements géomorphologiques de la côte et de la plage et pour évaluer les effets de l'artificialité sur la côte.

2.3.1 Intégration des photographies aériennes historiques dans un SIG

Les photographies aériennes de 1963 (1 : 15 840), 1983 (1 : 10 000) et des images multispectrales acquises en septembre 2008 ont été utilisées dans le cadre de ce projet de recherche. Les images de 2008 ont été mosaïquées de manière automatisée à l'aide du logiciel C3D Mosaic 4.2 (Geo 3D, Trimble Navigation Limited). Les mosaïques brutes sont par la suite orthorectifiées à partir des données LiDAR, 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. Ces images ont une résolution au sol de 15 cm et leur précision planimétrique en absolue est de 1 m. Les photographies aériennes de 1983 ont d'abord été numérisées à une résolution de 600 dpi, puis leur géoréférencement a été réalisé dans un SIG (ArcGIS 9.2) en se basant sur les mosaïques orthorectifiées de 2008 et en utilisant un maximum de points d'ancrage présents sur les deux couvertures aériennes. Seule la partie centrale des photographies aériennes a été conservée (sauf exception), car cela permet d'éliminer au maximum la distorsion radiale. Les photographies aériennes de 1983 ne sont pas disponibles dans deux secteurs soit l'extrémité de la pointe de l'Est et l'extrémité de Sandy Hook (ils n'ont pas fait l'objet d'un survol). 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 aériennes de 1963 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 2008. 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).

Lorsque des données à plus haute résolution temporelle étaient disponibles pour un secteur, elles ont été utilisées. C'est ainsi que dans les unités de la baie de Plaisance et de Pointe aux Loups, 6 séries de photographies aériennes ont été utilisées (1963 (1 : 15 840), 1977 (1 : 10 000), 1983 (1 : 10 000), 1992 (1 : 15 000), 2001 (1 : 40 000) et 2008. La couverture de 2001 a aussi été intégrée pour le secteur entre Gros Cap et la Digue sur l'île du Cap aux Meules en raison des nombreuses infrastructures de service pour évaluer s'il y avait une accélération de l'érosion entre 2001 et 2008.

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

Le trait utilisé pour établir l'évolution historique des systèmes côtiers ainsi que la caractérisation côtière dépend du type de côte (figure 3).

- Pour les **côtes à falaise**, le sommet du talus est utilisé (trait de côte au sens strict)
- Pour les **côtes sans falaise** ou les **côtes basses**, la limite des hautes mers maximales est utilisée (ligne de rivage au sens strict). Cette limite correspond généralement à la limite de végétation herbacée. En effet, la limite de végétation est assez constante et constitue généralement la meilleure limite à utiliser pour les côtes sans falaise (plage, dune, flèche littorale et tombolo) (Grenier et Dubois, 1992; Jolicoeur et O'Carroll, 2007).
- Pour les **côtes qui sont artificielles**, la limite supérieure des ouvrages de protection est utilisée.

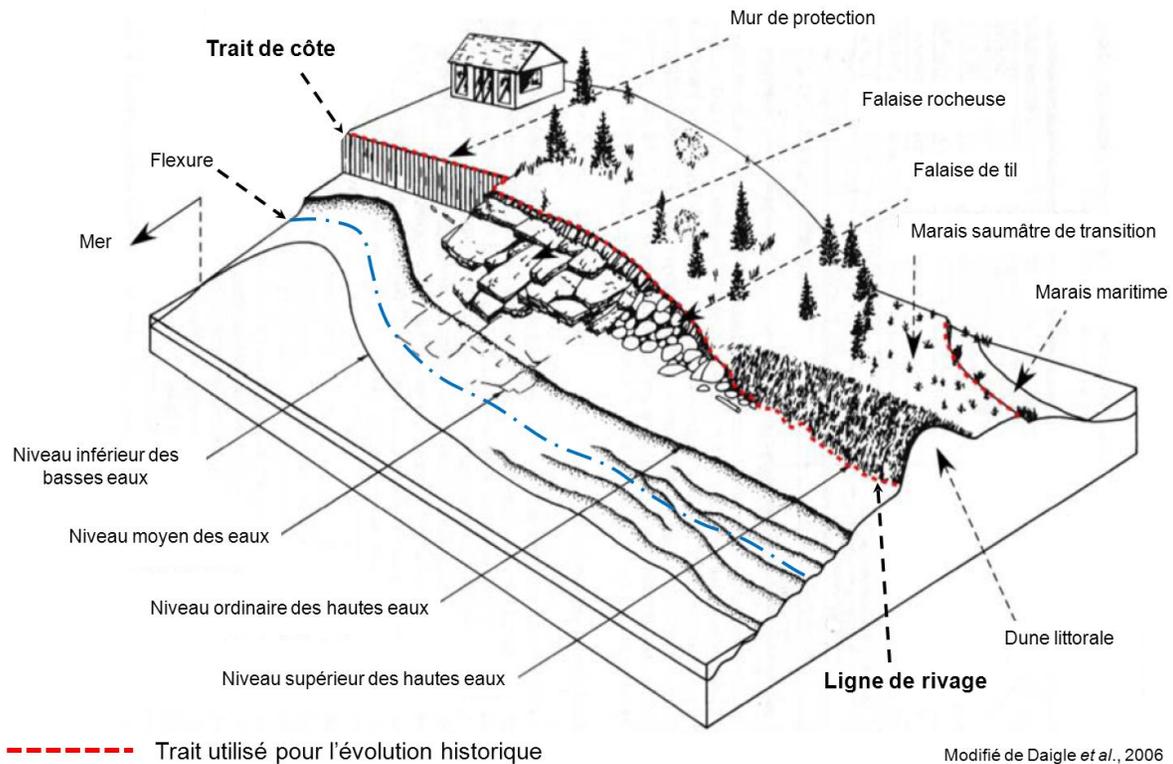


Figure 3. Tracés utilisés pour l'évolution historique du littoral selon différentes configurations de la côte (modifié de Daigle *et al.*, 2006)

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). 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 2008 et la numérisation à 600 dpi ou 1 814 dpi des autres couvertures aériennes offre une grande précision et permet le traçage à l'échelle de 1 :600. Enfin, le traçage à l'écran a été simultanément validé par stéréoscopie afin d'assurer la position des ruptures de pente, ce qui diminue l'erreur d'interprétation. En somme, le calcul de l'erreur maximale totale comprend a) une erreur liée à la résolution des images (0,15 pour 2008 et 0,2 m pour 1963 et 0,45 m pour 1983), b) une erreur de géoréférencement (entre 1 m (2008) et 3 m (1963) et c) une erreur d'interprétation lors du traçage (entre 0 et 0,5 m). En additionnant toutes les sources d'erreur, on obtient **l'erreur maximale totale en absolue** entre deux couvertures de photographies aériennes :

$$(a) 0,2 \text{ m} + 0,45 \text{ m} + (b) 3 \text{ m} + 1 \text{ m} (c) 0,5 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 5,65 \text{ m}$$

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. 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). À la suite de cette correction, l'erreur relative associée au géoréférencement est d'au plus 1 m. **L'erreur maximale totale en relatif** est ainsi réduite à **2,65 m**. Ensuite, pour obtenir l'erreur à considérer pour les taux annuels, il suffit d'additionner les erreurs liées aux couvertures de photos utilisées et de diviser par l'intervalle. Par exemple, **l'erreur maximale** sur la période de 1963 à 2008 (45 ans) se calcule comme suit :

$$(a) 0,2 \text{ m} + 0,15 \text{ m} + (b) 1 \text{ m} + (c) 0,5 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 2,35 \text{ m} / 45 \text{ ans} = 0,05 \text{ m/an}$$

2.3.3 Calcul de l'évolution historique

Le calcul de l'évolution historique a été réalisé dans un système d'information géographique (ArcGIS 9.2 et 9.3) 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 permet de générer de manière automatique des transects tous les 50 m puis calcule l'écart entre chacun des tracés et le rapporter 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 (par exemple 1963 à 1983 et 1983 à 2008) ainsi que pour la période entière (1963 à 2008). Les transects ont tous été ajustés manuellement pour qu'ils soient équidistants de 50 m selon le tracé de 2008, perpendiculaires aux lignes des différentes années (trait de côte ou ligne de rivage) et qu'ils ne se situent pas en un point non représentatif de la côte (caoudeyre, encoche, grotte, remblai) (figure 4).

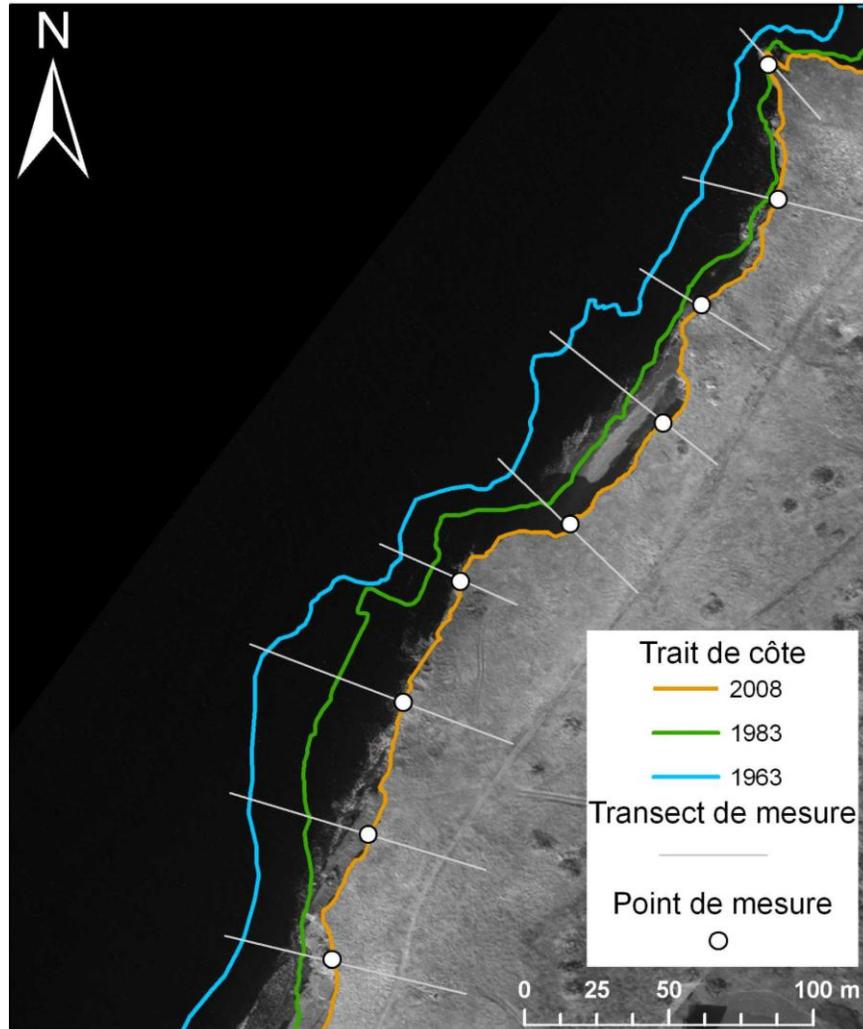


Figure 4. Méthodologie employée pour la mesure de l'érosion

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 1963 et 2008. Une validation manuelle a de plus été effectuées 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 d'annuler l'erreur de géoréférencement au maximum et réduit ainsi **l'erreur totale maximale** à 2,4 m (voir section 2.3.2). Donc, seules les mesures inférieures à cette marge sont conservées.

Pour l'ensemble des côtes des îles de la Madeleine, 4614 points de mesures ont été réalisées.

2.4 Évolution récente du littoral (2005-2010)

Sur le terrain, l'érosion est mesurée par le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières 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 annuelle de la ligne de rivage avec une précision inférieure à 5 cm. Les stations correspondent soit à des éléments permanents déjà présents (coin de bâtiments, poteaux) soit à des piquets d'arpentage installés par l'équipe (figure 5). Les stations de mesure de l'érosion côtière ont été implantées aux îles de la Madeleine à partir de 2005 et ont toujours été suivies depuis. Elles sont mesurées à une fréquence annuelle (durant les mois de mai et de juin). Lors des mesures, d'autres observations telles que l'état de la côte, sa hauteur, sa lithostratigraphie, la largeur de la plage et sa granulométrie sont notés.



Figure 5. Mesure d'une station de suivi de l'érosion

En 2010, l'ensemble des côtes extérieures et intérieures des Îles était suivi avec 794 stations de mesures (figure 6). Seule l'île d'Entrée n'est pas suivie du fait des contraintes d'accès.

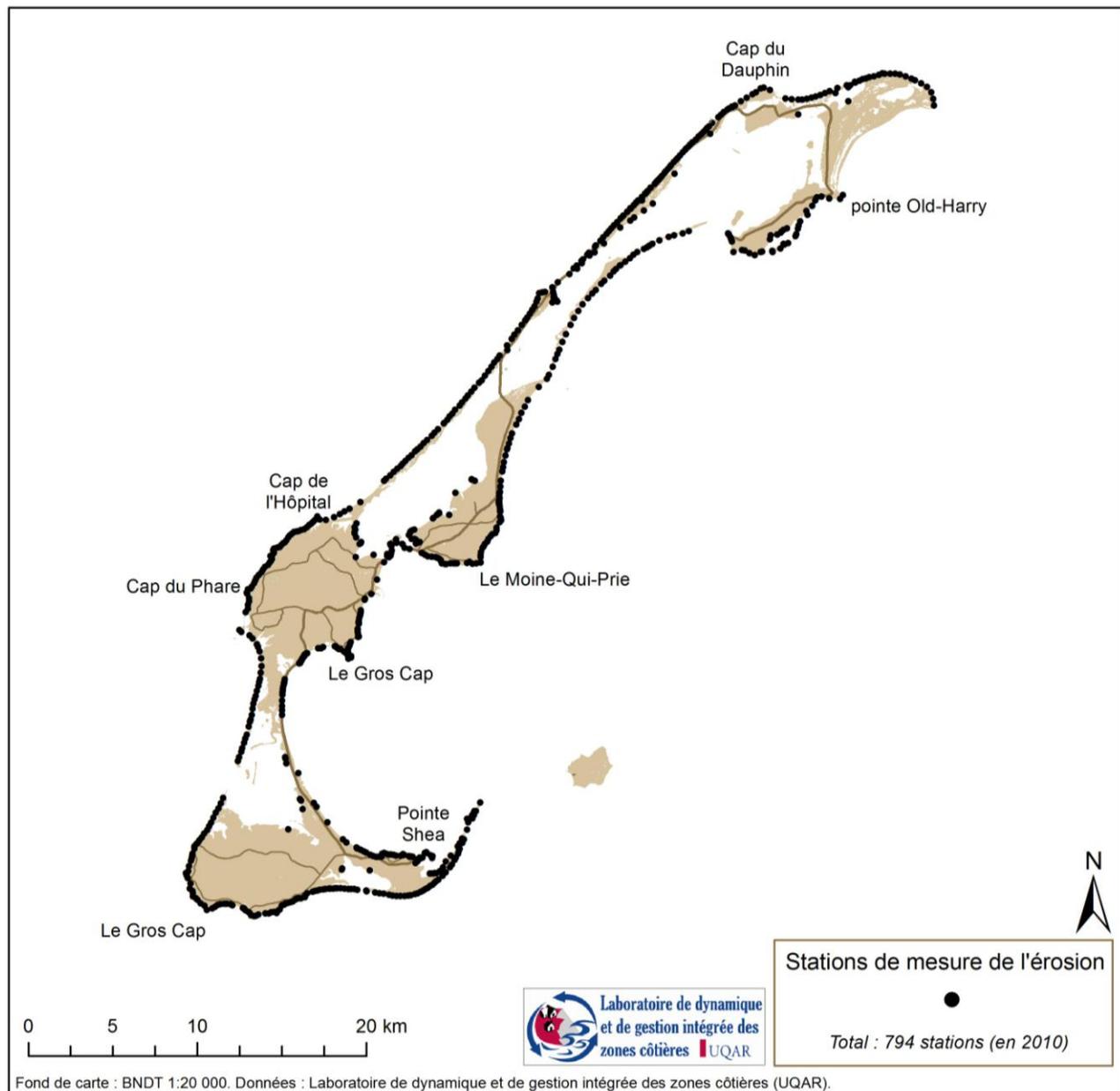


Figure 6. Localisation des stations de suivi de l'érosion aux Îles de la Madeleine

Les données utilisées ici sont celles qui couvrent la période de 2005 à 2010. 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.

2.5 Scénarios d'évolution future de la côte

2.5.1 Définition des zones homogènes d'évolution côtière

Les scénarios ont été calculés selon des zones homogènes le long du littoral. Ce sont des subdivisions des cellules hydrosédimentaires selon les types de côte et l'homogénéité de l'évolution côtière. Puisqu'une même cellule hydrosédimentaire peut par exemple inclure des zones de forte érosion, des zones de moindre recul ainsi que des zones d'avancée, et ce sur différents types de côte, il importe donc de définir avec précision des zones homogènes pour lesquelles seront appliquées les projections d'évolution et les marges de sécurité en érosion côtière. La longueur moyenne d'une zone homogène est de 760 mètres mais cela varie entre 33 m et 10,5 km. Chacune est identifiée par un numéro unique composé de 2 lettres pour l'unité hydrosédimentaire (permettant de se localiser) puis de 3 chiffres (tableau 2).

Tableau 2. Identifiants des zones homogènes

Unité hydrosédimentaire	Code	Nombre de zones homogènes
Pointe aux Loups	PL	22
Pointe de l'Est	PE	14
Grande Entrée	GE	41
Dune du Sud	DS	22
Cap aux Meules / Havre aux Maisons	CM	42
Baie de Plaisance	BP	29
Havre Aubert / Sandy Hook	HA	35
Dune de l'Ouest	DO	22
Étang du Nord	EN	9
Île d'Entrée	IE	15
TOTAL		251

2.5.2 Scénarios d'évolution

Deux scénarios ont été calculés afin de projeter l'évolution du littoral :

- **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 d'érosion (les taux de migrations positifs ou nuls sont exclus) pour la période la plus intense. 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.

2.5.3 Choix du scénario le plus probable

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; Bernatchez *et al.*, 2010b). Ce choix se fait différemment selon que l'on se situe dans un secteur avec deux périodes de mesures ou cinq périodes de mesures pour tenir compte de l'atténuation des valeurs de migration extrêmes au sein des périodes de mesures plus longues :

- **Si les périodes de mesure sont de plus de 20 ans.** En cas d'érosion, c'est le scénario 2 de la période ayant connu l'érosion la plus marquée qui est utilisé. En cas d'accumulation pour chacune des deux sous périodes, c'est le scénario 1 de la période globale qui est utilisé (soit la moyenne générale de toutes les mesures).
- **Si les périodes sont courtes.** C'est le scénario 1 de la période la plus intense qui est utilisé. Si toutes les périodes ont un S1 en accumulation alors sera utilisé le S1 de la période globale.

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.*, 2010a).

$$\begin{aligned} & \text{Équation 1. Marge de sécurité en érosion côtière} \\ & \{ \text{Taux de recul du scénario le plus probable} \} \times 52 \text{ ans (horizon 2060)} \\ & + \{ \text{Recul maximum atteint lors d'un événement} \} \\ & \text{ou} \\ & \text{Marge minimale de sécurité en érosion côtière pour 2060} \end{aligned}$$

La marge la plus sévère des deux est utilisée

Le calcul de la marge de sécurité en érosion côtière a été effectué individuellement pour chacune des **251 zones homogènes** des îles de la Madeleine (définition, 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 Pourquoi utilise-t-on un horizon de gestion d'environ 50 ans ?

Pour l'archipel des îles de la Madeleine, il est proposé d'utiliser un horizon de gestion de 52 ans car cela correspond à une évolution probable de la côte en 2060 (soit 52 ans par rapport la position de la côte déterminée sur les images les plus récentes qui existent, soit 2008). Il s'agit d'un horizon assez lointain mais nécessaire car ces marges de sécurité planifient l'installation de bâtiments qui seront encore en usage dans 50 ans. Cet horizon est également celui qui a été utilisé lors de l'entente spécifique sur l'érosion des berges de la Côte-Nord (Dubois *et al.*, 2006). C'est aussi l'horizon qui est ressorti d'échanges avec trois municipalités du Québec dans le cadre d'une recherche sur la vulnérabilité des communautés côtières aux changements climatiques (Bernatchez *et al.*, 2008). De plus, plusieurs auteurs recommandent d'utiliser cet horizon, notamment en raison de sa concordance avec la période utilisée pour les modèles de prévision climatique ou encore avec la durée de vie des habitations et de certaines infrastructures (Bernatchez *et al.*, 2008; Winckel *et al.*, 2008; Clark, 1996, Bernatchez *et al.*, 2010a). De plus, il s'agit d'un horizon de gestion qui peut mieux correspondre aux prévisions à long terme des municipalités ainsi qu'à deux fois la durée des hypothèques de 25 ans.

L'autorité responsable, ici la MRC, 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 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 Pourquoi ajouter une mesure de recul évènementiel ?

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. 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.

Finalement, les marges variables du zonage proposé pour les îles de la Madeleine sont également ajustées selon les éléments géomorphologiques présents localement. Par exemple, les secteurs de brèches de tempête ont été identifiés et déclarés « à risque » puisqu'un événement de tempête peut de manière soudaine trouer le système de tombolo ou de flèche littorale.

Tableau 3. Recul maximum enregistré lors d'un évènement (m) selon les types de côte

Type de Côte	Recul (m)
Falaise meuble	-14,10
Falaise rocheuse	-4,4
Falaise rocheuse à sommet meuble	-8,40
Flèche littorale	-15,00
Terrasse de plage	-12,50
Tombolo / Cordon littoral	-16,90
Marais maritime	-1,4
Côtes basses meubles abritées	-2,4

2.6.3 Marge minimale de sécurité pour les îles de la Madeleine

Une **marge minimale de sécurité** a été déterminée pour les îles de la Madeleine. Ces marges ont pour fonction d'appliquer le principe de précaution dans les secteurs :

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

Pour l'établissement de la marge minimale de sécurité, 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 (tableau 4). De plus, la marge minimale de sécurité prend en compte les **processus géomorphologiques importants** pour la sécurité des infrastructures telles que les brèches de tempêtes (présentes dans les tombolos et sur les flèches littorales) ou la mobilité du système (au niveau des flèches littorales). Les marges minimales selon le type de côte sont présentées au tableau 5.

Tableau 4. Taux d'érosion probables moyens selon les types de côte (m/an)

Type de côte	m/an
Falaise meuble	-0,55
Falaise rocheuse	-0,45
Falaise rocheuses à sommet meuble	-0,48
Flèche littorale	-1,93
Terrasse de plage	-0,79
Tombolo / Cordon littoral	-1,36
Marais maritime	-0,43
Côtes basses meubles abritées	-0.31

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

Type de côte	Marge minimale de sécurité en érosion côtière (m) pour 2060
Falaise meuble	45
Falaise rocheuse	30
Falaise rocheuses à sommet meuble	35
Flèche littorale	ensemble de la forme géomorphologique
Terrasse de plage	55
Tombolo / Cordon littoral	90
	+ ensemble des zones de brèches de tempêtes

2.6.4 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 d'une flèche littorale montre parfois une étonnante stabilité ou même de l'accrétion, d'autres portions de la flèche sont étroites et sont sujettes à des brèches de tempête, ce qui peut soudainement isoler un cordon littoral et ainsi fragiliser l'accès.

Terrasse de plage au pied d'une falaise morte

Lorsqu'il y a présence d'une terrasse de plage de moins de 55 m (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 52 ans d'érosion mais sans inclure de recul évènementiel car la terrasse de plage joue un rôle de protection du pied du talus contre un évènement extrême. Si la terrasse de plage n'est pas suffisamment large pour assurer une protection contre les évènements extrêmes, alors le recul évènementiel est ajouté dans la marge au sommet du talus.

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 considérée 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.

Ravin

Lors de la présence d'un **ravinement**, l'ensemble du ravin est cartographié comme étant un talus. De plus, à partir du sommet du ravin, une marge de sécurité est ajoutée, elle correspond à la prévision de recul pour 2060 de la zone homogène dans laquelle se trouve le ravin (soit 52 ans + recul évènementiel). La largeur correspondant à la prévision est appliquée même si pour la zone homogène c'est la marge minimale qui avait été choisie.

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.

3. Description du site

3.1 Contexte physique

Les îles de la Madeleine sont situées au centre du golfe du Saint-Laurent, sur le plateau madelinien, une plate-forme d'une profondeur inférieure à 50 m, avec des bancs et des affleurements rocheux (figure 7).

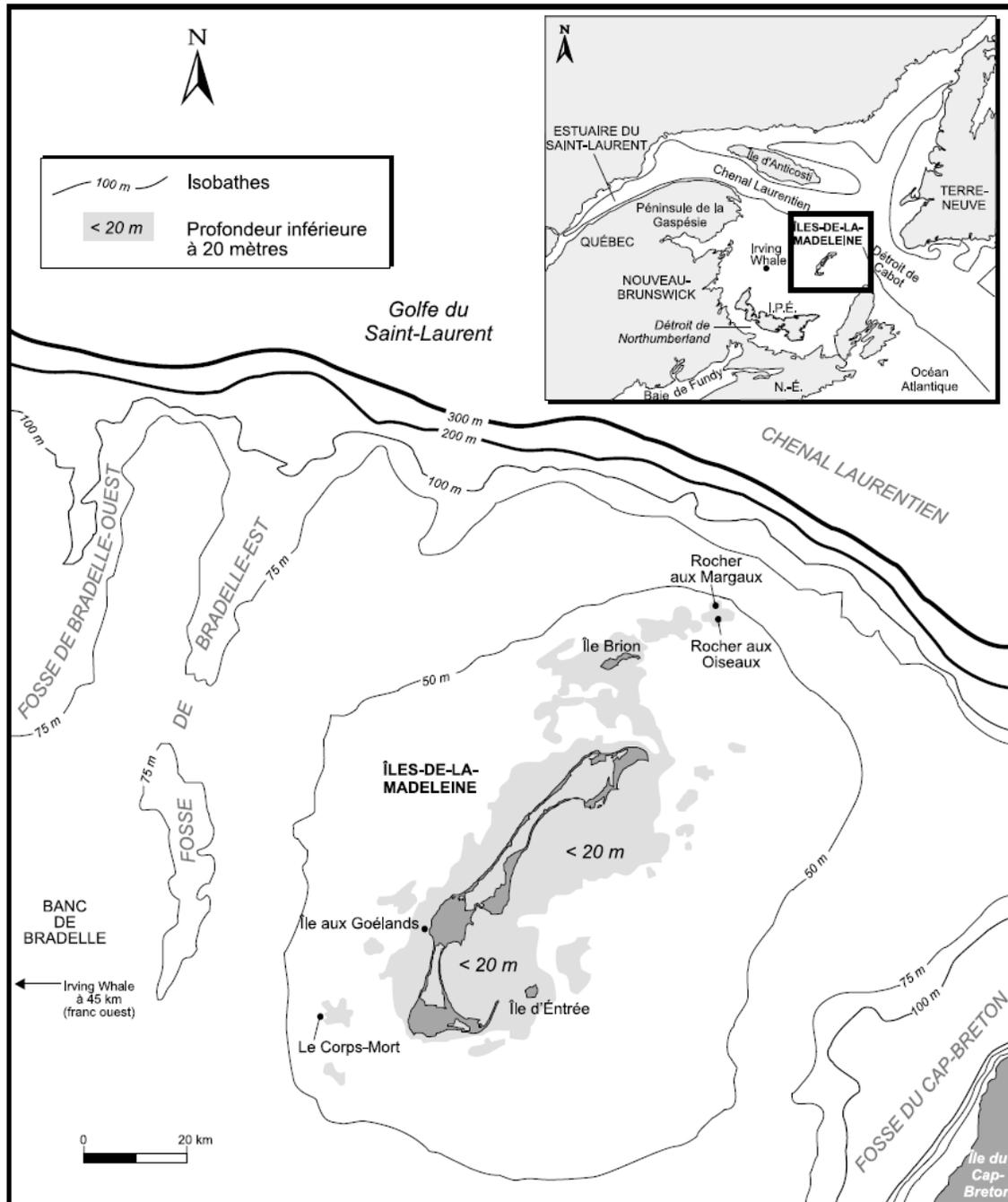


Figure 7. Environnement maritime des îles de la Madeleine

Source : Gagnon, 1998

D'un point de vue **géologique**, les roches en présence proviennent toutes du bassin de Madeleine (Permo-Carbonifère). Elles se regroupent sous trois formations géologiques : la Formation du Havre-aux-Maisons, du Cap-au-Diable et du Cap-aux-Meules (Brisebois, 1981). Les quatre îles du sud comportent un noyau rocheux composé de roches volcaniques de la Formation du Cap-du-Diable (basaltes, calcaires cristallins et roche pyroclastique) (figure 8). Toutefois, Giles (2008) élimine dans sa subdivision lithostratigraphique la Formation du Cap-du-Diable et intègre plutôt ses roches volcaniques dans la Formation du Havre-aux-Maison. La Formation du Havre-aux-Maisons est constituée de brèche, de mudstone, de grès, de siltstone, de calcaire, de dolomie, de gypse, d'anhydrite, de basalte et de roche pyroclastique (Brisebois, 1981; Giles, 2008). Elle est présente sur le pourtour des collines volcaniques (figure 8). Enfin, la Formation du Cap-aux-Meules se retrouve sur toutes les îles et comprend deux membres (Étang-des-Caps et Étang-du-Nord). Elle est composée de grès, de siltstone, de mudstone, de conglomérat et de calcaires (figure 8). Cette dernière formation qui compose la plaine côtière des îles prend son origine dans les sédiments marins.

Il est à noter que des diapirs de sels ou **dômes de sel** sont remontés près de la surface. Même s'ils ne sont pas apparents, ils ont contribué au relief des îles. Le dôme le plus proche de la surface se situe sous la dune du nord, à proximité de Grosse-île et il est exploité par les mines Seleines (figure 8).

Les **dépôts meubles** aux îles de la Madeleine sont très variés et très complexes. Les falaises meubles et rocheuses à sommet meuble sont composées de dépôts quaternaires dont principalement de till, de dépôts glacio-marins, de colluvions périglaciaires et de dépôts littoraux et intertidaux anciens (Dredge *et al.*, 1992; Vigneault, 2012; Mercier-Rémillard, 2011; Mercier-Rémillard *et al.*, sous presse). Les tombolos, les cordons littoraux, les flèches littorales et les systèmes dunaires sont composés principalement de sable et se sont formés à l'Holocène.

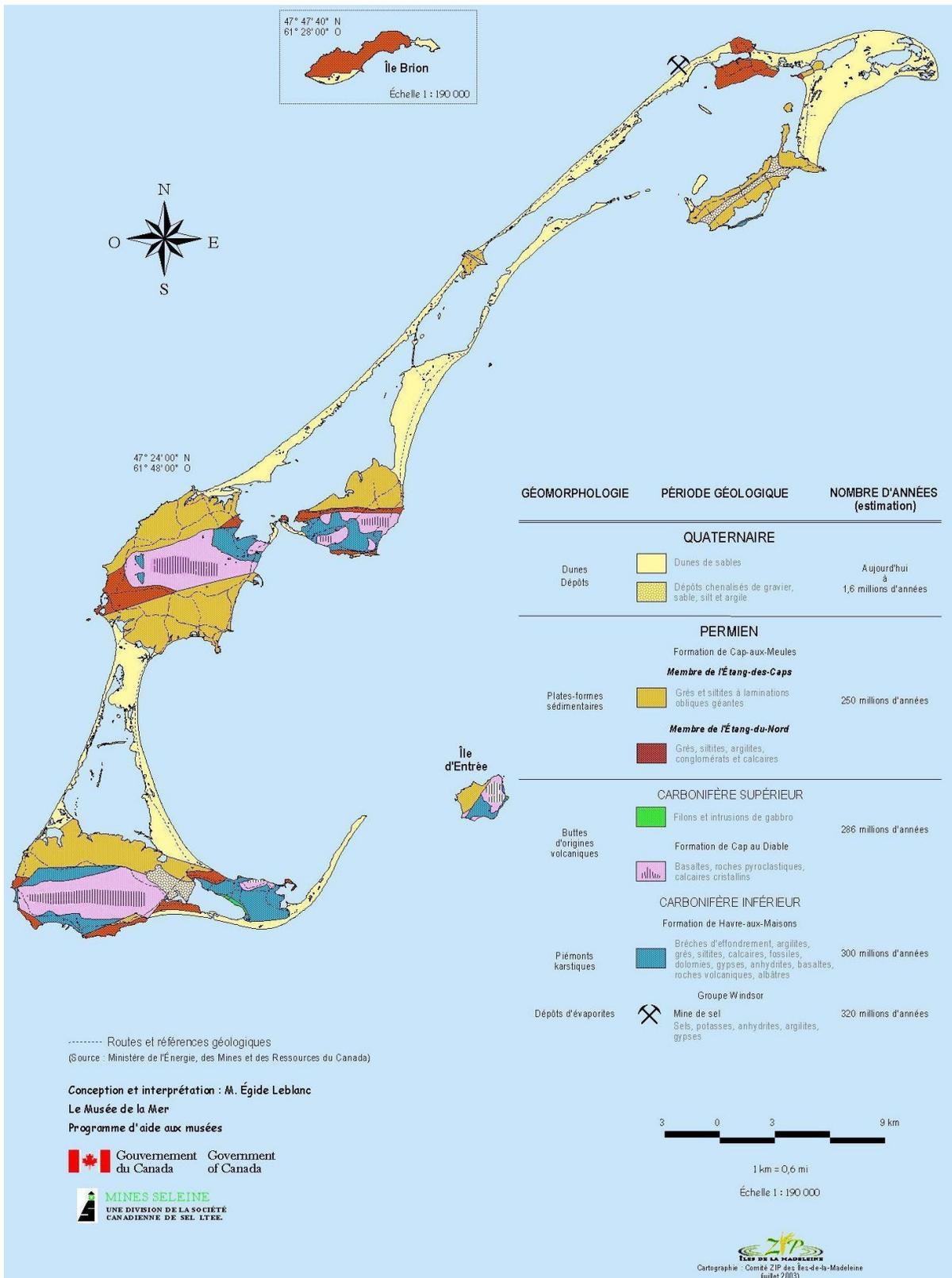


Figure 8. Géologie des îles de la Madeleine
Source des données : Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources du Canada, modifié par E. Leblanc
Conception et interprétation par É. Leblanc (2003)

3.2 Conditions hydrodynamiques et climatiques

3.2.1 Hydrographie

Il n'y a pas de rivières importantes aux îles de la Madeleine. Les apports sédimentaires terrigènes proviennent donc directement de l'érosion de la côte ou du remaniement par les vagues de tempête des dépôts de la plate-forme littorale et très peu de l'arrière-côte (seulement quelques ravinements et petits cours d'eau).

3.2.2 Océanographie

Marées

Les îles de la Madeleine se trouvent près d'un point amphidromique autour duquel la marée se propage dans le golfe du Saint-Laurent (Gagnon, 1998). Ce point se situe à environ 50 km à l'ouest des Îles (Drapeau et Mercier, 1990). La proximité du point amphidromique contribue aussi à modifier le cycle des marées aux environs des Îles. On retrouve des marées diurnes dans le secteur nord des Îles et un mélange de marées diurnes et semi-diurnes au sud. Le marnage moyen est de 0,7m alors que durant les marées de vives eaux il atteint 1,1 m (Service hydrographique du Canada, 2012). La marée haute est de 1,0 m en moyenne et de 1,2 m lors des grandes marées; la marée haute maximale enregistrée est de 2,4 m. Cela indique que des surcotes importantes (1,2 m) peuvent survenir.

Le courant de jusant circule en direction sud-est, passant entre la dune de Sandy Hook et l'île d'Entrée. Il se dirige ensuite le long de la côte sud de l'île du Havre Aubert. Le courant de jusant est généralement plus fort que celui de flot et sa vitesse augmente avec des vents d'ouest, alors que celle du courant de flot s'accroît avec des vents d'est (Service hydrographique du Canada, 2008).

Fetch

Le fetch (distance ouverte sur laquelle les vagues peuvent se former avant d'arriver à la côte) mesure plus de 300 km dans toutes les directions, hormis pour la direction sud où il est limité à 100 km (Drapeau et Mercier, 1990).

Vagues

La hauteur **moyenne** des vagues significatives du secteur est des Îles est de 0,35 m en été et de 0,98 m en hiver alors que du côté ouest elle est de 0,49 m en été et de 1,19 m en hiver (Owens, 1977). La hauteur **maximale** des vagues significatives est en été de 2,0 m du côté est et de 2,3 m du côté ouest des Îles alors qu'en hiver elle est de 3,5 m du côté est et de 3,9 m du côté ouest (Owens, 1977). Le côté ouest des Îles est exposé de deux à trois fois plus de fortes vagues de tempête (plus de 4 m de hauteur) que le côté est (Savard *et al.*, 2008). Ceci est lié au fait que les tempêtes du nord-ouest sont les plus communes et représentaient 66 % des tempêtes répertoriées entre 1961 et 1990 (Savard *et al.*, 2008).

3.2.3 Climat

Le climat des îles de la Madeleine correspond au climat maritime de l'Est. La température moyenne annuelle est de 5,3°C et les précipitations totales sont de 1 037 mm (Bernatchez *et al.*, 2008). En général, la direction dominante des vents pour les mois de septembre à juin est du nord-ouest alors que celle pour les mois de juillet et août provient du sud-ouest (Owens et McCann, 1980). Cela a un impact important sur les côtes de l'archipel selon leur orientation face à ces vents dominants. Les moyennes mensuelles de la vitesse maximale des vents varient entre 47 km/h (janvier) et 30 km/h (août) (Owens et McCann, 1980).

3.2.4 Variation du niveau marin relatif et évènements extrêmes

La variation du niveau marin relatif est un facteur important 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 recherches récentes menées par la Chaire de recherche en géoscience côtière indiquent que la hausse du niveau marin relatif aux îles de la Madeleine a été de 20,7 cm/siècle (2,07 mm/an) au cours des deux derniers millénaires (Juneau, 2012). Une accélération importante de la hausse du niveau marin est cependant mesurée entre 1964 et 2010, soit un taux de 3,5 mm/an selon les données marégraphiques (Juneau, 2012). Cette valeur est nettement la plus élevée du Québec maritime, mais se rapproche des valeurs mesurées à l'Île-du-Prince-Édouard et en Nouvelle-Écosse (Koozhare *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 des îles de la Madeleine y sera donc particulièrement sensible.

Dans le golfe du Saint-Laurent, les événements extrêmes ayant eu un impact sur la côte sont plutôt rares pendant la période estivale, ils se concentrent plutôt d'octobre à mars/avril (figure 9) (Friesinger, 2009). Aux îles de la Madeleine, les mois d'octobre, novembre, décembre et janvier sont les périodes où la mer est la plus agitée (Friesinger, 2009). En janvier et février, il y aussi de forts vents qui soufflent sur le littoral. Les événements de tempête proviennent principalement du NO et du NNE (Owens et McCann, 1980).

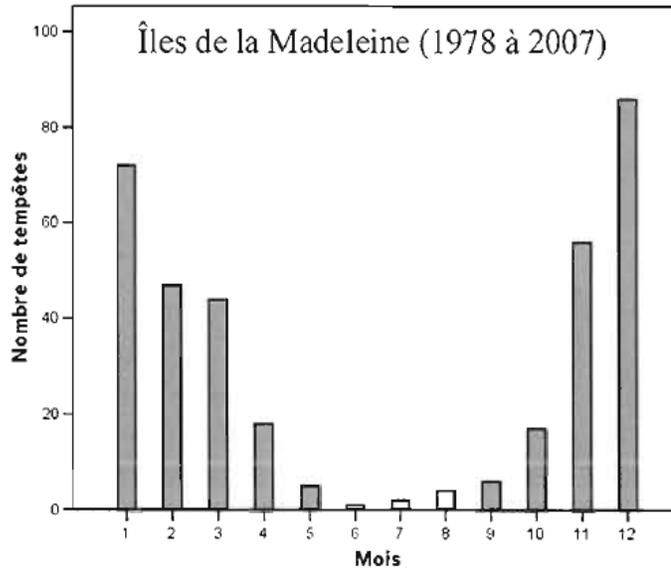


Figure 9. Répartition du nombre de tempête selon les mois (avec des vitesses initiales et finales de 60 km/h ou plus)
Source : Friesinger, 2009

Aux îles de la Madeleine, les évènements climatiques extrêmes ayant un impact sur la population se produisent régulièrement à raison de 1,1 événement par an. Il s'agit principalement de vagues de tempête (40,8 %) ou de forts vents (32,7 %) (Friesinger, 2009).

Les prévisions concernant le nombre de tempêtes aux îles de la Madeleine n'indiquent aucune augmentation dans le futur (Savard *et al.*, 2009). Cependant, comme un grand nombre de tempêtes survenait en hiver, la baisse de la couverture glacielle appréhendée entre 63 et 72 % pour 2050 (tableau 6) devrait conduire à l'augmentation du nombre de tempêtes effectives qui vont affecter la côte.

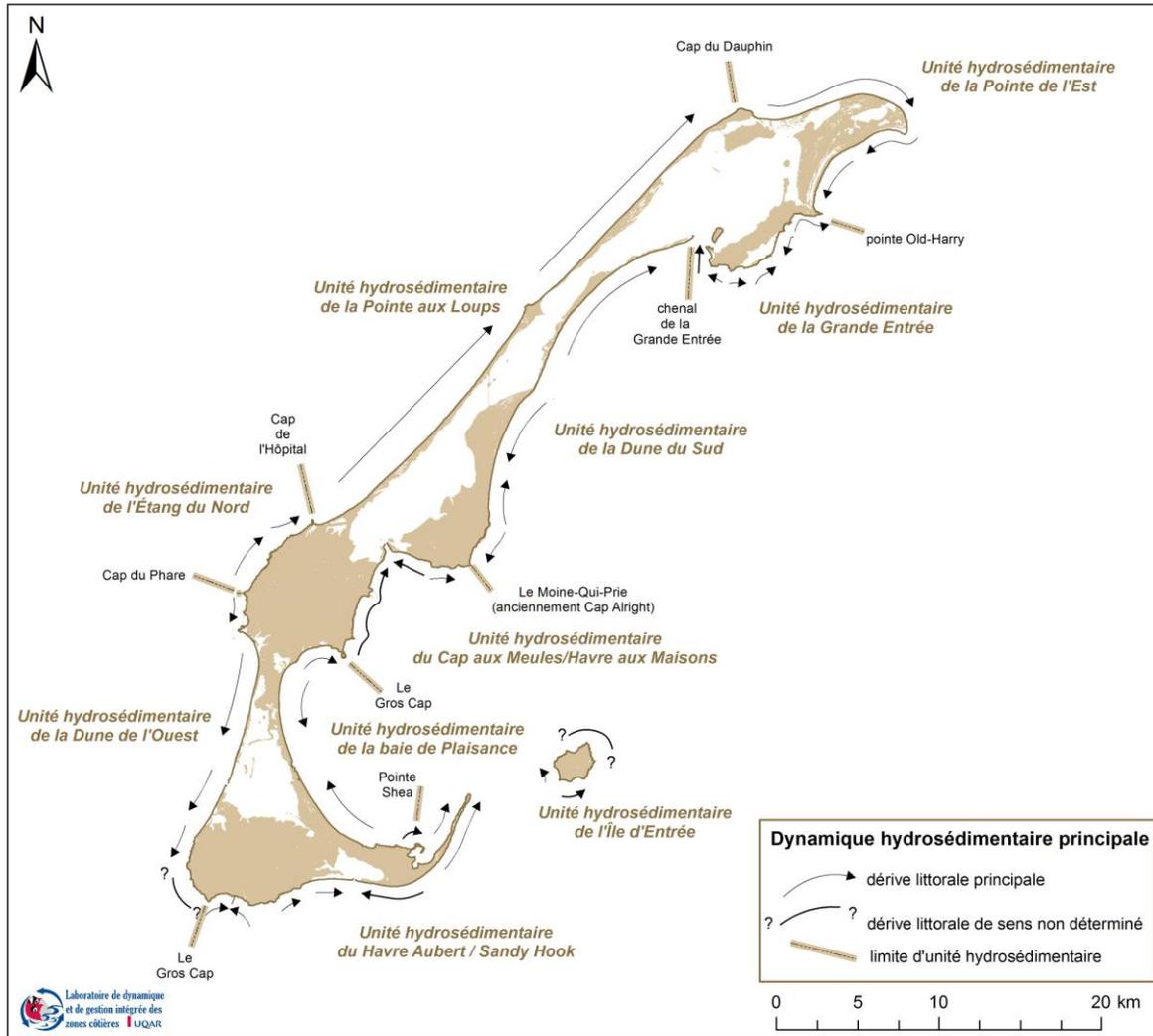
Tableau 6. Résultats des simulations de l'impact des variations de température sur les conditions de glace pour la période 1996-2003 et des projections futures

Station de mesure	Période témoin	Période chaude	Réduction	
	1996 à 2003	+ 2°C	nombre de jour	%
	jours >30% de glace			
Plage de la Martinique	71,0	26,3	44,7	63,0
Pointe-aux-Loups	57,3	15,9	41,4	72,3
Pointe-aux-Loups (OS) entre les îles et la Gaspésie	33,9	11,9	22,0	64,9

(modifié de Senneville et Saucier, 2007)

3.3 Présentation générale du milieu côtier

Les Îles de la Madeleine sont divisées en 10 unités hydrosédimentaires qui sont, elles-mêmes composées de cellules hydrosédimentaires (figure 10). La longueur des unités hydrosédimentaires varie entre 10 km de côtes (unités de l'Île d'Entrée et de l'Étang du Nord) et 40 km (unité de la Pointe aux Loups) et leur longueur moyenne et médiane est de 24 km.



Source des données : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, octobre 2011, fond de carte : BDTQ 1:20 000

Figure 10. Localisation des unités hydrosédimentaires des îles de la Madeleine et dynamique hydrosédimentaire générale

La côte extérieure des îles de la Madeleine est constituée à 67 % de côtes meubles (tableau 7).

Tableau 7. Nature des côtes des îles de la Madeleine

Nature de la côte	Longueur	
	km	%
Côte artificielle	3,51	1,49
Côte meuble	158,00	67,10
Côte mixte	8,56	3,63
Côte rocheuse	65,40	27,77
TOTAL	235,47	100,0

Trois grands types de côte dominant: les côtes à tombolo et cordon littoral (40,4 %), les falaises rocheuses (27,7 %) et les flèches littorales (20,2 %) (figure 11 et tableau 8). Les tombolos, les cordons, les flèches littorales ainsi que les terrasses de plages des îles de la Madeleine sont le plus souvent dunifiées. Les côtes sont classées artificielles seulement lorsqu'elles ont été tellement modifiées par des interventions humaines qu'il n'est plus possible de reconnaître le type de côte qui s'y trouvait avant la modification; cela se présente principalement au niveau des infrastructures portuaires.

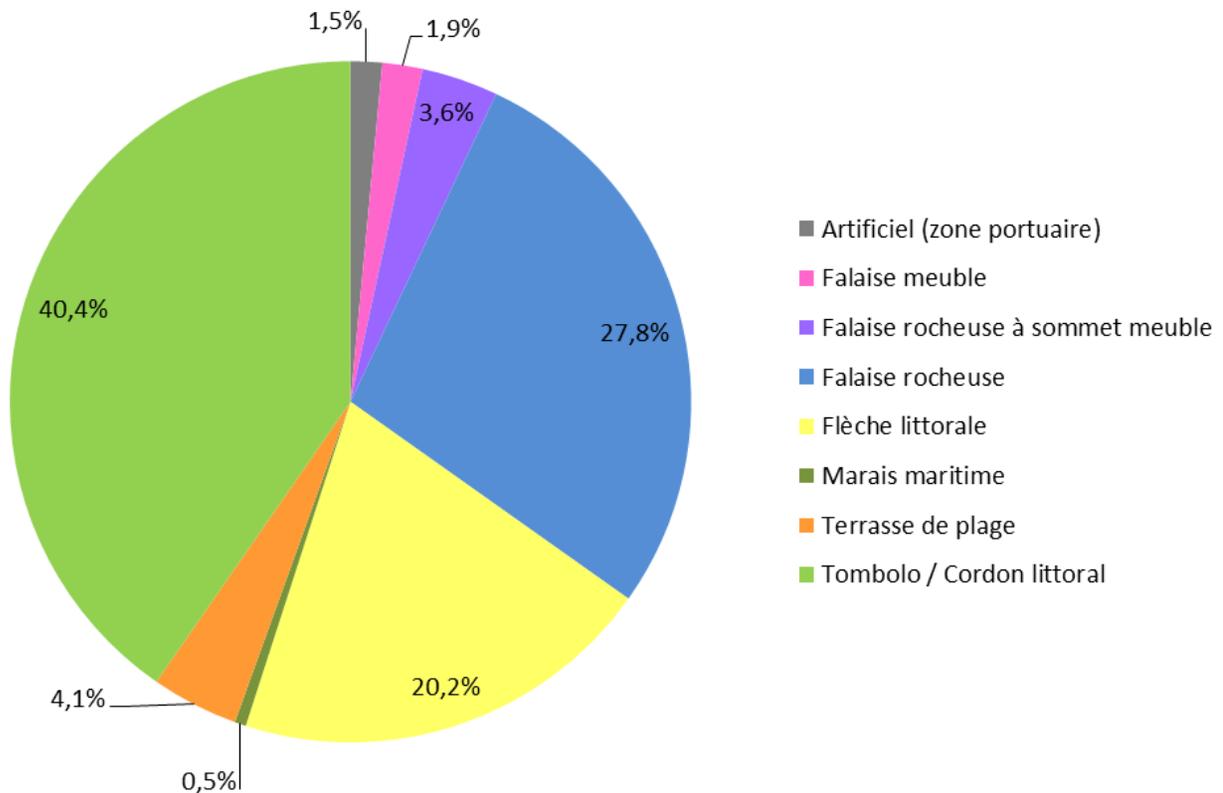


Figure 11. Répartition des principaux types de côte aux îles de la Madeleine

Tableau 8. Principaux types de côtes des îles de la Madeleine

Type de côte	Longueur	
	km	%
Artificiel (zone portuaire)	3,51	1,49
Falaise meuble	4,50	1,91
Falaise rocheuse à sommet meuble	8,56	3,63
Falaise rocheuse	65,40	27,77
Flèche littorale	47,49	20,17
Marais maritime	1,26	0,54
Terrasse de plage	9,74	4,14
Tombolo / Cordon littoral	95,01	40,35
TOTAL	235,47	100,0

4. Portrait des unités hydrosédimentaires des îles de la Madeleine

Les types de côtes des îles de la Madeleine et les courants côtiers sont présentés pour chaque unité hydrosédimentaire. Leur localisation et leurs limites se trouvent sur la figure 10. 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 il est important de se rappeler que 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 Pointe aux Loups

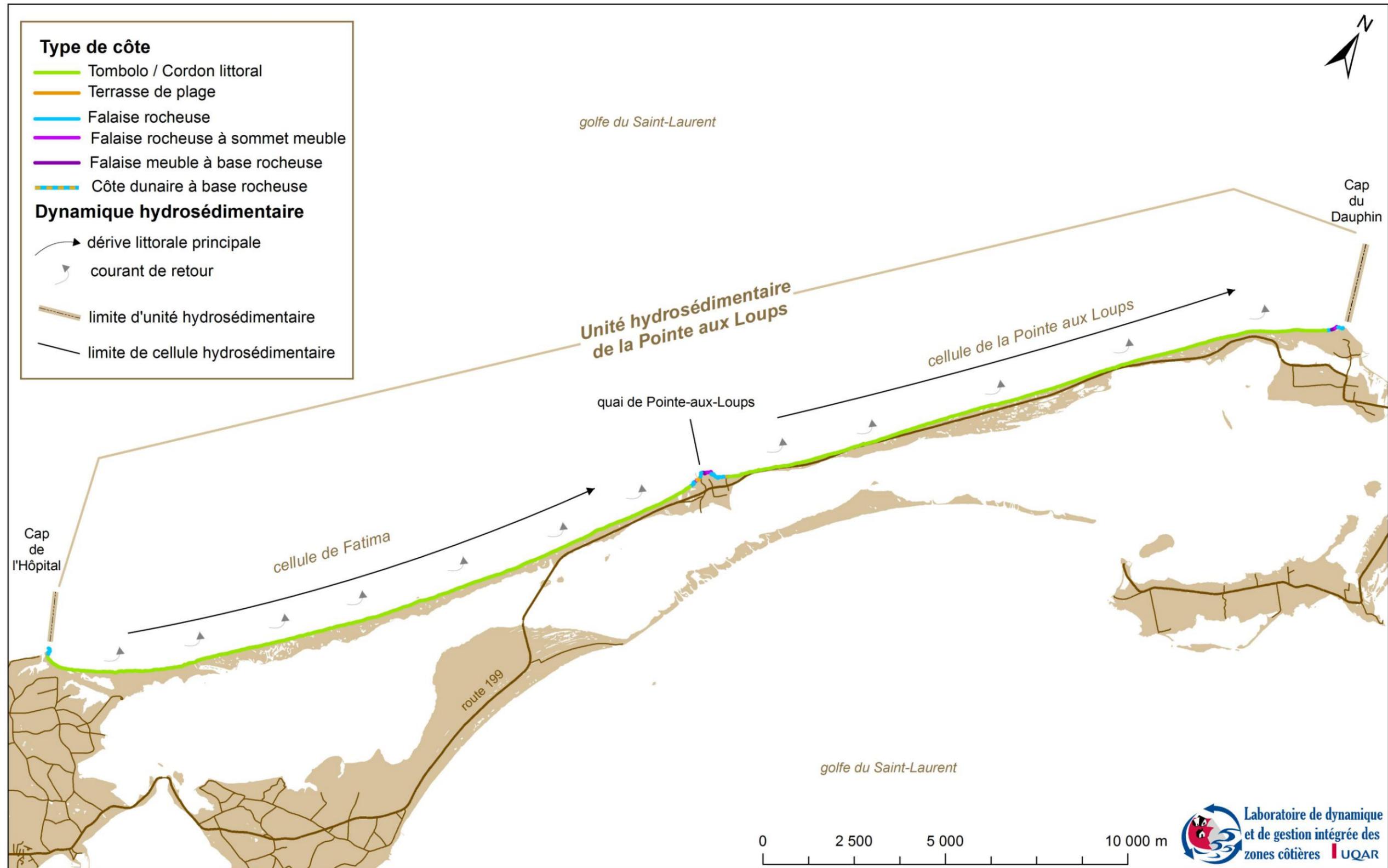
L'unité hydrosédimentaire de la Pointe aux Loups s'étend du Cap de l'Hôpital au sud, jusqu'au Cap du Dauphin au nord sur une longueur de plus de 39 km. La dérive littorale principale s'effectue sur l'ensemble de la zone du sud-ouest vers le nord-est en raison notamment des vents dominants du nord-ouest (Owens et McCann, 1980) (figure 12). Toutefois, étant donné la présence d'un îlot rocheux limitant le transit sédimentaire, l'unité est divisée en deux cellules hydrosédimentaires de part et d'autre de l'île de Pointe-aux-Loups : la cellule de Fatima au sud et la cellule de la Pointe aux Loups au nord. L'île de Pointe-aux-Loups fait office d'obstacle naturel au transit sédimentaire, obstacle amplifié par la présence de deux jetées encadrant le havre de pêche. De plus, directement en face de la pointe rocheuse de la Pointe aux Loups, les relevés bathymétriques montrent la présence d'un haut fond qui correspond à un complexe de dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires présentant de nombreux blocs rocheux. Ce contexte géomorphologique de la zone pré-littorale peut aussi constituer un obstacle au transit sédimentaire provenant du sud. Ce dépôt constitue toutefois une source sédimentaire sous-marine pour alimenter la cellule de la Pointe aux Loups au nord. Il y a de nombreux courants de retour sur l'ensemble de l'unité hydrosédimentaire formant des croissants de plage. Cette dynamique est typique des côtes réfléchissantes et de forte énergie où les tempêtes conditionnent le transit sédimentaire et la morphosédimentologie des plages. La variation saisonnière dans le niveau d'énergie des vagues entraîne aussi une forte variabilité dans la dynamique morphosédimentaire saisonnière de la côte (Owens, 1977; Bernatchez *et al.*, 2010b). Il existe aussi un transit sédimentaire perpendiculaire à la côte avec des échanges sédimentaires entre la plage et les cordons sableux de bas estran et les barres d'avant-côte (Bernatchez *et al.*, 2010b; Owens et Frobel, 1977). De manière générale, l'ensemble du système de tombolo tend à migrer vers l'intérieur des terres (soit vers la lagune du Havre aux Maisons), et ce, depuis au moins les deux derniers millénaires. Il s'agit donc d'un système transgressif.

Le type de côte principal de cette unité est le tombolo / cordon littoral (figure 12 et tableau 9). Les tombolos relient les îlots rocheux du Cap de l'Hôpital à l'île de Pointe-aux-Loups et cette dernière au Cap Dauphin. Les tombolos sont dunifiés, tant par des dunes bordières que par des dunes paraboliques avec la présence de caoudeyres (cuvette de déflation). Les deux extrémités des tombolos de l'unité hydrosédimentaire présentent de nombreuses brèches principalement reliques formées par les vagues de tempête dans les années 50 et 60 (Bernatchez *et al.*, 2010b). En effet, cette période est caractérisée par une forte fréquence de violentes tempêtes qui culmine en 1963 avec six tempêtes, dont trois ouragans (Lewis et Morgan, 1984;

Grenier, 1993). Ces événements géomorphologiques extrêmes rappellent que les tombolos sont très sensibles aux événements de tempête même dans les secteurs où le système dunaire est bien développé. Les autres types de côte sont principalement des falaises rocheuses et de dépôts meubles. Au contact entre les côtes meubles dunifiées et les côtes rocheuses, on retrouve un type de côte particulier qui marque la transition entre les deux systèmes côtiers, soit une côte dunaire à base rocheuse. Un petit lambeau de terrasse de plage est aussi présent en bordure du quai de Pointe-aux-Loups.

Tableau 9. Types de côtes de l'unité de la Pointe aux Loups

Type de côte	Longueur	
	km	%
Dunaire à base rocheuse	0,32	0,8
Falaise deltaïque à base rocheuse	0,17	0,4
Falaise rocheuse	1,82	4,6
Falaise rocheuse à sommet meuble	0,36	0,9
Terrasse de plage	0,15	0,4
Tombolo / Cordon littoral	36,81	92,9
TOTAL	39,64	100,0



Source des données : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (UQAR). Fond de carte : BDTQ 1:20 000. Cartographie réalisée en juin 2012

Figure 12. Unité hydrosédimentaire de la Pointe aux Loups : cellules, dérives littorales et type de côte

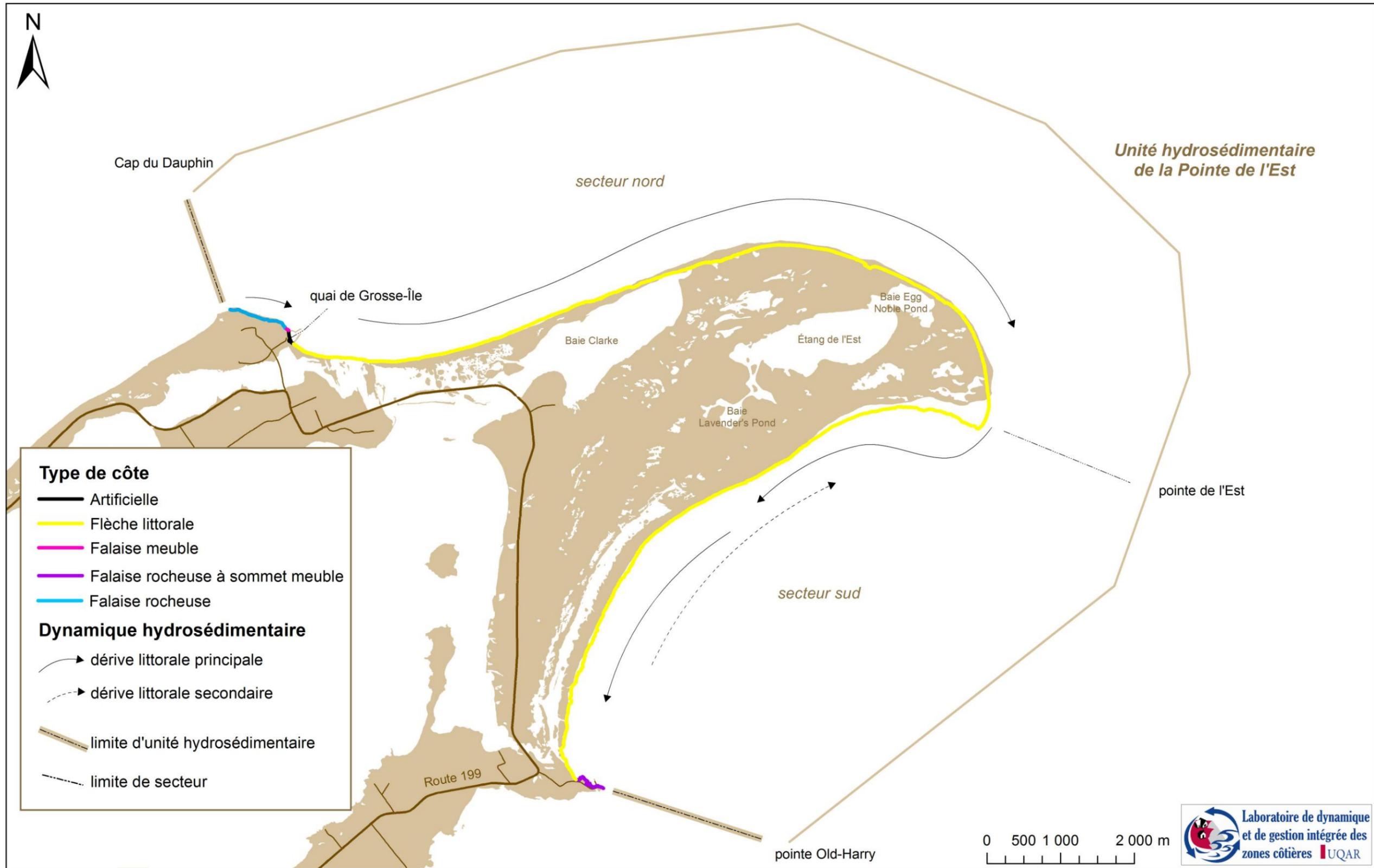
4.2 Unité hydrosédimentaire de la Pointe de l'Est

L'unité hydrosédimentaire de la Pointe de l'Est s'étend du Cap du Dauphin sur Grosse-Île jusqu'à la pointe Old-Harry sur l'île de la Grande Entrée sur une longueur de 23,2 km. La dérive littorale contourne la pointe en parcourant le littoral d'ouest en est sur la partie nord et d'est en ouest dans la partie sud (figure 13). La dominance des tempêtes du NO et du NNE entraîne une forte érosion du côté nord et un fort transit sédimentaire qui par conséquent engendre une forte accumulation du côté sud. Ainsi, le secteur sud présente pour la période de 1963 à 2008 le plus fort bilan sédimentaire positif des îles de la Madeleine.

La très grande majorité de la côte est constituée d'une grande flèche littorale dont l'origine peut être interprétée comme un saillant triangulaire (tableau 10). La flèche littorale est dunifiée et comprends plusieurs étangs et zones humides. Les extrémités de l'unité sont constituées des falaises rocheuses du Cap du Dauphin au nord et des falaises rocheuses à sommet meuble de la pointe Old-Harry au sud (figure 13). Deux ports sont présents sur les noyaux rocheux, soit le port de Grosse-Île (Cap du Dauphin) et celui de Old-Harry.

Tableau 10. Type de côte de l'unité hydrosédimentaire de la Pointe de l'Est

Type de côte	Longueur	
	km	%
Artificiel (port)	0,31	1,3
Falaise meuble	0,07	0,3
Falaise rocheuse	0,88	3,8
Falaise rocheuse à sommet meuble	0,57	2,5
Flèche littorale	21,35	92,1
TOTAL	23,18	100,0



Source des données : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (UQAR). Fond de carte : BDTQ 1:20 000. Cartographie réalisée en juin 2012

Figure 13. Cellules hydrosédimentaires et type de côte de l'unité de la Pointe de l'Est

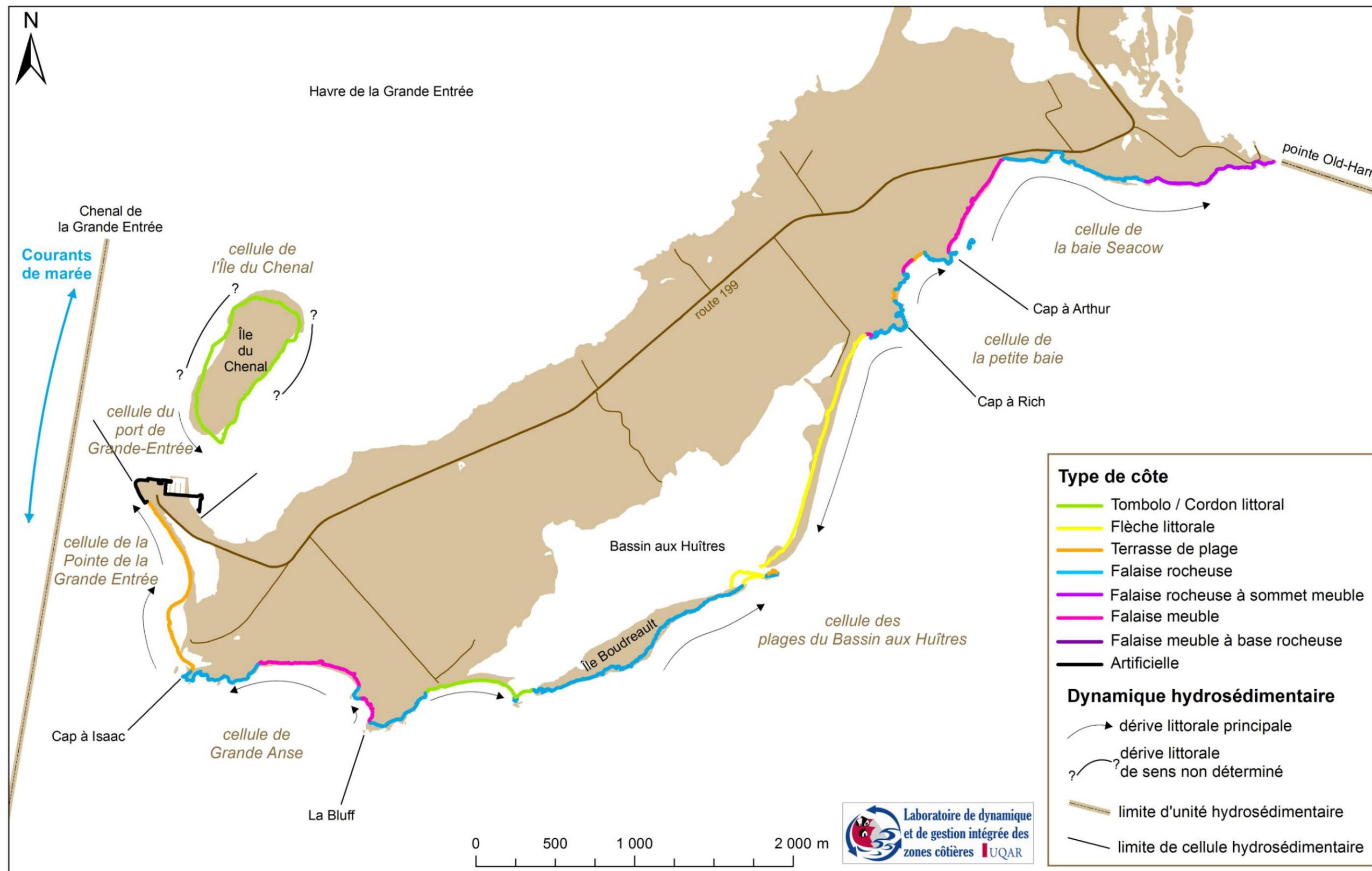
4.3 Unité hydrosédimentaire de la Grande Entrée

L'unité hydrosédimentaire de la Grande Entrée s'étend du port de Grande-Entrée à l'ouest jusqu'à la pointe de Old-Harry à l'est sur plus de 17 km (tableau 11). Il y a une succession de petites baies et d'anses séparées par des caps rocheux qui sont autant de cellules hydrosédimentaires étant donné qu'elles sont relativement isolées les unes des autres (figure 14). Au centre se trouve le Bassin aux Huîtres qui est isolé du golfe par l'île Boudreau à l'ouest et par la flèche littorale de la plage du Bassin Est à l'est. Le Bassin aux Huîtres n'est pas inclus dans cette étude. Actuellement le goulet se situe à l'est de l'île Boudreau mais il était du côté ouest en 1963. L'unité hydrosédimentaire de la Grande Entrée présente un des rares secteurs aux îles de la Madeleine de falaise complètement meuble. Les falaises sont composées principalement de sable deltaïque et littoral, de silt marin et de dépôts grossiers glaciaires et fluvioglaciaires (Vigneault, 2012). Cette unité hydrosédimentaire semble actuellement déficitaire puisque certaines terrasses de plage ont disparus au cours de la dernière décennie, entraînant la réactivation des falaises.

L'île du chenal (îlot C), qui est une île artificielle résultant d'un dépôt de sable de dragage n'existait pas en 1963. Par contre elle est présente sur les photographies aériennes à compter de 1983, ainsi elle pourrait avoir été créée lors du dragage initial du chenal d'accès aux mines Seleine à Grande-Entrée en 1981-1982.

Tableau 11. Types de côte de l'unité hydrosédimentaire de la Grande Entrée

Type de côte	Longueur	
	km	%
Artificiel (port)	0,95	5,5
Falaise meuble	1,91	11,0
Falaise meuble à base rocheuse	0,07	0,4
Falaise rocheuse	6,33	36,5
Falaise rocheuse à sommet meuble	0,95	5,5
Flèche littorale	2,17	12,5
Terrasse de plage	4,13	23,9
Tombolo / Cordon littoral	0,81	4,7
TOTAL	17,33	100,0



Source des données : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (UQAR). Fond de carte : BDTQ 1:20 000. Cartographie réalisée en juin 2012

Figure 14. Type de côtes et cellules hydrosédimentaires de l'unité hydrosédimentaire de la Grande Entrée

4.4 Unité hydrosédimentaire de la Dune du Sud

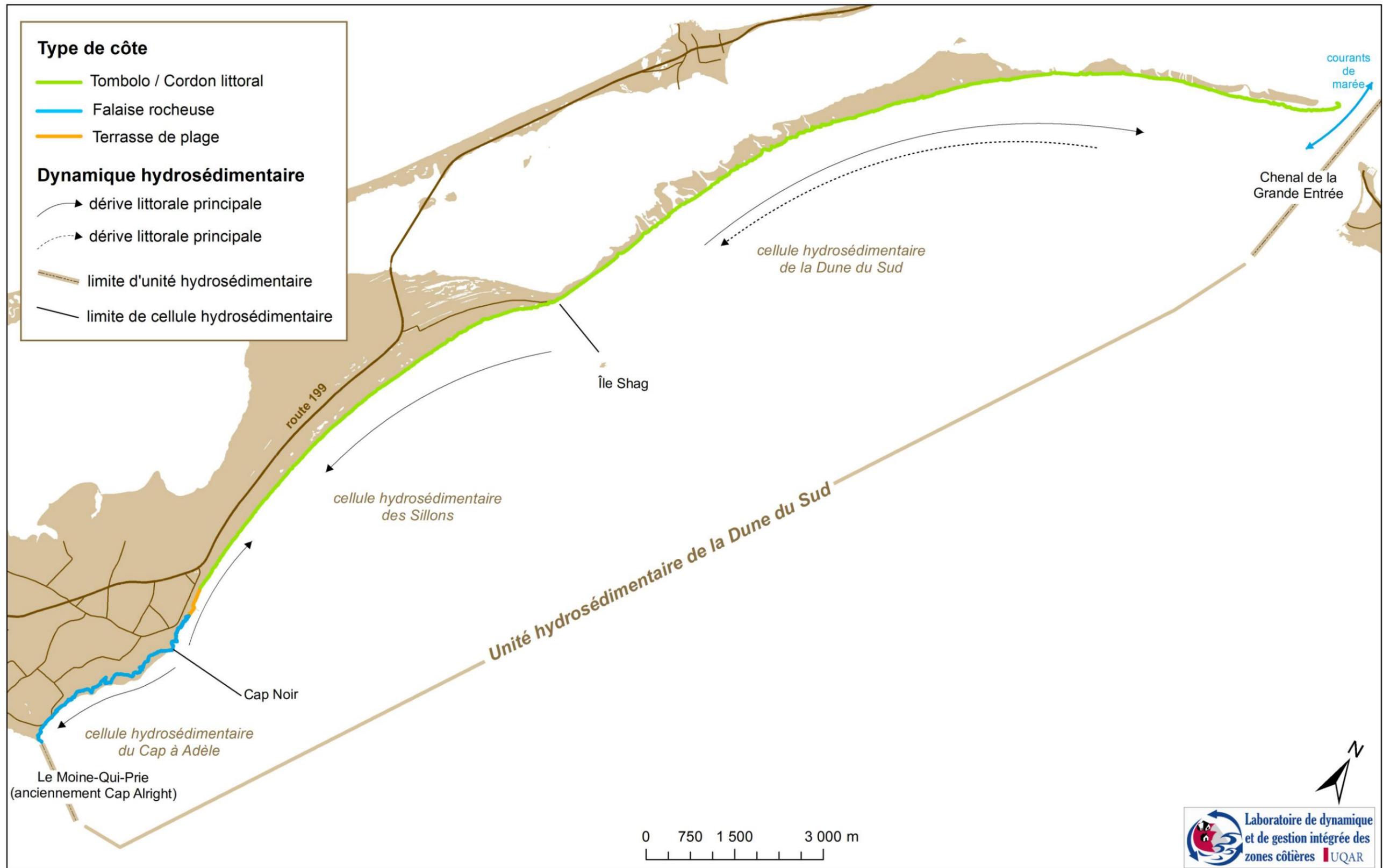
L'unité hydrosédimentaire de la Dune du Sud s'étend du Cap du Moine-Qui-Prie (anciennement le Cap Alright) jusqu'au chenal de la Grande Entrée. Il s'agit d'un grand système de tombolo / cordon littoral de près de 25 km de long, attaché au sud aux falaises rocheuses de l'île du Havre aux Maisons (figure 15). Au niveau de la transition entre les falaises et le tombolo il y a la présence de près de 600 mètres de terrasse de plage en arrière de laquelle on retrouve une falaise morte végétalisée. L'unité est divisée en trois cellules hydrosédimentaires :

- La cellule du Cap à Adèle au sud qui est constituée de hautes falaises rocheuses. La dérive littorale y est dirigée du nord-est vers le sud-ouest.
- La cellule des Sillons au centre qui comprend la transition entre le noyau rocheux et le tombolo. Elle s'arrête vis-à-vis l'île Shag, là où les dérives littorales principales s'inversent.
- La cellule de la Dune du Sud au nord qui est un mince cordon sableux avec de nombreuses brèches de tempête.

L'évolution morphosédimentologique de cette unité est directement en lien avec la fréquence des événements de vagues de tempête. Lors des tempêtes il y a érosion alors qu'il y a accrétion entre les événements de tempête (Owens, 1977). Le bilan sédimentaire historique (1963-2008) est positif dans la zone de convergence de la dérive littorale (cellule des Sillons) et à la limite est de l'unité alors qu'il est négatif ailleurs particulièrement pour la cellule de la Dune du Sud.

Tableau 12. Types de côte de l'unité hydrosédimentaire de la Dune du Sud

Type de côte	Longueur	
	km	%
Falaise rocheuse	5,00	16,6
Terrasse de plage	0,57	1,9
Tombolo / Cordon littoral	24,59	81,5
TOTAL	30,15	100,0



Source des données : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (UQAR). Fond de carte : BDTQ 1:20 000. Cartographie réalisée en juin 2012

Figure 15. Cellules hydrosédimentaires et type de côte de l'unité de la Dune du Sud

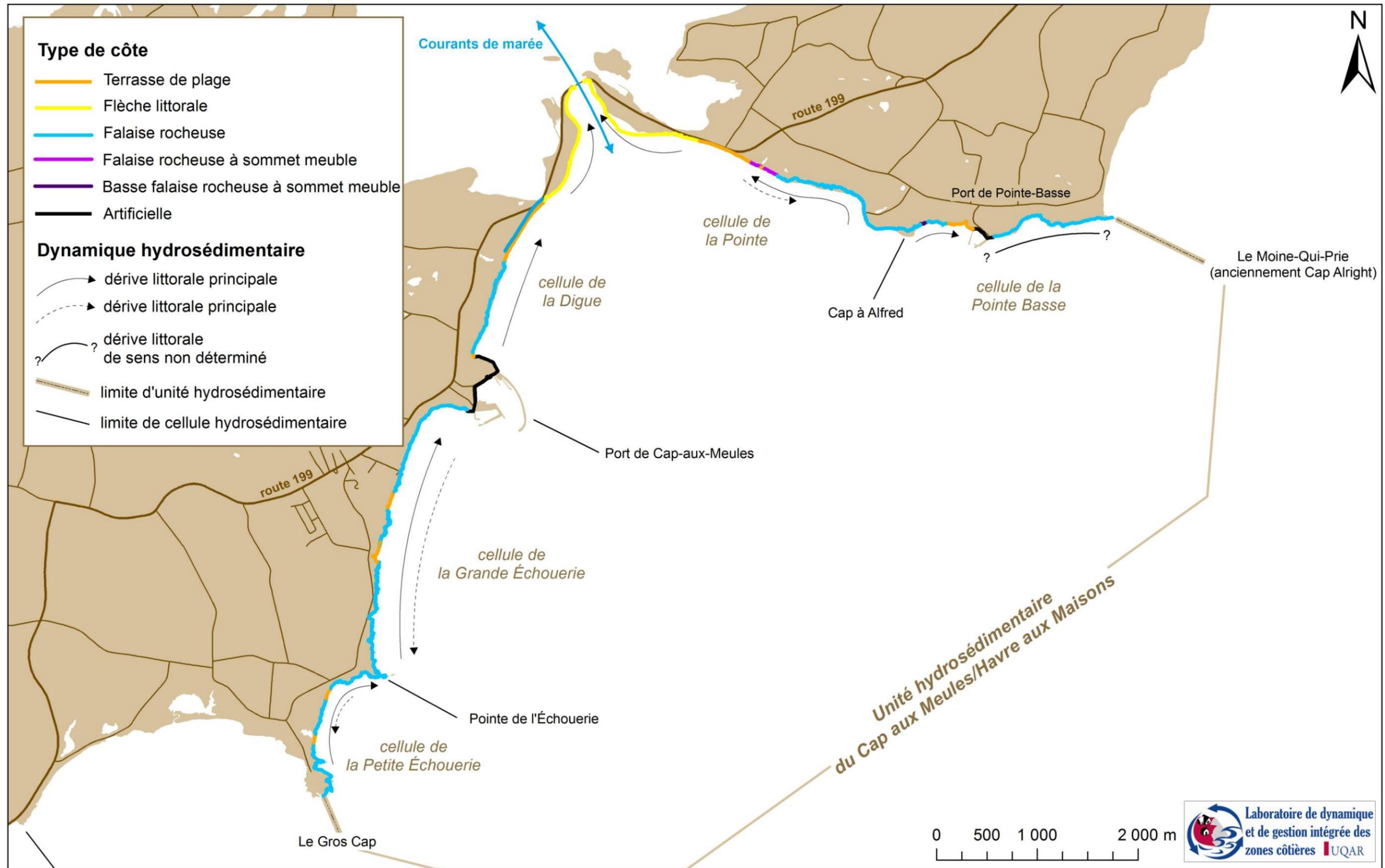
4.5 Unité hydrosédimentaire du Cap aux Meules / Havre aux Maisons

L'unité hydrosédimentaire du Cap aux Meules / Havre aux Maisons s'étend du Gros Cap au sud-ouest jusqu'au Moine-Qui-Prie (anciennement Cap Alright) (figure 16). Elle est composée de 5 cellules hydrosédimentaires séparées par des caps rocheux, le port de Cap-aux-Meules ou par le chenal du Havre aux Maisons (figure 16). C'est une unité principalement rocheuse (65,6 %) avec deux flèches littorales qui s'avancent des îlots rocheux vers le goulet de la lagune du Havre aux Maisons (figure 16). L'importance des côtes artificielles (1,21 km, tableau 13) tient à la présence du plus gros port des îles de la Madeleine, le port de Cap-aux-Meules, ainsi qu'à celui de Pointe-Basse. Le port de Cap-aux-Meules a connu de très importantes phases de remblayages par le passé.

Tableau 13. Types de côte de l'unité hydrosédimentaire du Cap aux Meules/Havre aux Maisons

Type de côte	Longueur	
	km	%
Artificiel (ports)	1,21	6,5
Basse falaise rocheuse à sommet meuble	0,06	0,3
Falaise rocheuse	12,25	65,6
Falaise rocheuse à sommet meuble	0,30	1,6
Flèche littorale	2,97	15,9
Terrasse de plage	1,89	10,1
TOTAL	18,67	100,0

Cette unité hydrosédimentaire présente généralement un bilan sédimentaire négatif, à l'exception des extrémités des deux flèches littorales. La construction actuellement d'un nouveau pont pour la route 199 au-dessus du chenal du Havre aux Maisons va modifier la dynamique sédimentaire de ce secteur, cependant il n'est pas possible de savoir exactement de quelle manière ces changements vont se produire.



Source des données : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (UQAR). Fond de carte : BDTQ 1:20 000. Cartographie réalisée en juin 2012

Figure 16. Cellules hydrosédimentaires et types de côtes de l'unité du Cap aux Meules / Havre aux maisons

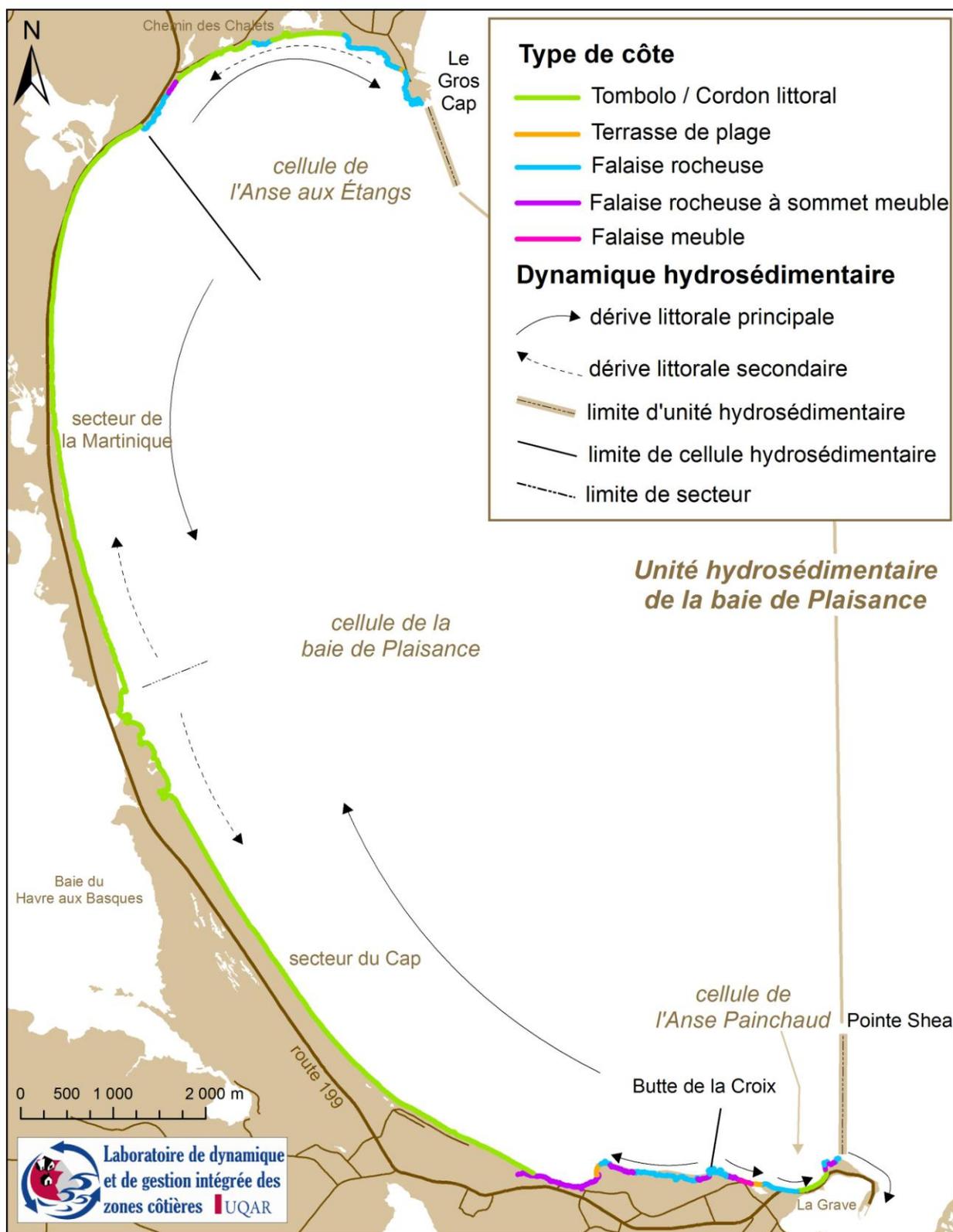
4.6 Unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance

L'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance comporte trois cellules hydrosédimentaires délimitées par des dérives littorales divergentes. La principale cellule correspond à la majeure partie de la baie de Plaisance qui présente une dérive littorale convergente. Ceci explique un bilan plus négatif aux extrémités de la cellule en amont de la dérive littorale et une forte accumulation au centre de la cellule, dans la partie aval du transit sédimentaire principal. Au nord de la cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance, on retrouve la cellule de l'anse aux Étangs qui va jusqu'au Gros Cap. Cette cellule présente un bilan négatif avec un recul important du littoral. Au sud on retrouve la cellule de l'Anse Painchaud jusqu'à la Pointe Shea (figure 17). Cette dernière cellule présente un bilan sédimentaire historique près de la stabilité. Les 24,5 kilomètres de côtes de cette unité sont principalement des côtes à tombolo (69,8 %) qui relient des caps rocheux entre eux (tableau 14). Il y a le tombolo principal, qui relie l'île du Cap aux Meules à l'île du Havre Aubert et trois tombolos plus petits à savoir celui de la Grave au sud et ceux qui ferment l'Étang à Ubald (Chemin des Chalets) et l'Étang à Procul-Bourgeois au nord (figure 17).

Tableau 14. Types de côtes de l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance

Type de côte	Longueur	
	km	%
Falaise meuble	0,19	0,8
Falaise rocheuse	4,86	19,8
Falaise rocheuse à sommet meuble	2,05	8,3
Terrasse de plage	0,30	1,2
Tombolo / Cordon littoral	17,11	69,8
TOTAL	24,51	100,0

Cette unité hydrosédimentaire communiquait avec la baie du Havre aux Basques avant la fermeture artificielle du goulet lors de la construction de la route en 1952 (Grenier, 1993) ce qui a changé la dynamique hydrosédimentaire de ce secteur.



Source des données : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (UQAR). Fond de carte : BDTQ 1:20 000. Cartographie réalisée en juin 2012

Figure 17. Cellules hydrosédimentaires de l'unité de la baie de Plaisance

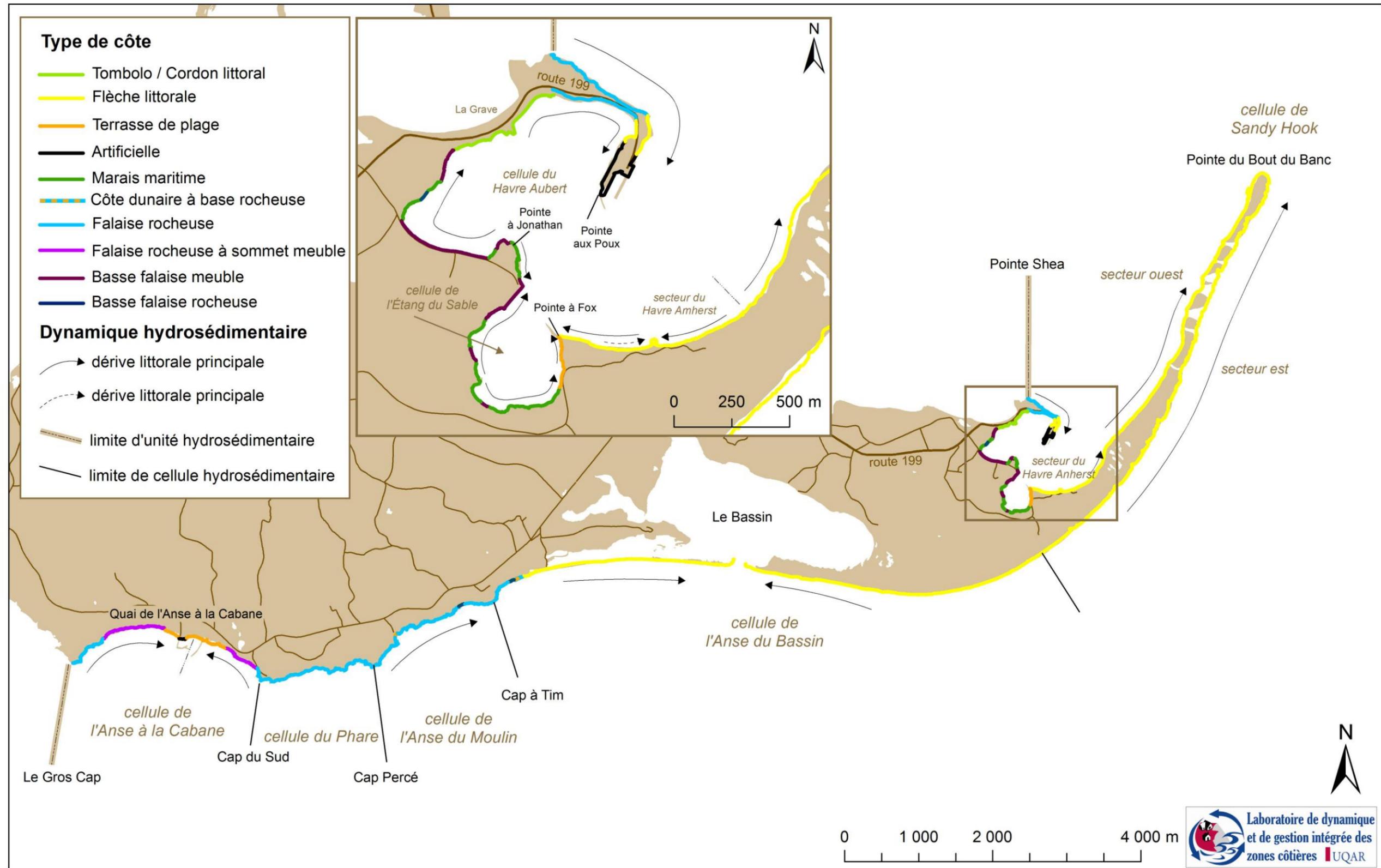
4.7 Unité hydrosédimentaire du Havre Aubert/Sandy Hook

L'unité hydrosédimentaire du Havre Aubert/Sandy Hook s'étend du Gros Cap (de Havre-Aubert) jusqu'à la Pointe Shea. Les 34 km de la côte de cette unité se répartissent en 6 cellules hydrosédimentaires (figure 18). Étant donné l'importance de la flèche littorale de Sandy Hook et de celles du Bassin, la côte de cette unité est principalement composée de flèches littorales (60,5 %) (tableau 15). L'extrémité de la Pointe aux Poux était également une flèche littorale, cependant elle a été beaucoup modifiée lors de la construction du port (remblai, murs, enrochements), c'est pourquoi elle est maintenant classée comme côte artificielle. La cellule hydrosédimentaire de Sandy Hook est une longue et étroite flèche littorale, avec de nombreuses brèches de tempête, s'avancant vers La Passe et l'île d'Entrée. En raison du sens du transit sédimentaire, une très grande quantité de sédiments s'accumule à son extrémité. Elle comporte 13,3 km de côtes qui ont été divisées en 3 secteurs. Cette unité comprend, les seuls endroits de marais maritime sur la côte extérieure des îles de la Madeleine. En effet les deux cellules hydrosédimentaires du Havre Aubert et de l'Étang du Sable sont suffisamment abritées pour permettre le développement de ce type de côte. De manière globale, la majeure partie de cette unité hydrosédimentaire présente un bilan négatif, à l'exception de l'extrémité du Sandy Hook, puisque les sédiments sont expulsés par les courants côtiers vers la zone pré-littorale.

L'intérieur de Bassin n'est pas inclus dans la présente étude.

Tableau 15. Types de côte de l'unité hydrosédimentaire du Havre Aubert/Sandy Hook

Type de côte	Longueur	
	km	%
Artificiel (port)	0,71	2,1
Basse falaise meuble	1,05	3,0
Basse falaise rocheuse	0,23	0,7
Dunaire à base rocheuse	0,13	0,4
Falaise rocheuse	6,81	19,6
Falaise rocheuse à sommet meuble	1,64	4,7
Flèche littorale	20,99	60,5
Marais maritime	1,26	3,6
Terrasse de plage	1,25	3,6
Tombolo / Cordon littoral	0,60	1,7
TOTAL	34,69	100,0



Source des données : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (UQAR). Fond de carte : BDTQ 1:20 000. Cartographie réalisée en juin 2012

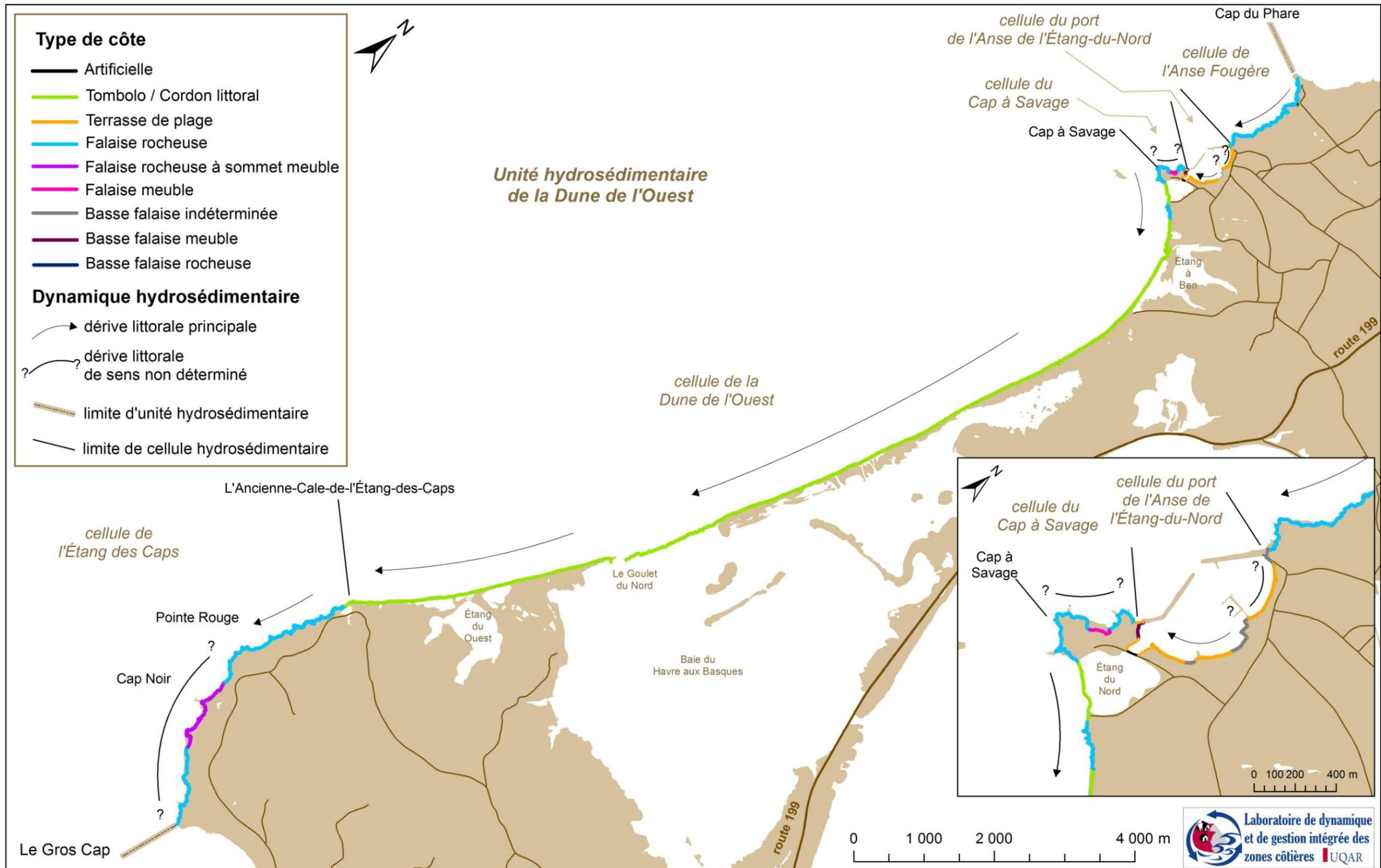
Figure 18. Cellules hydrosédimentaires et types de côte de l'unité du Havre Aubert/SandyHook

4.8 Unité hydrosédimentaire de la Dune de l'Ouest

L'unité hydrosédimentaire de la Dune de l'Ouest s'étend du Gros Cap (de Havre-Aubert) au sud jusqu'au cap du Phare au nord sur 26,5 km. La dérive littorale est dirigée vers le sud (figure 19). La majorité de la côte est un tombolo (15 km) qui relie entre eux les îles du Cap aux Meules et du Havre Aubert situés aux extrémités de l'unité (tableau 16). Ce cordon sableux est caractérisé par de nombreuses brèches de tempête et est coupé par le Goulet du Nord qui relie la baie du Havre aux Basques au golfe du Saint-Laurent. Ce goulet n'est pas ouvert en permanence, il tend à se combler de sable et à se fermer, mais s'ouvre occasionnellement lors de grandes marées ou de tempêtes. L'intérieur du port de l'Anse de l'Étang du Nord est constitué d'une alternance de côtes à terrasses de plage et de basses falaises. L'unité hydrosédimentaire de la dune de l'Ouest présente un bilan sédimentaire historique (1963-2008) négatif avec un fort recul, à l'instar de l'ensemble de la façade ouest des îles de la Madeleine.

Tableau 16. Types de côtes de l'unité de la Dune de l'Ouest

Type de côte	Longueur	
	km	%
Artificiel	0,05	0,2
Basse falaise (non déterminé)	0,38	1,4
Basse falaise meuble	0,09	0,4
Basse falaise rocheuse	0,06	0,2
Falaise meuble	0,14	0,5
Falaise rocheuse	8,23	31,0
Falaise rocheuse à sommet meuble	1,50	5,7
Terrasse de plage	0,99	3,7
Tombolo / Cordon littoral	15,09	56,9
TOTAL	26,54	100,0



Source des données : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (UQAR). Fond de carte : BDTQ 1:20 000. Cartographie réalisée en juin 2012

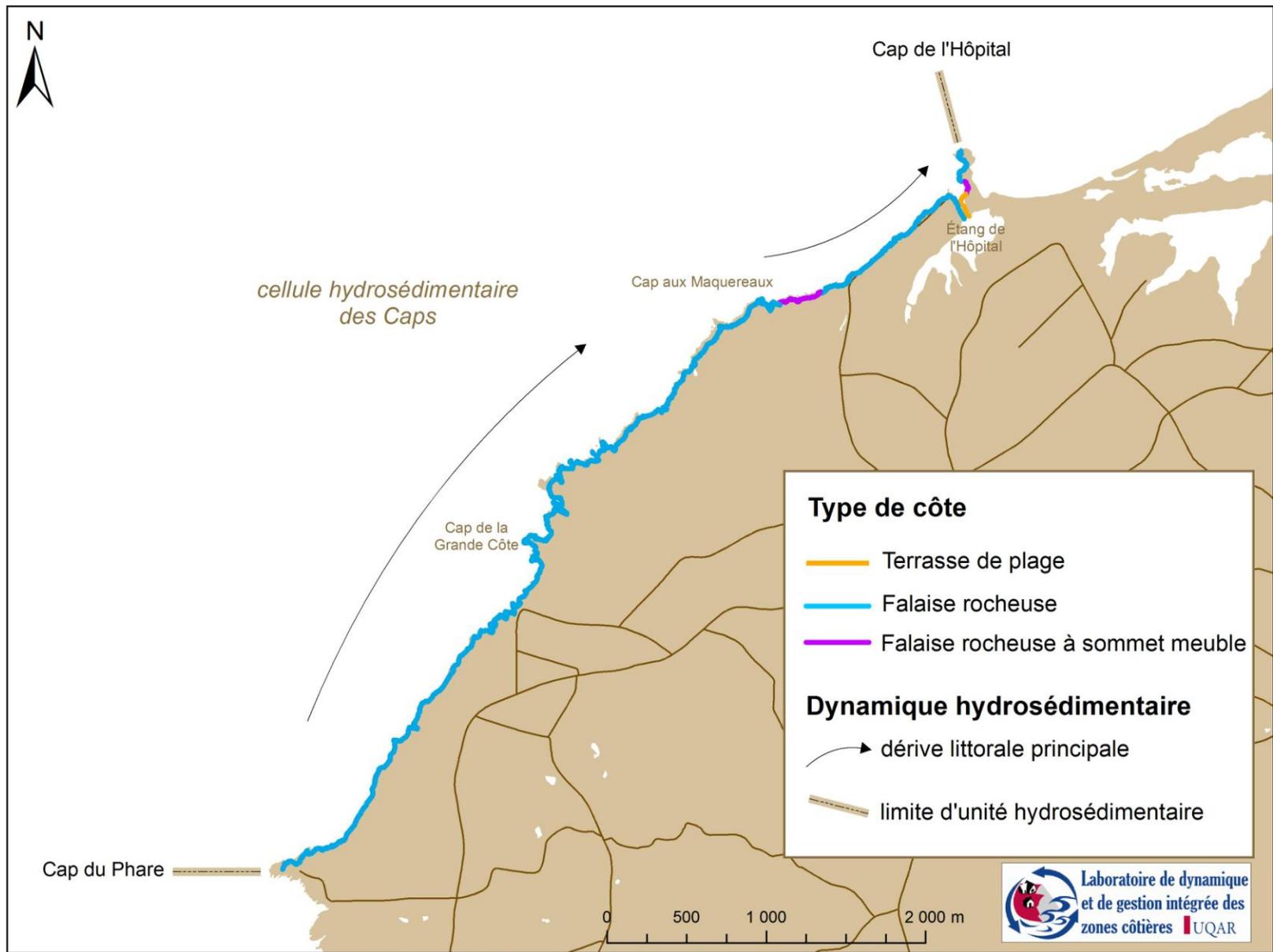
Figure 19. Carte des cellules hydro-sédimentaires et des types de côte de l'unité hydro-sédimentaire de la Dune de l'Ouest

4.9 Unité hydrosédimentaire de l'Étang du Nord

Cette unité hydrosédimentaire de 10,2 km de long se compose d'une seule cellule hydrosédimentaire, celle des Caps. Sur l'île du Cap aux Meules, elle s'étend du Cap du Phare au sud-ouest jusqu'au Cap de l'Hôpital au nord-est. La dérive littorale principale est orientée vers le nord-est (figure 20). Les côtes sont principalement des falaises rocheuses (9,72 km) à l'exception de deux petits segments de falaise rocheuse à sommet meuble et une terrasse de plage au niveau du goulet (tableau 17). La falaise de grès présente un fort recul, étant exposée directement aux tempêtes du nord-ouest. Il est intéressant de noter la présence d'un goulet, artificiellement creusé en 1984, immédiatement à l'ouest du Cap de l'Hôpital afin de donner un accès à l'Étang de l'Hôpital. Celui-ci est maintenant comblé par du sable et il est inutilisable.

Tableau 17. Types de côte de l'unité de l'Étang du Nord

Type de côte	Longueur	
	km	%
Falaise rocheuse	9,72	95,2
Falaise rocheuse à sommet meuble	0,42	4,1
Terrasse de plage	0,07	0,7
TOTAL	10,22	100,0



Source des données : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (UQAR). Fond de carte : BDTQ 1:20 000. Cartographie réalisée en juin 2012

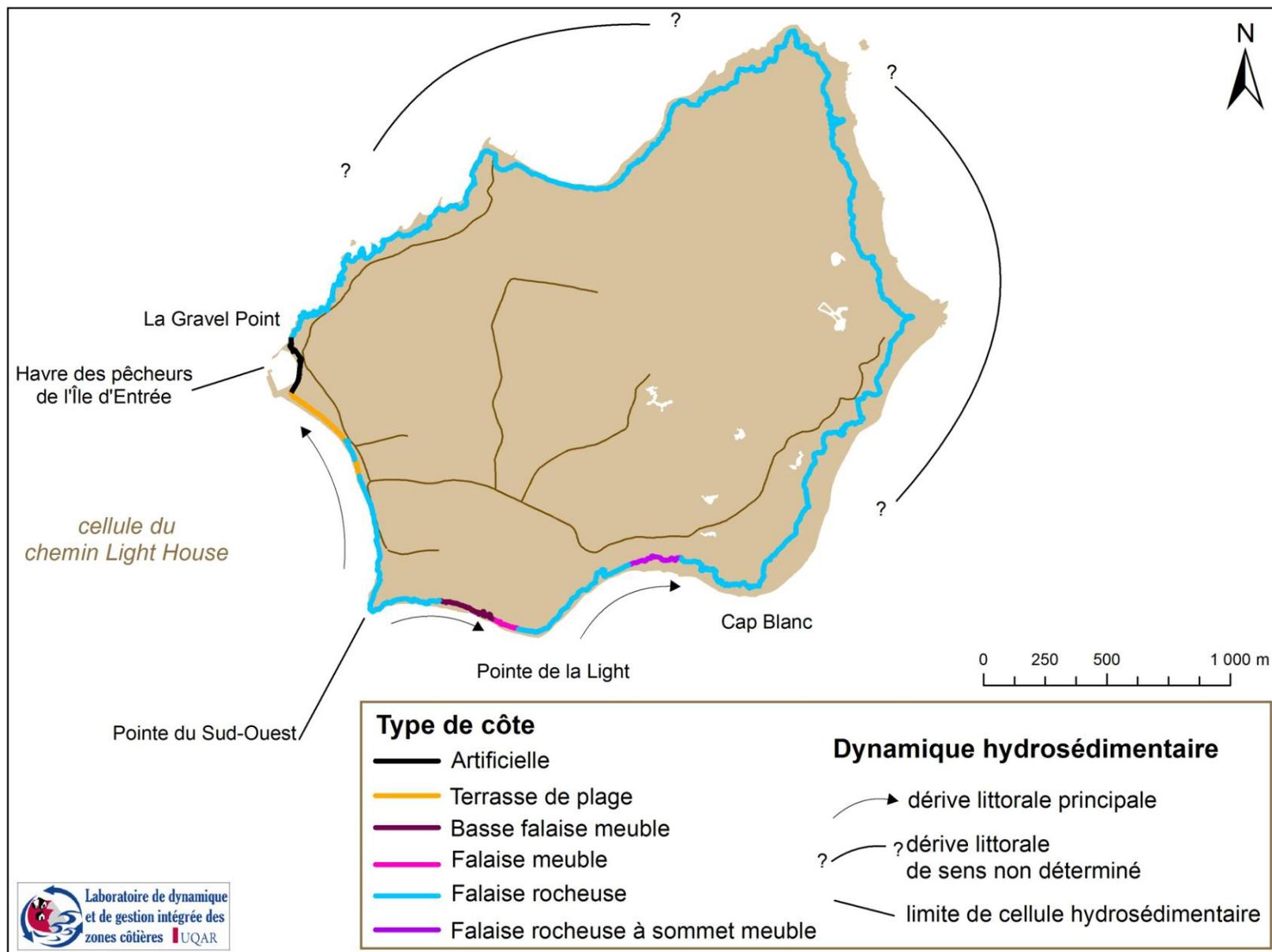
Figure 20. Unité hydrosédimentaire de l'Étang du Nord : dérives littorales et types de côte

4.10 Unité hydrosédimentaire de l'Île d'Entrée

L'unité hydrosédimentaire de l'Île d'Entrée est longue de 10,5 km. C'est la seule île habitée de l'archipel qui n'est pas reliée aux autres par un cordon sableux. La côte est principalement constituée de falaises rocheuses (tableau 18). Dans la cellule hydrosédimentaire du chemin Light House, la dérive littorale principale est dirigée vers le nord (figure 21). Entre la Pointe du Sud-Ouest et le Cap Blanc, la dérive littorale est dirigée vers l'est (figure 21). Cependant, pour le reste de l'île, il n'a pas été possible de déterminer le sens de la dérive littorale.

Tableau 18. Types de côte de l'unité de l'Île d'Entrée

Type de côte	Longueur	
	km	%
Artificiel (port)	0,28	2,7
Basse falaise meuble	0,30	2,9
Falaise meuble	0,13	1,2
Falaise rocheuse	9,19	87,2
Falaise rocheuse à sommet meuble	0,25	2,4
Terrasse de plage	0,38	3,6
TOTAL	10,54	100,0



Source des données : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (UQAR). Fond de carte : BDTQ 1:20 000. Cartographie réalisée en juin 2012

Figure 21. Cellules hydrosédimentaires et type de côte de l'unité de l'Île d'Entrée

5. Gestion de l'érosion côtière aux îles de la Madeleine

5.1 Sensibilité de la côte à l'érosion

La sensibilité d'une côte à l'érosion peut se quantifier à partir de sa vitesse de migration pour une période donnée. L'analyse de l'évolution du littoral aux îles de la Madeleine entre 1963 et 2008 indique que le taux de déplacement global, tout type de côte confondu, a été de -0,24 m/an (tableau 19). Cette valeur moyenne masque toutefois une forte variabilité spatiale tant entre les types de côte que pour les différentes unités hydrosédimentaires (tableaux 19 et 20). Par exemple, les tombolos ont reculé à des vitesses variant généralement entre -0,5m et -2 m/an sur la façade ouest alors qu'ils ont avancé à une vitesse variant généralement de 0,5 à 3 m/an pour la même période pour l'unité hydrosédimentaire de la baie de Plaisance localisée du côté est des îles de la Madeleine. Les trois principaux types de côtes des îles de la Madeleine sont les côtes à tombolo/cordon littoral (40 %), les falaises rocheuses (28 %) et les flèches littorales (20 %). Ils représentent à eux seuls, près de 90 % des types de côte des îles de la Madeleine. De manière globale, la vitesse moyenne du taux de déplacement historique des tombolos et des falaises rocheuses a été respectivement de -0,34 m/an et de -0,30 m/an alors que la valeur moyenne pour les flèches littorales se situe près de la stabilité, soit -0,02 m/an (tableau 19).

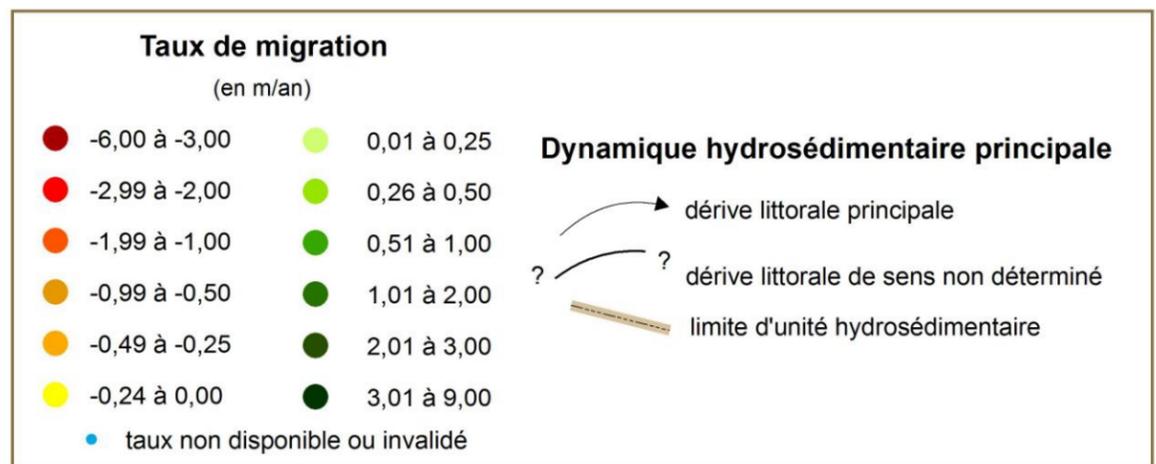
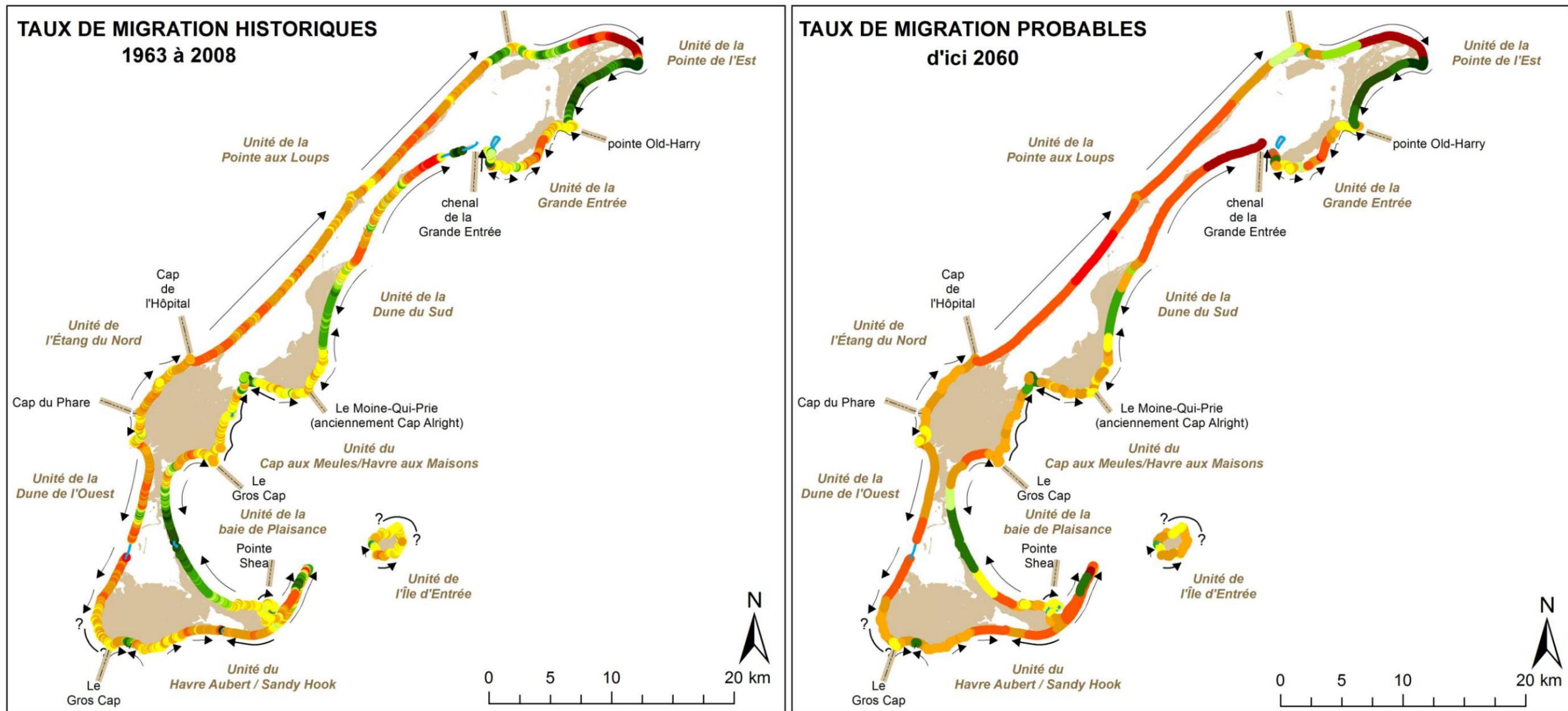
Tableau 19. Taux de migration historique et probable selon les types de côte

Type de côte	Taux de migration historique (1963 à 2008) m/an	Taux de migration probable d'ici 2060 m/an
Basse falaise meuble	-1,10	-1,41
Basse falaise rocheuse	-0,46	-0,70
Basse falaise rocheuse à sommet meuble	-0,17	nd
Dunaire à base rocheuse	-0,58	-0,89
Falaise meuble	-0,34	-0,53
Falaise rocheuse	-0,30	-0,42
Falaise rocheuse à sommet meuble	-0,35	-0,44
Flèche littorale	-0,02	-0,50
Terrasse de plage	0,14	-0,33
Tombolo / Cordon littoral	-0,34	-0,98
TOTAL	-0,24	-0,66

Tableau 20. Taux de migration historiques et probables selon les unités hydrosédimentaires

Unité hydrosédimentaire	Taux de migration historique (1963 à 2008)	Taux de migration probable d'ici 2060
du Cap aux Meules/Havre aux Maison	-0,03	-0,26
du Havre Aubert / Sandy Hook	-0,33	-0,79
de la baie de Plaisance	0,52	-0,17
de la Dune de l'Ouest	-0,62	-0,73
de la Dune du Sud	-0,24	-0,65
de la Grande Entrée	-0,30	-0,50
de la Pointe de l'Est	0,30	-0,06
de l'Étang du Nord	-0,53	-0,61
de la Pointe aux Loups	-0,70	-1,51
de l'Île d'Entrée	-0,22	-0,31
Moyenne globale	-0,24	-0,66

En raison de la forte dominance des côtes basses sablonneuses et des falaises de grès, le littoral des îles de la Madeleine est particulièrement sensible aux conditions météo-marines. La réduction significative de la couverture de glace en raison du réchauffement climatique ainsi que la hausse du niveau de la mer appréhendée vont accroître la fréquence d'exposition du littoral aux événements de tempête. Dans ce contexte, la vitesse moyenne de recul pour l'ensemble des îles de la Madeleine va presque tripler d'ici 2060, passant de -0,24 m/an à -0,66 m/an (tableau 20 et figure 22). On constate que le changement dans la vitesse de déplacement du littoral va être particulièrement significatif pour les côtes à tombolo, les flèches littorales et les terrasses de plage (tableau 19). L'augmentation de la vitesse de déplacement des sédiments le long de la côte va entraîner à long terme un déficit sédimentaire pour l'ensemble des unités hydrosédimentaires (tableau 20).



Type de côte	Taux de migration historique (1963 à 2008) m/an	Taux de migration probable d'ici 2060 m/an
Basse falaise meuble	-1,10	-1,41
Basse falaise rocheuse	-0,46	-0,70
Basse falaise rocheuse à sommet meuble	-0,17	nd
Dunaire à base rocheuse	-0,58	-0,89
Falaise meuble	-0,34	-0,53
Falaise rocheuse	-0,30	-0,42
Falaise rocheuse à sommet meuble	-0,35	-0,44
Flèche littorale	-0,02	-0,50
Terrasse de plage	0,14	-0,33
Tombolo / Cordon littoral	-0,34	-0,98
TOTAL	-0,24	-0,66

Source des données :
Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières,
juillet 2012.

Fond de carte : BDTQ 1:20 000



Figure 22. Évolution côtière historique et probable des îles de la Madeleine

Ainsi, l'analyse effectuée indique que seules 14 % des côtes des îles de la Madeleine seront en accumulation d'ici 2060 alors que 81 % seront en érosion (figure 23). Pour près de 5 % des côtes (11,2 km) il n'a pas été possible de déterminer un scénario d'évolution de la côte, soit parce que ces secteurs se situent dans des zones portuaires, soit parce que des actions anthropiques ont trop modifié la côte par le passé (ouverture ou fermeture artificielle d'un goulet, remblais, enrochements) soit par manque de données (parallaxe trop importante, manque de photos,...). Les zones portuaires (4,28 km) n'ont pas de scénario probable d'évolution étant donné que la côte est figée artificiellement (figure 24-A). Cependant, ne sont pas inclus dans la catégorie « zone portuaire » les secteurs naturels présents dans les havres de pêche qui connaissent, eux, une évolution (figure 24-B).

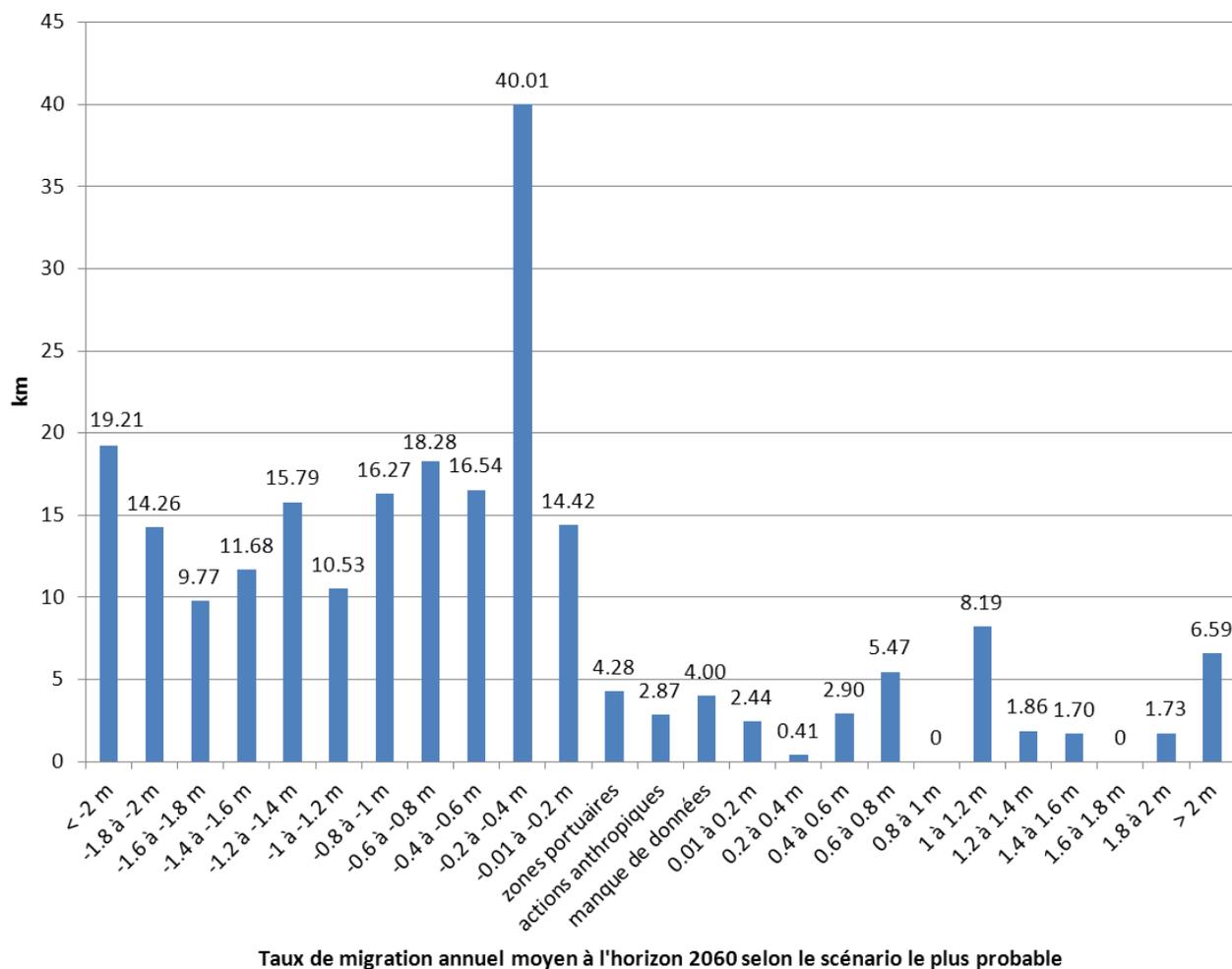


Figure 23. Longueur de côtes selon les catégories de taux probable

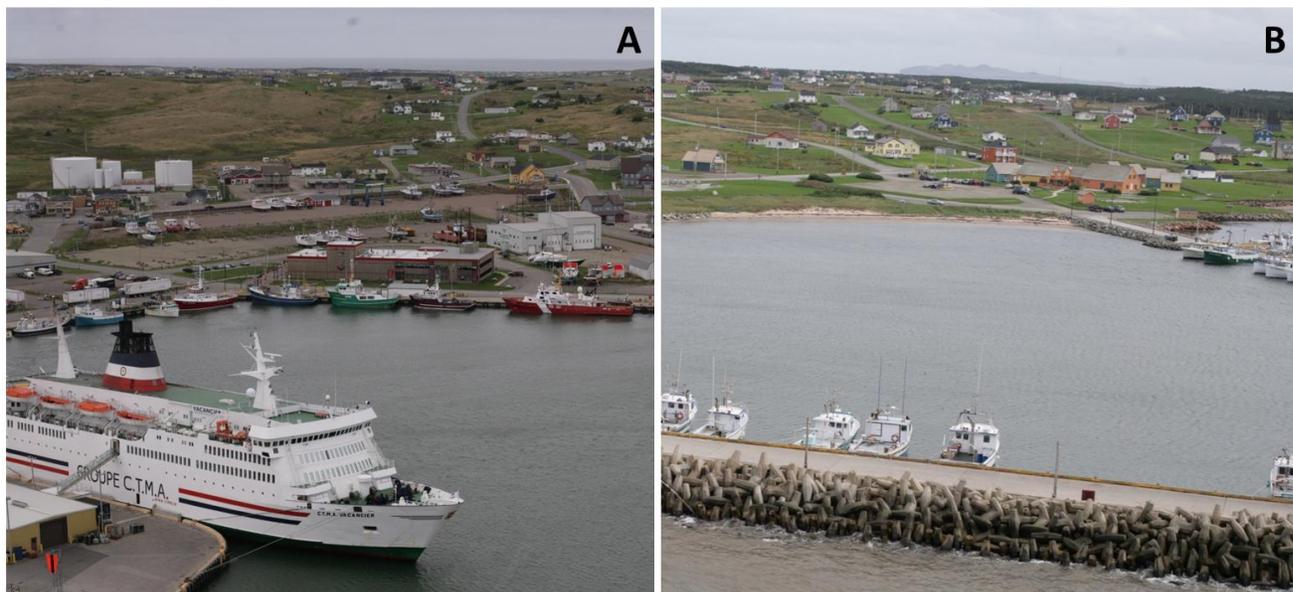


Figure 24. Zones portuaires des îles de la Madeleine.

A : port polyvalent de Cap-aux-Meules B : Havre de Pêche de l'Étang-du-Nord

Plus d'un tiers des côtes des îles de la Madeleine connaîtront une érosion supérieure à 1 m/an pour le demi-siècle à venir (35%); plus de 57 % connaîtront une érosion supérieure à 0,4 m/an et 18 % des côtes (soit 40,01 km) vont probablement connaître une érosion située entre 0,2 et 0,4 m/an au cours des 50 prochaines années. Seuls 6 % des côtes (14,4 km) connaîtront une érosion inférieure à 0,2 m/an. Pour les tombolos, la proportion de côte en érosion est semblable à l'ensemble des îles soit d'environ 80 %. Par contre l'intensité de l'érosion y est plus marquée. En effet, 62 % des côtes à tombolo / cordon littoral auront une érosion supérieure ou égale à 1 m/an alors que pour l'ensemble des côtes cette proportion est de 35 %. Quant aux falaises rocheuses, elles vont tout de même reculer à une vitesse moyenne de -0,42 m/an (tableau 19), ce qui est nettement plus élevé que les valeurs mesurées ailleurs au Québec maritime pour les falaises rocheuses (Bernatchez et Dubois, 2004). Certaines falaises de grès présentent à leur sommet des couches fortement altérées. Ainsi lors de hauts niveaux d'eau associés aux tempêtes hivernales et en l'absence d'une couverture de glace comme lors de la dernière décennie, les vagues peuvent atteindre plus régulièrement la partie moins résistante de la falaise et faire reculer le sommet de la falaise deux à trois fois plus rapidement que la vitesse historique (Pierre et Bernatchez, 2009). Outre l'action des vagues de tempête, les falaises rocheuses, particulièrement celles composées d'argilite, sont très sensibles aux cycles de gel-dégel et aux redoux hivernaux qui seront beaucoup plus nombreux avec le réchauffement des températures hivernales (Bernatchez *et al.*, 2008). Ces conditions climatiques favorisent la cryoclastie et la formation de coulées boueuses. Les falaises à sommet meuble, particulièrement celles localisées sur l'île du Havre Aubert sont aussi sensibles aux processus de suffosion.

5.2 Classification des marges de sécurité en érosion côtière

Une cartographie des marges de sécurité en érosion côtière à une échelle de 1 :5 000 a été effectuée individuellement pour chacune des **251 zones homogènes** des îles de la Madeleine. Cela pour permettre aux responsables de l'aménagement de visualiser au mieux la localisation et l'étendue des secteurs zonés. Un exemple est présenté à la figure 25. Cependant, dans les secteurs pour lesquels aucune infrastructure n'est présente (par exemple la Pointe de l'Est, la Dune de l'ouest ou le Sandy Hook) les cartes sont présentées à l'échelle du 1 :20 000. L'ensemble des cartes est présenté dans un recueil de cartes conjoint à ce document, soit 10 cartes au 1 :20 000 et 90 cartes au 1 :5 000 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.

Les marges de recul en érosion côtière pour chacun des types de côte des îles de la Madeleine sont présentées à l'annexe 3. La marge minimale, la marge maximale atteinte, des exemples de marges et de calculs, des illustrations ainsi que des cas particuliers sont détaillés pour chaque type de côte.

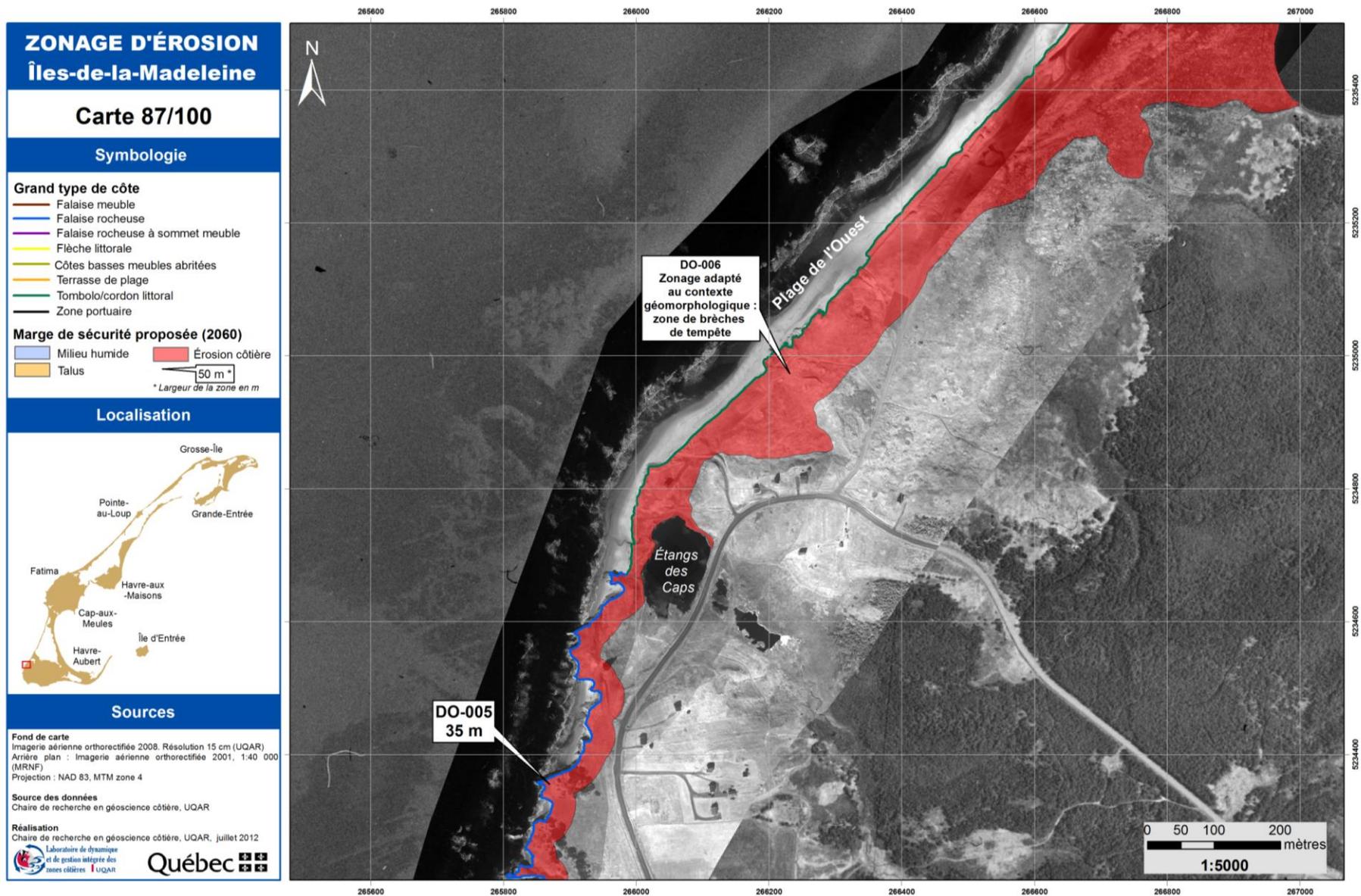


Figure 25. Exemple de cartographie de marge de sécurité en érosion proposée (carte 87 - Étangs des Caps)

La plupart des côtes des îles de la Madeleine (69 %) se retrouvent dans les catégories de marge de sécurité en érosion côtière de 90 m, de 30 m et de marges variables (figure 26).

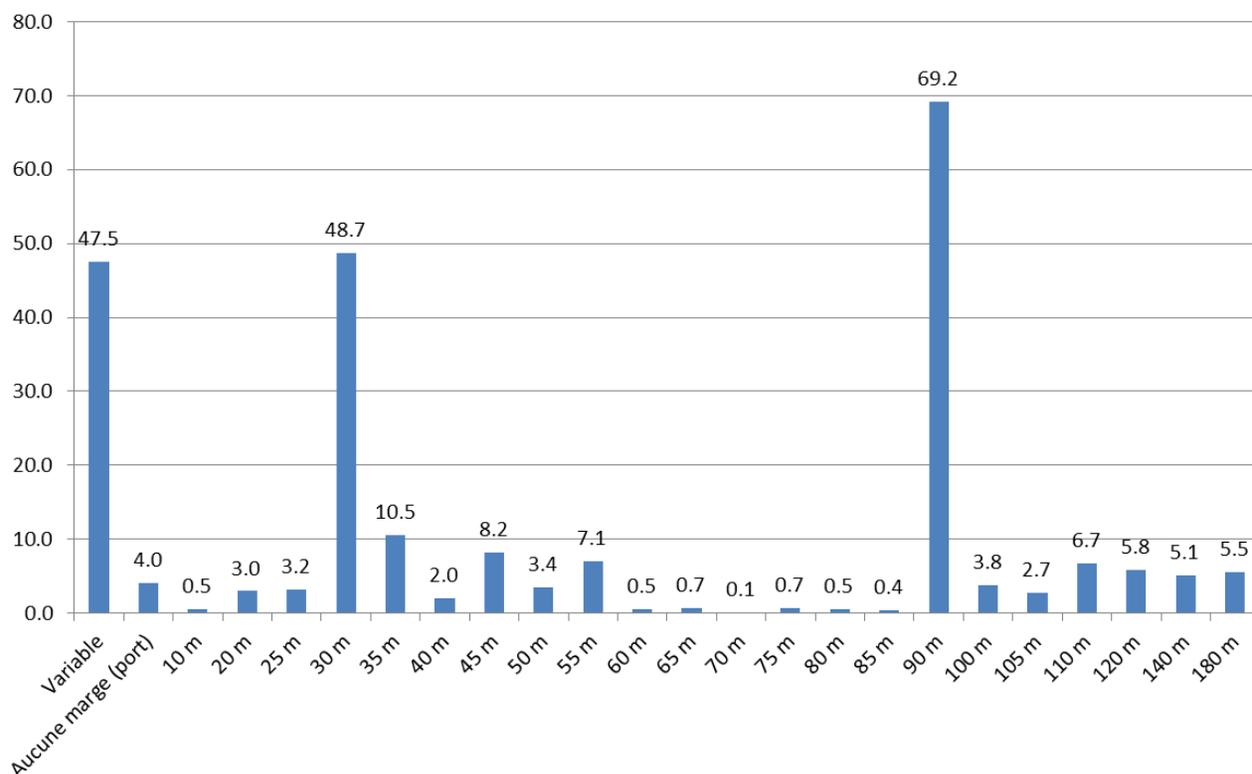


Figure 26. Longueur de côte (km) selon la largeur de la marge de sécurité en érosion côtière

La marge de 90 m est celle présente sur la plus grande longueur de côte (28,8 %, soit 69,2km) mais regroupe seulement 29 zones homogènes. En effet, ce sont quasi-exclusivement des tombolos, donc généralement de grandes zones homogènes. La grande longueur de côte s'explique par le fait qu'il s'agit de la marge minimale des côtes à tombolo et que ce type de côte est le plus important. Seule une petite zone dont la marge est de 90 m n'est pas un tombolo (BP-025, falaise rocheuse).

19,8 % de côte (47,5 km) présente une marge variable au sein d'une même unité en raison de la géomorphologie du territoire (figure 26), soit 33 zones homogènes. Il s'agit des secteurs de flèches littorales et des secteurs de brèches de tempête.

La marge de 30 m a été appliquée sur près de 49 km de côte (soit 20,3 % des côtes). Il s'agit seulement des secteurs de falaises rocheuses. Cela regroupe 71 zones homogènes. Ce chiffre élevé s'explique par le fait que les zones homogènes situées dans les secteurs de falaises rocheuses sont plus petites car l'intensité de l'érosion y est plus variable (présence de caps, orientation variable, lithologie changeante, densité des diaclases). La longueur moyenne des zones homogènes est de seulement 0,60 km dans les secteurs de falaises rocheuses comparativement à 2,59 km dans les secteurs de tombolo.

Les quatre kilomètres de secteurs n'ayant pas de marge d'érosion (figure 26), correspondent aux zones portuaires, pour lesquelles effectuer un zonage de l'érosion côtière n'est pas approprié en raison de leur vocation. Ces secteurs devraient cependant recevoir que des infrastructures liées à l'activité portuaire et qui ne peuvent pas être localisées plus loin de la côte.

Pour l'ensemble des îles de la Madeleine, les superficies zonées relativement à l'aléa d'érosion sont de 36 km² soit 17,8 % des 202 km² de superficie de l'archipel. Il faut cependant noter que la plupart des surfaces zonées se trouvent sur les flèches littorales (18,8 km²), sur les tombolos / cordon littoral (14,2 km²) et sur l'île du Chenal (0,2 km²). Ainsi seuls 2,8 km² de terrain sont concernés par une marge de sécurité en érosion côtière sur les îlots rocheux, cela représente donc 2,0 % des 140 km² pouvant être occupés par l'habitat. Ces marges de sécurité en érosion côtière sont une contrainte pour les nouvelles constructions, mais peuvent également être vues comme une opportunité de développer d'autres usages que le cadre bâti et de maintenir des milieux naturels afin d'assurer la viabilité des zones urbanisées.

6. Conclusion

Les côtes des îles de la Madeleine connaissent une érosion importante. Avec les changements environnementaux, les prévisions montrent un système côtier en déficit sédimentaire dont seulement 14 % de sa longueur de côte devrait connaître une accumulation d'ici 2060 alors que 81 % seront en érosion. C'est pourquoi il est primordial que l'aménagement soit adapté à cet aléa naturel. La proposition de marge de sécurité en érosion côtière développée dans cette étude pourra ainsi être appliquée 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 événementiel. 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 aux îles de la Madeleine 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 est présent sur les côtes des îles de la Madeleine, soit **l'aléa de submersion** (figure 27). Il affecte les côtes basses (terrasses de plages, flèches littorales, tombolos / cordon littoral ainsi que les basses falaises) et son importance va aller en augmentant du fait de la subsidence des îles de la Madeleine (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 des îles de la Madeleine afin que le développement et la gestion effectués puissent tenir compte de l'ensemble des aléas côtiers présents.



Figure 27. Tempête d'octobre 2000 sur la flèche littorale de La Digue
Source : MTQ

7. 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.
- 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 and de Manicouagan-Outardes : synthèse, processus, causes et perspectives». Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, 460 p.
- Bernatchez, P., Bouchard, J-D., Dugas, S., Drejza, S., Fraser, C., Morneau, F., Nicorici, C. et Jolivet, Y (2010a) Principes et fondements méthodologiques appuyant l'évaluation des marges de recul d'érosion en zone côtière. Document de travail remis au ministère de la Sécurité Publique du Québec, avril 2010, 42 p.
- Bernatchez, P., Drejza, S. et Dugas, S. (2012) *Marges de sécurité en érosion côtière aux îles de la Madeleine – Recueil de cartes*. 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, juillet 2012, 100 cartes.
- 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, n°1, p. 45-71.
- Bernatchez, P. et Fraser, C. (2012) Evolution of Coastal Defence Structures and Consequences for Beach Width Trends, Quebec, Canada. *Journal of Coastal Research*, disponible en ligne
- 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., Toubal, T., Van-Wiersts, S., Drejza, S. et Friesinger, S. (2010b) *Caractérisation géomorphologique et sédimentologique des unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups, route 199, Îles-de-la-Madeleine*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport final remis au ministère des Transports du Québec, avril 2010, 177 p.
- Brisebois, D. (1981) Lithostratigraphie des strates Permo-Carbonifères de l'archipel des Îles de la Madeleine. *Ministère de l'énergie et des ressources*, DPV-796, 48 p.
- Clark, J. R. (1996) *Coastal zone management handbook*, Lewis Publisher, 694 p.
- 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 *et al.* (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.

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

Drapeau, G. et Mercier, O (1990) « Modélisation de l'évolution du littoral des îles de la Madeleine, Québec » *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 44, n° 2, 1990, p. 217-226.

Dredge, L. A., Mott, R. J. et Grant, D. R. (1992) Quaternary stratigraphy, paleoecology, and glacial geology, Îles de la Madeleine, Québec. *Canadian Journal of Earth Science*, vol. 29, p. 1981-1996.

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.

Dubois, J.-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

Friesinger S. (2009) *Géorisques côtiers: adaptation et perceptions des communautés côtières dans le golfe du Saint-Laurent*. Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Rimouski; 2009, 168 p.

Gagnon, M. (1998) *Bilan régional - Îles-de-la-Madeleine. Zone d'intervention prioritaire 21*. Environnement Canada - région du Québec, Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent. 78 pages

Giles, P.S. (2008) « Windsor Group (Late Mississippian) stratigraphy, Magdalen Islands, Quebec: a rare eastern Canadian record of late Viséan basaltic volcanism », *Atlantic Geology*, vol 44, p. 167–185.

Grenier, A. (1993) *Évolution littorale récente et impact des structures artificielles aux Îles de la Madeleine, golfe du Saint-Laurent, Québec*. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 275 p.

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

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*, vol. 81, p. 287-298.

Juneau, M.N. (2012) *Hausse récente du niveau marin relatif aux Îles-de-la-Madeleine*. Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Rimouski, 174 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. (2008) « Pattern of recent vertical crustal movements in Canada », *Journal of Geodynamics*, vol 45, p. 133-145.

LDGIZC (2006 à 2009) Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Données et rapports internes.

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.

Lewis P.J., Morgan M.D. (1984) – *Severe storms of Canada's East coast: a catalogue summary for the period 1957 to 1983*. Report n° 84-13, Canadian Climate Centre, Atmospheric Environment Service, Canadian Climate Program, 322 p.

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

Mercier O. (1987) *Modèle géomorphologique géomorphologique dynamique du littoral de l'archipel des Îles-de-la-Madeleine*, Mémoire de maîtrise.

Mercier-Rémillard, A. (2011) *Stratigraphie, sédimentologie et micromorphologie du drift des Demoiselles, île du Havre-Aubert, Îles de la Madeleine, Québec*, mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 68p.

Mercier-Rémillard, A., Héту, B., Bernatchez, P., Bertran, P., (sous presse). *The Drift des Demoiselles on the Magdalen Islands (Québec, Canada): sedimentological and micromorphological evidence of a Late Wisconsinan glacial diamict*. *Canadian Journal of Earth Science*.

Milligan, D. A., Wilcox, C. and 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.

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.

Municipalité des Îles (2012), sur le site internet <http://www.muniles.ca/> consulté en juin 2012

Owens E. H. (1977) *Temporal variations in beach and nearshore dynamics*, *Journal of sedimentary petrology*, vol. 47, n°1, p. 168-190

Owens, E.H. et Frobel, D.H. (1977) *Ridge and runnel systems in the Magdalen Islands, Québec*. *Journal of Sedimentary petrology*, 47, p.191-198.

Owens, E. H. et McCann, S. B. (1980) *The coastal geomorphology of the Magdalen Islands, Québec*: in *The Coastline of Canada*. S.B. McCann, editor: Geological Survey of Canada, Paper 80-10; p. 51-72

Paskoff, R. (2001) *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.
- 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.
- Pierre G. et Bernatchez P. (2009) *Vulnérabilité à l'érosion côtière et à la submersion des étangs aérés du secteur de Fatima (Îles-de-la-Madeleine)*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis à la municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 24 pages.
- 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
- Sabatier, P., L. Dezileau, M. Condomines, L. Briquieu, C. Colin, F. Bouchette, M. Le Duff, et P. Blanchemanche. (2008) Reconstruction of paleostorm events in a coastal lagoon (Hérault, South of France). *Marine Geology*, **251**, p. 224–232.
- Savard, J.-P., sous la direction de (2008) *Étude de la sensibilité des côtes et de la vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques - Synthèse des résultats*, Ouranos, 58 p.
- Savard, J.-P., Bernatchez P., Morneau, F. et Saucier, F. (2009) « Vulnérabilité des communautés côtières de l'Est du Québec aux impacts des changements climatiques ». *La Houille blanche*, n° 2, p. 59-66.
- SDAGE (2005) Guide technique n°9, Connaissance et gestion de l'érosion du littoral, 51 p.
- Senneville, S. et Saucier, F. (2007) *Étude de sensibilité de la glace de mer au réchauffement climatique dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent*, rapport d'étape, 30 p.
- Service hydrographique du Canada (2012) Marées, courant et niveaux d'eau. Disponible en ligne sur : <http://www.marees.gc.ca/fra/accueil>, dernière consultation en juin 2012
- 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.
- 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.
- 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.
- Vigneault, B. (2012) *Cadre lithostratigraphique quaternaire du nord des îles de la Madeleine*, Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Rimouski, 118 p.
- 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.

8. 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. 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. Liste des cartes de la marge de sécurité en érosion côtière

Les 100 cartes réalisées se trouvent dans le recueil de cartes « *Marges de sécurité en érosion côtière aux îles de la Madeleine* » (Bernatchez *et al.*, 2012).

Numéro de la carte	Nom	Éléments présents	Échelle
01	Île d'Entrée	La Gravel Point, port	1 :5 000
02	Île d'Entrée	Pointe du Sud-Ouest	1 :5 000
03	Île d'Entrée	Cap Blanc	1 :5 000
04	Île d'Entrée	La Black Head	1 :5 000
05	Sandy Hook	Dune Sandy Hook, Pointe du Bout du Banc	1 :20 000
06	Étang du Sable	Pointe à Fox	1 :5 000
07	La Grave	Pointe Shea, Pointe aux Poux	1 :5 000
08	Hare-Aubert	Butte à la Croix	1 :5 000
09	Anse au Plâtre	Pointe au Tremble, Plage du Cap	1 :5 000
10	Baie de Plaisance	Plage du Cap, Portage du Cap	1 :5 000
11	Baie de Plaisance	Plage du Cap	1 :5 000
12	Baie de Plaisance	Plage du Cap	1 :5 000
13	Baie de Plaisance	Plage de la Martinique	1 :5 000
14	Baie de Plaisance	Ancien goulet, Plage de la Martinique	1 :5 000
15	Baie de Plaisance	Plage de la Martinique	1 :5 000
16	Baie de Plaisance	Plage de la Martinique	1 :5 000
17	Baie de Plaisance	Plage de la Martinique	1 :5 000
18	Baie de Plaisance	Plage de la Martinique	1 :5 000
19	La Martinique	Pointe de la Martinique	1 :5 000
20	Anse aux Étangs	Chemin des Chalets	1 :5 000
21	Anse aux Étangs	Anse aux Étangs	1 :5 000
22	Gros Cap	Gros Cap, Pointe de l'Échouerie	1 :5 000
23	Pointe de l'Échouerie	Pointe de l'Échouerie	1 :5 000
24	Cap-aux-Meules	Anse Goodwin	1 :5 000
25	Cap-aux-Meules	Anse Leslie, Port de Cap-aux-Meules	1 :5 000
26	Cap-aux-Meules	Cap au Taureau, Cap des Bock	1 :5 000
27	La Digue	La Digue	1 :5 000
28	La Pointe	La Pointe, pont du Havre-aux-Maisons	1 :5 000
29	Havre-aux-Maisons	Cap à Gaspard	1 :5 000
30	Havre-aux-Maisons	Anse à Damase, port de Pointe Basse	1 :5 000
31	Havre-aux-Maisons	Le Moine qui Prie (anciennement Cap Alright)	1 :5 000
32	Havre-aux-Maisons	Cap à Adèle	1 :5 000
33	Havre-aux-Maisons	Cap Noir	1 :5 000
34	Dune du Sud	Plage de la dune du Sud	1 :5 000
35	Dune du Sud	Plage de la dune du Sud	1 :5 000
36	Dune du Sud	Plage de la dune du Sud	1 :5 000

Numéro de la carte	Nom	Éléments présents	Échelle
37	Dune du Sud	Dune du Sud	1 :5 000
38	Dune du Sud	Dune du Sud	1 :5 000
39	Dune du Sud	Dune du Sud	1 :5 000
40	Dune du Sud	Dune du Sud	1 :5 000
41	Dune du Sud	Dune du Sud, île de Pointe-aux-Loups	1 :20 000
42	Dune du Sud	Dune du Sud	1 :20 000
43	Île du Chenal	Île du Chenal	1 :5 000
44	Grande Entrée	Pointe de la Grande Entrée, Dune de la Pointe	1 :5 000
45	Grande Entrée	Cap à Isaac, La Bluff	1 :5 000
46	Bassin aux Huîtres	Plage du Bassin ouest, île Boudreau	1 :5 000
47	Bassin aux Huîtres	île Boudreau, goulet du bassin aux Huîtres	1 :5 000
48	Bassin aux Huîtres	île Boudreau, plage du bassin est, cap à Rich	1 :5 000
49	Grande Entrée	Cap à Arthur, île à Arthur, Baie Seacow	1 :5 000
50	Pointe Old-Harry	Pointe Old-Harry	1 :5 000
51	Pointe de l'Est	Pointe de l'Est	1 :20 000
52	Pointe de l'Est	Pointe de l'Est	1 :20 000
53	Grosse-île	Pointe de l'Est, Grosse-île	1 :20 000
54	Grosse-île	Port de Grosse-île, Cap du Dauphin	1 :5 000
55	Grosse-île	Cap du Dauphin	1 :5 000
56	Dune du Nord	Plage de la Pointe aux Loups, Havre de la Grande Entrée	1 :5 000
57	Dune du Nord	Havre de la Grande Entrée, Mine Seleine	1 :5 000
58	Dune du Nord	Dune du Nord, Havre de la Grande Entrée	1 :5 000
59	Dune du Nord	Dune du Nord, Havre de la Grande Entrée	1 :5 000
60	Dune du Nord	Dune du Nord, Havre de la Grande Entrée, Le Grand Étang, Plage de la Pointe aux Loups	1 :5 000
61	Dune du Nord	Plage de la Pointe aux Loups, Dune du Nord, Lagune de la Grande Entrée	1 :5 000
62	Dune du Nord	Plage de la Pointe aux Loups, Dune du Nord, Lagune de la Grande Entrée	1 :5 000
63	Dune du Nord	Plage de la Pointe aux Loups, Dune du Nord, Lagune de la Grande Entrée	1 :5 000
64	Dune du Nord	Plage de la Pointe aux Loups, Dune du Nord, Lagune de la Grande Entrée	1 :5 000
65	Dune du Nord	Plage de la Pointe aux Loups, Dune du Nord, Lagune de la Grande Entrée	1 :5 000
66	Dune du Nord	Plage de la Pointe aux Loups, Dune du Nord, Lagune de la Grande Entrée	1 :5 000
67	Dune du Nord	Plage de la Pointe aux Loups, Dune du Nord, Lagune de la Grande Entrée	1 :5 000
68	Pointe-aux-Loups	Anse à Jim, Pointe du Cap, Anse de pêche, Cap à Alex Aucoin, Anse de l'Est	1 :5 000
69	Dune du Nord	Dune du Nord, Lagune de la Grande Entrée	1 :5 000
70	Dune du Nord	Dune du Nord, Lagune de la Grande Entrée	1 :5 000

Numéro de la carte	Nom	Éléments présents	Échelle
71	Dune du Nord	Dune du Nord, Lagune de la Grande Entrée	1 :5 000
72	Dune du Nord	Dune du Nord. Lagune du Havre aux Maisons, Lagune de la Grande Entrée	1 :5 000
73	Dune du Nord	Dune du Nord. Lagune du Havre aux Maisons	1 :20 000
74	Dune du Nord	Plage de l'Hôpital, Dune du Nord. Lagune du Havre aux Maisons	1 :20 000
75	Fatima	Cap de l'Hôpital, Cap de l'Hôpital	1 :5 000
76	Fatima	Cap aux Maquereaux	1 :5 000
77	Fatima	Cap de la Grande Pointe	1 :5 000
78	Étang-du-Nord	Cap de la Grande Côte	1 :5 000
79	Étang-du-Nord	Cap du Phare	1 :5 000
80	Étang-du-Nord	Cap à Fidèle	1 :5 000
81	Étang-du-Nord	Anse de l'Étang du Nord, Cap à Savage, Étang du Nord	1 :5 000
82	Étang à Ben	Étang à Ben	1 :5 000
83	Dune de l'Ouest	Dune de l'Ouest	1 :5 000
84	Dune de l'Ouest	Dune de l'Ouest, Baie du Havre aux Basques	1 :20 000
85	Dune de l'Ouest	Dune de l'Ouest, goulet, baie du Havre aux Basques	1 :20 000
86	Dune de l'Ouest	Plage de l'Ouest	1 :5 000
87	Étang des Caps	Étang des Caps	1 :5 000
88	Étang des Caps	Étang des Caps	1 :5 000
89	Pointe Rouge	Pointe Rouge	1 :5 000
90	Cap Noir	Cap Noir	1 :5 000
91	Anse à la Cabane	Le Gros Cap	1 :5 000
92	Anse à la Cabane	Anse à la Cabane, port de Millerand	1 :5 000
93	Cap du Sud	Cap du Sud, Cap Blanc	1 :5 000
94	Bassin	Cap Percé	1 :5 000
95	Bassin	Anse du Bassin	1 :5 000
96	Bassin	Plage du Bassin	1 :5 000
97	Bassin	Dune du Bassin, Pointe à Marichite, goulet	1 :5 000
98	Bassin	Goulet du Bassin	1 :5 000
99	Bassin	Plage du Havre	1 :5 000
100	Plage du Havre	Plage du Havre	1 :5 000

Annexe 3. Fiches explicatives de la marge de sécurité en érosion côtière selon le type de côte

- Fiche n°1 : côte artificielle (zone portuaires)
- Fiche n°2 : côte à falaise meuble
- Fiche n°3 : côte à falaise rocheuse à sommet meuble
- Fiche n°4 : côtes à falaise rocheuse
- Fiche n°5 : côte à flèche littorale
- Fiche n°6 : côtes basse meubles abritées
- Fiche n°7 : côtes à terrasse de plage
- Fiche n°8 : côtes à tombolo / cordon littoral

Fiche n°1

Côtes artificielles

Marge minimale	aucune
Marge maximale	32 m
Nombre de zones homogènes	8
Longueur de côte	3,5 km

Exemple(s)

Sont considérées comme des unités totalement artificielles et donc sans aucune marge de recul les zones homogènes suivantes : CM-013 (port polyvalent de Cap-aux-Meules), CM-038 (port de Pointe-Basse), GE-002 (Havre de Pêche de Grande-Entrée), GE-003 (Havre de Pêche de Grande-Entrée), HA-003B (port de Millerand), HA-034 (Installation de Pêche côtière de Havre-Aubert, ci-dessous) et PE-003 (port de Grosse-Île, Cap du Dauphin).



Zone portuaire de Havre-Aubert (2010)

Particularité(s)

Le port de l'Île d'Entrée, soit la zone IE-011, comprend des secteurs qui ne sont pas totalement artificialisés (figure ci-dessous) mais pour lesquels il n'y a pas de scénario d'évolution probable. Un zonage a donc été mis de l'avant, tout en tenant compte de la situation particulière du havre de pêche. Le zonage mis de l'avant (carte 01) ne se veut pas comme une contrainte au développement du port et de ses infrastructures essentielles. Dans la partie basse au nord, la marge s'étend jusqu'à la route (maximum de 32 m) et dans la partie sud, la terrasse de plage est incluse jusqu'au pied du talus puis il y a une marge au sommet de celui-ci jusqu'à la route.



Port de l'Île d'Entrée (2010)

Le havre de pêche de l'Anse de l'Étang-du-Nord (zones DO-018 et DO-019) n'est, lui non plus, pas totalement artificialisé. Cependant, comme une évolution probable a pu être calculée il n'est pas inclus dans les zones portuaires, mais selon les types de côtes en présence (respectivement falaises meubles et terrasses de plage).

Fiche n°2

Côte à falaise meuble

Marge minimale	45 m
Marge maximale	85 m
Marges supérieure à 45 m	43 % des côtes à falaise meuble
Nombre de zones homogènes	12
Longueur de côte	4,50 km
Comprend	falaise meuble, basse falaise meuble, falaise meuble à base rocheuse, falaise deltaïque à base rocheuse

Exemple(s)

Sur la figure ci-dessous est illustrée la zone homogène GE-038 dont la marge de sécurité en érosion est de 55 m (carte 49). Ce secteur est très actif et le taux probable y a été évalué à -0,776 m/an (soit 40,35 m d'ici 2060). Un recul évènementiel de 14,10 m y a été mesuré après la tempête de décembre 2010, ce qui porte la prévision de marge de sécurité pour 2060 à 54,5 m soit 55 m une fois arrondi.



Falaise meuble – Île de la Grande Entrée, Baie seacow (2010)

Sur la figure ci-dessous, dans la zone GE-010, la falaise est meuble et la marge de sécurité en érosion côtière est de 45 m (carte 45). Il s'agit d'une marge minimale car l'érosion est moins importante dans ce secteur. Cependant, si le haut de plage présent actuellement au pied du talus meuble venait à totalement disparaître (ce qui semble être le cas selon les suivis de terrain réalisés), l'érosion s'intensifiera dans la falaise, d'où l'application d'une marge minimale.

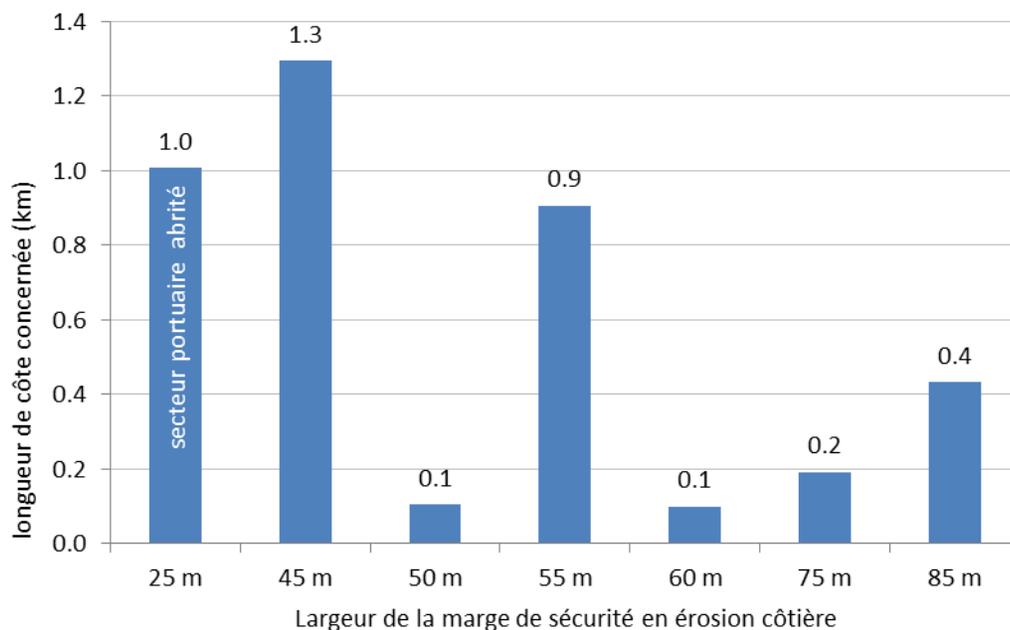


Falaise meuble – île de la Grande Entrée, la Grande Anse (2010)

Particularités

Il est à noter que la zone homogène DO-018 (carte 81) fait figure d'exception quant à sa marge de sécurité. En effet, cette zone comporte à la fois des basses falaises meubles et des terrasses de plage avec localement la présence de marais maritime sur l'estran. La marge proposée y est de seulement 25 m car la zone est située entre les 2 brise-lames du havre de pêche de l'Étang-du-Nord, elle est donc abritée des principales tempêtes.

Répartition des marges



Fiche n°3

Côte à falaise rocheuse à sommet meuble

Marge minimale	35 m
Marge maximale	80 m
Marges supérieure à 35 m	32,1 % des côtes à falaise rocheuse à sommet meuble
Nombre de zones homogènes	24
Longueur de côte	8,6 km
Comprend	falaise rocheuse à sommet meuble, basse falaise rocheuse à sommet meuble, côte dunaire à base rocheuse

Exemple(s)

Dans l'anse à la Cabane, sur la figure ci-dessous (carte 91 et 92), les falaises de la zone HA-002 sont constituées d'argilites avec un sommet meuble et le taux de migration probable est de -0,68 m/an. La marge de sécurité proposée est donc de 45 m soit $[0,680 \times 52] + 8,40 = 43,760$ arrondi à 45 m.



Falaise rocheuse à sommet meuble - Havre-Aubert, Anse à la Cabane (2010)

La marge de recul en érosion côtière la plus importante pour les falaises rocheuses à sommet meuble est de 75 m. Elle est présente au niveau du segment PL-012 sur l'île de Pointe-aux-Loups (carte 68). Les taux d'érosion probables y est de -1,264 m/an. Cette falaise est composée de grès à la base avec de nombreuses diaclases surmonté d'un dépôt glaciaire et fluvioglaciaire et d'un dépôt marin.

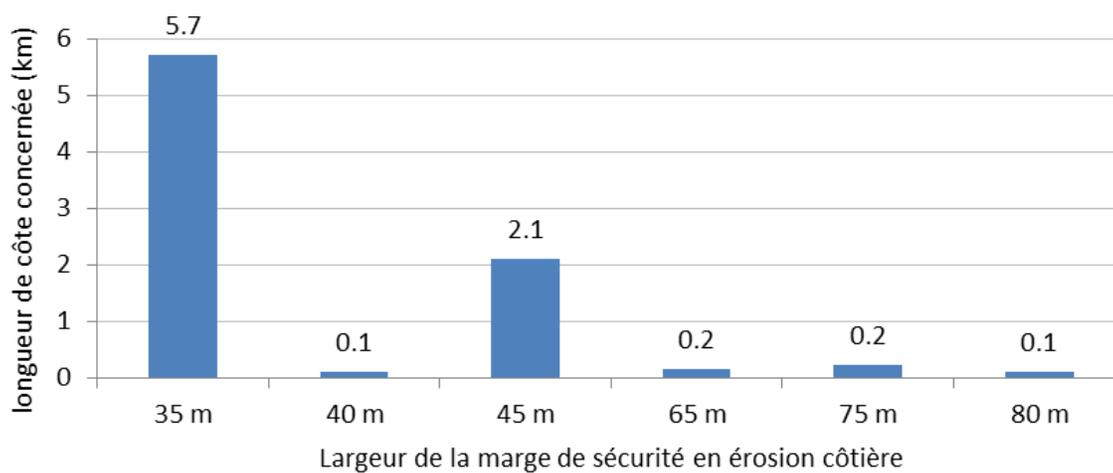
Particularités

En ce qui a trait à la marge de sécurité en érosion côtière, les côtes dunaires à base rocheuse ont été incluses avec les côtes à falaise rocheuse à sommet meuble étant donné leur stratigraphie (meuble au sommet et roche sédimentaire à la base) ainsi que leur profil vertical. La zone qui a une marge de recul la plus importante est ainsi PL-016 (carte 68) avec une marge de 80 m (figure ci-dessous).



Côte dunaire à base rocheuse - Pointe-aux-Loups (2010)

Répartition des marges



Fiche n°3

Côte à falaise rocheuse

Marge minimale	30 m
Marge maximale	90 m
Marges supérieure à 30 m	25,5 % des côtes à falaise rocheuse
Nombre de zones homogènes	110
Longueur de côte	65,4 km
Comprend	falaise rocheuse, basse falaise rocheuse

Exemple(s)

Sur la figure ci-dessous, dans la zone DO-005, la falaise rocheuse de grès est exposée à un recul probable de 0,56 m/an, correspondant au taux de recul moyen de la période de 1983 à 2008. Le recul évènementiel pour ce type de côte est de 4,38 m. La marge de sécurité proposée est donc de 35 m soit $[0,56 \times 52] + 4,4 = 33,6$ arrondi à 35 m (carte 88).



Falaise rocheuse - île de Havre-Aubert, Étang des Caps (2010)

Sur la figure ci-dessous, il y a concordance entre la marge calculée et la marge minimale pour ce type de côte soit 30 m. Il s'agit de l'unité DO-002 (carte 90) où le taux probable est de 0,53 m/an d'ici 2060 (soit 27,8 m en 52 ans) et recul évènementiel de 4,4 m. La prévision est ainsi de 32,2 m et donc arrondie à 30 m.



Falaise rocheuse – île de Havre-Aubert (2010)

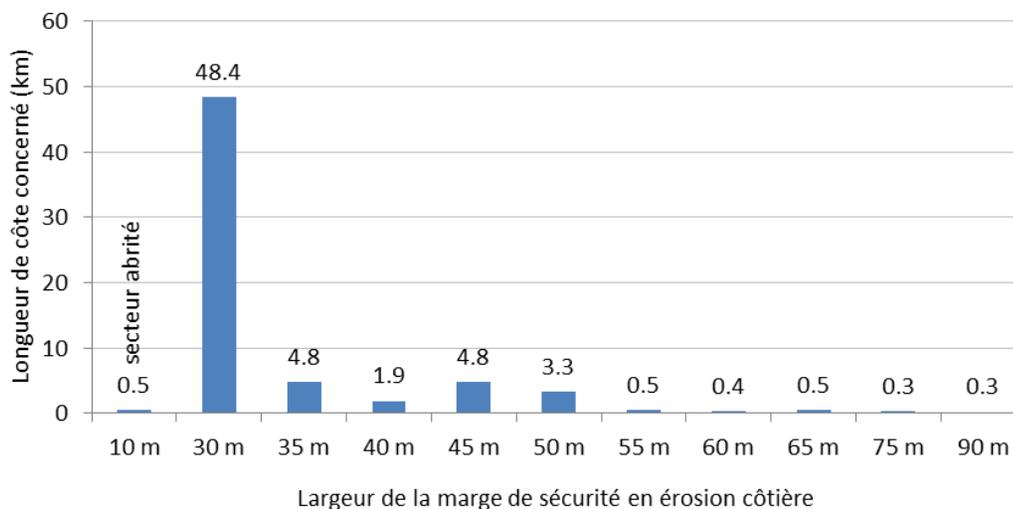
La marge de recul en érosion côtière la plus importante pour les falaises rocheuses se situe dans l'unité BP-025 (carte 21) et elle est de 90 m. Cela s'explique par la présence de grès rouges très altérés avec de nombreuses diaclases formant un réseau orthogonal favorisant ainsi une érosion historique très importante (40 à 50 m de recul entre 1963 et 2008), avec un taux probable d'érosion de 1,68 m/an.

Particularités

Dans les secteurs présentant des **grottes et/ou d'importantes encoches basales**, une étude géologique plus détaillée devra être réalisée. La marge proposée pour l'érosion côtière pourrait dans certains cas être augmentée en cas de présence d'autres aléas (géologique ou mouvement de masse notamment).

La marge minimale pour les falaises rocheuses est de 30 m, cependant, il y a une exception avec la zone homogène HA-033 qui se situe dans la cellule du Havre Aubert, abritée par la pointe aux Poux (carte 07). La marge n'y est que de 10 m étant donné la situation particulière : milieu abrité, côte stable végétalisée, partiellement enrochée, stabilité historique. Les conditions sont plus calmes que l'extérieur des îles, cela s'apparente plutôt à une dynamique d'intérieur de lagune.

Répartition des marges



Fiche n°5
Côte à flèche littorale

Marge minimale	ensemble de la forme géomorphologique
Nombre de zones homogènes	33
Longueur de côte	47,5 km

Exemple(s)

Toutes les flèches littorales des îles de la Madeleine sont zonées sur l'ensemble de la forme géomorphologique étant donné les processus qui peuvent s'y produire (brèches, submersion, isolement par la rupture du pédoncule de la flèche,...). Ci-dessous, une brèche dans la flèche du Sandy Hook (carte 05) pourtant large de plus de 100 m.



Brèche de tempête dans une flèche littorale – Sandy hook (2010)

Pour la flèche littorale de Bassin (ci-dessous), ou pointe à Marichite, l'ensemble de la forme géomorphologique est incluse dans la marge ainsi que le marais maritime qu'elle abrite (carte 97). La marge vient s'appuyer au pied du talus situé en arrière.



Flèche littorale – île du Havre Aubert, Bassin (2010)

Particularités

Il est à noter que la flèche littorale de la Pointe de l'Est (cartes 51 et 52) comprend une partie actuelle et une partie de flèche plus ancienne (paléo-forme). Cette dernière n'est pas incluse dans la marge de sécurité étant donné qu'elle n'est plus active d'un point de vue géomorphologique et n'est donc pas affectée par les processus côtiers actuels.

Fiche n°6

Côte basses meubles abritées

Marge minimale	20 m
Marge maximale	20 m
Nombre de zones homogènes	3
Longueur de côte	2,4 km

Exemple(s)

Sont inclus dans ce type de côte trois zones, soit HA-029, 030 et 031 qui présentent un marais maritime en alternance avec des basses falaises meubles et de basses falaises rocheuses (ci-dessous). Dans ces secteurs la marge de sécurité en érosion côtière est de 20 m (carte 06 et 07) en raison du caractère abrité du secteur et des valeurs de recul plutôt faibles. Le taux d'érosion probable y est de -0,301 m/an et le recul évènementiel de 2,4 m. La prévision d'érosion est donc de 18,05 m ce qui correspond à une marge de 20 m une fois arrondi.



Basses falaises meubles et marais maritime, île du Havre Aubert, Étang du Sable (2010)

Fiche n°7

Côte à terrasse de plage

Marge minimale	55 m
Marge maximale	110 m
Marges supérieure à 55 m	18,5 % des côtes à terrasse de plage
Nombre de zones homogènes	33
Longueur de côte	9,7 km
Comprend	terrasse de plage, terrasse de plage à base rocheuse et terrasse de plage à marais maritime

Exemple(s)

Sur la figure ci-dessous, la zone GE-005, présente une terrasse de plage qui a été en accumulation depuis 1963, cependant une marge minimale de 55 m a été appliquée pour ce secteur (carte 44). En effet, ces nouveaux terrains devraient demeurer inconstructibles étant donné que la dynamique qui a conduit à leur accumulation est récente et pourrait s'inverser. D'ailleurs, la zone adjacente (GE-006) présente la marge de recul en érosion côtière la plus importante pour les terrasses de plage, soit 110 m. Elle a connu une érosion très importante par le passé et pour laquelle le taux probable est de -1,8 m/an.



Terrasse de plage - île de la Grande Entrée, dune de la Pointe (2010)

Sur la figure ci-dessous est illustré l'exemple de la zone GE-004 qui est un secteur de terrasse de plage, localement dunifié. Ce secteur connaît une érosion importante avec un scénario probable de -1,6 m/an. La marge de sécurité proposée est donc de 100 m soit $[1,6 \times 52] + 12,50 = 98,1$ arrondi à 100 m (carte 44).

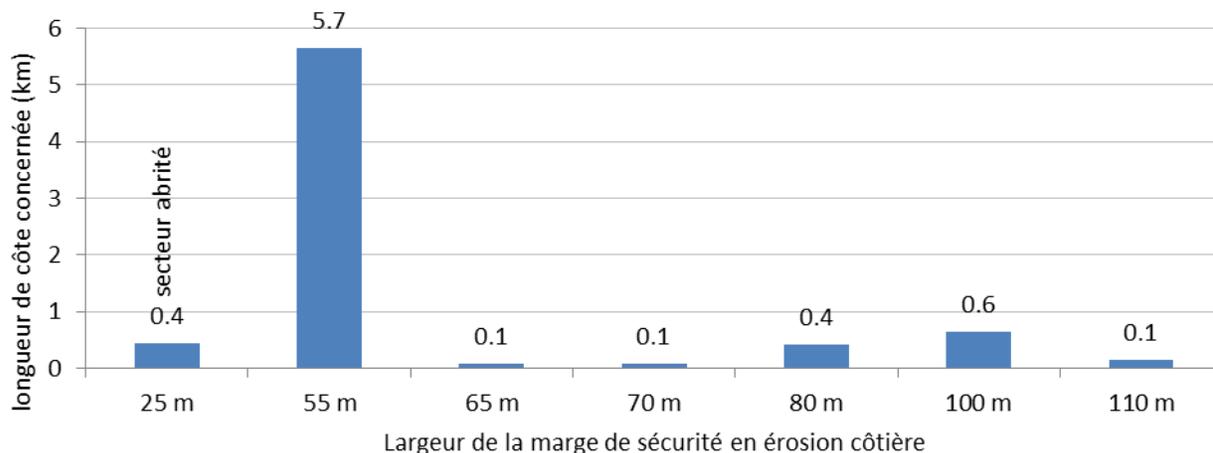


Terrasse de plage – île de la Grande Entrée, dune de la Pointe (2010).

Particularités

La zone homogène DO-019 fait figure d'exception (carte 81). La terrasse de plage se situe dans le havre de pêche de l'Anse de l'Étang-du-Nord qui est un secteur abrité par la présence de 2 brise-lames. Comme c'est le cas pour la zone DO-018, les conditions hydrosédimentaires plus calmes ont conduit à l'application d'une marge plus faible que la marge minimale, mais correspondant tout de même à 52 ans d'érosion probable ($0,2 \text{ m} \times 52 = 10,4$) auquel est ajouté l'érosion d'un événement extrême (12,50 m) soit 22,9 qui une fois arrondi, l'on obtient une marge de sécurité de 25 m.

Répartition des marges



Fiche n°8

Côte à tombolo / cordon littoral

Marge minimale	90 m + ensemble des zones de brèche de tempête
Marge maximale	180 m
Marges supérieures à 90 m	31,7 % des côtes à tombolo / cordon littoral
Nombre de zones homogènes	37
Longueur de côte	95 km

Exemple(s)

Dans la zone PL-017 (figure ci-dessous), le taux probable d'évolution de la côte est de -1,435 m/an soit une prévision de 91,52 m d'ici 2060 (52 ans d'érosion + un recul événementiel de 16,90 m). Une fois arrondi, la marge pour cette zone est de 90 m.



Tombolo / cordon littoral - Dune du Nord (2010)

Sur la figure ci-dessous, le tombolo (GE-014), présente une accumulation historique, amplifiée depuis la fermeture du goulet du Bassin aux Huîtres qui s'y trouvait avant les années 1980. Cependant, comme les ouvertures et les fermetures de goulet peuvent se produire naturellement et modifier sensiblement la dynamique d'érosion, une marge de sécurité minimale de 90 m a été établie pour ce secteur.



Île de la Grande Entrée, Bassin aux Huîtres (2010)

Particularités

En plus de la largeur minimale de 90 m les **zones de brèches de tempêtes** sont ajoutées à la marge de sécurité et ce quelle que soit la largeur du tombolo. En effet, ces brèches peuvent survenir dans des milieux de plusieurs centaines de mètres de large comme sur la figure ci-dessous, où l'on peut voir une brèche de tempête dans un tombolo / cordon littoral qui mesure pourtant plus de 300 m de largeur (zone DS-020, carte 41). De plus, il a déjà été observé une brèche de plus de 2 km de largeur dans un tombolo, au nord du Cap de l'Hôpital en 1963. De tels cas pourraient se reproduire, c'est pourquoi tous les secteurs présentant des marques de brèches sont inclus dans la marge de sécurité en érosion.



Brèche de tempête dans un tombolo – Dune du Sud (2010)

Répartition des marges

