



**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

Sécurité publique
Québec

UQAR



Pêches et Océans
Canada

Fisheries and Oceans
Canada



Environnement Canada
Environment Canada

Coordonnateur

François Morneau, ministère de la Sécurité publique, collaboration à Ouranos

Auteurs

Jean-Pierre Savard, Ouranos
Pascal Bernatchez, Université du Québec à Rimouski
François Morneau, ministère de la Sécurité publique, collaboration à Ouranos
François Saucier, Institut des sciences de la mer
Philippe Gachon, Environnement Canada
Simon Senneville, Institut des sciences de la mer
Christian Fraser, Université du Québec à Rimouski
Yvon Jolivet, Université du Québec à Rimouski

Chercheurs participants

Denis Lefaivre, Pêches et des Océans
Corina Rosu, Université du Québec à Montréal, collaboration à Ouranos
Steeve Dugas, Université du Québec à Rimouski
Stéphanie Friesinger, Université du Québec à Rimouski
Susan Drejza, Université du Québec à Rimouski
Zhigang Xu, Pêches et des Océans
Antoine Morissette, Université du Québec à Rimouski
Alain Bourque, Ouranos
Guenther Pacher, Ouranos

Contributeurs

Serge Bourgeois, aménagiste Municipalité des Îles-de-la-Madeleine
Michel Chouinard, directeur général du Comité ZIP baie des Chaleurs
Yan Crousset, directeur général du Comité ZIP Côte-Nord du golfe
Guy Parenteau, responsable de l'environnement de la Ville de Sept-Îles
Louis Vigneau, ministère des Transports – Centre de services de Cap-aux-Meules
Ghislain Pitre, directeur de l'aménagement de la Ville de Percé
Christian Poirier, ingénieur au ministère des Transports
Yvon Ouellet, Université Laval
Marco Carrera, Université McGill, collaboration à Ouranos
Viateur Turcotte, Environnement Canada
Denis Jacob, Environnement Canada

Crédits photo

Page couverture : MRC des Îles-de-la-Madeleine, Havre-aux-Maisons, Dune-du-Sud (face à la halte routière)
Photo de Denis Chabot, 2003
Gracieuseté du Centre collégial de développement de matériel didactique
Autres photos; gracieuseté des divers partenaires d'Ouranos

Édition

Ouranos
Juin 2008

Remerciements

Ouranos et ses partenaires remercient le Programme sur les impacts et l'adaptation liés aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada pour son appui financier à cette étude. Ouranos remercie également les ministères des gouvernements du Canada et du Québec qui ont collaboré activement à l'étude. Des remerciements particuliers sont adressés aux municipalités de Sept-Îles, de Percé et des Îles-de-la-Madeleine qui ont participé activement aux travaux et livré des données essentielles pour soutenir les études. Nous remercions sincèrement les participants aux ateliers et aux comités de concertation qui ont généreusement accordé leur temps et leur compétence à la réalisation de cette étude. Enfin, mille mercis au personnel d'Ouranos, dont Anne Debrabandere et Nathalie Bleau, pour leur aide précieuse à la préparation de ce document, ainsi qu'à Christiane Bessette, du ministère de la Sécurité publique, pour ses précieux conseils et son travail d'éditrice.



Table des matières

1.	Introduction.....	1
2.	Climat du golfe du Saint-Laurent.....	3
2.1	Températures de l'air dans le golfe.....	3
2.2	Niveau de la mer.....	5
2.3	Glaces.....	8
2.4	Tempêtes.....	10
2.4.1	Surcotes et décotes.....	12
2.4.2	Vagues.....	12
2.5	Processus cryogéniques.....	13
2.6	Précipitations intenses.....	14
3.	Dynamique côtière des régions témoins.....	15
3.1	Scénarios de référence.....	16
4.	Région de Sept-Îles.....	18
4.1	Bilan historique.....	19
4.2	Dynamique côtière.....	19
4.3	Scénarios futurs.....	21
4.4	Solutions d'adaptation.....	23
5.	Région des Îles-de-la-Madeleine.....	26
5.1	Bilan historique.....	27
5.2	Dynamique côtière.....	28
5.3	Scénarios futurs.....	29
5.4	Solutions d'adaptation.....	31
5.4.1	Route 199, secteur de la Martinique.....	31
5.4.2	Route 199, secteur Pointe-aux-Loups.....	32
5.4.3	Secteur de Cap-aux-Meules.....	33
6.	Région de Percé.....	36
6.1	Bilan historique.....	37
6.2	Dynamique côtière.....	37
6.3	Scénarios futurs.....	39
6.4	Solutions d'adaptation.....	40
7.	Communautés et aspects socio-économiques.....	43
8.	Conclusion.....	44
9.	Références.....	47

Liste des figures

FIGURE 1	Structure organisationnelle de l'étude.....	2
FIGURE 2	Le golfe du Saint-Laurent et les trois sites témoins.....	3
FIGURE 3	Moyennes des multi-modèles et fourchettes estimées du réchauffement des températures en surface, GIEC 2007 [1]	4
FIGURE 4	Anomalie de température moyenne annuelle par rapport à la moyenne de 1971-2000 à trois stations du golfe Saint-Laurent (tendance estimée par régression linéaire)	4
FIGURE 5	Diagramme de dispersion des températures et des précipitations représentatif de la région du golfe [3]	6
FIGURE 6	Évolution temporelle du niveau de la mer global par rapport à la moyenne 1980-1999 et projections futures, d'après GIEC 2007 [1]	6
FIGURE 7	Ajustement isostatique postglaciaire pour l'ensemble de l'Amérique du nord [7].....	7
FIGURE 8	Impact simulé d'une hausse des températures hivernales de 2 °C sur la concentration moyenne mensuelle des glaces par rapport à la période 1997-2003 dans le golfe [12].....	9
FIGURE 9	Directions des vagues engendrées par les tempêtes « rouges », « bleues » et « vertes »	10
FIGURE 10	Position d'un système dépressionnaire traversant le golfe à 00 h 00 le 23 novembre 2005 (à gauche) et sa trajectoire entre le 22 et le 23 novembre 2005 correspondant à une tempête rouge (à droite)	11
FIGURE 11	Diagramme de dépassement des niveaux de surcotes (E) à Charlottetown, Île-du-Prince-Édouard [8]	12
FIGURE 12	Formation des cônes de glace dans la falaise de L'Anse-à-Beaufils.....	14
FIGURE 13	Exemple de cartographie numérisée des scénarios S1, S2 et S3 à Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine	17
FIGURE 14	Site témoin de Sept-Îles	18
FIGURE 15	Site témoin des Îles-de-la-Madeleine	26
FIGURE 16	Site témoin de Percé.....	36
FIGURE 17	Répartition des usages de la zone côtière pour chacune des trois régions témoins [21]	43

Liste des tableaux

TABLEAU 1	Normales climatiques et synthèse du diagramme de dispersion pour la région du golfe [3]	5
TABLEAU 2	Résultat des simulations de la variation de température sur les conditions de glaces pour la période 1996-2003 et des projections en conditions futures	8
TABLEAU 3	Scénarios d'érosion utilisés pour cartographier l'évolution du trait de côte jusqu'en 2050	17

1. Introduction

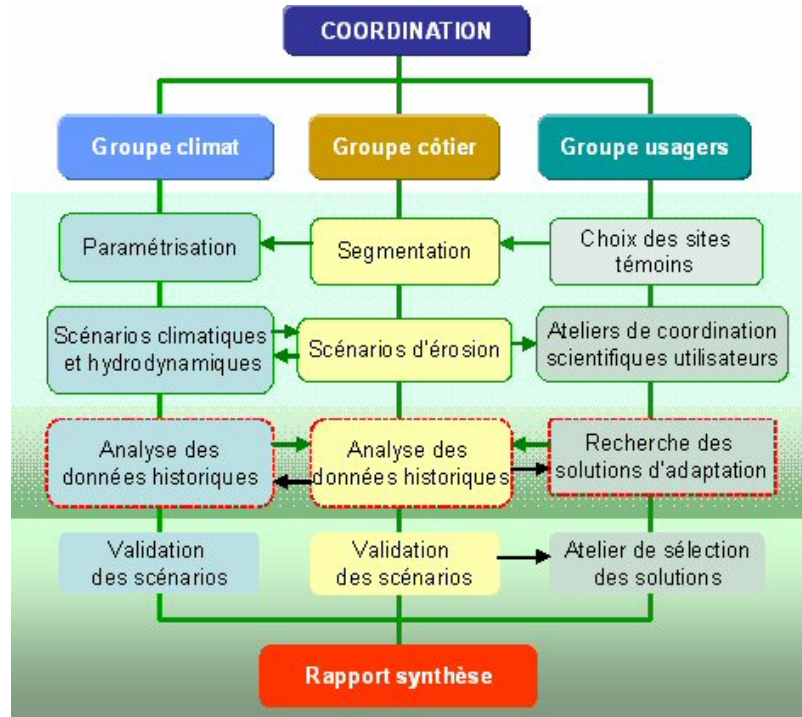
Cette synthèse collige les résultats d'une vaste étude menée de septembre 2005 à décembre 2007 par Ouranos et ses partenaires, principalement l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), l'Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER), le ministère de la Sécurité publique du Québec et Environnement Canada. Les résultats détaillés de l'étude sont présentés dans plusieurs rapports techniques sectoriels et des rapports régionaux résumant les discussions des comités de concertation des trois régions témoins.

L'objectif de l'étude est d'évaluer les principaux impacts appréhendés des changements climatiques sur la dynamique côtière dans le golfe du Saint-Laurent, de proposer des solutions d'adaptation et d'explorer les vulnérabilités socio-économiques. Bien que l'étude porte sur l'ensemble du golfe, une partie importante de l'effort de recherche a été concentrée sur trois sites témoins, soit Sept-Îles, Percé et les Îles-de-la-Madeleine.

Dans chacun de ces trois sites, des comités de concertation formés d'intervenants de la zone côtière ont collaboré à l'étude en évaluant trois scénarios fondés sur les taux historiques d'érosion et sur des taux d'érosion illustrant l'influence appréhendée des changements climatiques. Les comités ont ainsi proposé des solutions d'adaptation pour chaque site témoin. Ces comités de concertation ont été constitués lors d'ateliers tenus au début de l'étude. Les membres des trois comités (8 à 10 par comité) ont été nommés par les participants aux ateliers, qui représentaient une vaste gamme d'organisations locales, régionales et gouvernementales pouvant apporter une variété de points de vue sur la gestion de la zone côtière.

La structure organisationnelle de l'étude est présentée à la figure 1. L'équipe de travail a été divisée en trois groupes. Le premier a mené les recherches sur le climat, l'océanographie et les conditions de glace; le second s'est penché sur la dynamique côtière, les vulnérabilités socio-économiques et les risques; le troisième est constitué des membres des comités de concertation, qui forment le groupe usagers.

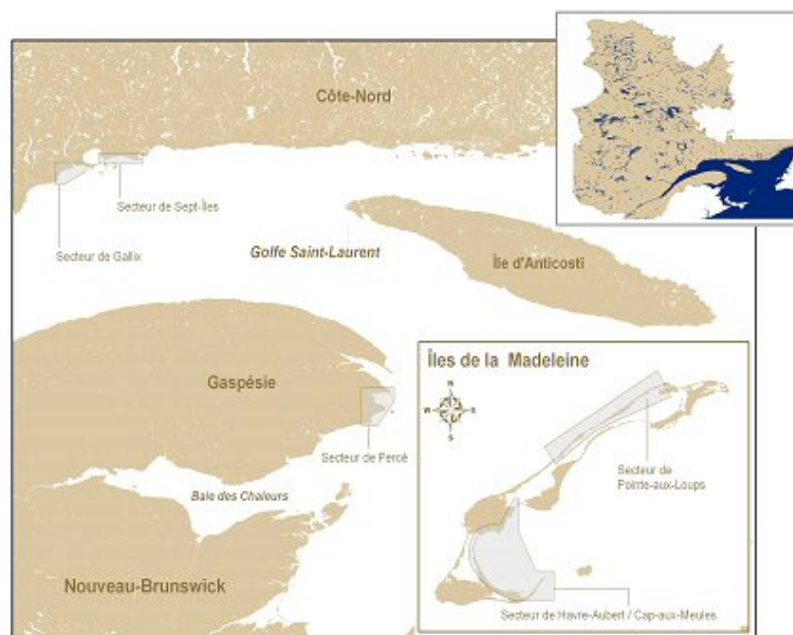
FIGURE 1 Structure organisationnelle de l'étude



2. Climat du golfe du Saint-Laurent

La hausse planétaire des températures causée par l'activité humaine [1] affecte plusieurs variables climatiques et hydrodynamiques dans le golfe du Saint-Laurent (figure 2). Ces variables liées à l'érosion sont le niveau moyen de la mer, les conditions de glaces de mer et de rive, la fréquence et l'intensité des tempêtes, les vents, les vagues, les précipitations pluviales et nivales (neige), et les processus cryogéniques, comme les cycles de gel et de dégel et les redoux hivernaux. La présente étude a évalué l'effet de plusieurs de ces variables sur la stabilité des berges et les infrastructures côtières.

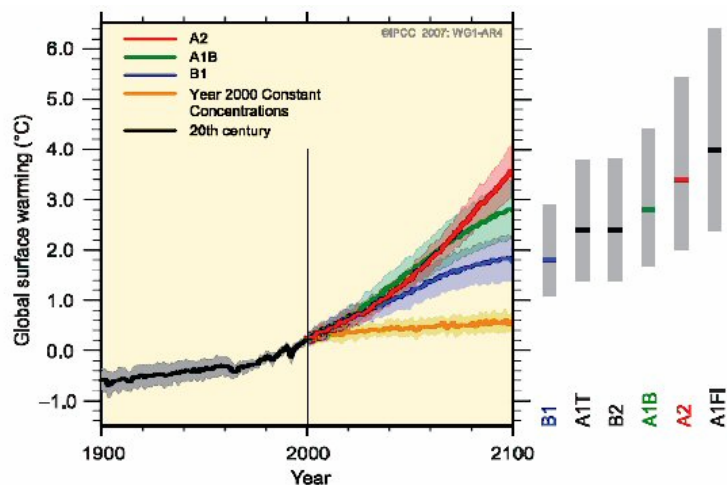
FIGURE 2 *Le golfe du Saint-Laurent et les trois sites témoins*



2.1 Températures de surface dans le golfe

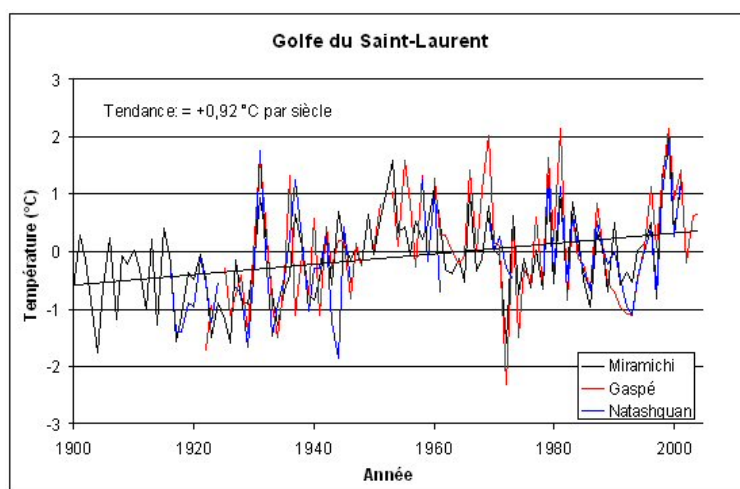
La température moyenne planétaire a augmenté de 0,74 °C depuis le début du 20^e siècle [1]; onze des douze dernières années affichent les températures moyennes annuelles les plus élevées depuis 1850 à l'échelle planétaire. La température planétaire devrait augmenter de 1,4 à 4,0 °C au cours du présent siècle (figure 3).

FIGURE 3 Moyennes des multi-modèles et fourchettes estimées du réchauffement des températures en surface, GIEC 2007 [1]



En se basant sur les données des stations météorologiques de Natashquan, Gaspé et Miramichi, la température moyenne annuelle de la région du golfe du Saint-Laurent a augmenté de 0,9 °C pendant le 20^e siècle (figure 4). En hiver (moyenne des mois de décembre, janvier et février), la température moyenne a augmenté de 1,6 °C à ces mêmes stations.

FIGURE 4 Anomalie de température moyenne annuelle par rapport à la moyenne de 1971-2000 à trois stations du golfe Saint-Laurent (tendance estimée par régression linéaire)



Selon les simulations réalisées par les principaux modèles climatiques intégrant divers scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES) [2], la température annuelle de surface du golfe, centrée sur la période 2050 (2041-2070) augmenterait d'environ $2,5 \text{ °C} \pm 1,2 \text{ °C}$ par rapport à celle de la période 1961-1990. En hiver, cette augmentation atteindrait $3,0 \text{ °C} \pm 1,5 \text{ °C}$ (figure 5 et tableau 1).

2.2 Niveau de la mer

Pendant le 20^e siècle, le niveau moyen de la mer dans l'Atlantique nord-ouest s'est rehaussé à un rythme semblable à celui du niveau moyen planétaire, pour atteindre $1,8 \pm 0,5 \text{ mm/an}$. Cette hausse est due principalement à l'expansion thermique des océans et à la fonte des glaciers terrestres. Pendant le 21^e siècle, cette hausse du niveau moyen de la mer devrait s'accroître [1], atteignant une valeur moyenne de $3,7 \pm 2,0 \text{ mm/an}$. Depuis une décennie, le taux de rehaussement du niveau de la mer est de $3,1 \pm 0,7 \text{ mm/an}$ (figure 6).

TABLEAU 1 Normales climatiques et synthèse du diagramme de dispersion pour la région du golfe [3]

Saison		Climat des années 1980	Delta 2020s	Delta 2050s	Delta 2080s
Hiver	Température	De -10 à -13°C	De +1 à +2°C	De +2 à +4°C	De +3 à +6°C
	Précipitation	De 295 à 400 mm	De -2 à +12 %	De -1 à +21%	De +1 à +32%
Printemps	Température	De -1 à +3°C	De +1 à +2°C	De +1,5 à +3,5°C	De +2,5 à +5°C
	Précipitation	De 250 à 325 mm	De -3 à +13 %	De -2 à +16%	De +1 à +23%
Été	Température	De +13 à +17°C	De +1 à +1,5°C	De +1,5 à +3°C	De +2,5 à +5°C
	Précipitation	De 250 à 350 mm	De -6 à +7%	De -10 à +9%	De -11 à +9%
Automne	Température	De +3 à +6°C	De +1 à +1,5°C	De +1,5 à +3°C	De +2 à +5°C
	Précipitation	De 275 à 350 mm	De +2 à +11%	De -3 à +11%	De -3 à +11%

FIGURE 5 Diagramme de dispersion des températures et des précipitations représentatif de la région du golfe [3]

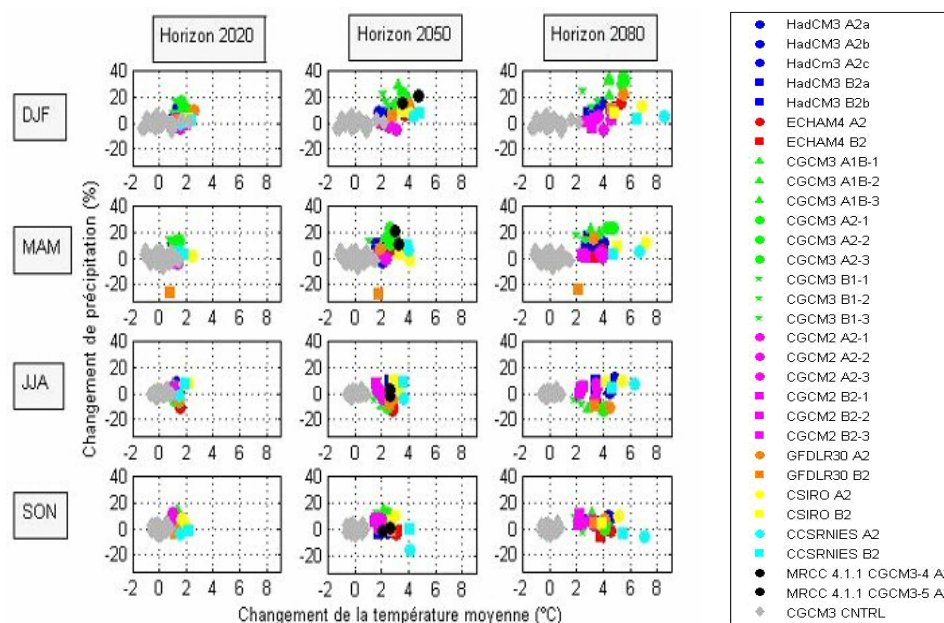
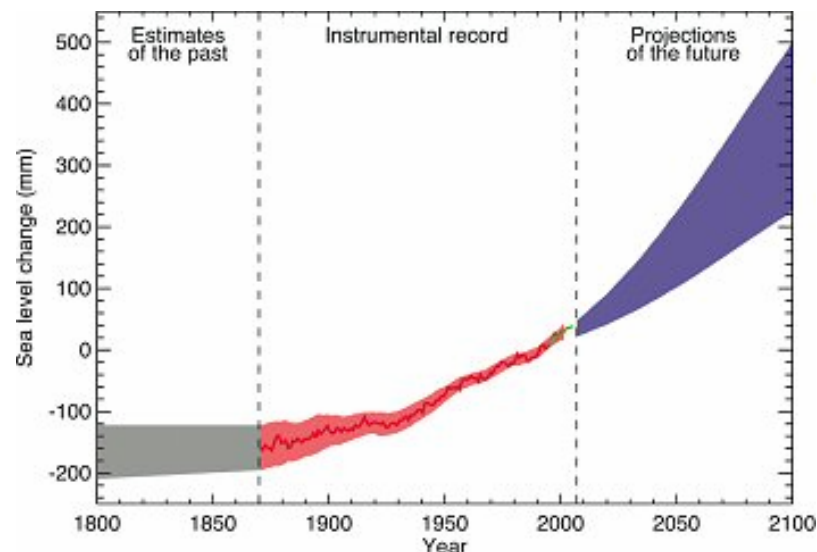


FIGURE 6 Évolution temporelle du niveau de la mer global par rapport à la moyenne 1980-1999 et projections futures, d'après GIEC 2007 [1]

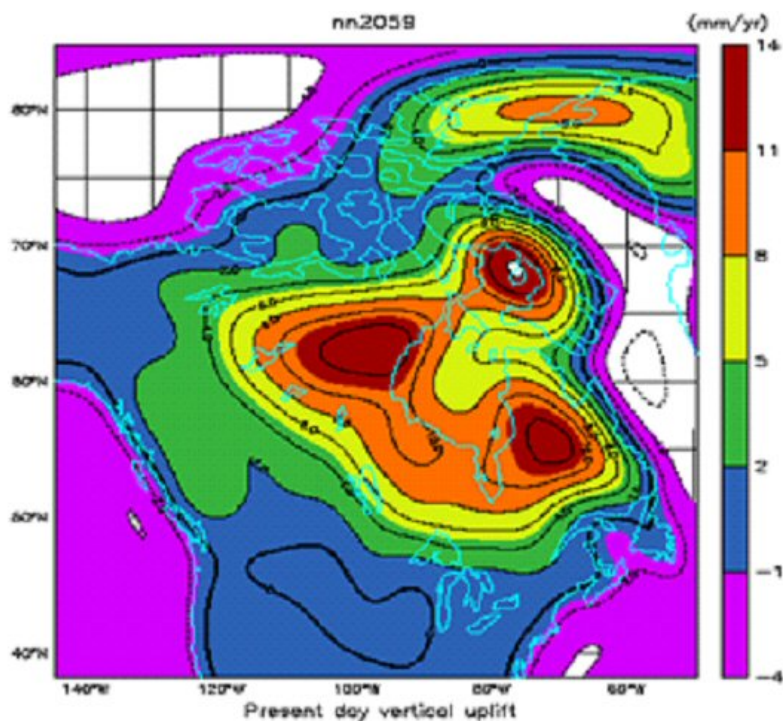


La hausse du niveau de la mer dans le golfe du Saint-Laurent a tendance à s'approcher des valeurs moyennes planétaires et de l'Atlantique nord-ouest estimées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Dans le golfe, la hausse du niveau de la

mer se superpose aux mouvements verticaux de la croûte terrestre. La partie sud du golfe s'abaisse alors que la partie nord se rehausse en réponse au retrait des glaciers il y a environ 12 500 ans (figure 7). Ce réajustement isostatique postglaciaire se traduit selon les régions par une subsidence ou un relèvement des terres.

Dans le sud du golfe du Saint-Laurent, la côte s'est abaissée d'environ 15 cm depuis un siècle alors que le niveau de la mer s'est élevé de 17 cm [4] [5]. En résulte une hausse du niveau relatif de la mer de 32 cm en 100 ans [6]. Les Îles-de-la-Madeleine et la Baie des Chaleurs, qui sont aussi situées dans la partie sud du golfe, subissent une hausse du niveau relatif de la mer. Ce taux n'est pas connu avec précision dans ces deux zones faute de données marégraphiques à long terme.

FIGURE 7 *Ajustement isostatique postglaciaire pour l'ensemble de l'Amérique du nord [7]*



Dans le nord du golfe, les données de niveau d'eau disponibles ne permettent pas de conclure à un rehaussement du niveau relatif de la mer. Dans ce secteur, le rebond isostatique postglaciaire se poursuit et la côte émerge à un rythme proche du taux de relèvement actuel du niveau de la mer [7]; [8]; [9]. L'information disponible suggère que le taux relatif de changement du niveau de la mer oscille autour d'une valeur nulle ou d'une faible émergence, mais il est probable que la côte nord du golfe passera en submersion nette d'ici la fin du 21^e siècle.

2.3 Glaces

Historiquement, le golfe du Saint-Laurent est couvert de glaces de mer environ trois mois par année, de la mi-janvier à la mi-avril. Lorsque la couverture de glaces de mer atteint une concentration supérieure à 30 %, la genèse des vagues est inhibée. La durée de la période d'inhibition des vagues par les glaces de mer a diminué de 30 % depuis 1960, passant d'une durée moyenne de 80 jours par année (1960 à 1995) à 55 jours par année (1995-2007). D'après les simulations climatiques et les résultats des études à partir d'un modèle océanique (ISMER-IML) [10] [11], on anticipe une réduction additionnelle de 50 à 72 % selon le secteur choisi (tableau 2) d'ici 2050 par rapport à la période 1996-2003 et une disparition complète des glaces de mer dans le golfe avant la fin du siècle.

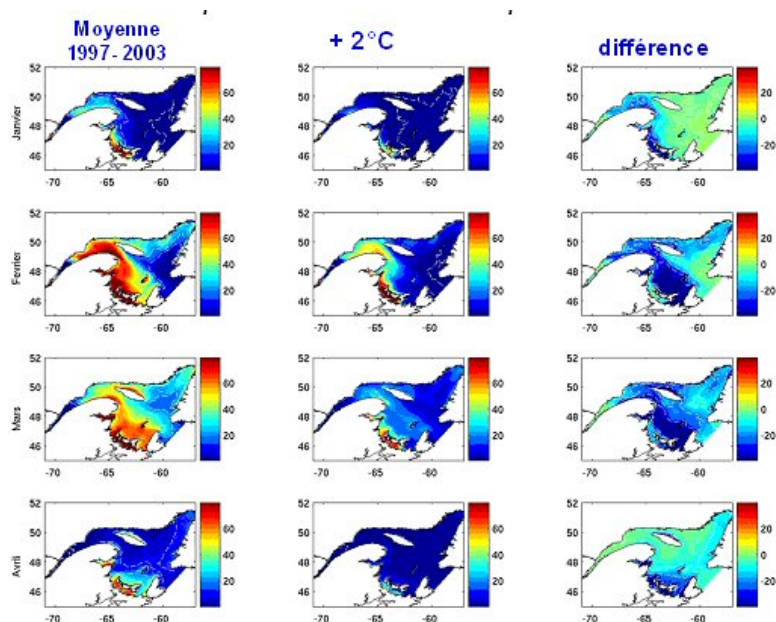
Le tableau 2 et la figure 8 illustrent l'effet d'une hausse de 2 °C sur la concentration des glaces dans le golfe du Saint-Laurent [12].

TABEAU 2 *Résultat des simulations de la variation de température sur les conditions de glaces pour la période 1996-2003 et des projections en conditions futures*

Station / jour	Période témoin > 30 % 1996-2003	Période chaude > 30 % +2 °C	Différence	Écart type
Sept-Îles	40,4	16,1	24,3	16,6
Sept-Îles Anticosti	59,9	32,9	27,0	13,6
Percé	62,2	26,1	36,1	12,2
Plage Martinique	71,0	26,3	44,7	15,2
Pointe-aux-Loups	57,3	15,9	41,4	14,8
Pointe-aux-Loups/Anticosti	33,9	11,9	22,0	9,9

Le tableau présente le nombre de jours avec plus de 30 % de concentration de glaces (vagues inhibées) pendant la période témoin (1996-2003), puis à la suite d'une hausse de 2 °C, ce qui correspond à la hausse anticipée d'ici 2050.

FIGURE 8 Impact simulé d'une hausse des températures hivernales de 2 °C sur la concentration moyenne mensuelle des glaces par rapport à la période 1997-2003 dans le golfe [12]



La disparition progressive des glaces cause indirectement une augmentation de l'impact des vagues sur les zones côtières. Environ 30 à 40 % des tempêtes se produisent en hiver alors que le golfe est couvert de glaces. La diminution de la période d'inhibition des vagues a pour effet d'augmenter le nombre total de vagues de tempêtes touchant les côtes des sites témoins.

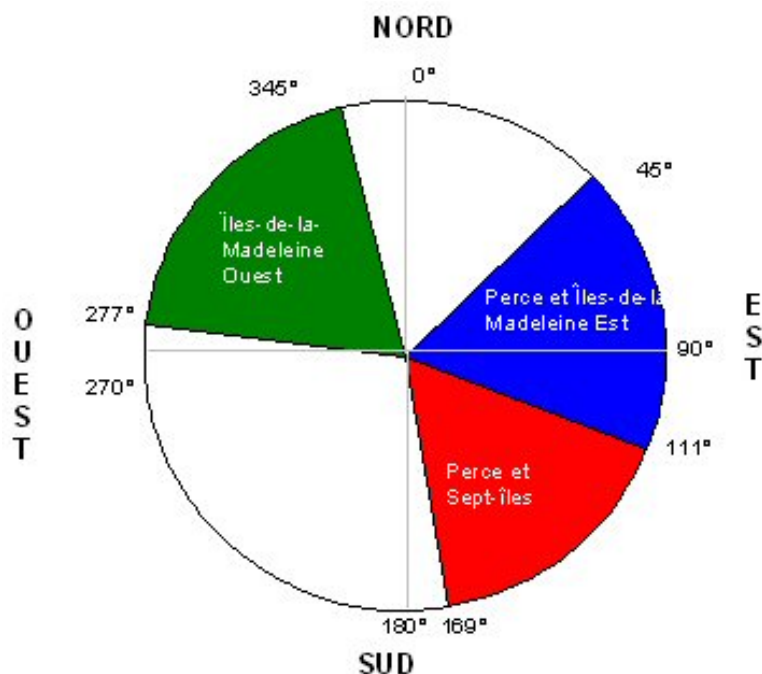
Lors d'hivers très froids, la durée de couverture de glace est généralement supérieure à 30 % pendant 70 à 90 jours dans tout le golfe. Lors d'hivers très doux, la concentration de glace n'est supérieure à 30 % que pendant 40 à 65 jours. La période 1985-1995 a été caractérisée par des hivers plus froids que la moyenne dans le golfe, alors que la période 1995-2006 affiche des hivers plus doux que la moyenne. D'après les résultats des simulations climatiques, les hivers des quatre ou cinq prochaines décennies s'apparenteraient, en moyenne, à ceux de la période 1995-2006.

Ces hivers doux se caractérisent par une formation tardive du couvert de glaces dans le golfe, par un départ des glaces plus hâtif et par des glaces de mer plus mobiles. De grandes ouvertures sans glace de plusieurs dizaines de kilomètres de largeur se forment dans le nord du golfe lorsque les vents du secteur nord repoussent les glaces vers le sud. Les glaces de rive se forment aussi tardivement et le pied de glace peut se briser en hiver, formant un mur vertical de glace sur les plages ou dénudant la plage. La présence d'ouvertures dans la nappe de glaces flottantes permet aux glaces de rive d'être emportées au large lors de tempêtes.

2.4 Tempêtes

La dynamique côtière est fortement influencée par le vent et les tempêtes, qui produisent des variations du niveau d'eau (surcotes et décotes) et des vagues. Une étude des tempêtes réalisée au cours de l'étude a permis de distinguer trois types de tempêtes qui affectent les régions témoins dans le golfe du Saint-Laurent [13] [14]. Ces tempêtes, qui sont représentées ci-après par les couleurs rouge, bleu et vert (figure 9), affichent des caractéristiques distinctives et produisent des effets différents aux trois sites témoins de l'étude.

FIGURE 9 Directions des vagues engendrées par les tempêtes « rouges », « bleues » et « vertes »

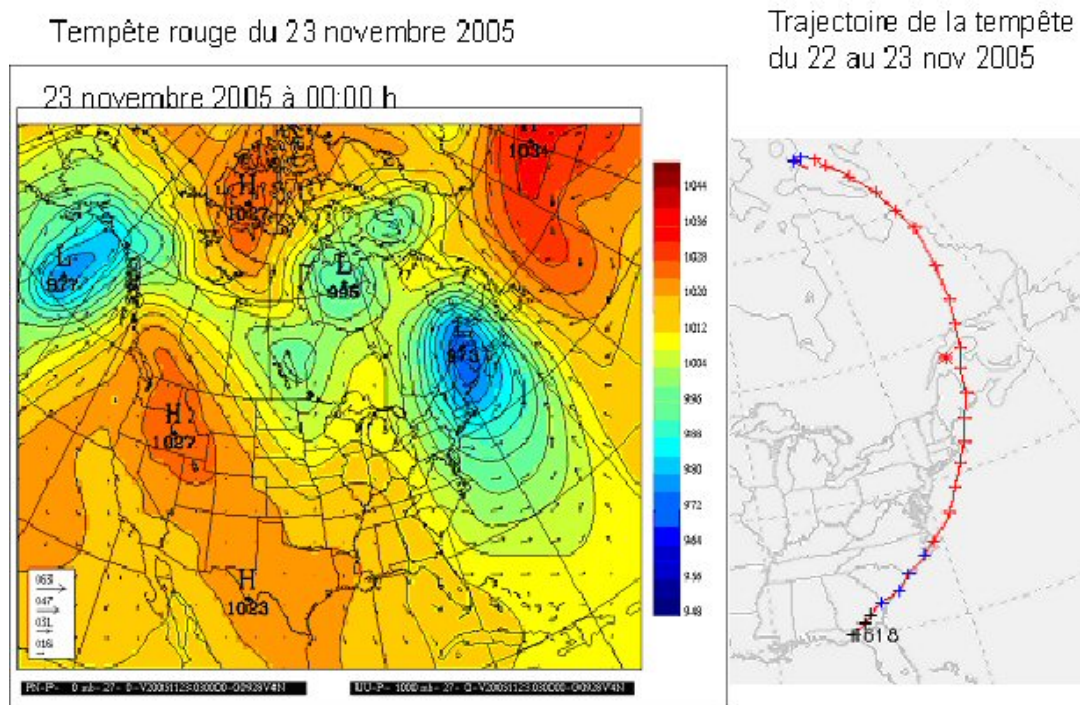


Les tempêtes rouges (figure 10) se caractérisent par de forts vents du secteur sud-est qui affectent les zones côtières de Sept-Îles et de Percé, mais beaucoup moins les Îles-de-la-Madeleine.

Les tempêtes bleues engendrent de forts vents du secteur nord-est et affectent les plages et les falaises situées du côté est des Îles-de-la-Madeleine (Cap-aux-Meules) et le secteur de Percé.

Enfin, les tempêtes vertes produisent des vents du secteur nord-ouest et affectent le côté ouest des Îles-de-la-Madeleine (Pointe-aux-Loups), mais aussi certaines portions du littoral de la région de Sept-Îles. La fréquence des trois types de tempêtes n'est pas la même : les tempêtes rouges, bleues et vertes représentent, respectivement, 18, 16 et 66 % des 1160 tempêtes répertoriées de 1961 à 1990.

FIGURE 10 Position d'un système dépressionnaire traversant le golfe à 00 h 00 le 23 novembre 2005 (à gauche) et sa trajectoire entre le 22 et le 23 novembre 2005 correspondant à une tempête rouge (à droite)



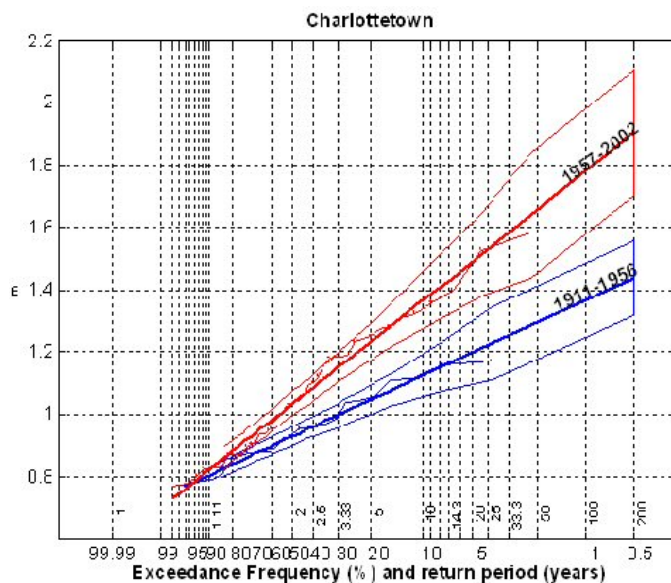
Des simulations climatiques ont été réalisées à l'aide du modèle régional canadien du climat (MRCC) d'Ouranos [15]. Ces simulations préliminaires du régime des tempêtes dans le golfe montrent que la fréquence des tempêtes devrait diminuer légèrement d'ici 2050; le nombre total de tempêtes rouges, bleues et vertes diminuerait, respectivement, de 15 %, 19 % et 8 %.

Ces résultats préliminaires doivent être vérifiés et validés par d'autres simulations. De plus, ces diminutions ne compensent pas l'érosion accrue liée à la disparition des glaces.

2.4.1 Surcotes et décotes

Les ondes de tempête qui provoquent des surcotes dans le golfe sont associées au passage des tempêtes rouges et bleues, qui produisent simultanément une chute de la pression atmosphérique et de forts vents du secteur est. Les surcotes et les décotes sont des déviations du niveau de la mer par rapport à la marée prédite. Les surcotes se manifestent de manière quasi synchrone sur l'ensemble des côtes québécoises du golfe, avec un décalage de quelques heures tout au plus. La fréquence des surcotes causées par les tempêtes a augmenté entre la première et la seconde moitié du 20^e siècle dans les secteurs de Québec et de Charlottetown (figure 11) [16]. Les tempêtes rouges produisent les surcotes les plus fortes, suivies par les tempêtes bleues. Les tempêtes vertes produisent généralement des décotes dans l'ensemble du golfe du Saint-Laurent.

FIGURE 11 *Diagramme de dépassement des niveaux de surcotes (E) à Charlottetown, Île-du-Prince-Édouard [8]*



2.4.2 Vagues

Les vagues causées par le vent peuvent atteindre plus de 10 m de hauteur lors de très fortes tempêtes dans le golfe. D'après les simulations de vagues couvrant la période 2003-2005 [17], les vagues d'une hauteur supérieure à 4 m constituent environ 1 % de tout le spectre de vagues aux trois sites témoins de l'étude. La côte ouest des Îles-de-la-Madeleine (secteur de Pointe-aux-Loups) est exposée aux vagues du nord-ouest causées par les tempêtes vertes; cette côte reçoit environ 66 %

des vagues de tempête de plus de 4 m de hauteur qui affectent les trois sites témoins de l'étude. Comme les tempêtes vertes produisent principalement des décotes, la grande majorité de ces vagues atteint la côte lorsque le niveau d'eau est inférieur au niveau de la marée prédite.

La région de Sept-Îles est surtout exposée aux vagues en provenance du sud-est causées par les tempêtes rouges. Ces vagues peuvent atteindre des hauteurs de plus de 6 m et représentent 18 % du total des vagues. Comme ces tempêtes produisent très souvent des surcotes pouvant atteindre jusqu'à 1,2 m au-dessus du niveau de la marée prédite, les vagues peuvent atteindre les parties supérieures des plages et des infrastructures côtières.

La région de Percé est affectée par les vagues des tempêtes bleues et rouges, qui proviennent des secteurs nord-est et sud-est. Ces vagues atteignent parfois 10 m de hauteur au large de Percé et sont fortement associées à la présence de surcotes.

2.5 Processus cryogéniques

L'érosion des falaises de roches sédimentaires et des falaises argileuses est fortement influencée par les processus cryogéniques (processus liés au gel et au dégel). L'intensité de ces phénomènes est déterminée par l'exposition des falaises au rayonnement solaire direct, au nombre de redoux hivernaux, à la fréquence des pluies hivernales et aux cycles de gel-dégel. Ces processus complexes ont fait l'objet d'études afin de mieux comprendre la mécanique et l'évolution historique des processus cryogéniques. Des indicateurs sont en cours de développement. Aucun scénario climatique futur de ces processus n'a été produit dans le cadre de l'étude; la production de scénarios fera l'objet d'études ultérieures.

Les processus cryogéniques représentent un important facteur d'érosion des falaises d'argile et de grès (figure 12). Dans certains cas, 65 % de l'érosion de ces falaises se produit en hiver, alors que la berge et la mer sont gelées [18]. Les redoux hivernaux, les pluies hivernales et la quantité de neige sont les principales variables climatiques à prendre en compte alors que l'orientation des falaises et leur composition sont d'autres variables clés à considérer. La neige agit comme isolant et atténue les fluctuations de température dans les falaises. Le gel et le dégel n'affectent les falaises qu'en l'absence de neige. C'est la couverture de glace littorale qui permet à la neige de s'accumuler sur le littoral et sur les falaises.

Enfin, les pluies diluviennes et les pluies hivernales favorisent le déclenchement de glissements de terrain et de chutes de pierres le long des hautes falaises. La période 1987-2006 est celle qui affiche les températures hivernales les plus élevées, le plus grand nombre de jours de redoux hivernal et l'occurrence la plus élevée de pluies hivernales, en particulier à Sept-Îles et à Percé en ce qui concerne les pluies hivernales.

FIGURE 12 *Formation des cônes de glace dans la falaise de L'Anse-à-Beaufils*



2.6 Précipitations intenses

Une partie des processus côtiers est affectée par les précipitations, qui peuvent causer du ruissellement de surface, des crues de rivières et des écoulements d'eau souterraine. Une analyse historique des pluies diluviennes a été réalisée à partir des données de stations météorologiques et des données de modèles climatiques. Seul le secteur de Gaspé montre une tendance positive de l'occurrence des pluies diluviennes, qui est particulièrement marquée pour la période de 1987-2006. Des scénarios de précipitations produits pour le golfe du Saint-Laurent [2] anticipent une variation des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de -4 à +12 % dans le golfe, avec une valeur médiane de +4 %. Les précipitations intenses devraient augmenter, surtout dans le nord du golfe. Le risque de précipitations intenses augmenterait pour les bassins versants du sud du Québec d'ici 2050 [19] [20].

Ces données suggèrent que le risque de fortes crues causées par des précipitations intenses (p. ex., les pluies diluviennes du Saguenay en 1996) devrait augmenter pour toutes les rivières de la Côte-Nord et, probablement, de la Gaspésie. Par contre, le risque de fortes crues causées par la fonte des neiges diminuera peu à peu. Les crues printanières des rivières se produiront plus tôt et seront moins intenses. Des études additionnelles sont nécessaires pour quantifier ces processus.

3. Dynamique côtière des régions témoins

Les trois régions à l'étude présentent une grande variété de types de côtes. La région de Sept-Îles est constituée de terrasses de plage, celle des Îles-de-la-Madeleine est un ensemble d'îles reliées par des tombolos sableux bordant de grandes lagunes et la côte de Percé est constituée principalement de falaises vives et de plages et marais côtiers encastrés entre ces falaises. La réponse de ces systèmes côtiers aux changements climatiques [21] est différente dans chaque cas, mais elle est influencée par des phénomènes communs.

La hausse du niveau de la mer

La hausse du niveau de la mer tend à modifier négativement le bilan sédimentaire des plages et à favoriser une érosion généralisée, peu importe le type de côte. La hausse du niveau de la mer augmente les risques de surcote et de submersion, exposant les hauts de plage, les talus côtiers et les infrastructures à l'action des vagues.

Les tempêtes

Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues et des surcotes causées par les tempêtes a tendance à modifier négativement le bilan sédimentaire des plages des zones littorales et à augmenter le taux d'érosion des falaises exposées. Par contre, certaines plages, selon leur orientation, leur géométrie et leur composition granulométrique peuvent résister mieux que d'autres à une augmentation de la fréquence des tempêtes, voire même, parfois, bénéficier de l'érosion accrue de plages ou de falaises voisines moins résistantes.

Les glaces

Les glaces marines et les glaces de rive ont généralement un effet protecteur lorsqu'elles sont complètement formées et peu mobiles. Les glaces de mer atténuent les vagues; les glaces de rive fixent le sable et les talus, les protégeant contre l'abrasion causée par le vent, la pluie et les vagues. Cependant, lorsque les glaces flottantes sont très mobiles et se déplacent au gré du vent et des courants, elles peuvent laisser de vastes ouvertures d'eau libre permettant aux vagues de se développer lors de tempêtes hivernales. Les glaces de rive peuvent alors agir comme des réflecteurs de vagues, causant un ressac important qui abaisse la plage. Les surcotes et les marées peuvent aussi soulever les glaces de rive et les emporter au large, ce qui cause une perte de sable. Dans ces conditions, les glaces perdent leur effet protecteur et contribuent à l'érosion des berges.

La dynamique des côtes basses

La dynamique des côtes à dépôts meubles (flèches, basses terrasses sablonneuses, tombolos, etc.) comporte un aspect aléatoire qui se superpose à une tendance nette à long terme. Une plage peut subir des périodes d'accrétion (avancée ou rehaussement) et d'érosion (recul ou

abaissement) de manière aléatoire en réponse à une grande variété de processus (fortes tempêtes successives, migration de barres d'avant-plage, submersion/érosion du cordon de plage, etc.). La durée des périodes d'avancée et de recul d'une plage peut s'échelonner de quelques mois à quelques décennies. L'amplitude et la durée de ces épisodes d'avancée et de recul dépendent surtout de la hauteur du talus sableux auquel la plage est accolée. Plus ce talus est élevé, plus la réserve de sable disponible pour maintenir la position de la plage est grande. Les plages les plus mobiles sont généralement celles qui s'adosent à une basse terrasse, à des séries de cordons de plage de faible hauteur, ou à des champs de dunes de petite taille. L'analyse climatique ne permet d'expliquer que les tendances nettes d'un système de plage causées par les variations à long terme du niveau de la mer, du régime des vagues, des conditions de glaces etc.; elle ne permet pas de prévoir les fluctuations aléatoires.

La variabilité du taux de recul des falaises

Contrairement aux terrasses de plages, les falaises argileuses et les falaises de grès ou de schiste argileux ne peuvent pas avancer, mais seulement reculer (s'éroder) ou demeurer stables. Cependant, tout comme les plages, les falaises peuvent connaître des fluctuations aléatoires du taux d'érosion pour des périodes plus ou moins longues. Ces fluctuations aléatoires dépendent à la fois des conditions environnementales et de la géologie et de la hauteur des falaises. Le taux de recul des falaises augmente généralement lorsque celles-ci sont exposées à plus de redoux hivernaux, à plus de cycles de gel et de dégel, à plus d'écoulement souterrain en hiver, à plus de vagues s'abattant directement en pied de falaise, à plus de pluies intenses, etc. La plupart de ces processus ont peu d'effet sur les terrasses sableuses, qui peuvent même parfois bénéficier de l'apport accru de sable provenant de l'érosion de falaises voisines.

3.1 Scénarios d'érosion

Trois scénarios d'érosion appelés S1, S2 et S3 ont été développés sur la base des taux historiques d'érosion mesurés depuis 1930. L'élaboration des scénarios repose sur l'hypothèse de travail suivante : « Les fluctuations des taux d'érosion à l'échelle d'une ou deux décennies sont causées par les variables climatiques qui affectent le système côtier local ». Le tableau 3 décrit les trois scénarios. Le scénario S1 représente le *statu quo* ou le scénario de référence alors que les deux autres, S2 et S3, prennent en compte l'augmentation appréhendée de l'érosion côtière qui pourrait découler des changements climatiques. La position du trait de côte ou du talus côtier projetée en 2050 a été cartographiée sur des photographies aériennes (exemple figure 13) selon ces trois scénarios. Des cartes de scénarios semblables ont été produites pour les trois sites témoins.

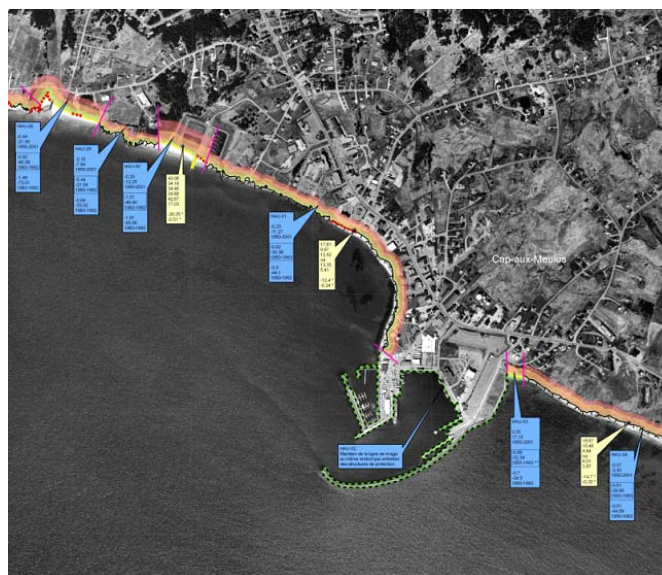
Avec l'appui scientifique et technique des chercheurs, les comités de concertation formés d'intervenants locaux, régionaux et gouvernementaux ont examiné les problématiques et les enjeux propres à chacun des sites témoins et évalué les diverses solutions d'adaptation compte tenu de chaque scénario. Les analyses de l'impact des changements climatiques réalisées par les chercheurs

dans le cadre de l'étude ont par la suite permis d'évaluer, pour chacun des sites témoins et en fonction de sa dynamique côtière propre, lequel des scénarios d'érosion S1, S2 ou S3 serait le plus probable selon un horizon de 2050. Les sections 4 à 6 de ce rapport résument les résultats de ces analyses et les solutions d'adaptation proposées par les membres des comités de concertation.

TABLEAU 3 Scénarios d'érosion utilisés pour cartographier l'évolution du trait de côte jusqu'en 2050

Scénarios pour 2050	Description
S1 : taux de déplacement moyen de la ligne de rivage entre 1931 et 2006	Ce scénario suppose que l'effet des changements climatiques ne modifiera pas les taux moyens de recul des talus côtiers d'ici 2050.
S2 : taux d'érosion moyen mesuré pour un intervalle de 10 à 15 ans où l'érosion a été la plus intense lors de la période 1931-2006	Ce scénario considère comme probable une accélération de l'érosion côtière en raison des changements climatiques.
S3 : Taux moyen des valeurs supérieures à la moyenne des taux de recul pour un intervalle de 10 à 15 ans où l'érosion a été la plus intense lors de la période 1931-2006	Ce scénario considère comme probable une accélération très élevée de l'érosion côtière en raison des changements climatiques et de facteurs anthropiques aggravants.

FIGURE 13 Exemple de cartographie numérisée des scénarios S1, S2 et S3 à Cap-aux-Meules, Îles-de-la-Madeleine.



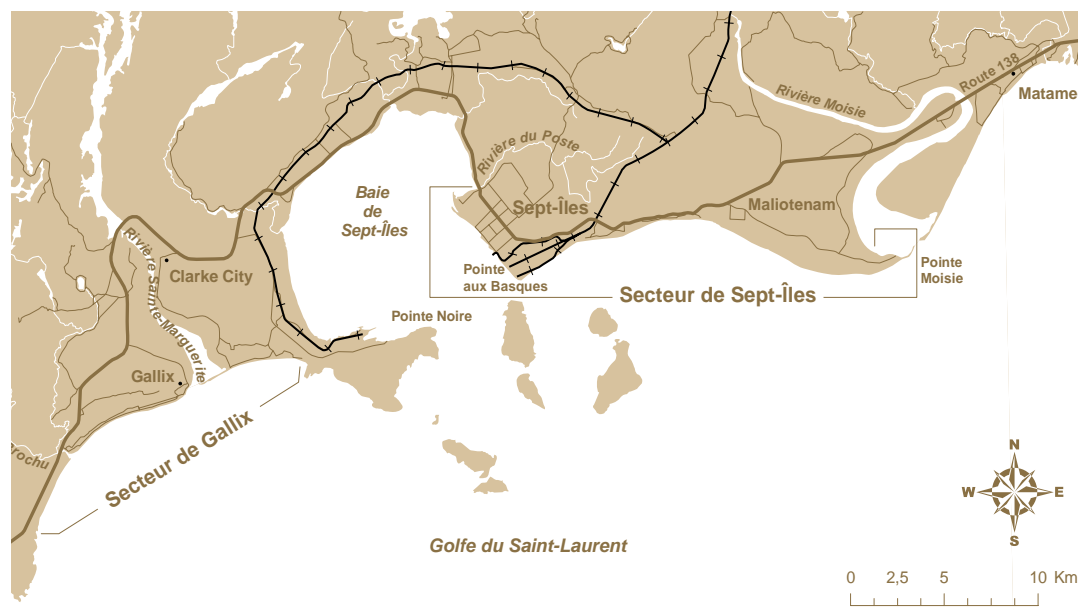
Des cartes de scénarios semblables ont été produites pour les trois zones témoins. Avec l'appui scientifique et technique des chercheurs, le rôle des comités de concertation était d'examiner les diverses solutions d'adaptation à l'impact des changements climatiques.

4. Région de Sept-Îles

La façade maritime de la région de Sept-Îles est largement dominée par les terrasses de plage à hauteur de 85 % de la longueur totale de côte. En 2006, 60 % du littoral montrait des signes d'érosion et 24 % est déjà protégé par des structures de protection.

Le secteur de Gallix, à l'ouest du centre-ville de Sept-Îles, regroupant les districts de Gallix et de Clarke (figure 14) est principalement constitué de terrasses de plage (51 %) intercalées entre des flèches littorales (24 %). Ces dernières sont situées à l'embouchure de la rivière Brochu et de la rivière Sainte-Marguerite. Les falaises meubles occupent 24 % du littoral et se trouvent principalement à Val-Marguerite. En 2006, 67 % du littoral de Gallix montrait des signes d'érosion alors que 15 % était stabilisé artificiellement par des ouvrages de protection. L'ensemble de ces côtes est occupé par des résidences principales et secondaires et est desservi par des routes de desserte (des Chalets, Bell et des Campeurs).

FIGURE 14 Site témoin de Sept-Îles



Le secteur de Sept-Îles regroupe, de l'ouest vers l'est, la réserve autochtone d'Uashat, le centre-ville et le District de la Rive regroupant les plages Monaghan, Ferguson, Routhier et Lévesque (figure 14).

Plus à l'est se trouve la réserve autochtone de Maliotéham. L'ensemble de ce secteur est formé de terrasses de plages de basse altitude par rapport à la mer. De longs segments de ces côtes ont fait l'objet d'ouvrage de protection dont toute la façade du centre-ville, la quasi-totalité de la réserve d'Uashat et des segments des plages Monaghan et Ferguson.

4.1 Bilan historique

À l'échelle de la région de Sept-Îles, les terrasses de plage affichent un bilan sableux positif pour la période 1931-2006. En effet, la ligne de rivage de ces terrasses de plage a avancé vers la mer (accumulation) à un rythme moyen de 0,36 m/an et de 0,15 m/an respectivement pour les secteurs à l'ouest et à l'est du centre-ville de Sept-Îles. Seule la zone de Val-Marguerite, située à l'est de la rivière Sainte-Marguerite présente un bilan négatif (recul net) depuis 1931.

Même si le bilan sédimentaire est globalement positif, les terrasses de plage ont connu à certains endroits des périodes de recul depuis 1931. Tant pour le secteur de Sept-Îles que pour la zone de Val Marguerite, la période 1996-2006 présente un bilan négatif. C'est la période qui contient les valeurs d'érosion le plus élevées, suivie de la période 1965-1979. La période d'érosion la plus importante est aussi 1996-2006, suivie de 1965-1979, pour les falaises et les flèches littorales. Les périodes d'érosion pour ces systèmes côtiers correspondent aussi aux périodes d'accumulation pour les terrasses de plages situées en l'aval (par rapport à la source) du transit sédimentaire net (p. ex., Gallix et Pointe aux Basques).

4.2 Dynamique côtière

La dynamique côtière est influencée par de nombreux facteurs interdépendants.

Sources et répartition des sédiments côtiers

Les sources principales de sable qui alimentent les plages de la région proviennent de l'érosion des berges des estuaires de la rivière Moisie et dans une moindre mesure, de la Sainte-Marguerite. L'érosion des terrasses deltaïques et des bancs sableux bordant ces estuaires se produit principalement lors de pluies intenses et de fortes crues des rivières, qui causent du ravinement et des glissements de terrain en bordure de la zone estuarienne. La présence de lobes deltaïques à l'embouchure de ces estuaires constitue des réserves sédimentaires importantes, notamment pour la Moisie, pour alimenter les systèmes côtiers qui ont permis de maintenir un bilan sédimentaire côtier positif entre 1931 et 2006.

La redistribution par les vagues et les courants côtiers des apports sableux de la rivière Moisie alimente les barres de sable et les plages en fonction de la dérive littorale principale. La plupart des plages situées entre la Pointe aux Basques et l'embouchure de la Moisie sont adossées à des cordons de plages intercalées de lagunes et bordées par d'importants systèmes de barres littorales très mobiles. Les avancées et reculs aléatoires de ces plages sont importants et peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres pour des périodes allant de quelques années à quelques décennies. Depuis 1985, le débit moyen de la rivière Moisie et son débit annuel maximum ont diminué, ce qui s'est traduit par une baisse des apports sédimentaires vers la zone deltaïque.

L'aménagement de la centrale SM3 en 1998 a modifié l'équilibre hydrosédimentaire de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite. La coupure du débit pendant la mise en eau des réservoirs et la disparition des crues printanières majeures ont causé une rétention du sable dans l'estuaire. Une partie des sédiments qui transitent le long du littoral migre davantage dans l'estuaire, tout comme l'extrémité de la flèche littorale et le delta interne. L'érosion intense de l'extrémité ouest de la flèche de Sainte-Marguerite depuis 1996 a entraîné la réactivation et l'érosion d'une haute falaise de sable, qui est maintenant exposée aux vagues du sud-est et qui vient alimenter la terrasse de plage de Gallix vers l'ouest. Cet apport de sédiments se traduit par une avancée du littoral immédiatement à l'ouest de l'embouchure de l'estuaire.

Tempêtes

À cette composante hydrologique s'ajoute l'exposition du littoral aux vagues de tempêtes. Dans la région de Sept-Îles, la quasi-totalité des vagues de plus de 2 m de hauteur provient du sud-est (tempêtes rouges). L'analyse de la fréquence des tempêtes en fonction des intervalles de temps utilisés pour calculer le taux de déplacement de la ligne de rivage indique que les deux périodes de forts reculs du littoral correspondent aux deux périodes où la fréquence des tempêtes du sud-est est la plus élevée (1965-1979 et 1996-2006).

Couvert de glace

La réduction du couvert de glace depuis 1996 entraîne aussi une modification importante de la dynamique sédimentaire le long du littoral et expose le littoral aux tempêtes hivernales. Les vents dominants étant du nord-ouest en hiver, ils déplacent les glaces mobiles vers le sud du golfe, ouvrant de vastes espaces d'eau libre et causant l'absence d'un pied de glace de bas estran, ce qui permet aux vagues des tempêtes rouges hivernales d'éroder le bas de plage.

Niveau de la mer

La tendance du niveau marin montre une apparente stabilité sur la Côte-Nord. Cependant, à long terme, les niveaux marins pourraient varier selon les impacts des changements climatiques qui contribueraient à une modification négative du bilan sédimentaire des plages. D'une part, les importantes formations meubles de la région (complexes deltaïques postglaciaires) s'affaissent sur elles-mêmes. D'autre part, la hausse du niveau de la mer (hausse eustatique) devrait être accélérée en raison du réchauffement climatique (fonte des glaciers terrestres et expansion thermique des eaux marines). Ces deux phénomènes devraient entraîner une hausse relative du niveau de la mer à Sept-Îles.

Impacts des ouvrages de protection

À l'est du centre-ville de Sept-Îles, au District de la Rive, la mise en place d'ouvrages de protection a modifié la dynamique naturelle du littoral. Ainsi, la largeur des plages en bordure des segments

côtiers qui ont été enrochés a connu une réduction majeure de 84 %. L'abaissement et l'érosion des plages font en sorte que les barres de sable n'ont pas tendance à s'accoler à la côte, mais plutôt à poursuivre leur migration devant les zones de plage fortement en déficit. Ce constat traduit aussi une hausse du transit sédimentaire devant les infrastructures dont la conséquence est d'empêcher le littoral d'avancer et de réduire le bilan sédimentaire (p. ex., la plage Ferguson).

Pluies intenses

Dans la zone d'Uashat, on retrouve une falaise principalement affectée par l'écoulement souterrain et des décrochements superficiels. L'évolution de ce type de côte est conditionnée principalement par les pluies intenses. Le recul de cette falaise a été deux fois plus rapide entre 1965 et 1979 qu'aux autres périodes d'analyse. Cette période correspond à la période où l'on enregistre clairement la plus grande fréquence de pluies intenses.

Redoux hivernaux

Enfin, les hautes falaises de Val-Marguerite ont été affectées par l'érosion principalement lors de la période chaude récente de 1996-2006. Le recul important pour ce même type de falaises ailleurs sur la Côte-Nord a été corrélé avec des redoux hivernaux accompagnés de pluie.

4.3 Scénarios futurs

La dynamique côtière de la façade maritime de la région de Sept-Îles est contrôlée essentiellement par le régime des vagues associé aux tempêtes rouges et par les conditions de glaces de mer et de rivage. Les conditions de vagues et de glaces qui ont prévalu pendant la période 1996-2006 sont très probablement la cause principale de l'érosion plus intense observée dans cette région pendant cette période. À cela s'ajoutent des causes aggravantes comme l'urbanisation (augmentation du ruissellement) et des méthodes de protection (enrochement) qui ont activé le transit sédimentaire.

La période de 1996-2006 devrait refléter assez bien les conditions climatiques qui prévaudront au cours des prochaines décennies. Cette période se caractérise par des hivers doux, une saison de glaces très courte, des glaces flottantes plus mobiles et un nombre plus élevé de tempêtes rouges et de vagues causées par ces tempêtes. Ces conditions coïncident avec la décennie la plus chaude enregistrée à l'échelle planétaire depuis 1850 [1]. D'après les modèles climatiques, le cumul des degrés jours de gel (DJG, un indicateur de la rigueur de l'hiver) devrait en moyenne se comparer à celui de la période 1996-2006 d'ici 2050, soit une valeur de 1200 DJG à Sept-Îles. Les conditions de glaces dans le nord du golfe sont corrélées avec le nombre de DJG.

Dans le secteur de Sept-Îles, le scénario d'érosion S2 s'est produit le plus souvent durant la période 1996-2006. Le scénario S2, pour le secteur de Sept-Îles–Moisie, prévoit une accélération de l'érosion côtière par rapport à la tendance historique. Ce scénario entraînerait, pour 2050, un recul moyen des côtes basses sablonneuses de 54 m, mais pouvant, par endroits, atteindre 139 m. En ce qui a trait aux falaises, le recul appréhendé est de 40 m. Ces reculs présentent une valeur moyenne ou une tendance nette à long terme auxquelles on doit ajouter les avancées et reculs aléatoires des plages, qui peuvent atteindre une cinquantaine de mètres dans ce secteur à basses terrasses sableuses.

Dans la zone de Val-Marguerite, située à l'est de l'embouchure de l'estuaire Sainte-Marguerite, le scénario S3 est le plus probable. Cette côte a connu un bilan négatif depuis 1931, et elle devrait connaître une accélération importante de l'érosion côtière causée par la réduction de la glace littorale, l'augmentation des tempêtes effectives du sud-est (qui a déjà contribué à une réduction importante de la largeur de la plage) et l'augmentation du nombre de redoux hivernaux et de la probabilité de pluies hivernales. Le réchauffement hivernal anticipé de près de 2 °C d'ici 2050 devrait augmenter l'instabilité des hautes falaises silto-argileuses. La réactivation de ces falaises et la disparition de la couverture végétale pourrait ensuite permettre aux processus cryogéniques (gélifraction et coulées boueuses) d'intensifier le recul de ces falaises. D'après ce scénario S3, le trait de côte devrait reculer en moyenne de 32 m pour les falaises et de 52 m pour la terrasse de plage de la zone de Val-Marguerite d'ici 2050.

Les taux de recul de la flèche littorale de l'estuaire de la Sainte-Marguerite devraient suivre la tendance observée pendant la période 1996-2006, d'où le choix d'un scénario S2 pour cette flèche, ce qui correspond à un recul de 76 m d'ici 2050.

La terrasse de plage à Gallix, immédiatement en bordure ouest de la rivière Sainte-Marguerite, devrait bénéficier des apports sédimentaires des zones en érosion à l'est de Val-Marguerite. De plus, les tempêtes du sud-est ont tendance à remonter vers cette zone les sédiments du delta de la rivière Sainte-Marguerite, ce qui devrait se traduire par une accumulation d'un peu plus de 15 m en 2050. Il importe dans ce cas également de tenir compte des fluctuations aléatoires de la ligne de rivage qui peuvent modifier ce scénario dans les zones non protégées par des épis rocheux.

Enfin, le scénario S2 est le plus probable pour les autres zones du secteur de Gallix, en direction de la rivière Brochu. Les reculs mesurés entre 1996 et 2006 devraient se maintenir pour le futur. Ce scénario prévoit un recul moyen de 42 m pour les terrasses de plage, et de 174 m pour les flèches littorales d'ici 2050.



4.4 Solutions d'adaptation

Le comité de concertation de la région de Sept-Îles recommande, partout où c'est possible, d'éviter les solutions lourdes et irréversibles comme des empiètements linéaires dont les impacts environnementaux sont importants (effets de bout, réflexion des vagues provoquant l'affouillement et la disparition des plages, etc.).

Le comité propose d'abord la révision de la zone non constructible visée par la réglementation relative aux zones de risques d'érosion adoptée en mars 2005 par la municipalité régionale de comté. Le cadre normatif et le zonage ont été établis sur la base des travaux réalisés dans le cadre de l'entente spécifique sur l'érosion des berges de la Côte-Nord [22]. La cartographie des zones à risque d'érosion a été établie selon un principe de précaution basé sur les taux d'érosion historiques évalués lors de cette étude. L'analyse de l'impact des changements climatiques sur les processus d'érosion littorale montre que dans l'ensemble, bien que ces zones soient sécuritaires, il serait possible d'envisager de réévaluer les marges de recul. Toutefois, dans les milieux formés de basses terrasses de plages, il est recommandé de maintenir une zone d'exclusion de toute construction, même dans les zones en accrétion, afin de permettre les mouvements d'avancée et de recul aléatoires des plages dans la région.

Dans les endroits en érosion active pendant la période 1995-2007, principalement à l'est du secteur de Gallix (Val-Marguerite), le comité recommande de déménager les bâtiments lorsque la situation le commandera. À cet effet, l'opportunité d'octroyer des terres du domaine de l'État dans certains secteurs proches, selon une procédure particulière, est en cours d'examen. La municipalité pourrait envisager l'opportunité de regrouper, selon un concept de revitalisation d'un noyau urbain, les bâtiments dispersés le long de la côte, afin de diminuer l'étalement urbain. Ainsi,

la plupart des bâtiments à risque dans les zones de Rivière Brochu pourraient être déménagés par petits groupes à mesure qu'il sera nécessaire de le faire. D'ici là, des mesures légères, comme la restauration du haut de plages par des recharges en sable et des épis végétaux de haut de plage, pourraient être envisagées pour ralentir l'érosion, mais aucune méthode lourde (empierrement, épis de pierre ou autre) ne devrait être mise en place.



La flèche d'embouchure de la rivière Sainte-Marguerite devrait faire l'objet d'une affectation de conservation afin d'être transformée en zone protégée. L'interdiction d'accès aux véhicules tout-terrain (VTT) devrait être mieux respectée et des haies constituées de rangées d'épinettes pourraient être utilisées afin de capter le sable dans les brèches déjà laissées par les VTT et dans les goulets de tempête. Ces méthodes visent à réduire le risque d'une perforation permanente de la flèche, tout en permettant aux goulets de tempête de s'ouvrir lors de surcotes majeures, afin que la flèche puisse migrer vers l'estuaire au même rythme que les talus de la zone de Val-Marguerite.

En marge des travaux du comité, une solution originale a été avancée concernant le Canton-Arnaud. Le nord de la baie des Sept Îles est délimité par une falaise argileuse en érosion (Canton-Arnaud) dont le recul menace certaines propriétés. Bien que cette zone ne figure pas formellement dans le secteur d'étude, elle a fait l'objet d'une évaluation et de discussions de la part de l'équipe de projet. Les observations effectuées pendant l'étude suggèrent que la cause probable de la dégradation du marais et des talus attenants serait liée à l'érosion glaciaire. Depuis quelques décennies, les glaces de la baie des Sept Îles sont en effet devenues plus minces et plus mobiles à cause des hivers plus doux et des manœuvres des navires du port de Sept-Îles. Cette mobilité accrue faciliterait une évacuation hâtive des glaces hors de la baie, ce qui permet aux glaces de rive d'emporter des morceaux de marais, des blocs glaciels et des morceaux de plage vers la zone profonde. Ces hypothèses font présentement l'objet de

démarches de validation. Les correctifs pourraient comprendre des mesures de rétention des glaces, la restauration du marais, le reconditionnement des plages et des correctifs du drainage des terrains attenants aux talus. Dans la baie des Sept Îles, un projet de restauration des marais est en gestation avec la collaboration de Pêches et Océans Canada et le Comité ZIP Côte-Nord du golfe, qui propose d'utiliser des fonds en réserve dans le cadre du programme de compensation d'habitats pour stopper la dégradation du marais.

Dans le secteur de Sept-Îles, un programme de réutilisation des sables dragués dans le port de Sept-Îles est proposé pour corriger le déficit en sable de la flèche située près de la réserve autochtone d'Uashat, dans la mesure où la granulométrie et la qualité du sable (absence de contaminants) soient compatibles.

Les plages Monaghan, Ferguson, Routhier et Lévesque ont subi une érosion accélérée depuis 1996, aggravée par l'urbanisation rapide de ce secteur (aéroport, routes, etc.), qui a activé le drainage superficiel. La construction de murs de protection a accentué l'affaissement des plages. Diverses solutions ont été étudiées par le comité, qui a recommandé de ne plus recourir à des empierrements protecteurs. D'ailleurs, les empierrements déjà construits sont sous-dimensionnés et ne protègent pas le secteur contre les risques de submersion. Le comité propose d'évaluer des méthodes mixtes qui consisteraient en plusieurs actions conjuguées, dont :

- le déplacement ou le recul de quelques résidences qui font saillie sur la plage afin de reprofiler le trait de côte;
- la recharge en sable de la partie érodée de la plage avec un sable grossier afin d'élargir la plage et de rehausser le profil de plage;
- l'ajout de diffuseurs à l'extrémité des ruisseaux de drainage trop actifs pour réduire l'entraînement du sable vers le bas de plage;
- l'ajout de capteurs de sable légers sur le haut des plages restaurées (petits épis de bois ou structures similaires) afin de ralentir le transit sédimentaire et de favoriser la construction d'une dune de haut de plage pour amortir les vagues de tempêtes.

Ces recommandations s'appliqueraient à un secteur résidentiel de 4 km de longueur. Un programme d'entretien consistant en de petites recharges périodiques (aux cinq ans) et un entretien annuel des structures de diffusion et de captage doit être considéré.

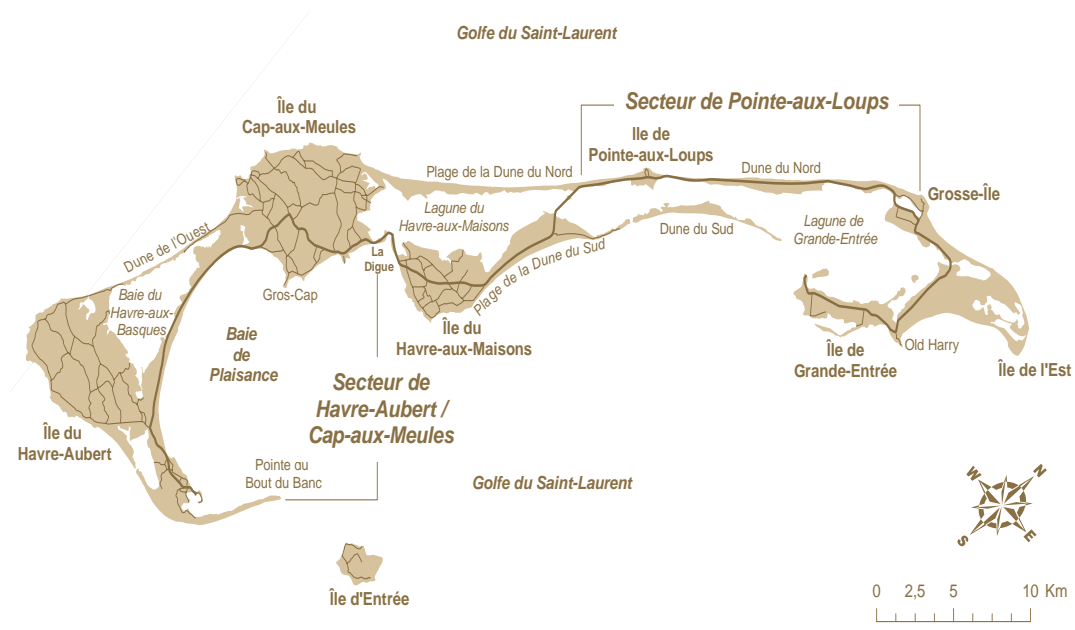
Pour le secteur de Malioténam, le comité recommande d'éviter que des empierrements ou autres structures lourdes soient installés dans ce secteur et risquent de compromettre l'équilibre hydrosédimentaire des plages situées en aval vers l'ouest. Des recharges sporadiques ou des techniques légères de captage et un programme de retrait et de zonage seraient plus appropriés.

5. Région des Îles-de-la-Madeleine

L'archipel des Îles-de-la-Madeleine est constitué d'une douzaine d'îlots rocheux dont six sont reliés entre eux par des cordons dunaires et des tombolos. Les îlots rocheux sont formés de roches métasédimentaires et volcaniques. Ces assemblages de conglomérats, de grès, de schistes, d'argilite, d'anhydrite, de basaltes, de calcaires, de dolomie et de gypse ont été soulevés par d'épais dépôts d'évaporites (diapirs de sels) qui ont formé les îles. L'érosion de ces sédiments a libéré le sable et le gravier qui composent la plateforme des Îles-de-la-Madeleine. Ce sable s'est accumulé pour former les cordons dunaires et les tombolos qui ceinturent actuellement les lagunes et relient les îles les unes aux autres.

Comme les Îles-de-la-Madeleine sont situées au milieu du golfe du Saint-Laurent, sur un plateau de 60 m de profondeur, aucun sable ne peut venir du large ni d'aucune source continentale. Le sable qui circule sur les plages et le long des zones littorales est donc soit du sable remanié par l'érosion de dépôts quaternaires plus anciens, des dunes et des tombolos, soit dérivé de l'érosion des îlots rocheux (grès rouges, conglomérats, etc.).

FIGURE 15 Site témoin des Îles-de-la-Madeleine



Dans le cadre de l'étude, deux secteurs des Îles-de-la-Madeleine ont été analysés, soit le secteur de Pointe-aux-Loups, qui s'étend jusqu'à Grosse-Île, et le secteur de Cap-aux-Meules/Havre-Aubert qui s'étend de la flèche littorale de La Digue à la pointe de Sandy Hook (figure 15).

5.1 Bilan historique

Le secteur Cap-aux-Meules/Havre-Aubert comporte cinq types de côtes, soit : les plages bordant le tombolo qui relie Cap-aux-Meules à Havre-Aubert sur 18,8 km (39 %), les falaises rocheuses de Havre-Aubert et de Cap-aux-Meules, qui occupent 15,6 km (32,5 %), la flèche littorale de Sandy Hook, d'une longueur de près de 8 km (16,3 %), quelques segments de terrasses de plage à Cap-aux-Meules et dans la baie du Havre représentant 5 km de côte (10,7 %) et une petite zone de la baie du Havre, au fond de l'Étang du Sable. En 2006, 56 % du littoral de ce secteur présentait des signes d'érosion alors que 14 % du littoral était artificiel et principalement constitué d'enrochements mis en place pour contrer l'érosion côtière.

Le secteur de Pointe-aux-Loups à Grosse-Île est principalement composé d'une côte à tombolos (91,6 %). Ces cordons de sable, d'une largeur qui varie de 200 à 1000 m, bordent la lagune côtière de Grande-Entrée, le plus grand plan d'eau intérieur des Îles-de-la-Madeleine. Le reste du littoral est composé d'une côte à falaise rocheuse (7,4 %) et d'un étroit segment de terrasse de plage (1,1 %) situé en bordure du quai de Pointe-aux-Loups. En 2006, 88 % du littoral montrait des signes d'érosion alors que près de 7 % avait été artificialisé pour protéger la route 199¹ immédiatement au nord-est de Pointe-aux-Loups.

Le bilan d'évolution côtière entre 1963 et 2001 est fortement négatif pour le secteur de Pointe-aux-Loups, avec un recul moyen de 0,79 m/an. L'érosion la plus forte s'est produite pendant la période 1983-1992, suivie de celle de la période 1977-1983. La période 1963-1977 est une période de très forte érosion pour la côte à falaise rocheuse, suivie de celle de la période 1977-1983.

Dans le secteur de Cap-aux-Meules/Havre-Aubert, les falaises ont subi un recul moyen ou érosion de 0,46 m/an de 1963 à 2001. Pour ces côtes à falaises, le recul le plus important s'est produit de 1977 à 1983, suivi de celui de la période 1992-2001. À l'inverse, les côtes à tombolos ont enregistré une avancée moyenne de 0,47 m/an pour la période 1963-2001. Malgré ce bilan généralement positif, les côtes à tombolos, à flèche littorale et à terrasse de plage ont subi un recul 0,16, 0,71 et 1,06 m/an respectivement de 1983 à 1992, ce qui correspond au taux de recul le plus élevé enregistré pour ces systèmes côtiers.

1. Cette route est sous la responsabilité du ministère des Transports.

5.2 Dynamique côtière

L'exposition aux vagues de tempête est le principal facteur qui conditionne l'évolution des systèmes côtiers aux Îles-de-la-Madeleine. Le côté ouest des îles est exposé à deux à trois fois plus de fortes vagues de tempête (plus de 4 m de hauteur) que le côté est. Les courants littoraux qui se développent sous l'action des vagues transportent le sable vers les deux extrémités nord et sud des îles, puis vers l'est en direction de la Pointe de l'est et de Sandy Hook. Ces deux secteurs sont en accumulation. La majeure partie des autres zones d'accumulation sont situées du côté est des îles, dans les zones à cordons dunaires et à sillons. De manière générale, les falaises rocheuses exposées à la mer sont en recul et les avancées du littoral sont confinées à certaines côtes à tombolos, flèches, dunes et terrasses de plages (toutes inconstructibles).

Le secteur de tombolos de la baie de Plaisance est principalement sensible aux tempêtes bleues (vagues du nord-est) puisqu'il est protégé des vagues du sud-est par la flèche littorale de Sandy Hook et L'Île d'Entrée. La période de forte érosion (1983-1992) correspond à la période où le nombre de tempêtes bleues (vagues du nord-est), en eau libre de glace (concentration de moins de 30 %), a été le plus élevé. Du côté de Pointe-aux-Loups, les tempêtes vertes (vagues du nord-ouest) sont le principal facteur climatique qui affecte les côtes à tombolos; les périodes de forte érosion correspondent, elles aussi, aux deux périodes où le nombre de ces tempêtes est le plus élevé, soit 1977-1983 et 1983-1992.

La réduction de la couverture de glace littorale joue aussi un rôle important dans l'érosion des plages. Les périodes de 1977-1983 et de 2001-2007 sont caractérisées par une réduction du couvert de glace et une diminution importante de la largeur des plages. L'érosion des plages dans la période de 1977-1983 a ensuite favorisé le recul du trait de côte lors de la période suivante. D'ailleurs, il a été possible de quantifier la forte relation entre la faible largeur des plages pour une année donnée et le fort recul du trait de côte pour la période suivante [18]. Ce constat laisse envisager une accélération de l'érosion côtière pour la période à venir.

La relation entre le climat et l'évolution des côtes rocheuses est dépendante du type de lithologie qui compose les falaises rocheuses; la lithologie détermine leur sensibilité aux agents d'érosion. Les falaises de grès de Cap-aux-Meules et de Pointe-aux-Loups sont avant tout sensibles aux vagues de tempête. Les périodes de forte érosion correspondent donc aux périodes de forte tempête. Le secteur de Havre-Aubert est caractérisé par des falaises très sensibles aux processus cryogéniques, notamment aux coulées boueuses. Les périodes de 1977-1983 et de 1992-2001 sont caractérisées par les reculs les plus importants. Ces deux périodes correspondent à des hivers plus doux, avec un nombre de degrés-jours de gel plus faible (annuels et printaniers), un plus grand nombre de redoux hivernaux et davantage de pluies hivernales. Ces conditions sont donc propices à la formation de coulées boueuses et aux processus de gélifraction dans les falaises.



Aux Îles-de-la-Madeleine, il faut aussi tenir compte du vent et de la migration des dunes. Les vents dominants du secteur ouest ont tendance à charrier le sable des plages vers l'est, ce qui contribue à retirer le sable des plages situées à l'ouest des îles et à en déposer sur les plages situées du côté est. Ce processus de migration du sable par le vent explique en partie la migration vers le sud-est des Îles-de-la-Madeleine, le déficit en sable des plages situées à l'ouest des îles et l'accrétion observée pour les plages situées du côté est des Îles, surtout sur la Pointe de l'Est, Sandy Hook et la Dune du Sud.

5.3 Scénarios futurs

Le scénario S2 est le plus probable pour la région des Îles-de-la-Madeleine. Ce scénario prévoit une hausse du taux d'érosion côtière par rapport à la moyenne historique. Le recul du trait de côte pour 2050 devrait être en moyenne de 80 m pour les côtes basses sablonneuses et de 38 m pour les falaises rocheuses. Les périodes de 1977-1983 et de 1983-1992 sont, dans la majorité des cas, les périodes où le recul a été le plus important. Ces périodes sont caractérisées soit par une réduction importante de la couverture de glace (1977-1983), soit par une fréquence de tempêtes plus importante. De plus, les périodes de forte réduction de la couverture de glace correspondent aux périodes de forte érosion des plages. Les périodes aux hivers doux de 1977-1983 et de 1992-2001 correspondent aussi à un fort recul dans les falaises rocheuses sensibles au gel-dégel. Les conditions climatiques qui ont prévalu lors des périodes de forte érosion devraient devenir la « norme » dans le contexte du réchauffement climatique appréhendé. La hausse des températures hivernales et la réduction de la période glacielle envisagées par les modèles climatiques et océaniques se conjuguent à la hausse du niveau marin relatif; ces changements auront pour effet d'accroître la vitesse de recul des littoraux.

La hausse anticipée du niveau marin augmentera les risques de submersion et la fréquence des surcotes de tempêtes en dépit d'une baisse probable du nombre de tempêtes bleues et rouges. D'une manière globale, la hausse plus rapide du niveau de la mer devrait favoriser une augmentation de l'érosion à l'échelle de plusieurs décennies et de plusieurs siècles. La hausse du niveau moyen de la mer augmente les risques de submersion sur toutes les côtes basses, (p. ex., le chemin des Chalets). Les risques de surcote majeure (niveau supérieur à 2,4 m) sont aussi augmentés. Cette augmentation des risques de surcote s'accompagne d'un risque élevé que de fortes vagues se produisent en même temps qu'une surcote majeure du côté est des îles. La réduction probable du nombre de tempêtes bleues pourrait atténuer un peu ce risque, mais il est probable que cette réduction ne sera pas suffisante pour compenser l'impact de la hausse du niveau marin.



La diminution de la durée de l'hiver a un impact inconnu, mais probablement substantiel, sur la migration des dunes actives couvrant en partie les tombolos. En hiver, lorsque le sol et les plages sont gelés, la migration des dunes vers l'est est réduite ou arrêtée. Il est probable que la saison d'hiver plus courte augmente la perte de sable sur les plages situées du côté ouest des îles, et augmente l'apport de sable venant des dunes sur les plages situées du côté est. Dans les lagunes, une plus grande quantité de sable se dépose du côté ouest sous l'effet du vent. Le côté est des lagunes s'engraisse en sable par les goulets de tempête lors de surcotes, surtout du côté de la Dune du Sud.

Dans l'ensemble, les systèmes côtiers des Îles-de-la-Madeleine sont des systèmes très dynamiques depuis longtemps. La zone littorale des îles évolue très rapidement et les changements climatiques ont tendance à accélérer l'évolution normale des systèmes côtiers.

5.4 Solutions d'adaptation

Les secteurs principaux ayant fait l'objet de propositions d'adaptation de la part du comité sont : la route de la Martinique, la route de Pointe-aux-Loups et le secteur de Cap-aux-Meules.

5.4.1 Route 199, secteur de la Martinique

La route 199², dans ce secteur, est enrochée sur une longueur de 1200 m. La route est vulnérable parce qu'elle est construite sur un mince cordon dunaire et ne peut être déplacée sans envisager un empiètement dans la lagune. Les protections existantes sont constituées de pierre de carrière des Îles, et ne sont pas de qualité suffisante pour supporter une tempête majeure. La route est exposée aux surcotes et aux vagues du nord-est et de l'est causées par les tempêtes bleues. La disparition des glaces augmente le nombre de vagues et la hausse du niveau de la mer augmente les risques de surcote pour cette plage. L'empierrement a causé un abaissement de la plage qui a pratiquement disparu dans la portion nord de l'empierrement. Dans son état actuel, cette portion de la route est devenue très vulnérable à une tempête majeure du type de l'ouragan Blanche qui a frappé les Îles le 28 juillet 1975. Une tempête de cette envergure pourrait provoquer la destruction de la route sur plusieurs centaines de mètres, isolant pour une période indéterminée la population de Havre-Aubert. Ce secteur devrait donc recevoir une attention prioritaire.

Le comité est d'avis que poursuivre l'empierrement est à la fois coûteux, dommageable au plan environnemental et peu efficace. Pour renforcer l'empierrement existant, il serait nécessaire d'augmenter la taille et la qualité des pierres qui devraient alors être importées puisqu'on ne trouve pas de pierre de la qualité requise aux Îles.

Le comité suggère plutôt d'examiner la possibilité d'une recharge majeure pour reconstituer la plage détruite. La quantité de sable nécessaire serait de l'ordre de 100 000 m³. Idéalement, la solution serait de revaloriser une partie des 250 000 m³ de sable dragués par la Mine Seleine pour l'entretien périodique (aux cinq ans environ) du chenal d'accès de la mine.³

Il serait aussi possible de prélever du sable dans une zone d'accumulation (extrémité de Sandy Hook ou côté sud de la plage de la Martinique), mais cette solution exigerait une approbation environnementale. La suggestion d'une recharge en sable implique un entretien périodique

2 Cette route est sous la responsabilité du ministère des Transports.

3 Lors des consultations interministérielles requises dans le processus d'évaluation environnementale de ce projet, des discussions et des négociations ont été entreprises entre la Mine Seleine, le ministère des Transports et diverses organisations gouvernementales, tant fédérales que provinciales, responsables de l'approbation du dragage et des rejets en mer (MDDEP, MSP, MPO, EC, etc.).

comprenant des recharges d'appoint pour compenser les pertes, la mise en place de capteurs de sable pour éviter l'ensablement de la route (végétation de dune ou clôtures à sable) et probablement la mise en place de ralentisseurs de transit sédimentaire sur le haut de plage (épis légers ou équivalent). Cette approche semble être la seule qui permette de conserver la plage dans son intégrité tout en protégeant la route. Elle assurerait une meilleure protection contre la submersion et les tempêtes extrêmes parce que le sable dissipe beaucoup mieux l'énergie des vagues qu'un empierrement. Il est probable que cette méthode soit aussi la moins coûteuse sur un horizon de 35 ans (cette possibilité devra faire l'objet d'une analyse coûts-avantages qui s'appuiera sur des critères de faisabilité technique, financière, économique et environnementale).

5.4.2 Route 199, secteur Pointe-aux-Loups

La route 199 reliant le secteur Pointe-aux-Loups à l'Île de Grande-Entrée est construite par endroits sur un étroit cordon sableux, bordé de part et d'autre par le golfe et par la lagune de Grande-Entrée. La route a déjà fait l'objet de tentatives d'empierrements (côté ouest) soutenus par quelques courts épis visant à maintenir la plage. Ces tentatives ont permis de maintenir la route, mais les infrastructures de protection sont maintenant fortement sollicitées et la zone menacée s'est déplacée et agrandie. L'érosion se produit non seulement du côté ouest (golfe), mais aussi côté lagune, ce qui aggrave le problème.

Dans le secteur de Pointe-aux-Loups, la plage subit un déficit en sable aggravé par plusieurs facteurs anthropiques, dont la rétention du sable par le quai de Pointe-aux-Loups et l'activation du transit sableux causé par les empierrements. Ces facteurs s'ajoutent à l'effet de l'augmentation du nombre de vagues du nord-ouest (tempêtes vertes), elle-même causée par la réduction de la période d'inhibition des vagues par les glaces de mer.

Bien que très vulnérable à l'érosion, la route 199 de Pointe-aux-Loups n'est pas menacée de rupture soudaine lors d'une tempête majeure. Ce secteur est affecté par les tempêtes vertes, qui causent surtout des décotes pendant la tempête. Les vagues du nord-ouest ont donc tendance à éroder la partie médiane de la plage lors de très fortes tempêtes. Cette érosion provoque un abaissement de la plage qui entraîne par la suite un réajustement de l'ensemble du profil de plage et un recul progressif du talus. La route est donc exposée à des dommages progressifs plutôt qu'à une rupture soudaine lors d'une tempête.

Puisqu'on ne peut envisager de déplacer la route dans la lagune, ce qui menacerait la lagune à court terme, la solution de protection pourrait s'avérer la seule option. Les protections actuelles peuvent tenir le coup pendant quelques années, mais elles devront être renforcées ou améliorées. Les recharges en sable ou la reconstruction des talus en réutilisant le sable dragué dans le port peuvent contribuer à compenser le déficit en sable dans la zone vulnérable. Le

comité propose d'expérimenter une combinaison de reconstruction des talus avec le sable récupéré du dragage du port de Pointe-aux-Loups ou de la Mine Seleine si possible. Un suivi de ces recharges et l'expérimentation de méthodes de captage améliorées pour réduire les pertes et augmenter la résistance du talus à l'érosion pourraient être testés. En parallèle, il sera sans doute nécessaire de renforcer les protections existantes, d'allonger les épis, d'en ajouter si nécessaire et de faciliter la rétention du sable avec des capteurs de haut de plage.

Il n'est pas recommandé, pour le moment, de procéder à une recharge massive comme celle proposée pour la plage de la Martinique. Toute cette zone est en déficit sédimentaire et une recharge massive seule ne serait pas efficace parce que les courants d'arrachement, nombreux dans ce secteur, pourraient dégarnir la zone rechargée très rapidement.

5.4.3 Secteur de Cap-aux-Meules

Le troisième secteur prioritaire est la falaise qui borde Cap-aux-Meules entre le quai du traversier et Le Gros Cap et qui comprend le secteur de la route des Chalets. Tout ce secteur est en érosion. Le taux de recul des falaises et les risques de submersion (secteur des chalets) devraient augmenter avec la hausse du niveau de la mer. Le nombre de vagues des tempêtes bleues (vagues des secteurs est et nord-est) devrait demeurer sensiblement le même puisque la réduction du nombre de ces tempêtes sera vraisemblablement compensée par la durée plus courte de la saison de glaces de mer.

Le secteur de Cap-aux-Meules est une zone urbanisée où l'on retrouve une importante concentration de commerces et de services publics – pipeline, hôpital, cimetière, piste cyclable, étangs d'épuration, etc. Toutes ces infrastructures sont situées à faible distance de la falaise de grès en recul rapide. La plupart des falaises de ce secteur contiennent des failles qui s'élargissent et s'approfondissent sous l'action des vagues de tempête. Le recul de cette falaise menace donc des infrastructures critiques en zone urbaine.

La solution proposée par le comité est de protéger ce secteur, même si cela comporte deux inconvénients importants. D'abord, l'érosion de cette falaise est la principale source de sable qui alimente le secteur du chemin des Chalets et la partie nord de la plage de la Martinique. L'arrêt complet de l'érosion de tout ce secteur à la suite de travaux de protection priverait de sable des plages déjà sujettes à un déficit en sable. Ensuite, le paysage sculptural de la côte et les falaises magnifiques du secteur de Cap-aux-Meules sont un attrait touristique certain. Or, l'attrait de ces falaises est un produit de l'érosion qui sera perdu si toute cette côte est enrochée.

Les solutions retenues devraient le plus possible éviter d'altérer les attraits touristiques que constituent ces falaises, comme le feraient des ouvrages lourds d'empierrement massif. L'effort de protection serait limité autant que possible aux zones où se trouvent des infrastructures critiques menacées.

La zone est jugée trop dynamique pour qu'une recharge globale soit possible, à moins de construire des épis ou des protections assez massives pour confiner le sable. Il est possible que certains secteurs où des plages encaissées entre des falaises existent déjà puissent faire l'objet de petites recharges localisées. Dans les zones où la côte sera stabilisée par des enrochements, la perte de sable devrait, autant que possible, être compensée par des apports locaux (revalorisation du sable de dragage du port de Cap-aux-Meules si ce sable est propre).



Bien qu'il ne s'agisse pas d'infrastructures essentielles, le comité s'est penché sur le secteur du chemin des Chalets. Ce secteur est situé dans un endroit impossible à protéger à cause de son exposition à la submersion. Les chalets sont construits dans une partie très basse de la côte sur un mince cordon de sable séparant le golfe d'un marais. Ce secteur est très exposé à une surcote majeure qui pourrait isoler les résidents et même, dans un cas extrême, mettre leur vie en danger. La seule solution possible dans ce cas est le déplacement de bâtiments.

Conclusion

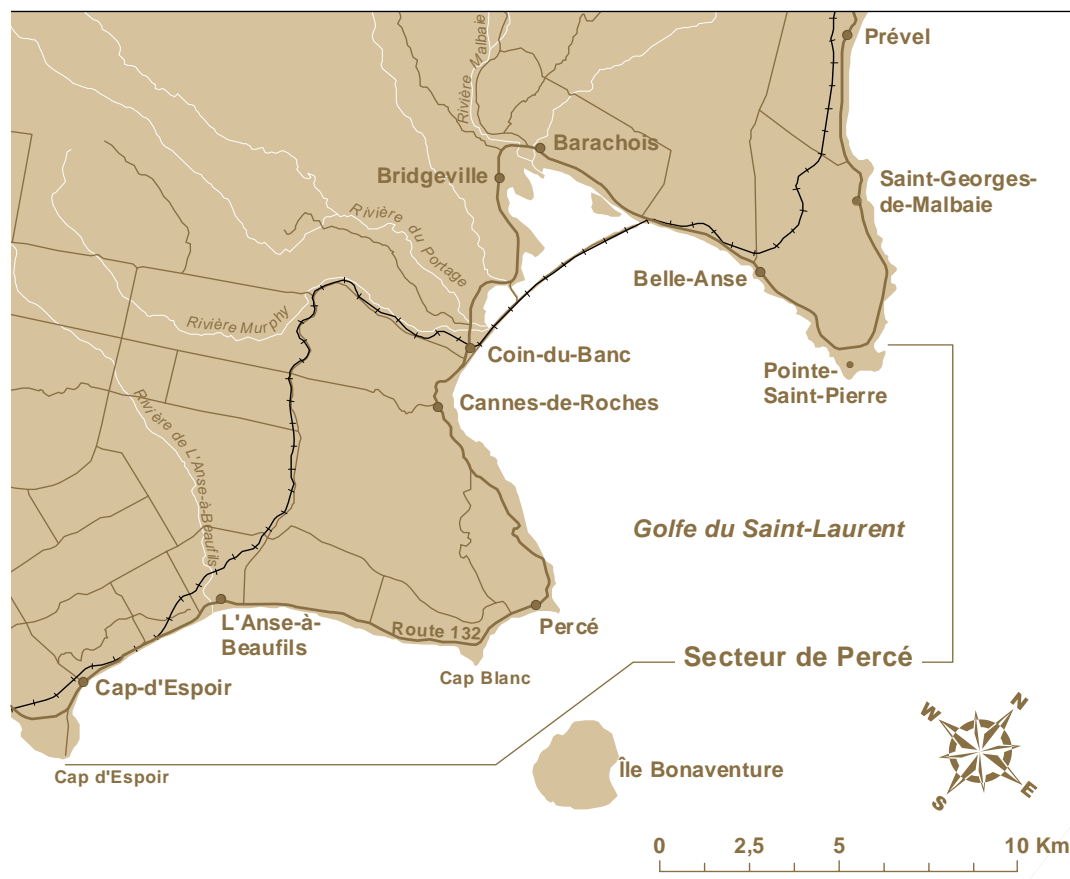
En résumé, l'érosion des berges augmentera aux Îles-de-la-Madeleine, causant une perte nette de terrains constructibles parce que les secteurs où se produisent des avancées de la côte sont presque tous situés dans des zones inconstructibles (dunes, tombolos, flèches). Le comité des Îles-de-la-Madeleine a proposé des solutions fondées principalement sur un scénario S2 d'augmentation des taux d'érosion dans les zones déjà sujettes à l'érosion. Les solutions choisies visent à maintenir autant que possible l'intégrité des systèmes de plages et des paysages partout où c'est possible en évitant les méthodes qui rigidifient la côte et qui provoquent l'abaissement des plages. Le secteur le plus à risque d'une coupure du lien routier est celui de la Martinique. Dans ce secteur, la solution la plus efficace semble être une recharge en sable et un contrôle du transit de haut de plage. Le secteur de Pointe-aux-Loups ne présente pas autant de risque de

coupure brutale que la Martinique, mais il est le plus affecté à court terme par les changements climatiques. Les protections de la route devront être renforcées et le talus, reconstitué à l'aide de la revalorisation de sable dragué au cours de prochaines années. Dans le secteur de Cap-aux-Meules, une protection s'impose. Des solutions visant à rehausser les plages encastrées entre les pointes rocheuses et à amortir l'impact des vagues dans les fractures devraient être testées dès que possible.

6. Région de Percé

Le site témoin de Percé s'étend de Cap-d'Espoir à Pointe-Saint-Pierre. Cette côte est constituée principalement de falaises rocheuses (76 %) dont la plupart sont de hautes falaises de roches sédimentaires de la formation Bonaventure des Appalaches (carbonifère) et des grès et calcaires de Gaspé (silurien/dévonien). Les terrasses de plage représentent 12 % de la côte et occupent généralement le fond d'anses rocheuses. Une flèche littorale à marais maritime occupe à elle seule 11 % de la côte, elle ferme le barchois de la Malbaie, entre Coin-du-Banc et Barchois (figure 16).

FIGURE 16 Site témoin de Percé



6.1 Bilan historique

En 2006, la majeure partie des côtes est affectée par l'érosion (80 %) et 18 % sont artificialisées. Seulement 2 % des côtes sont considérées comme stables, c'est-à-dire colonisées par une végétation durable. Dans le cas de la région de Percé, il faut considérer la grande proportion de falaises rocheuses qui évoluent très lentement. Elles sont affectées par plusieurs processus actifs, mais ne présentent pas de forts taux de recul.

L'évolution historique des falaises rocheuses du littoral de Percé de 1934 à 2001 est marquée par des taux moyens de recul de l'ordre de 0,2 m/an avec un taux de maximum de l'ordre de 0,4 m/an pendant la période 1992-2001. Le secteur à flèche littorale du barachois de la rivière Malbaie et les terrasses de plage ont connu des périodes d'accrétion variant entre 0,30 et 0,45 m/an entre 1934 et 1963, et un recul de 0,08 à 0,22 m/an de 1963 à 2001.

6.2 Dynamique côtière

Percé est située dans une zone de subsidence. Le niveau moyen relatif de la mer augmente de plus en plus rapidement, ce qui augmente la hauteur des surcotes et, par conséquent, la puissance des vagues atteignant le pied des falaises. Dans la région de Percé, où les valeurs de recul sont faibles, les apports des rivières plutôt négligeables et le transit sédimentaire très limité, la hausse du niveau de la mer provoque par un ennoiment des plages qui se traduit, peu importe le type de côte, par une réduction graduelle de la largeur des plages de 54 % entre 1934 à 2001. Les terrasses de plage ayant été artificialisées par des ouvrages de protection sont passées d'une moyenne de 34 m de largeur en 1934 à 10 m en 2001 (moins 70 %). La plage a presque complètement disparu à certains endroits.

Les principaux apports sableux qui alimentent les plages proviennent de l'érosion des falaises rocheuses. Les pointes rocheuses forment des barrières au transit sédimentaire, et plusieurs anses se retrouvent ainsi sans apport extérieur de sable. Dans le secteur d'étude, une seule rivière importante, la rivière Malbaie, se jette à la mer. Sa charge sédimentaire est majoritairement déposée à l'intérieur du barachois et aucun delta n'est présent à l'embouchure. La durée de la saison de glace de mer diminue, de sorte que les tempêtes hivernales peuvent développer des vagues pendant une plus grande partie de l'année.

La côte de Percé est l'une des plus sollicitées par les vagues de tempête de tout le golfe du Saint-Laurent. Cette côte est exposée aux vagues des tempêtes bleues (nord-est) et rouges (sud-est) qui se produisent le plus souvent en condition de surcote. Ces vagues disposent, pour se développer, d'un long fetch atteignant plus de 400 km. Lorsqu'elles atteignent la côte, les vagues peuvent excéder 10 m de hauteur au large de Percé lors de fortes tempêtes. L'orientation et la composition des plages sont généralement typiques des plages modelées par les tempêtes.



Quant aux côtes rocheuses, elles sont affectées par les vagues de tempêtes, les processus cryogéniques et hydrogéologiques. Le mode de recul des falaises rocheuses est fortement conditionné par l'inclinaison des couches sédimentaires et la présence de couches tendres qui entraînent la formation de surplombs et d'effondrements. Les basses et les moyennes falaises sont davantage influencées par le sapement des vagues suivi, dans une moindre mesure, par l'action du gel et du dégel tandis que les hautes falaises sont d'abord affectées par le gel et le dégel et ensuite par les pluies.

La relation entre le climat et l'évolution côtière pour la région de Percé est plus difficile à établir en raison de la résolution spatiale et temporelle des données. Seules les données du secteur de la ville de Percé sont homogènes pour l'ensemble des périodes, et d'une qualité suffisante pour permettre une comparaison entre le climat et l'évolution côtière. Les résultats montrent que la période où le recul des falaises est le plus élevé correspond à la période récente (1992-2001). Cette période a enregistré le plus grand nombre de redoux hivernaux, de pluies hivernales et de pluies intenses, ainsi que des conditions de glaces de mer très mobiles.

Dans le secteur du barachois de la rivière Malbaie, la répartition des vagues des tempêtes bleues et rouges conditionne l'état de la plage. Cette flèche est artificialisée par la présence de la voie ferrée et d'empierrements protecteurs qui empêche toute modification de l'orientation générale de la plage. Les tempêtes bleues (vagues du nord-est) favorisent un transport littoral vers le sud de la plage, érodant la partie nord et engraisant le côté sud. Les tempêtes rouges (vagues du sud-est) font l'inverse. Avant 1992, les tempêtes bleues et rouges étaient en nombre à peu près égal, soit en moyenne 4 tempêtes bleues et 4,5 tempêtes rouges par année. À partir de 1992, le nombre de tempêtes bleues diminue à 3,5 par année alors que les rouges augmentent à 5,5 par

an. La plage a tendance à reculer du côté sud et le talus subit une forte érosion; le côté nord de la plage tend plutôt à s'engraisser (près du pont du barachois).

6.3 Scénarios futurs

Le scénario S2 est le plus probable pour la région de Percé. Ce scénario prévoit pour 2050 un recul moyen de 27 m pour les côtes basses sablonneuses et de 16 m pour les falaises rocheuses. Les valeurs élevées mesurées pour la période récente (1992-2001) sont un bon indicateur des conditions qui devraient prévaloir pour le futur. Le scénario S2 prévoit une accélération de l'érosion côtière causée par la hausse du niveau de la mer et la réduction du couvert de glace. Les redoux hivernaux, les cycles de gel et de dégel et les pluies hivernales plus nombreux devraient encore contribuer à augmenter l'érosion des falaises rocheuses.

Même si les taux de recul des falaises devaient augmenter les apports sédimentaires vers les plages, ces apports ne seraient pas suffisants pour compenser la hausse du niveau de la mer et la hausse du nombre de tempêtes rouges effectives. Dans certains secteurs, la diminution de la largeur des plages va se poursuivre jusqu'à leur disparition. Les données préliminaires de modélisation des tempêtes suggèrent que les plages orientées nord-sud devraient s'éroder du côté sud et s'engraisser du côté nord.

La flèche du barachois de la rivière Malbaie est un bon exemple de cette tendance à la prédominance accrue des tempêtes rouges par rapport aux bleues. Cette plage est soumise au régime des vagues de tempêtes bleues et rouges (vagues du nord-est et du sud-est). D'après les simulations préliminaires, le nombre de tempêtes rouges effectives a tendance à augmenter lors d'hivers doux (période 1992-2006) alors que le nombre de tempêtes bleues effectives diminue. On peut donc considérer que le transport net en direction nord sera activé pour cette plage qui s'érodera côté sud et s'engraissera à son extrémité nord.

La plage du barachois de la rivière Malbaie recevra probablement plus de sédiments au total puisque la hausse du niveau de la mer, les redoux et les pluies hivernales plus nombreuses et la disparition des glaces auront pour effet d'activer l'érosion des falaises qui bordent la plage. Cette érosion accrue augmentera l'apport sédimentaire vers la plage de Barachois, ce qui aura pour résultat d'augmenter le taux d'accrétion côté nord. Comme le côté sud de la flèche ne peut bouger parce qu'il est empierré, on peut s'attendre à une disparition partielle de la plage côté sud et, si rien n'est fait, à une destruction par les tempêtes des protections actuelles du chemin de fer dans la zone où la palissade de bois est déjà fortement détériorée.

6.4 Solutions d'adaptation

Le secteur de Percé sera affecté par la hausse du niveau de la mer, par la disparition progressive des glaces et par l'augmentation probable des processus cryogéniques et des pluies diluviennes. C'est durant la période 1992 à 2006 que taux d'érosion ont généralement été les plus forts. La plupart des falaises ont connu un recul maximum pendant cette période, et le scénario S2 est le plus susceptible de prévaloir au cours des prochaines décennies.

Après avoir examiné les scénarios d'érosion pour la région de Percé, le comité de concertation a déterminé les enjeux et proposé les pistes de solutions suivantes.

Dans le secteur de Cap d'Espoir, le phare et certains gîtes sont dans la zone à risque délimitée par le scénario S2. Quelques infrastructures municipales et la route 132 sont aussi situées dans la zone vulnérable. Le comité est d'avis que le ministère des Transports du Québec devrait examiner la possibilité d'un déplacement de la route 132 vers l'intérieur des terres, dans le secteur du 2^e rang, afin de l'éloigner des zones à risque.

Dans le secteur de L'Anse-à-Beaufils, les plages se sont beaucoup réduites (90 %), et aucune recharge n'est possible dans ce secteur.

Dans le secteur du Cap Blanc, (Côte Surprise), les vagues ont tendance à creuser les couches sédimentaires plus friables à la base de la falaise. Dans ce secteur, des éboulements soudains sont fréquents. Il est donc recommandé de procéder à des expertises géotechniques détaillées pour les secteurs bâtis.



Dans la zone emmurée de Percé village, le trait de côte s'est maintenu, mais la largeur des plages s'est réduite de façon importante. La possibilité de restaurer la plage par une recharge en sable a été discutée. Le quai a agi comme un épi et capturé du gravier provenant de la zone du Mont Joli. La redistribution du gravier situé du côté du Mont Joli à l'est du quai sur la plage est déjà effectuée. Toutefois, il serait plus avantageux que ce gravier soit déposé en partie de l'autre côté du quai, afin d'alimenter la plage du côté ouest du quai.



Un problème de submersion a été relevé dans la partie la plus basse du village : d'après les résidents, certains secteurs ont été inondés par le passé lors de fortes tempêtes. Étant donné la hausse anticipée du niveau de la mer, cette question requiert des données plus précises pour que l'on puisse évaluer le risque et déterminer les mesures appropriées.

Dans le contexte où le village de Percé fait partie d'un arrondissement naturel protégé, les solutions d'adaptation à l'impact des changements climatiques sur la zone côtière devraient intégrer trois objectifs simultanés, soit : la restauration de la zone côtière vers son état le plus naturel possible, la mise en valeur de ce secteur à des fins écotouristiques et l'amélioration des infrastructures touristiques déjà en place.

Dans le secteur de l'Anse du Nord, les scénarios S2 et S3 prévoient des taux de recul importants parce que les falaises de ce secteur sont très friables. Ce secteur regroupe plusieurs bâtiments à risque : restaurants, usine d'épuration, garage municipal, motels. L'érosion du cap est surtout causée par le cycle de gel et de dégel et par l'écoulement souterrain, et ce type d'érosion est très difficile à stopper. Le comité a donc évalué la possibilité de déplacer les bâtiments. Pour les commerces qui sont situés dans un secteur de terrasses de plage, il serait

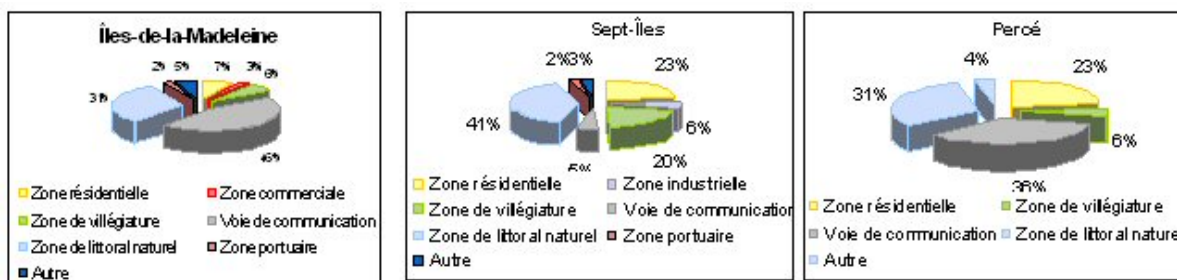
possible de les protéger avec un mur, mais le résultat serait de faire disparaître la plage. Étant donné l'exposition très directe de cette plage aux vagues du secteur est, il faudrait procéder à des études précises pour évaluer les méthodes de protection les plus pertinentes (brise-lames, épis, murs ou combinaison de plusieurs méthodes).

Dans le secteur Canne de Roches, la plage du Barachois est menacée surtout du côté sud de la plage, à la naissance (pédoncule) de la flèche. D'après les scénarios climatiques les plus probables, le transport du sable en direction nord devrait augmenter au détriment du transport en direction sud. Dans la zone affectée, la palissade de bois et les enrochements ont déjà subi des dommages considérables et la voie ferrée est menacée. Une simple restauration des protections existantes aura pour effet de faire disparaître la plage située dans la zone à risque. Si l'on désire garder la voie ferrée sur la flèche, il faudrait envisager l'ajout d'épis chargés ou autres ralentisseurs de transit pour compenser l'effet de ressac dans la zone affectée. Des études complémentaires sont aussi nécessaires avant de procéder à des actions à long terme.

7. Communautés et aspects socio-économiques

La figure 17 présente la répartition des usages de la zone côtière en fonction de grands secteurs socio-économiques et environnementaux (résidentiel, commercial) pour chaque site témoin [21]. Selon une estimation très conservatrice, qui exclut les risques de submersion et ne tient compte que de la perte foncière des bâtiments et des infrastructures, les enjeux économiques liés à l'érosion sont d'environ 70 millions de dollars pour l'ensemble des trois sites témoins. L'importance des coûts souligne néanmoins l'envergure des enjeux économiques, compte tenu du fait que ces trois zones ne représentent qu'une faible proportion des zones côtières à risque au Québec.

FIGURE 17 Répartition des usages de la zone côtière pour chacune des trois régions témoins [21]



Sur le plan des perceptions, une consultation a été menée auprès des résidents riverains directement concernés par la problématique, quant à leurs préoccupations et opinions sur l'érosion des berges et la zone côtière [23]. La perception des riverains exposés à l'érosion des berges coïncide avec les observations sur la permanence de l'érosion. Lorsque l'érosion est manifeste (côtes à falaises en recul historiquement ou terrasses sableuses en recul depuis suffisamment longtemps), les résidents riverains expriment leur inquiétude. Leurs préoccupations sont d'autant plus fortes que les résidences sont menacées à court terme. Dans les zones en accrétion où la ligne de rivage subit des avancées et des reculs, les préoccupations à l'égard de l'érosion diminuent.

Les résidents riverains de Percé et des Îles-de-la-Madeleine croient, à 70 %, que les changements climatiques sont une cause de l'érosion. À Sept-Îles, seuls 45 % des répondants associent l'érosion aux changements climatiques, mais 68 % l'attribuent à des causes d'origine anthropique, contre 58 et 53 % pour les deux autres régions.

La plupart des riverains aux prises avec l'érosion privilégient les méthodes de protection lourdes (empierrement, épis, murs), considérées comme plus rassurantes. Plus la préoccupation relative à l'érosion est élevée, plus les méthodes lourdes sont privilégiées. La plupart des personnes interrogées comprennent bien les mécanismes de base de l'érosion et les enjeux environnementaux liés aux méthodes de protection. Dans certains cas, lorsque les personnes interrogées ont constaté les répercussions indésirables de certaines méthodes lourdes, elles privilégient des méthodes plus légères (recharge, épis légers en bois ou autres).

8. Conclusion

L'étude montre que les zones côtières du golfe du Saint-Laurent seront affectées par les changements climatiques. Dans les trois sites témoins de l'étude, soit Percé, Sept-Îles et les Îles-de-la-Madeleine, l'érosion des berges et les risques de submersion ont augmenté pendant le 20^e siècle et devraient continuer d'augmenter au cours des prochaines décennies. Les principaux facteurs qui contribuent à cette augmentation des risques côtiers sont : la hausse du niveau de la mer, la disparition progressive des glaces de mer et des glaces de rives, les changements du régime des tempêtes et les modifications de la fréquence des cycles de gel et de dégel, des redoux hivernaux et des pluies hivernales.

- La hausse du niveau de la mer observée à l'échelle de la planète touche aussi le golfe du Saint-Laurent. Cette hausse du niveau marin est plus rapide aux Îles-de-la-Madeleine et dans la baie des Chaleurs que sur la Côte-Nord parce que les deux premières régions sont en subsidence au plan géologique alors que la Côte-Nord est en émergence. Comme le rehaussement du niveau marin s'accroît, l'impact sur les risques de submersion et sur les taux d'érosion deviendra de plus en plus important avec le temps et continuera à s'aggraver à long terme.
- Les simulations de la dynamique des glaces réalisées pendant l'étude montrent que la durée de la saison de glace diminuera d'environ 6 semaines (65 %) d'ici 2050. Les glaces de mer seront plus mobiles, surtout dans le nord du golfe.
- Trois types de tempêtes (identifiées par les couleurs rouge, bleu et vert) atteignent les sites témoins de l'étude. Ces tempêtes produisent des vagues d'une hauteur de 4 m à 10 m. Les tempêtes rouges se caractérisent par des vagues provenant du sud-est qui affectent surtout les régions de Percé et de Sept-Îles. Les tempêtes bleues produisent des vagues en provenance du nord-est et affectent Percé et le côté est des Îles-de-la-Madeleine. Enfin, les tempêtes vertes, qui produisent des vagues du nord-ouest, affectent principalement le côté ouest des Îles-de-la-Madeleine. Environ 30 à 40 % de ces tempêtes se produisent en hiver. Une modélisation du climat futur et de la dynamique des glaces a indiqué que le nombre de vagues produites par ces tempêtes augmentera, surtout en raison de la diminution de la durée de la saison de glace hivernale, particulièrement en ce qui concerne les tempêtes rouges et vertes.
- La fréquence des redoux hivernaux, des pluies hivernales et des précipitations intenses a contribué à accroître l'érosion des falaises observée entre 1992 et 2006. Bien qu'on anticipe une hausse du nombre de redoux hivernaux, de cycles de gel et de dégel et de la fréquence des pluies hivernales, il sera nécessaire de vérifier ces scénarios climatiques pour le golfe du Saint-Laurent dans le cadre d'études futures pour consolider les résultats.

L'étude a aussi permis d'évaluer la vulnérabilité socio-économique et la perception des populations côtières des trois sites témoins. Les résultats mettent en relief l'importance économique des enjeux dans ces régions. Malgré une évaluation conservatrice ne couvrant qu'une partie des enjeux (valeurs foncières à risque et coût de remplacement des infrastructures), l'impact économique de l'érosion est estimé à plus de 70 millions de dollars pour les trois sites témoins.

L'étude a permis de fournir aux municipalités des sites témoins des cartes détaillées représentant le scénario le plus plausible de l'évolution du trait de côte d'ici 2050, compte tenu de l'impact appréhendé des changements climatiques. Ces cartes peuvent être utilisées pour soutenir le développement d'outils de planification et d'aménagement du territoire.

L'originalité de la structure organisationnelle de l'étude a été la formation de comités de concertations issus du milieu pour chacun des trois sites témoins. Ces comités avaient pour tâche d'examiner les options d'adaptation des zones côtières face aux changements climatiques avec le soutien de l'équipe scientifique de l'étude. Les propositions d'adaptation décrites dans ce rapport émanent de ces comités et sont les résultats d'un effort d'intégration de l'ensemble des aspects de la problématique incluant les aspects scientifiques, sociaux, économiques et environnementaux. Cet effort concerté de recherche de consensus entre les acteurs du milieu régional, des intervenants des divers paliers de gouvernement et des chercheurs est une première en matière de gestion intégrée des zones côtières du Québec dans un contexte de changement climatique.

Dans l'ensemble, les participants aux comités de concertation ont privilégié les solutions préventives, comme le zonage et l'aménagement du territoire lorsque c'était possible. Dans les secteurs déjà bâtis, les participants ont généralement optés pour des méthodes permettant un développement durable de la zone côtière, en évitant autant que possible de rigidifier les milieux actifs comme les plages, les terrasses de plages, les flèches littorales, etc. Les participants ont aussi choisi d'établir d'abord une priorité ou une hiérarchie des secteurs à protéger, réservant l'utilisation de méthodes lourdes aux infrastructures hautement prioritaires ou de grande valeur. Partout où c'était possible, les membres des comités ont privilégié les approches permettant de conserver et, parfois, de restaurer les plages, considérées comme des milieux menacés.

L'étude a contribué à améliorer la connaissance des liens entre le climat et la dynamique côtière, mais il reste beaucoup de travail à faire pour représenter les processus de manière quantitative. Par exemple, le répertoire de 1200 tempêtes développé lors de l'étude permet d'améliorer les connaissances de l'impact du régime des tempêtes sur les berges. Il reste cependant à comprendre pourquoi certaines de ces tempêtes produisent de fortes surcotes alors que d'autres, très semblables, ne le font pas. On ne dispose pas encore d'outils statistiques fiables pour estimer les risques liés aux conditions extrêmes de surcotes et de vagues. Les modèles et

les méthodes développées lors de l'étude fournissent la base de données indispensable au développement de modèles statistiques et physiques présentement en cours de développement.

Des progrès significatifs ont aussi été accomplis en ce qui concerne les connaissances sur les processus d'érosion du littoral marin se produisant en conditions hivernales; l'étude a mis en lumière l'importance des glaces flottantes et des glaces de rives, des processus cryogéniques, des redoux hivernaux et d'autres phénomènes qui jouent un rôle très significatif dans le golfe du Saint-Laurent. Cependant, il n'a pas été possible de modéliser tous ces processus en détail pour les conditions du climat futur. Les outils existent et l'étude a permis de développer des méthodes permettant d'exploiter ces outils de manière à mieux évaluer l'impact des changements climatiques sur les conditions hivernales. Les prochaines recherches devraient permettre de compléter le travail amorcé lors de l'étude.

L'amélioration des connaissances sur les zones côtières est ralentie par l'absence ou la rareté de données fiables sur plusieurs aspects, comme les données bathymétriques des zones peu profondes, les données de vagues, les données sur les sédiments, les données météorologiques maritimes et les données topographiques à haute résolution. L'acquisition de données de meilleure qualité est une condition essentielle pour que des progrès significatifs puissent être réalisés. Un projet d'étude comme celui dont il est question ici ne saurait à lui seul remplacer l'acquisition de bonnes séries chronologiques de données par les organisations responsables. Par exemple, l'absence quasi-totale de données fiables sur le régime des vagues du golfe est regrettable.

Enfin, la formule participative élaborée dans le cadre de l'étude s'est avérée une excellente idée. La tenue d'ateliers en début de projet, la formation des comités de concertation et les échanges réguliers entre des représentants du milieu et l'équipe scientifique de l'étude ont permis de développer une approche d'adaptation fondée sur la recherche de consensus et sur le leadership régional. Les résultats de l'étude montrent que cette approche favorise le dialogue, le transfert de connaissances, les capacités d'adaptation et la recherche et développement appliqués [24]. Cette approche mérite ainsi d'être étendue à d'autres régions et à d'autres contextes. Elle permet une meilleure intégration des aspects socio-économiques, environnementaux et scientifiques dans la prise de décision. Cette méthode pourrait être appliquée à la recherche de solution d'adaptation dans de nombreux domaines où il est important d'intégrer les préoccupations sociales et économiques et de tenir compte des aspects politiques lorsqu'il est essentiel d'harmoniser les actions de divers paliers de gouvernement et des acteurs du milieu.

9. Références

1. GIEC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR et H.L. MILLER (eds.), Cambridge (UK) et New York, NY, USA, Cambridge University Press.
2. GIEC (2001). *Climate Change 2001 : The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, HOUGHTON, J.T., Y. DING, D.J. GRIGGS, M. NOGUER, P.J. VAN DER LINDEN, X. DAI, K. MASKELL et C.A. JOHNSON (eds.), Cambridge (UK) et New York, NY, USA, Cambridge University Press, 881pp.
3. BOURQUE, A. et G. SIMONET (2008). « Québec », *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, LEMMEN, D.S., F.J. WARREN, J. LACROIX et E. BUSH (éditeurs), Ottawa (Ontario), Gouvernement du Canada, pp. 171-226
4. MCCULLOCH M. M., D.L. FORBES, R.W. SHAW and the CCAF-A041 Scientific Team (2002). *Coastal Impact of Climate Change and Sea-Level Rise on Prince Edward Island. Synthesis Report. Meteorological Service of Canada*, Environment Canada, Geological Survey of Canada (File 4261). 62 p.
5. FORBES, D.L., G.S. PARKES, G.K. MANSON et L.A. KETCH (2004). « Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence », *Marine Geology*, 210, p. 169-204.
6. PARKES, G.S., D.L. FORBES et L.A. KETCH (2006). *Élévation du niveau de la mer et subsidence régionale*. In DAIGLE, R. (dir.) (2006). *Impacts de l'élévation du niveau de la mer et du changement climatique sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick*. Environnement Canada, 644 p.
7. TARASOV, L. et W.R. PELTIER, 2004. « A geophysically constrained large ensemble analysis of the deglacial history of the North American ice-sheet complex », *Quaternary Science Reviews*, 23, p. 359-388.
8. XU, Z., F.J SAUCIER et D. LEFAIVRE (2006). « Water Level Variations in the Estuary and Gulf of St. Lawrence », *Presentation at the Understanding Sea-level Rise and Variability Workshop, June 6-9, 2006, Paris, France*.
9. BERNATCHEZ, P. et J.M. DUBOIS (2004), « Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien », *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 58, no 1, p. 45-71.
10. SAUCIER, F.J., F. ROY, D. GILBERT, P. PELLERIN et H. RITCHIE (2003). « Modeling the formation and circulation processes of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence », *Journal of Geophysical Research*, 108(C8), p. 3269-3289.
11. SAUCIER, F.J., J. CHASSÉ, M. COUTURE, R. DORAIS, A. D'ASTOUS, D. LEFAIVRE et A. GOSSELIN (1999). *The making of a surface current atlas of the St. Lawrence Estuary, Canada, Fourth international conference on computer modelling of seas and coastal regions*, BREBBIA C. A. & P. ANAGNOSTOPOULOS (eds.), J. Computational Mechanics, Wessex Institute of Technology Press, p. 87-97.

12. SENNEVILLE, S. et F.J. SAUCIER (2007). *Étude de sensibilité de la glace de mer au réchauffement climatique dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent*. Rapport préparé pour Ouranos et soumis le 30 octobre 2006.
13. SAVARD, J.-P., C. ROSU, P. GACHON, G. PACHER et M. CARRERA (2008). « Étude des tempêtes dans le golfe du Saint-Laurent, rapport sectoriel », *Étude de la vulnérabilité des communautés côtières de l'Est du Québec aux changements climatiques*, Ouranos. En préparation.
14. GACHON P., C. ROSU et J.-P. SAVARD (2008). « *Analyse des trajectoires et de l'intensité des dépressions dans le golfe du Saint-Laurent en lien avec le processus d'érosion des berges* rapport sectoriel », *Étude de la vulnérabilité des communautés côtières de l'Est du Québec aux changements climatiques*. Ouranos. En préparation.
15. PLUMMER D. A., D. CAYA, A. FRIGON, H. CÔTÉ, M. GIGUÈRE, D. PAQUIN, S. BINER, R. HARVEY et R. DE ELIA (2006). « Climate and Climate Change over North America as Simulated by the Canadian RCM », *Journal of Climate*, 19, p. 3112-3132.
16. XU, Z., F.J. SAUCIER, D. LEFAIVRE (2004). *Water Level Variations in the Estuary and Gulf of St. Lawrence - A Working Progress Report (rapport à Ouranos)*, 25 p.
17. JACOB D., W. PERRIE, B. TOULANY, F. SAUCIER, D. LEFEBVRE et V. TURCOTTE (2002). « Wave Model Validation in The St-Lawrence River Estuary », *7th International Workshop on Wave Hindcasting and forecasting*, CMOS, 2002.
18. BERNATCHEZ, P. et J.M.M. DUBOIS (2008). « Seasonal Quantification of coastal Processes and cliff Erosion on fine sediments shoreline in a Cold Temperate Climate, Ragueneau Region, Quebec », *Journal of Coastal Research*, vol. 24, p. 169-180.
19. GROLEAU, A., A. MAILHOT et G. TALBOT (2007). « Trend Analysis of Winter Rainfall over Southern Québec and New Brunswick (Canada) », *Atmosphere-Ocean*, 45 (3) 2007, p. 153-162.
20. MAILHOT, A., S. DUCHESNE, D. CAYA et G. TALBOT (2007). « Assessment of future change in Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM) », *J. of Hydrology*. Article accepté.
21. BERNATCHEZ, P., C. FRASER, S. FRIESINGER, Y. JOLIVET, S. DUGAS, S. DREJZA, et A. MORISSETTE (2008). *Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques*. Université du Québec à Rimouski, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières. En préparation.
22. DUBOIS, J.-M.M., P. BERNATCHEZ et J.-D. BOUCHARD (2005). *Évaluation préliminaire du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du Saint-Laurent*, Comité d'experts du Comité régional de coordination sur l'érosion des berges de la Côte-Nord, Gouvernement du Québec.
23. FRIESINGER, S. et P. BERNATCHEZ (2008). « Perceptions des communautés côtières du golfe du Saint-Laurent face aux changements environnementaux : aléas et adaptations, Québec, Canada ». *Actes du colloque International pluridisciplinaire sur le littoral : Le littoral : subir, dire, agir*, Lille, France, 13 p.
24. FUSSEL, H.-M. (2007). « Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons. », *Sustainability science*, 2 : 265-275.

