

Proposition d'un programme de surveillance de l'intégrité écologique de l'écosystème côtier pour les parcs nationaux du Canada, biorégion Québec-Atlantique.

Pour Parcs Canada

Section du Québec-Atlantique

Pascal Bernatchez

Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières

Université du Québec à Rimouski

Mars 2008



RÉALISATION

Pascal Bernatchez, Ph.D. Géomorphologie côtière et télédétection

Responsable du projet

Professeur-chercheur

Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières

Université du Québec à Rimouski

300, allée des Ursulines

Rimouski (Québec)

G5L 3A1, Canada

Téléphone : (418) 723-1986 #1257

Courriel : pascal_bernatchez@uqar.qc.ca

REMERCIEMENTS

L' auteur désire remercier les collaborateurs suivants :

- Claude Samson et Suzanne Dionne, Centre de service de Québec, Parcs Canada;
- Julie Bernier, Charles Kavanagh et Yann Troutet, Réserve de parc national du Canada de l' Archipel-de-Mingan;
- Daniel Sigouin, Jean-Guy Chavarie, Steve Pronovost et Serge Brodeur, Parc national du Canada Forillon;
- Maude Corriveau et Yvon Jolivet, Université du Québec à Rimouski pour la révision du rapport;
- Steeve Dugas, Université du Québec à Rimouski pour la cartographie.

RÉFÉRENCE COMPLÈTE

BERNATCHEZ, P. 2008. *Proposition d'un programme de surveillance de l'intégrité écologique de l'écosystème côtier pour les parcs nationaux du Canada, biorégion Québec-Atlantique*. Rapport de recherche remis à Parcs Canada. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR, 27 p.

Table des matières

Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
Résumé	vi
1. Introduction	1
2. Considérations théoriques sur le programme de surveillance de l'IE et niveau de référence	2
3. Identification des forces naturelles clés qui conditionnent la dynamique côtière	4
3.1. Rayonnement solaire	4
3.2. Climat	4
3.3. Événements météorologiques extrêmes	8
3.4. Hausse du niveau marin relatif	12
3.5. Régime hydrologique	12
3.6. Régime glaciaire	13
4. Les mesures de l'intégrité écologique de l'écosystème côtier	15
4.1. Bilan de l'évolution côtière	15
4.1.1. Déplacement de la ligne de rivage	15
4.1.2. Largeur des plages	20
4.1.3. Calcul du niveau de l'IE pour l'indicateur Bilan de l'évolution côtière (IEBEC)	21
4.2. Géodiversité des habitats côtiers	22
4.2.1. Superficie des habitats côtiers	22
4.2.2. Texture des substrats	22
4.2.3. Calcul du niveau de l'IE pour l'indicateur Géodiversité des habitats côtiers (IEGHC)	23
5. Conclusion	24
6. Références	25

Liste des figures

- Figure 1. Couverture de glace de mer dans le golfe du Saint-Laurent.....13
- Figure 2: Représentation cartographique du niveau de l'intégrité écologique de l'écosystème côtier basé sur le déplacement de la ligne de rivage. À noter que les données sont fictives. 19
- Figure 3. Exemple montrant la proportion (%) de points de mesure qui indiquent une érosion, une stabilité ou une accumulation de la plage pour trois périodes de temps (Îles-de-la-Madeleine). La période 2001-2007 indique une altération de la plage.....21

Liste des tableaux

Tableau 1. Principales variables à mesurer pour le suivi de la dynamique côtière.....	5
Tableau 2. Définition de paramètres climatiques.....	7
Tableau 3. Périodes d'enregistrements de différents paramètres climatiques aux stations météorologiques d'Environnement Canada (jusqu'en 2006).....	8
Tableau 4. Liste des événements de niveau d'eau supérieur à 3,00 m pour la période de 2000 à 2006 à Belledune, N.-B.	9
Tableau 5. Quelques définitions du vocable tempête.....	10
Tableau 6. Classification de la vitesse des vents selon l'échelle de Beaufort.....	11
Tableau 7. Exemple de grille d'évaluation pour mesurer le niveau de l'IE d'un écosystème côtier basé sur le déplacement de la ligne de rivage.	18
Tableau 8. Exemple de grille d'évaluation pour mesurer le niveau de l'IE d'un écosystème côtier basé sur la largeur des plages.	21

Résumé

En 2008, Parcs Canada doit mettre en place un programme de surveillance de l'intégrité écologique (IE) pour l'ensemble des parcs nationaux au Canada. À l'aide d'indicateurs et de mesures, ce programme doit permettre d'évaluer l'état de l'intégrité écologique (IE) des écosystèmes ainsi que l'efficacité des mesures de gestion mises en place pour assurer ou améliorer l'intégrité écologique des parcs. Les mesures de l'IE doivent tenir compte de la nécessité d'établir des cibles et des seuils. Les seuils vont permettre de déterminer si l'IE d'un parc est élevée, préoccupante ou altérée. Les objectifs de ce rapport sont d'identifier les mesures les plus pertinentes pour suivre la dynamique géomorphologique côtière pour les parcs nationaux du Québec-Atlantique, particulièrement pour la réserve de parc national du Canada de l'Archipel-de-Mingan (RPNCAM) et le parc national du Canada Forillon (PNCF).

Le rapport présente dans un premier temps les forces naturelles clés qui conditionnent la dynamique côtière. Ces forces naturelles, notamment le climat, les événements météorologiques extrêmes, la hausse du niveau marin et les régimes hydrologiques et glaciels, dirigent de manière importante le fonctionnement de l'écosystème côtier en ayant une influence directe et indirecte sur les processus physiques et écologiques, sur les ressources biologiques et les composantes abiotiques. Même si elles ne sont pas considérées comme des indicateurs proprement dit, le suivi de ces différentes variables va permettre de préciser les causes de la modification des écosystèmes côtiers et d'expliquer les variations enregistrées par les mesures de l'intégrité écologique. Ces informations permettront de mieux cibler les mesures de gestion à mettre en œuvre si des indicateurs de l'intégrité écologique montrent un niveau d'altération de l'écosystème.

Deux indicateurs sont proposés pour le suivi de la géomorphologie et de la dynamique côtière, soit le bilan de l'évolution côtière et la géodiversité des habitats côtiers. Ces deux indicateurs seront mesurés à l'aide de 14 indices selon différentes échelles spatiales et temporelles. À tous les cinq ans, en lien avec la remise d'un rapport sur l'état des parcs, les indicateurs seront caractérisés selon des mesures effectuées sur l'ensemble de l'écosystème côtier d'un parc afin de faire état des principaux problèmes écologiques que connaît chacun des parcs. Des relevés annuels sur des habitats-types ou sensibles permettront de détecter rapidement si des changements brusques mettent en péril l'IE afin de mettre en place des mesures de gestion adéquates.

Le bilan de l'évolution côtière sera quantifié à partir de deux variables clés, le déplacement de la ligne de rivage et la largeur des plages. Ces deux variables évoluent en réponse aux changements environnementaux et de la dynamique côtière. Elles indiquent directement le niveau de sensibilité des systèmes côtiers en réponse aux perturbations naturelles et anthropiques. Ces deux variables peuvent être quantifiées par la mesure de l'érosion, la stabilité ou l'accumulation du littoral. Le niveau de l'IE est évalué selon deux types de mesures complémentaires, dont l'une est basée sur la moyenne des taux de déplacement de la ligne de rivage et la largeur des plages et, l'autre, basée sur le niveau de stabilité du littoral calculé à partir de la proportion de bornes indiquant une érosion, une stabilité ou une accumulation. Les techniques de mesures préconisées sont

l'implantation d'un réseau de bornes de suivi qui servira aux relevés annuels et l'utilisation de données aéroportées (images numériques et Lidar) qui seront acquises à tous les cinq ans.

La géodiversité des habitats côtiers est déterminée en fonction des habitats retrouvés dans les zones supratidales et intertidales. Les habitats sélectionnés correspondent aux types de systèmes côtiers, aux types de plage, aux herbiers de zostère marine, aux zones d'algues et aux bancs d'accumulation. Ces habitats sont aussi caractéristiques d'une variété de substrats. La diminution ou la disparition de ces habitats constituent une perte nette d'habitats et une atteinte à l'intégrité écologique de l'écosystème côtier. Les changements environnementaux, qu'ils soient naturels ou anthropiques, peuvent entraîner une modification importante de la texture des substrats en raison du contexte stratigraphique de la zone côtière. Par conséquent une modification des substrats peut avoir un effet important sur la diversité et l'abondance de la faune et la flore dans l'écosystème côtier. Deux mesures seront effectuées pour suivre cet indicateur, soit la superficie totale de chaque habitat et la texture des substrats de la surface de ces habitats. La délimitation des habitats côtiers et l'identification du type de substrats seront réalisées à l'aide des photographies aériennes à tous les 5 ans. L'utilisation des images numériques couleurs couplées à des relevés de validation terrain lors de l'acquisition des images permettrait de réaliser une cartographie semi-automatisée des habitats et des substrats de la zone côtière à partir des signatures spectrales.

Le plus grand défi pour la mise en place du programme de surveillance de l'IE sera de définir des seuils à partir d'un niveau de référence qui reflète bien la variabilité naturelle des mesures et des indicateurs proposés. Les nombreuses lacunes soulevées dans les synthèses des connaissances de la RPNCAM et du PNCF impliquent des analyses préalables afin de définir des seuils scientifiquement acceptables. L'évolution historique de l'écosystème côtier à haute résolution temporelle permettrait de combler plusieurs lacunes. En l'absence de ces analyses, nous proposons des alternatives et des seuils préliminaires qui pourront être bonifiés avec le temps. Outre les indicateurs proposés, des indicateurs écologiques devraient aussi être développés pour compléter le programme de surveillance de l'IE de l'écosystème côtier.

1. Introduction

L'Agence Parcs Canada a l'obligation légale de maintenir et d'améliorer l'intégrité écologique de ses parcs. Pour remplir cette obligation, un programme de surveillance de l'intégrité écologique doit être implanté dans l'ensemble des parcs nationaux du Canada en 2008. À l'aide d'indicateurs et de mesures, ce programme doit permettre d'évaluer l'état de l'intégrité écologique (IE) des écosystèmes ainsi que l'efficacité des mesures de gestion mises en place pour assurer ou améliorer l'intégrité écologique des parcs.

Les objectifs de ce rapport sont d'identifier les mesures les plus pertinentes pour suivre la dynamique géomorphologique côtière pour les parcs nationaux du Québec-Atlantique, particulièrement pour la réserve de parc national du Canada de l'Archipel-de-Mingan (RPNCAM) et le parc national du Canada Forillon (PNCF). Ces mesures doivent tenir compte du modèle conceptuel proposé par Parcs Canada ainsi que de la nécessité d'établir des cibles et des seuils. De plus, les recommandations devront porter spécifiquement sur les milieux suivants : dunes, plages graveleuses, plages rocheuses, plages sableuses et falaises. Toutefois, à la lumière des synthèses des connaissances sur les zones côtières des parcs nationaux de la biorégion du Québec-Atlantique réalisées dans le cadre de notre mandat (Bernatchez et Quintin, 2007a,b; Leclerc *et al.*, 2007), nous croyons judicieux de ne pas nous restreindre à ces types de plage, mais plutôt de développer les mesures sur un plus grand nombre de systèmes côtiers représentatifs de ces parcs nationaux. Les indicateurs proposés feront partis d'un ensemble de mesures qui devra permettre le suivi de la biodiversité du parc, des processus naturels dirigeants et des facteurs de stress anthropiques qui modifient l'écosystème côtier.

Ce rapport présente dans un premier temps des considérations théoriques sur le programme de surveillance de l'IE et sur l'état des connaissances concernant l'établissement d'un niveau de référence. Ensuite, nous présentons les facteurs naturels externes qui devraient être suivis à l'intérieur d'un programme de surveillance de l'intégrité écologique des écosystèmes côtiers en lien avec l'analyse critique du modèle conceptuel proposé par Parcs Canada (Bernatchez et Leclerc, 2008). Finalement, nous présentons une description des indicateurs et des mesures avec les méthodes et les techniques qui devraient être utilisées pour le suivi en répondant aux différentes questions soulevées par les gestionnaires de Parcs Canada dans les instructions relatives à ce mandat. Nous identifions pour chacun des indicateurs les lacunes au niveau des connaissances scientifiques, notamment à l'égard du niveau de référence. Ceci permet d'appréhender les obstacles à une application efficace du programme de surveillance de l'IE.

2. Considérations théoriques sur le programme de surveillance de l'IE et niveau de référence

Le fonctionnement des écosystèmes côtiers est fort complexe puisqu'ils sont situés à l'interface entre les processus continentaux et marins, en plus d'être influencés par des processus qui leur sont propres. Le programme de surveillance de l'intégrité écologique de l'écosystème côtier doit donc tenir compte de cette particularité géographique. De plus, cette zone de confluence ou de transition est l'une des plus dynamiques à l'échelle des écosystèmes marins et continentaux. Les échanges et les flux énergétiques sont nombreux (Campbell, 2004) et la modification de l'écosystème peut se faire très rapidement. Dans cette optique, nous croyons que la sélection des variables pour les mesures de l'IE devrait être faite selon une approche stratifiée. C'est-à-dire que les variables doivent être sélectionnées pour chacune des grandes catégories d'éléments d'influence sur l'écosystème et le suivi doit être réalisé selon différentes échelles spatiales et temporelles. De plus, même si le programme n'a pas pour but principal de déterminer les causes des changements écologiques mais avant tout de détecter ces changements, la connaissance des causes demeure essentielle pour l'application des mesures de gestion adéquates. Dans ce contexte, les mesures proposées devraient idéalement identifier les principales causes et les facteurs qui occasionnent les modifications de l'écosystème. Nous croyons que cette approche permettrait de détecter rapidement les menaces potentielles pour l'IE et de proposer des mesures d'atténuation ou de précaution pour assurer le maintien de l'IE.

Les variables peuvent être regroupées selon les principales catégories du modèle conceptuel de l'écosystème côtier (Bernatchez et Leclerc, 2008) : 1) les forces naturelles; 2) les processus physiques et écologiques; 3) les composantes de la biodiversité et de la géodiversité; 4) les facteurs de stress. La géodiversité s'exprime par une juxtaposition ou une superposition d'éléments abiotiques, tels les substrats, la topographie, les modelés, les processus, que ce soit à l'échelle du paysage ou d'un habitat. Cette géodiversité peut donc avoir une influence sur la diversité végétale en milieu côtier ou encore sur la faune benthique.

Avant d'aborder la définition des variables et des méthodes et des techniques de suivi pour le programme de surveillance de l'intégrité écologique, il est important de se questionner sur le niveau de référence. Établir un niveau de référence crédible et juste est probablement le plus grand défi pour la mise en place d'un programme de surveillance de l'IE et ce qui pourrait limiter sa portée et sa faisabilité. Pour pouvoir identifier des seuils et des cibles et de les quantifier statistiquement, on doit avoir une excellente connaissance du fonctionnement de l'élément suivi. L'état du milieu au début d'une campagne de suivi est souvent considéré comme le niveau de référence ou, du moins, représente les conditions initiales. Or, certaines composantes, ressources ou processus connaissent des cycles naturels, soit dans leur fréquence, leur intensité ou encore dans leur abondance. Ces cycles peuvent se produire selon différentes échelles temporelles et même spatiales. La notion d'échelle spatiale et temporelle est donc primordiale dans l'étude et le suivi des écosystèmes (Petersen *et al.*, 2003). Afin d'établir des tendances, des seuils et des cibles scientifiquement valables et permettre de déterminer si les changements qui seront mesurés sont préoccupants et menaçant pour l'IE, il est fortement recommandé, lorsque possible, de réaliser un historique de l'évolution des variables choisies. Il sera ainsi possible de réaliser des analyses quantitatives pour évaluer la variabilité des éléments suivis.

L'absence de données exhaustives sur l'évolution historique des écosystèmes côtiers de la RPNCAM et du PNCF constitue une lacune fondamentale pour l'établissement d'un niveau de référence et la mise en place d'un programme de surveillance de l'intégrité écologique de l'écosystème côtier. La zone côtière a surtout été étudiée en tant que système physique ou système biologique, mais très peu d'études font le lien entre ces deux systèmes pour comprendre la dynamique d'évolution des habitats côtiers. Les connaissances sur le fonctionnement de la dynamique de la zone intertidale et pré littorale y sont très limitées, tant pour les platiers rocheux que pour les estrans meubles. Leur évolution a pourtant une incidence directe sur la morphosédimentologie des plages et l'évolution du haut littoral.

3. Identification des forces naturelles clés qui conditionnent la dynamique côtière

Les forces naturelles externes dirigent de manière importante le fonctionnement de l'écosystème côtier en ayant une influence directe et indirecte sur les processus physiques et écologiques, sur les ressources biologiques et les composantes abiotiques. Ces forces se produisent à différentes échelles temporelles et spatiales. Le suivi de ces différentes variables va permettre de préciser les causes de la modification des écosystèmes côtiers et d'expliquer les variations enregistrées par les mesures de l'intégrité écologique (tableau 1). Ce suivi permettra aussi de préciser si les changements font partie d'une variabilité naturelle ou encore si ils sont liés aux changements climatiques induits par les gaz à effet de serre. Ces informations permettront de mieux cibler les mesures de gestion à mettre en œuvre si des indicateurs de l'intégrité écologique montrent un niveau d'altération de l'écosystème. Les variables faisant partie des forces naturelles peuvent être caractérisées par des normales ou des moyennes permettant de les présenter sous forme d'anomalies positives ou négatives.

3.1. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire conditionne les bilans thermiques et les flux de chaleur à l'interface entre l'air et le sol et à l'interface entre les organismes vivants, l'air et les sédiments. Il agit directement sur les processus physiques en créant des gradients de température élevée. Il agit aussi sur les processus écologiques par la création de microclimats lumineux et thermiques. Des variations dans l'intensité du rayonnement solaire peuvent donc entraîner des modifications dans la dynamique de l'écosystème. Malheureusement, la plupart des stations météorologiques d'Environnement Canada ne possèdent plus de pyranomètres. Il faudrait alors songer à équiper des stations météorologiques localisées à proximité des parcs de ce type d'instrument de mesure.

3.2. Climat

Les paramètres climatiques sont des données de base qui peuvent être facilement analysées à partir des stations météorologiques d'Environnement Canada. Le tableau 1 présente les différents types de mesure qui peuvent être effectuées pour suivre l'évolution du climat ainsi que la fréquence d'acquisition nécessaire alors que le tableau 2 présente la définition de certains paramètres climatiques. L'analyse des données historiques aux stations météorologiques devrait permettre de déterminer des seuils en fonction de la variabilité climatique et des normales climatiques définies selon une période de 30 ans. Les anomalies représentent l'écart entre les résultats obtenus pour une période donnée et la normale ou la moyenne à la station climatique concernée.

Le tableau 3 présente les périodes d'enregistrements jusqu'en 2006 de différents paramètres climatiques aux stations météorologiques d'environnement Canada localisées à proximité de la RPNCAM et du PNCF.

Tableau 1. Principales variables à mesurer pour le suivi de la dynamique côtière.

Forces naturelles	Variables	Type de mesures	Fréquence des mesures	Techniques de mesure
Rayonnement solaire	Rayonnement solaire directe	Intensité du rayonnement	Horaire	Pyranomètre (station météorologique)
Climat	Température	Température moyenne annuelle et saisonnière	Journalière	Station météorologique
		Température minimum et maximum	Journalière	Station météorologique
		Degrés-jours de gel annuel, saisonnier et mensuel	Journalière	Station météorologique
		Degrés-jour de croissance ($t > 5C$)	Journalière	Station météorologique
		Nombre de jours avec un cycle de gel et de dégel	Horaire	Station météorologique
		Nombre de jours de redoux hivernaux	Horaire	Station météorologique
		Nombre de cycle de gel et dégel dépôt de surface	30 minutes	Senseurs de température, thermocable
		Variation de l'intensité et de la profondeur de l'onde de gel	30 minutes	Senseurs de température, thermocable
		Régime thermique des falaises	30 minutes	Senseurs de température, thermocable
		Précipitation	Précipitation totale annuelle	Journalière
		Précipitation de pluie annuelle	Journalière	Station météorologique
		Précipitation de pluie hivernale	Journalière	Station météorologique
		Précipitation de neige annuelle	Journalière	Station météorologique
		Intensité des précipitations	Horaire	Station météorologique
	Mesure du couvert de neige	Hauteur et persistance du	Horaire et journalière	Station météorologique

	au sol	couvert nival		
	Pression barométrique	Analyse des systèmes de pression	Journalière et horaire	Station météorologique
	Données synoptiques	Évaluation des tendances annuelles et mensuelles (ensemble des variables climatiques)	Sur toute la durée d'acquisition de données	Station météorologique
	Normale et moyenne climatiques	Établissement et caractérisation des cycles et séquences des anomalies des différents paramètres climatiques	30 ans (ou moins)	Station météorologique
Régime éolien	Données anémométriques (vent)	Vitesse et direction moyenne des vents	Journalière	Station météorologique
		Intensité et direction des vents, tempête	Horaire	Station météorologique
		Vitesse et direction des rafales	Seconde	Station météorologique
Événements météorologiques extrêmes	Tempêtes	surcote	Minutes	Marégraphe
		Rafales et Vents violents	Horaire et seconde	Station météorologique
		Pluies diluviennes	Journalière et horaire	Station météorologique
		Analyse des systèmes de pression	Journalière et horaire	Station météorologique
		Analyse des trajectoires de tempêtes	Journalière et horaire	Données satellitales
	Crues	Débit spécifique	Journalière	Station hydrométrique
Hausse du niveau marin relatif et régime marégraphique	Niveau d'eau	Tendance	Mensuelle et annuelle	Station marégraphique Dendrochronologie Datation ¹⁴ C
Régime hydrologique	Débit	Débit journalier moyen	Journalière et mensuelle	Station hydrométrique

		Débit annuel max et min		
		Débit spécifique moyen	Mensuelle et annuelle	
Régime glacial	Glace de mer	% de couvert de glace et type de glace	Hebdomadaire, mensuelle et annuelle	Téledétection satellitaire
	Pied de glace ou glace de rivage	Largeur, Épaisseur, Type de glace Processus glaciels	Hebdomadaire, Mensuelle	Relevés topographiques sur le terrain, gallow à mesurer
Régime des vagues	Niveau d'eau	Hauteur et période, direction	Minute	houlographe, caméra de surveillance
		Vitesse et direction		Courantomètre

Tableau 2. Définition de paramètres climatiques

	Paramètres	Définition
Température		
	Degrés-jours de gel annuel, saisonnier et mensuel	Les degrés-jours de gel sont représentés par les valeurs cumulées des températures moyennes journalières inférieures à la température seuil de 0 °C.
	Degrés-jours de croissance ($t > 5C$)	Les degrés-jours de croissance sont représentés par les valeurs cumulées des températures moyennes journalières supérieures à la température seuil de 5 °C.
	Nombre de jours avec un cycle de gel et de dégel	Un jour contenant un cycle de gel et de dégel est recensé si la température maximale est égale ou supérieure à 1,2 °C et que la température minimum est égale ou inférieure à -2,2 °C pendant au moins une heure pour chacun des seuils limites. Ces seuils de température ont été privilégiés, car ils représentent des seuils minimums et maximums élevés qui peuvent avoir un certain impact sur les surfaces géologiques altérables (Fraser, 1959)
	Nombre de jours de redoux hivernaux	Un jour de redoux devient effectif lorsque la température horaire est égale ou supérieure à 0 °C pendant une durée minimale d'au moins 4 heures consécutives ou non consécutives sur une plage de 24 heures

Tableau 3. Périodes d'enregistrements de différents paramètres climatiques aux stations météorologiques d'Environnement Canada (jusqu'en 2006).

Stations	Données	Type de données	Date de début	Date de fin
Havre-Saint-Pierre	Horaires	Température	1 janv. 1983	31 déc. 2006
		Vitesse et direction du vent	1 janv. 1983	31 déc. 2006
	Journalières	Température moyenne	1 janv. 1983	31 déc. 2006
		Précipitation totale	1 janv. 1983	31 déc. 2006
		Précipitation de pluie	1 janv. 1983	30 sept. 1994
		Précipitation de neige	1 janv. 1983	30 sept. 1994
Épaisseur de neige au sol (fin de mois)	1 janv. 1983	30 sept. 1994		
Gaspé et Gaspé A.	Horaires	Température	1 janv. 1975	31 déc. 2006
		Vitesse et direction du vent	1 janvier 1979	31 déc. 2006
	Journalières	Température moyenne	1 janv. 1916	31 déc. 2006
		Précipitation totale	1 janv. 1916	31 déc. 2006
		Précipitation de pluie	1 janv. 1916	31 déc. 2006
		Précipitation de neige	1 janv. 1916	31 déc. 2006
Épaisseur de neige au sol (fin de mois)	1968	2006		

3.3. Événements météorologiques extrêmes

Les grandes modifications des systèmes côtiers se produisent généralement lors des événements météorologiques extrêmes, notamment en raison des surcotes de tempêtes et des pluies diluviennes. Dans le contexte des changements climatiques, plusieurs chercheurs anticipent une augmentation de la fréquence et de l'intensité de ces événements. Les pluies diluviennes jouent un rôle très important dans le transport sédimentaire provenant des rivières et dans l'érosion des

falaises. Les pluies diluviennes pourraient être une cause importante dans les changements du rythme d'évolution des hautes falaises dans le PNCF puisque la région de Gaspé a connu une augmentation importante d'événements de pluies diluviennes depuis 1999 (Bernatchez *et al.*, 2008). L'analyse des pluies diluviennes est généralement effectuée en terme de fréquence et de récurrence. Encore une fois, l'analyse des données historiques devrait permettre de définir les seuils par rapport à une augmentation de la fréquence ou de la réduction de la période de retour. La définition d'une pluie diluvienne est variable selon les auteurs. Environnement Canada (2002) utilise le seuil de 25 mm/h ou plus, ou 50 mm ou plus en 3 heures, ou encore toute pluie causant une inondation locale. Selon Lacroix et Boivin (1991), les seuils de caractérisation des pluies diluviennes sont de 30 mm et plus de pluie en 24 heures pour le printemps, de 50 mm et plus de pluie en 24 heures pour la saison estivale et automnale et de 25 mm et plus de pluie en 1 heure sans saison spécifique.

Les ondes de tempête ou surcotes peuvent facilement être calculées en soustrayant la prédiction de la marée des niveaux observés à partir des marégraphes. Comme il s'agit d'ondes à grande échelle, les événements observés dans le golfe du Saint-Laurent sont cohérents entre eux en phase et en amplitude. On peut donc à partir d'un nombre restreint de marégraphes calculer la fréquence des surcotes et les périodes de retour (Bernatchez *et al.*, 2008). Le tableau 4 montre le nombre de surcotes enregistré dans la baie des Chaleurs entre 2000 et 2006.

Tableau 4. Liste des événements de niveau d'eau supérieur à 3,00 m pour la période de 2000 à 2006 à Belledune, N.-B.

Belledune 2145			TU	Niveau	Surcote
Jour	Mois	Année	Heure	(m)	(m)
21	1	2000	20:00:00	3,64	1
12	12	2000	20:00:00	3,40	0.8
6	2	2001	18:00:00	3,23	0.9
11	12	2004	19:00:00	3,13	0.2
29	4	2005	11:00:00	3,01	0.6
2	12	2005	20:00:00	3,18	0.5
2	12	2006	17:00:00	3,01	0.6

Tiré de Bernatchez *et al.*, 2008

Les tempêtes sont aussi déterminées à partir de la vitesse du vent provenant des stations météorologiques. Toutefois, cette approche sous-estime de 45 % à 70 % le nombre réel de tempêtes qui ont des impacts importants sur le littoral (Friesinger et Bernatchez, 2008). La définition des critères de base pour désigner une tempête est très variable (tableau 5). Dans la classification selon l'échelle de Beaufort, le terme tempête est employé à partir de la force 10 qui correspond à des vents de 89 à 102 km/h (tableau 6). En géomorphologie côtière, certains utilisent une vitesse supérieure ou égale à 74 km/h pendant une période minimale de trois heures pour désigner une tempête alors que d'autres utilisent une vitesse moyenne du vent de 50 km/h avec des pointes supérieures à 75 km/h peu importe la durée. Trzpit (1977) distingue deux classes

de tempêtes, soit les tempêtes avec des vents égaux ou supérieurs à 74 km/h et des tempêtes violentes avec des vents égaux ou supérieurs à 92 km/h. En milieu côtier, plus le vent souffle longtemps, plus la variation du niveau d'eau risque d'être élevée et l'influence des vagues sur la côte importante. Selon Paskoff (2001), un vent orienté vers la côte avec une vitesse de 80 km/h sur une durée de douze heures engendre une surcote de 1 m.

Tableau 5. Quelques définitions du vocable tempête.

«Dépression très creuse (très basse pression centrale) accompagnée de vents forts inférieurs à 117 km/h. Au-delà, on parle d'ouragan. (Lexique de météorologie sur le site Internet Wanadoo) »

« Violente perturbation atmosphérique, très fort vent souvent accompagné de pluie et d'orage. (lexique mandragoreII encyclopédie marine : www.mandragore2.net) »

«Tropicale» : Sous les latitudes tropicales, phénomène engendrant des vents de force 8 à 11 Beauforts. (Lexique mandragoreII; encyclopédie marine : www.mandragore2.net).

«Tropicale» : Cyclone tropical accompagné de vents de surface soutenus de 63 à 117 km/h maximum. (Glossaire météorologique; Environnement Canada)

La classification normale des vents d'Environnement Canada parle aussi d'une vitesse de 87 km/h, mais aussi d'une vitesse des vents horaires de plus de 50 km/h soutenue pendant au moins une heure.

«Violente tourmente atmosphérique, accompagnée de vent, associée au passage d'une dépression ou d'une dépression tropicale. Un avis de tempête est lancé par les services météorologiques lorsque les vents sont supérieurs à 90 km/h (Dictionnaire du climat, Larousse, 1995). »

Tableau 6. Classification de la vitesse des vents selon l'échelle de Beaufort.

Force	Effet sur terre	Effet sur mer	Appellation - sur terre - sur mer	Hauteur possible des vagues (m)	Vitesse du vent (km/h)
0	La fumée des cheminées s'élève verticalement	La mer est comme un miroir	vent calme mer calme	0	0-1
1	La fumée donne la direction du vent mais pas les girouettes	Rides comme des écailles de poisson	Très légère brise Mer ridée	0,1	1-5
2	Les girouettes tournent, sensation de vent sur le visage	Vagues courtes qui ne déferlent pas	Légère brise Mer ridée	0,2-0,3	6-11
3	Les feuilles sont constamment agitées, les drapeaux légers sont déployés	Très petites vagues	Petite brise Mer belle	0,6-1,0	12-19
4	Le vent soulève la poussière, les petites branches sont agitées	Petites vagues, les moutons sont nombreux	Jolie brise Mer peu agitée	1,0-1,5	2-28
5	Les arbustes en feuilles commencent à se balancer	Vagues modérées, nombreux moutons, petites vagues sur les eaux intérieures	Bonne brise Mer agitée	2,0-2,5	29-38
6	Les grandes branches sont agitées, les fils électriques sifflent, l'utilisation du parapluie est difficile	Des lames commencent à se former, les crêtes d'écume blanche sont plus étendues	Vent frais Mer forte	3,0-4,0	39-49
7	Les arbres en entier sont agités, marcher contre le vent devient difficile	L'écume blanche provenant des lames déferlantes commence à être soufflée en traînées	Grand frais Mer très forte	4,0-5,5	50-61
8	Le vent casse les petites branches, marcher contre le vent est pénible	Tourbillons d'embruns qui se détachent des crêtes des lames	Coup de vent Mer très forte	5,5-7,5	62-74
9	Le vent fait de légers dommages aux habitations	Grosses lames, épaisses traînées d'écume, visibilité réduite par les embruns	Fort coup de vent Mer grosse	7,0-10,0	75-88
10	Arbres déracinés, dommages importants aux habitations	Très grosses lames, la mer est blanche, visibilité réduite	Tempête Mer très grosse	9,0-12,5	89-102
11	Dommages très étendus	Lames exceptionnellement hautes, visibilité très réduite	Violente tempête Mer très grosse	11,5-16,0	102-117
12	Dévastation	L'air est plein d'écume et d'embruns, la visibilité est nulle	Ouragan Mer énorme	+14	+118

3.4. Hausse du niveau marin relatif

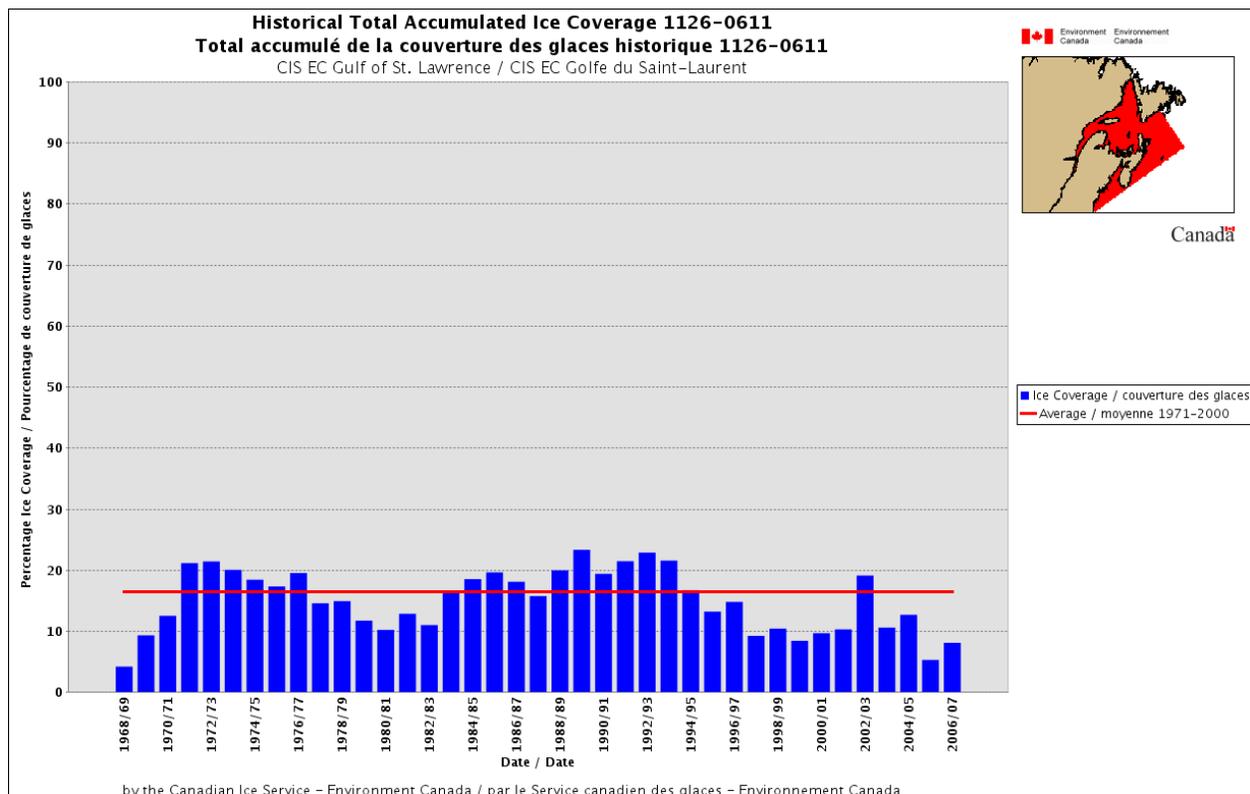
La hausse du niveau marin relatif appréhendée aura des conséquences importantes sur les modifications des écosystèmes côtiers. La hausse globale du niveau des océans a été de 1 à 2 mm/an depuis un siècle (Gornitz, 1995; Woodworth *et al.*, 1999; Mörner, 2004) et de 3,1 mm/an depuis la dernière décennie (GIEC, 2007). L'une des conséquences de cette hausse est non seulement l'accélération de l'érosion des berges, mais aussi l'augmentation de la fréquence de la submersion côtière et l'accélération du déficit sédimentaire (Daigle *et al.*, 2006). C'est plus particulièrement le cas des secteurs où l'apport sédimentaire n'est pas suffisant pour palier à la hausse du niveau marin relatif, comme les environnements à falaises rocheuses. Dans un système en équilibre entre les apports sédimentaires et le taux de hausse eustatique, les habitats côtiers s'adaptent en migrant naturellement vers l'intérieur des terres. Toutefois cette migration dépend en bonne partie de l'espace d'accommodement qui est dépendante de la géomorphologie de la plaine côtière. Les principaux facteurs qui limitent cette migration sont la présence de falaises littorales et d'infrastructures côtières. Cette contrainte spatiale entraîne un rétrécissement, voir la disparition de la zone intertidale et supratidale et des habitats qui y sont associés. La région de Percé a connu une réduction moyenne de 54 % de la largeur des plages depuis 1934 en raison de la hausse du niveau de la mer (Bernatchez *et al.*, 2008). Compte tenu de leurs caractéristiques géomorphologiques, l'écosystème côtier de la RPNCAM et particulièrement celui du PNCF sont très sensibles à la hausse du niveau de la mer. La hausse du niveau marin relatif associée à la hausse eustatique et à l'abaissement de la surface des plages en lien avec le déficit sédimentaire aura même des conséquences sur les limites territoriales de la RPNCAM. Dans cette optique, la hausse du niveau marin relatif doit être couplée avec des relevés topographiques pour en faire une mesure appropriée pour le suivi de l'IE.

3.5. Régime hydrologique

Les données de débit des rivières peuvent être acquies auprès du Centre d'expertise hydrique du ministère du Développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec et de la direction générale de l'observation atmosphérique et des relevés hydrométriques d'Environnement Canada. Pour la RPNCAM, il y a les stations de Magpie (1978-...) et de la Romaine (1957-...) qui peuvent être utilisées. Pour le PNCF, il y a la station de Dartmouth (1970-..) et de York (1980-...). Les débits moyens, minimaux et maximaux, incluant les débits de crue peuvent donner une très bonne indication de la capacité de transport sédimentaire des cours d'eau. Une modification de ces paramètres peut entraîner une diminution ou une augmentation des apports sédimentaires au littoral et ainsi modifier les habitats côtiers.

3.6. Régime glaciaire

La réduction importante de la couverture de la glace depuis 1996 dans l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent favorise l'érosion côtière (Bernatchez et Dubois, 2004 ; Bernatchez *et al.*, 2008 ; figure 1). Le pied de glace couvre désormais rarement l'ensemble de la zone intertidale et soumet donc le littoral à un plus grand nombre de tempêtes, d'autant plus que la majorité des tempêtes se produisent en hiver. Ce phénomène entraîne une augmentation du transport sédimentaire littoral et une modification de la morphosédimentologie des plages. Ce changement dans la dynamique glaciaire pourrait être responsable de l'abaissement de la surface des plages enregistré au cours des dernières années. Cet abaissement provoque une augmentation de la fréquence d'inondation de la partie supérieure du littoral et pourrait donc modifier la faune et la flore benthique. En milieu insulaire, la glace permet aussi le déplacement des mammifères entre les îles et entre les îles et le continent. L'absence de ce pont de glace peut donc modifier les ressources biologiques sur les îles.



Source : Service canadien des glaces

Figure 1. Couverture de glace de mer dans le golfe du Saint-Laurent.

La couverture de la glace de mer et de la glace de rivage (pied de glace) est un excellent indicateur des variations climatiques. Ce paramètre est fortement corrélé avec les températures de l'air, notamment les degrés-jours de gel et les anomalies de températures. Le Service canadien des glaces produit des cartes journalières sur la couverture et le type de glace de mer. De plus, il est possible d'obtenir des archives numériques hebdomadaires sur ces données depuis 1968. La

cartographie et le suivi de la glace de mer bénéficient largement du développement technologique spatiale. Il existe divers produits concernant la couverture des glaces conçus à partir de données satellitaires dont la résolution dépend principalement de la méthode employée pour l'observation. Les bandes du rayonnement électromagnétique dans le domaine visible, infrarouge et micro-ondes peuvent être utilisées pour observer l'étendue, la concentration, et même le type et l'épaisseur de la glace de mer. Dans le domaine visible et proche infrarouge, il est possible d'utiliser gratuitement depuis 2002 les données de la plate-forme MODIS/Aqua pour une couverture journalière de la région à l'étude à une résolution de 1 km. Ces données sont binaires (glace, absence de glace) et sont dépendantes d'une absence de couvert nuageux. La technique repose sur une classification de la surface en fonction de la signature spectrale distincte entre la glace et l'eau libre. Dans le domaine micro-ondes, la plate-forme AMSR-E fournit des données gratuites basées sur la bande de 89 GHz d'une résolution de 6,25 km depuis 2002. Les observations radars obtenues par la plate-forme canadienne RADARSAT (ainsi que le successeur, RADARSAT-2 lancé tout récemment et dont la mise en service ne saurait tarder) complètent les méthodes passives. Le radar à synthèse d'ouverture embarqué sur ces satellites permet une observation active de la surface. La résolution grandement plus fine que dans le domaine visible, infrarouge et micro-ondes, permet des classifications de couvert des glaces incluant la texture de la surface ainsi que la possibilité de déduire l'épaisseur de la glace en fonction des propriétés de l'écho de retour. Cependant, ces observations ne sont pas faites à intervalle constant dans le temps et l'utilisation des données est coûteuse : 15\$ par cellule de donnée (représentant quelques minutes de latitude et de longitude). Ces données sont disponibles depuis 1996.

En raison de leur résolution spatiale, les données satellites ne sont pas adéquates pour le suivi du pied de glace. Le suivi des glaces littorales peut être effectué à l'aide d'une caméra de surveillance ou d'un appareil photographique à partir d'un point fixe. De manière automatisée, il est possible de programmer la caméra pour une fréquence d'acquisition quotidienne. Dans ce contexte, il est concevable de suivre l'étendue de la couverture de glace à haute résolution temporelle. Aussi, il est possible de dépêcher une personne pour photographier les lieux et pour mesurer la largeur du pied de glace et son épaisseur. L'acquisition des données pour la largeur du pied de glace doit être effectuée selon une fréquence hebdomadaire alors que pour l'épaisseur et le type de glace une fréquence d'acquisition mensuelle est suffisante. Les relevés sur le terrain s'effectuent selon les types de côte afin de couvrir l'ensemble des systèmes côtiers ainsi qu'en fonction de côtes naturelles et artificielles. Les relevés se font de façon perpendiculaire à la côte en fonction des différentes parties de la zone côtière (supratidale-haut et bas estran) et en décrivant le type de glace, la topographie, l'épaisseur et la largeur du pied de glace. Lors de ces relevés, les formes d'érosion et d'accumulation glacielles ainsi que les perturbations écologiques (arrachement de radeaux de schorres ou de zostère, invertébrés) sont aussi notées.

4. Les mesures de l'intégrité écologique de l'écosystème côtier

Les mesures de l'intégrité écologique ont été définies lors d'un atelier de deux jours avec les responsables de Parcs Canada. Deux indicateurs ont été préconisés pour le suivi de la géomorphologie et de la dynamique côtière, soit le bilan de l'évolution côtière et la géodiversité des habitats côtiers, qui comprennent chacun deux catégories de mesures.

4.1. Bilan de l'évolution côtière

Le bilan de l'évolution côtière est un indicateur fiable de l'intégrité écologique. Il est basé sur plusieurs types de mesures qui témoignent de la dynamique de plusieurs variables. Cet indicateur sera quantifié à partir de deux variables clés, le déplacement de la ligne de rivage et la largeur des plages. Ces deux variables évoluent en réponse aux changements environnementaux et de la dynamique côtière. Elles indiquent directement le niveau de sensibilité des systèmes côtiers aux perturbations naturelles et anthropiques.

4.1.1. Déplacement de la ligne de rivage

Le calcul du déplacement de la ligne de rivage consiste à mesurer le recul, la stabilité ou la progradation du littoral. Il est essentiel de bien définir au départ la ligne de référence qui sera utilisée pour calculer le déplacement du trait de côte. Celle-ci peut être très variable selon les études (Leclerc *et al.*, 2007). Nous préconisons pour les côtes sans falaise ou à microfalaise, c'est-à-dire les flèches littorales, les terrasses de plage, les îles barrières, les tombolos et les dunes bordières d'utiliser la ligne de rivage qui correspond à la limite des hautes eaux maximales. Cette limite coïncide généralement avec la limite inférieure de la végétation littorale. Cette dernière est facilement visible sur les photographies aériennes et est généralement assez constante et stable et constitue la meilleure limite à utiliser pour les côtes sans falaise (Grenier et Dubois, 1992). Dans le cas des marais côtiers, la ligne de référence utilisée est le niveau moyen des hautes mers. Cette limite correspond à la délimitation entre le schorre supérieur et le schorre inférieur, visible aussi par un changement de végétation ou encore par la présence d'une microfalaise. Dans les milieux sans végétation, la laisse des hautes eaux est aussi visible par un trait plus foncé en raison de l'accumulation de la matière organique. La présence d'une microfalaise dans les zones en érosion permet de tracer de manière très précise la ligne de rivage. Dans les secteurs de falaises, le tracé du sommet de la falaise est utilisé, ce qui correspond à la définition du trait de côte au sens strict. Ce dernier est facilement repérable sur les photographies à l'aide d'un stéréoscope ou encore directement à l'écran à partir d'un appareil de visualisation 3D.

Les différentes méthodes et techniques utilisées pour suivre le déplacement de la ligne de rivage sont expliquées dans un rapport précédent remis à Parcs Canada (Leclerc *et al.*, 2007). La télédétection, notamment l'utilisation des photographies aériennes, est largement utilisée pour calculer les taux d'évolution du littoral et en dégager des tendances. L'utilisation d'un réseau de suivi basé sur l'implantation de bornes est aussi de plus en plus utilisé pour mesurer l'évolution récente et future des littoraux (Dagneau, 1998 ; Dagneau *et al.*, 2004 ; Dubois *et al.*, 2005 ;

Bernatchez, 2006). L'utilisation des données Lidar, quoique coûteuses à acquérir, offre un très grand potentiel pour cartographier de manière précise et objective la ligne de rivage et le trait de côte (Boak et Turner, 2005) et pour quantifier le recul des falaises rocheuses ainsi que les volumes de sédiments qui contribuent au budget sédimentaire des plages (Young et Ashford, 2006). Nous préconisons l'utilisation de ces trois techniques selon deux échelles temporelles.

Échelle décennale

L'Agence de Parcs Canada doit rédiger tous les cinq ans un rapport sur l'état des parcs (REP) qui est basé sur les données des programmes de surveillance de l'IE des parcs et permet de faire état des principaux problèmes écologiques que connaît chacun des parcs (Agence Parcs Canada, 2005). Dans ce contexte, l'acquisition d'images numériques et de données Lidar devrait être effectuée idéalement à tous les 5 ans. Ces relevés aéroportés permettraient de faire un bilan complet de l'évolution du littoral sur l'ensemble d'un parc ou des parcs nationaux côtiers. L'utilisation d'une caméra couleur ou multispectrale faciliterait la détection de la ligne de rivage et le traitement des images. Les données Lidar seraient très utiles pour le suivi des hautes falaises rocheuses du PNCF. Comme ces hautes falaises évoluent ponctuellement de manière spatio-temporelle par des mouvements de masse et des chutes de blocs, la cartographie 3D à partir de relevés successifs au Lidar permettrait de quantifier les volumes érodés de manière beaucoup plus efficace que les bornes de suivi et les photographies aériennes. L'utilisation d'un système d'information géographique est aussi fortement recommandé. Il permet le géopositionnement des photographies aériennes et permet d'améliorer la précision du traçage du trait de côte et des calculs (Dubois *et al.*, 2005). À l'aide d'un SIG, des bornes de mesure doivent être générées au 50 m le long de la ligne de rivage de chaque couverture de photographies aériennes afin d'en mesurer l'écart entre les années et calculer les taux de déplacement de la ligne de rivage.

Échelle annuelle et événementielle

L'implantation d'un réseau de bornes sur des systèmes côtiers-types et des milieux jugés fragiles ou préoccupants selon des enjeux particuliers identifiés permettrait de faire un suivi annuel et de détecter rapidement si des changements brusques mettent en péril l'IE afin de mettre en place des mesures de gestion adéquates. Les bornes sont des piquets métalliques (Synott, 1998; Dagneau, 1998; Dagneau *et al.* 2004) ou en bois (Dubois *et al.*, 2005; Bernatchez, 2006) à partir desquels on mesure à l'aide d'un gallon à mesurer la distance à la ligne de rivage selon un intervalle de temps donné. Les tiges métalliques peuvent être plus aisément retrouvables à l'aide d'un détecteur de métal, mais peuvent constituer un risque de blessures dans les secteurs fréquentés par la population. Nous préconisons pour des raisons de sécurité l'utilisation de tiges en bois. Lors de l'implantation, un azimuth peut être noté, mais encore mieux deux piquets peuvent être implantés un en arrière de l'autre, de manière à diminuer les biais associés aux différents angles que peuvent prendre les profils à chaque mesure. De plus, la deuxième borne sert de borne de sureté lorsque la première est emportée lors de tempêtes. Les bornes sont implantées sur l'arrière-côte à au moins 10 m de la ligne de rivage pour minimiser les pertes liées aux vagues de tempête ou à l'action des glaces. Dans les zones de forte érosion, des bornes supplémentaires sont implantées lorsque nécessaire. Il doit donc y avoir un entretien du réseau de suivi à chaque année pour assurer une constance dans les mesures de recul. L'intervalle idéal entre chaque site de mesure est de 100 m. Dans les milieux où le trait de côte est très échanuré et constitué d'une

lithologie très variable, l'intervalle peut être réduit à 25 ou 50 m. Les bornes géopositionnées à l'aide d'un GPS permettent de faciliter leur repérage sur le terrain et aussi d'intégrer la base de données dans un système d'information géographique.

Cette méthode a l'avantage d'être peu coûteuse et simple, une fois la stratégie d'implantation déterminée. Le suivi peut alors être effectué par des personnes avec un minimum de formation. Il demande néanmoins des campagnes de terrain à intervalles réguliers. Les relevés doivent être effectués une fois par année pendant l'été sur l'ensemble du réseau de suivi. Sur les côtes où la végétation herbacée est dense, il est préférable de réaliser les relevés au printemps (mai) avant les nouvelles pousses. Ce suivi peut être complété sur des zones témoins par des relevés à la fin de l'hiver ou de l'automne, de manière à évaluer les variations saisonnières (Bernatchez et Dubois, 2008). Les mesures devraient aussi être réalisées à la suite d'événements de tempête. Ces relevés pluriannuels permettraient de mieux documenter les processus d'érosion et le mode d'évolution côtière. Ce réseau pourrait aussi être intégré au réseau de 3200 stations de suivi de l'érosion de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent mis en place par le laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières de l'UQAR.

Types de mesure, niveau de référence et seuils

Les valeurs mesurées pour chaque intervalle de temps doivent être ramenées à un taux de déplacement en mètre par année. Les analyses effectuées doivent être réalisées en fonction des types de côte. Une segmentation côtière doit donc être réalisée au départ. Ainsi, la ligne de rivage est segmentée selon le type de côte et sa composition lithostratigraphique. Il est aussi important d'identifier les segments côtiers naturels et les segments artificiels puisque l'artificialisation d'un trait de côte vient modifier la vitesse de recul du littoral et la dynamique naturel du milieu.

Nous proposons deux types de mesures qui sont complémentaires, l'une basée sur la moyenne des taux de déplacement et l'autre basée sur le niveau de stabilité du littoral calculé à partir de la proportion de bornes indiquant une érosion, une stabilité ou une accumulation.

La moyenne est une valeur absolue qui peut bien représenter l'intensité moyenne du déplacement de la ligne de rivage. Toutefois, les milieux côtiers qui sont caractérisés par une grande variabilité dans l'évolution du trait de côte pourraient présenter des segments côtiers avec de forts taux de recul et d'autres segments avec de forts taux d'accumulation, de sorte que la moyenne pourrait être près de 0 m/an. Pour permettre de déterminer la variabilité naturelle dans le rythme de déplacement de la ligne de rivage et définir des seuils appropriés, il sera nécessaire d'effectuer une analyse historique à partir de couvertures aériennes à une résolution temporelle inférieure à 15 ans. Au Québec, il est généralement possible de remonter au début des années trente pour les plus vieilles couvertures de photographies aériennes acquises en mode vertical.

La proportion des bornes indiquant respectivement l'érosion, la stabilité et l'accumulation donne une meilleure perception de l'étendue spatiale du niveau de stabilité du littoral, sans indiquer l'intensité de la vitesse de déplacement de la ligne de rivage. Dans un système côtier en équilibre, on trouve généralement une proportion équivalente de côtes stables, de côtes en érosion et de côtes en accumulation. Il est possible de calculer la proportion de l'état de la côte pour chaque type de côte. Une côte qui présente une proportion de son littoral en érosion se situant entre 40 et 60 % pourrait indiquer un niveau d'IE préoccupant et plus de 60 % de côte en érosion pourrait

indiquer une IE altérée. Les seuils pourraient aussi être déterminés à partir de l'évolution historique. Les côtes à falaises ne peuvent qu'être stables ou en recul. Selon la pente de la surface de la falaise, les côtes stables vont parfois être recouvertes d'une végétation herbacée ou arbustive qui peut donner une idée du niveau de stabilité de la falaise. La proportion de falaise en érosion se situe généralement entre 40 et 60 % pour des falaises meubles (Dubois *et al.*, 2005) et peut s'élever à 70 % pour les falaises rocheuses. Le niveau de l'IE d'une côte à falaise qui présente une proportion de côte en érosion se situant entre 70 et 85 % pourrait être qualifié de préoccupant et plus de 85 % de côte en érosion pourrait être qualifié d'altéré. Encore une fois, les seuils pourraient être précisés à partir de l'évolution historique. En l'absence de mesures quantitatives basées sur l'évolution historique, un seuil préliminaire et temporaire pourrait être défini à partir de la segmentation côtière de l'état actuel du littoral. Il serait alors possible pour chaque type de côte de calculer la longueur totale des segments en érosion, stables ou en accumulation et ainsi établir le niveau de l'IE basé sur la proportion.

Calcul des indices

Des indices basés sur la moyenne et la proportion seront calculés pour chaque type de côte de manière globale (IGMC et IGPC), c'est-à-dire que le niveau de l'IE va être calculé sur l'ensemble des points de mesure pour chaque type de côte. Toutefois, un indice de l'intégrité écologique, par exemple pour l'ensemble des terrasses de plage d'un parc, pourrait être considéré élevé alors qu'il pourrait y avoir certaines terrasses de plage où l'IE est très altérée. Pour considérer cette situation, des indices devraient aussi être présentés pour chaque segment d'un même type de côte (IIMC et IIPC). Cette approche permettra aux gestionnaires de pouvoir identifier les segments où l'intégrité écologique est menacée. La figure 2 offre un exemple de type de représentation cartographique du niveau de l'IE basé sur le déplacement de la ligne de rivage. À partir de la sommation de l'IGMC et l'IGPC, le niveau de l'IE de l'écosystème côtier sera calculé en fonction du déplacement de la ligne de rivage (IGEC ; tableau 7).

IGMC : Indice global basé sur la moyenne des taux d'évolution côtière par type de côte.

IGPC : Indice global basé sur la proportion du nombre de points de mesure indiquant respectivement l'érosion, la stabilité et l'accumulation.

IIMC : Indice intra côte basé sur la moyenne des taux d'évolution côtière par segment côtier d'un même type de côte.

IIPC : Indice intra côte basé sur la proportion du nombre de points de mesure indiquant respectivement l'érosion, la stabilité et l'accumulation par segment côtier d'un même type de côte.

IGLREC : Indice global pour le déplacement de la ligne de rivage pour l'écosystème côtier = IGMC + IGPC.

Tableau 7. Exemple de grille d'évaluation pour mesurer le niveau de l'IE d'un écosystème côtier basé sur le déplacement de la ligne de rivage.

Type de côte/indice	Flèche littorale		Terrasse de plage				Marais	Falaise			IGLREC
IIMC	IEE	IEP	IEE	IEE	IEA	IEE	IEA	IEP	IEP	IEE	
IIPC	IEE	IEA	IEE	IEE	IEA	IEP	IEA	IEP	IEA	IEE	
IGMC	IEE		IEE				IEA	IEP			IEE
IGPC	IEP		IEP				IEA	IEP			IEP
IGLREC											IEP

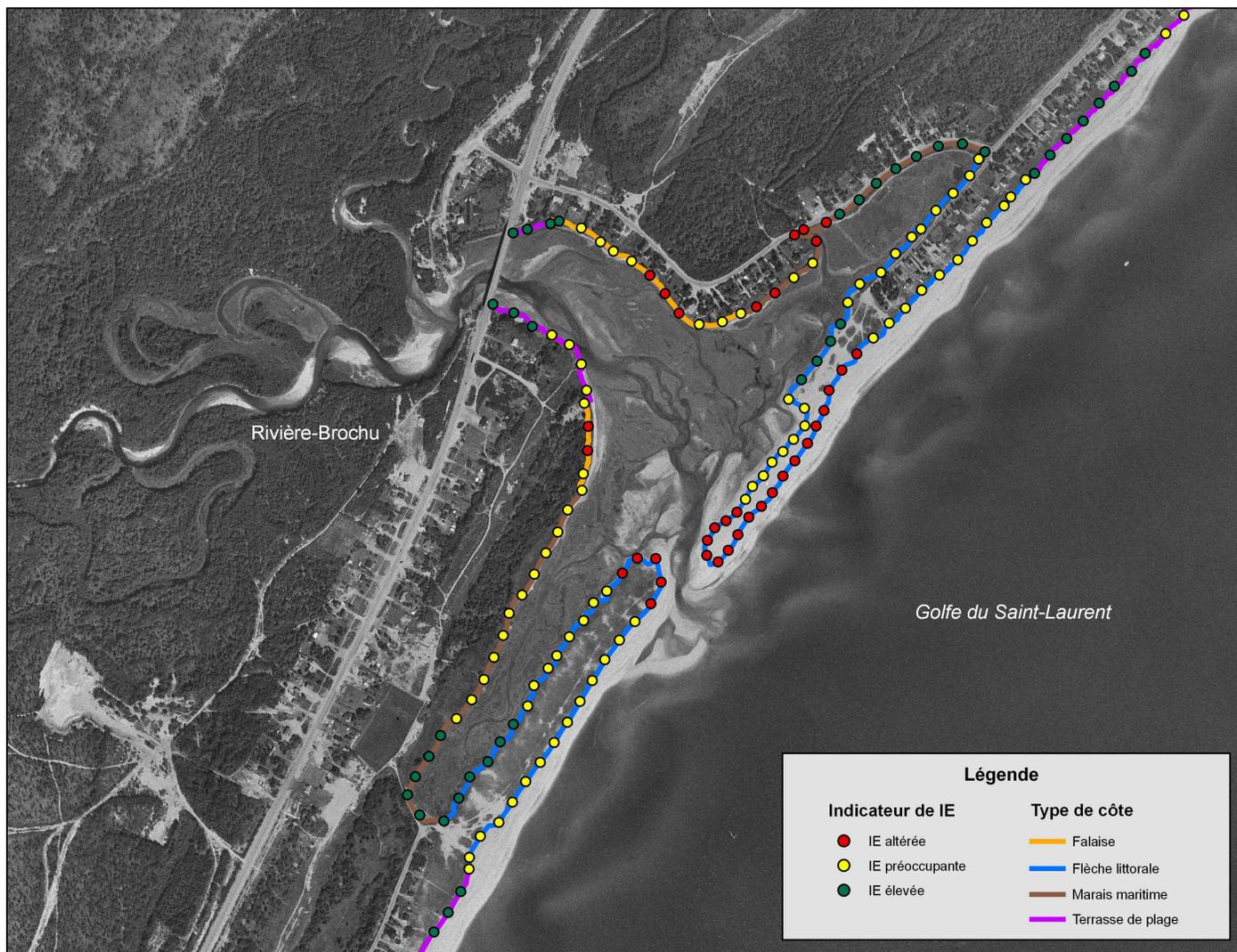


Figure 2: Représentation cartographique du niveau de l'intégrité écologique de l'écosystème côtier basé sur le déplacement de la ligne de rivage. À noter que les données sont fictives.

4.1.2. Largeur des plages

Les photographies aériennes sont aussi utilisées pour déterminer l'évolution de la largeur des plages (O'Carroll *et al.*, 2004). La largeur d'une plage s'ajuste en fonction des conditions hydrodynamiques, du type de côte et de l'équilibre hydrosédimentaire du milieu. La largeur de la plage peut facilement être déterminée en mesurant la distance entre la ligne de rivage (limite de végétation ou microfalaise, base des falaises) et le point d'inflexion de la plage qui correspond à la limite entre le haut et le bas estran. Cette rupture de pente est aussi souvent caractérisée par un changement dans la texture des sédiments et facilement reconnaissable sur les photographies aériennes même à marée haute. Cette limite est aussi utilisée car elle varie peu à l'échelle interannuelle.

Tout comme pour le déplacement de la ligne de rivage, le calcul de la largeur des plages devrait être réalisé à l'aide des images aéroportées sur l'ensemble du parc à tous les 5 ans. De plus, un suivi annuel devrait être réalisé sur des systèmes côtiers-types et des milieux jugés fragiles ou préoccupants selon des enjeux particuliers identifiés. Les relevés devraient être réalisés aux mêmes sites que le suivi du déplacement de la ligne de rivage réalisé à l'aide d'un réseau de bornes de suivi. Les relevés pour la largeur des plages et l'évolution de la ligne de rivage pourraient être fait en simultané. Le calcul s'effectue à une fréquence de 100 m en utilisant les mêmes points repères utilisés pour l'évolution historique de la ligne de rivage. Toutefois, une analyse réalisée en comparant des données à haute résolution et à plus faible résolution indique que pour les segments de côtes relativement homogènes, une fréquence au 300 m donne des résultats similaires à une fréquence de 100 m (de Siney, 2007). L'intervalle de 300 m pourrait être utilisé pour le suivi annuel et celui de 100 m pour le suivi au 5 ans. Contrairement aux taux de déplacement de la ligne de rivage qui est une mesure entre deux intervalles de temps, la largeur des plages est exprimée en valeur absolue pour une année donnée. La largeur d'une plage a tendance à être assez stable si les conditions hydrodynamiques demeurent constantes. Les calculs sont aussi effectués en fonction du type de côte. La segmentation côtière peut donc être utilisée tant pour le déplacement de la ligne de rivage que pour l'évolution de la largeur des plages.

Les seuils utilisés pour présenter le niveau de l'IE devraient est basés sur la moyenne historique de la largeur des plages en tenant compte de la variabilité naturelle de la largeur des plages selon les types de côte. Les valeurs mesurées pour chaque année de mesure devraient être comparées aux seuils d'IE. De plus, pour les questionnaires, il pourrait aussi être intéressant de connaître la tendance des changements entre les périodes. Par exemple, la figure 3 montre une hausse importante de l'érosion des plages entre 2001 et 2007 aux Îles-de-la-Madeleine.

Les deux types de mesures utilisés pour l'évolution de la ligne de rivage s'appliquent aussi pour la largeur des plages. La première mesure est basée sur la moyenne de la largeur des plages pour une année donnée et l'autre sur l'état des plages calculé à partir de la proportion de bornes indiquant une érosion, une stabilité ou une accumulation.

Les mêmes indices seront aussi utilisés pour définir le niveau de l'intégrité écologique pour les plages (tableau 8).

IGMP : Indice global basé sur la moyenne de la largeur des plages par type de côte.

IGPP : Indice global basé sur la proportion du nombre de points de mesure indiquant respectivement l'érosion, la stabilité et l'accumulation d'une plage par type de côte.

IIMP : Indice intra côte basé sur la moyenne de la largeur des plages par segment côtier d'un même type de côte.

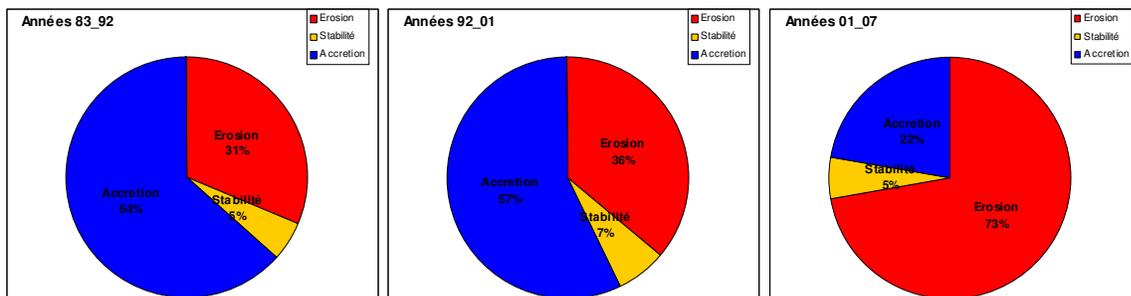
IIPP : Indice intra côte basé sur la proportion du nombre de points de mesure indiquant respectivement l'érosion, la stabilité et l'accumulation d'une plage par segment côtier d'un même type de côte.

IGLPEC : Indice global pour la largeur des plages pour l'écosystème côtier =

IGMP + IGPP.

Tableau 8. Exemple de grille d'évaluation pour mesurer le niveau de l'IE d'un écosystème côtier basé sur la largeur des plages.

Type de côte/indice	Flèche littorale		Terrasse de plage				Marais	Falaise			IGLPEC
IIMP	IEE	IEP	IEE	IEE	IEA	IEE	IEA	IEP	IEP	IEE	
IIPP	IEE	IEA	IEE	IEE	IEA	IEP	IEA	IEP	IEA	IEE	
IGMP	IEE		IEE				IEA	IEP			IEE
IGPP	IEP		IEP				IEA	IEP			IEP
IGLPEC											IEP



Tirée de de Sinety, 2007

Figure 3. Exemple montrant la proportion (%) de points de mesure qui indiquent une érosion, une stabilité ou une accumulation de la plage pour trois périodes de temps (Îles-de-la-Madeleine). La période 2001-2007 indique une altération de la plage.

4.1.3. Calcul du niveau de l'IE pour l'indicateur Bilan de l'évolution côtière (IEBEC)

Le calcul du niveau de l'IE pour l'indicateur du bilan d'évolution côtière est basé sur la sommation de l'indice global pour le déplacement de la ligne de rivage pour l'écosystème côtier et de l'indice global pour la largeur des plages pour l'écosystème côtier : IGLREC + IGLPEC = IEBEC.

4.2. Géodiversité des habitats côtiers

La géodiversité des habitats côtiers est ici déterminée en fonction des habitats retrouvés dans les zones supratidales et intertidales. Les habitats sélectionnés correspondent aux types de systèmes côtiers qui occupent le haut littoral ainsi que dans la zone intertidale, le type de plage, les herbiers de zostère marine, les zones d'algues et les bancs d'accumulation. Ces derniers sont des bancs coquilliers potentiels. Ces habitats sont aussi caractéristiques d'une variété de substrats. La diminution ou la disparition de ces habitats constituent une perte nette d'habitats et une atteinte à l'intégrité écologique de l'écosystème côtier. Deux mesures seront effectuées pour suivre cet indicateur, soit la superficie totale de chaque habitat et la texture des substrats de la surface de ces habitats.

4.2.1. Superficie des habitats côtiers

La délimitation des habitats côtiers sera réalisée à l'aide des photographies aériennes selon la fréquence des relevés aériens qui devrait être à tous les 5 ans. L'utilisation des images numériques couleurs couplées à des relevés de validation terrain lors de l'acquisition des images permettrait de réaliser une cartographie semi-automatisée de la surface des habitats de la zone côtière à partir des signatures spectrales (Leclerc *et al.*, 2007). À l'instar du bilan d'évolution côtière, la cartographie de l'évolution historique des habitats côtiers permettrait de définir des seuils de manière plus adéquate. Dans un premier temps, les seuils pourraient être définis de la façon suivante : une réduction de 25 à 50 % de la superficie des habitats pourrait être jugée préoccupante alors qu'une réduction supérieure à 50 % de la superficie pourrait être jugée altérée.

Le calcul du niveau de l'IE consiste dans un premier temps à mesurer la superficie totale de chaque type d'habitat côtier (ISHC). Ensuite, une sommation du niveau de l'IE obtenu pour chaque type d'habitat va permettre de déterminer l'état de l'IE pour l'ensemble des habitats de l'écosystème côtier basé sur la mesure de la superficie (IGSEC).

4.2.2. Texture des substrats

Les changements environnementaux, qu'ils soient naturels ou anthropiques, peuvent entraîner une modification importante de la texture des substrats en raison du contexte stratigraphique de la zone côtière. Par conséquent une modification des substrats peut avoir un effet important sur la diversité et l'abondance de la faune et la flore dans l'écosystème côtier. Une cartographie des types de substrats qui recouvrent en surface chaque habitat devrait être réalisée. La cartographie peut être effectuée de manière zonale en déterminant la superficie couverte pour chaque type de substrat et par la suite le résultat peut être exprimé en % de recouvrement. La cartographie peut aussi être effectuée à l'aide d'une matrice de points générée par un système d'information géographique. Une classe granulométrique est associée à chacun des points. Le résultat peut ensuite être converti selon les proportions en pourcentage de chaque type de substrat par habitat. Encore une fois, une analyse historique permettrait d'établir des seuils adaptés au milieu. Pour que l'IE soit altérée, il faut qu'il y ait un changement de la classe granulométrique dominante

pour un habitat donné. Dans un premier temps, les seuils pourraient être définis de la façon suivante : une réduction de 20 à 40 % de la proportion de la classe granulométrique dominante pour un habitat pourrait être jugée préoccupante alors qu'une réduction supérieure à 40 % de la proportion pourrait être jugée altérée.

La première mesure consiste à déterminer le niveau de l'IE basé sur la texture des substrats pour chaque type d'habitat côtier (ITSHC). Ensuite une sommation du niveau de l'IE obtenu pour chaque type d'habitat va permettre de déterminer l'état de l'IE pour l'ensemble des habitats de l'écosystème côtier basé sur la mesure de la texture des substrats (IGTSEC).

4.2.3. Calcul du niveau de l'IE pour l'indicateur Géodiversité des habitats côtiers (IEGHC)

Le calcul du niveau de l'IE pour l'indicateur géodiversité des habitats côtiers est basé sur la sommation de l'indice global de la mesure de la superficie totale des habitats de l'écosystème côtier et de l'indice global de la mesure de la texture des substrats pour l'ensemble des habitats de l'écosystème côtier : $IGSEC + IGTSEC = IEGHC$.

5. Conclusion

Le programme de surveillance de l'intégrité écologique de l'écosystème côtier va permettre d'identifier les changements qui se produisent à l'intérieur de l'écosystème. Les deux indicateurs proposés seront mesurés à l'aide de 14 indices. L'approche préconise différentes échelles spatiales et temporelles. À tous les cinq ans, les indicateurs sont caractérisés selon des mesures effectuées sur l'ensemble de l'écosystème côtier d'un parc afin de faire un bilan de l'état de l'IE du parc. Des relevés annuels sur des habitats-types ou sensibles permettront de cibler rapidement une modification qui pourrait mettre en péril l'IE. Le suivi des forces naturelles permettra de cibler les causes responsables de la modification de l'écosystème côtier et de mettre en place des mesures de gestion adaptées à la dynamique côtière. Outre les indicateurs proposés, des indicateurs écologiques devraient aussi être développés pour compléter le programme de surveillance de l'IE de l'écosystème côtier. Les invertébrés benthiques vivant dans la zone intertidale, notamment la méiofaune et la macrofaune, pourraient aussi être d'excellents indicateurs de l'IE puisqu'ils occupent une position particulière dans les réseaux trophiques. Ils peuvent soit être exploités directement par la population (c'est le cas de certains mollusques et crustacés), soit jouer un rôle intermédiaire entre les producteurs primaires (microphytobenthos) et les poissons ou oiseaux côtiers, notamment en étant une source de nourriture pour plusieurs espèces.

Le plus grand défi pour la mise en place du programme de surveillance sera de définir des seuils à partir d'un niveau de référence qui reflète bien la variabilité naturelle des mesures et des indicateurs proposés. Les nombreuses lacunes soulevées dans les synthèses des connaissances de la RPNCAM et du PNCF impliquent des analyses préalables pour définir des seuils scientifiquement acceptables. L'évolution historique de l'écosystème côtier à haute résolution temporelle permettrait de combler plusieurs lacunes. En l'absence de ces analyses, nous avons toutefois proposé des alternatives et des seuils préliminaires qui pourront être bonifiés avec le temps.

6. Références

Agence Parcs Canada. 2005. Surveillance et rapports relatifs à l'intégrité écologique dans les parcs nationaux du Canada. Volume 1 : principes directeurs. Parcs Canada, 71 p.

Bernatchez, P. 2006. Outils technologiques et système de suivi pour la connaissance des aléas côtiers et la gestion des risques naturels au Québec maritime. 1^{er} Colloque sur les risques naturels au Québec. 74^e Congrès de l'ACFAS, Montréal.

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

Bernatchez, P. et Dubois, J.M.M. 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.

Bernatchez, P., Fraser, C. et Jolivet, Y. 2008. Sensibilité des systèmes côtiers du golfe du Saint-Laurent aux paramètres climatiques. Rapport de recherche remis à OURANOS. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR.

Bernatchez, P., Fraser, C. et Lefaivre, D. 2008. Effets des structures rigides de protection sur la dynamique des risques naturels côtiers : érosion et submersion. 4^e Conférence canadienne sur les géorisques. Québec.

Bernatchez, P. et Leclerc, A.-M. 2008. Analyse critique du modèle conceptuel de l'écosystème côtier proposé par Parcs Canada.). Rapport de recherche remis à Parcs Canada. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR, 12 p.

Bernatchez, P. et Quintin, C. 2007. Synthèse des connaissances actuelles de la dynamique géomorphologique de l'écosystème côtier du parc national du Canada Forillon (PNCF). Rapport de recherche remis à Parcs Canada. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR, 42 p.

Bernatchez, P. et Quintin, C. 2007. Synthèse des connaissances actuelles de la dynamique géomorphologique de l'écosystème côtier de la Réserve de parc national du Canada de l'Archipel-de-Mingan (RPNCAM). Rapport de recherche remis à Parcs Canada. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR, 54 p.

Boak, E.H. et Turner, I.L. 2005. Shoreline Definition and Detection: A Review. Journal of Coastal Research, vol 21, n. 4, 688-703.

Campbell, D.E. 2004. Evaluation and Emergy Analysis of the Cobscook Bay Ecosystem. Northeastern Naturalist 11(Special Issue 2) p.355-424.

Dagneau, B. 1998. Système de suivi annuel de l'évolution du littoral : Parc national de Kouchibouguac, Nouveau-Brunswick : résultats 1996-1997. Parcs Canada. pagination multiple.

Dagneau, B., Dionne, J.-C. et Dubois, J.-M.M. 2004. Évolution holocène récente et dynamique actuelle des systèmes de barrières sableuses dunifiées de Parcs nationaux canadiens des Maritimes. Thèse de doctorat. Bulletin de recherche, Département de géographie et de télédétection, Université de Sherbrooke. 184 p.

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.

De Siney, M. 2007. Gestion de l'érosion côtière en Europe et dans le golfe du Saint-Laurent : étude de cas aux Îles de la Madeleine. Mémoire de Master II professionnel : Géohydrosystèmes continentaux en Europe, 98 p.

Dubois, J.M.M., Bernatchez, P., Bouchard, J.-D., Daigneault, B., Cayer, D. et Dugas, S. 2005. Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du Saint-Laurent pour la période de 1996-2003. Conférence régionale des élus de la côte-Nord, 291 p.

Friesinger, S. et Bernatchez, P. 2008. Analyse du climat maritime historique de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent selon les archives. Rapport de recherche remis à OURANOS. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR.

GIEC. 2007. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 18 p.

Gornitz, V. 1995. Sea-level rise : a review of recent past and near-future trends. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 20, p. 7-20.

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

Lacroix, J., Boivin, D. J., 1991. Étude du phénomène de pluies diluviennes en tant que catastrophe naturelle; une évaluation en matière de protection civile et de vulnérabilité municipale. Centre de Recherches en Aménagement et en Développement, Université Laval, 13; 2; 89 p.

Leclerc, A.-M., Bernatchez, P. et Fraser, C. 2007. Cadre méthodologique pour le suivi de la dynamique côtière : revue de littérature et analyse critique. Rapport de recherche remis à Parcs Canada. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, 140 p.

Mörner, N.-A. 2004. Estimating future sea level changes from past records. Global and Planetary Change, 40, p. 49-54.

O'Carroll, S., Bérubé, D. et Evans, P. 2004. Taux d'érosion de la dune dans le secteur de Rivière-du-Portage, Nouveau-Brunswick, entre 1944, 1974 et 2002. Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick, Division des minéraux, des politiques et de la planification, Planche 2004-13A.

Paskoff, R., 2001. Le changement climatique et les espaces côtiers, l'élévation du niveau de la mer : risques et réponses. Actes du colloque d'Arles, La Documentation française, Paris, 97 p.

Petersen, John E., W. M. Kemp, R. Bartleson, W. R. Boynton, C. C. Chen, J. C. Conrwell, R. H. Gardner, D. C. Hinkle, E. D. Houde, T. C. Malone, W. P. Mowitt, L. Murray, L. P. Sanford, J. C. Stevenson, K. L. Sundberg, and S. E. Suttles. 2003. Multiscale experiments in coastal ecology : Improving realism and advancing theory. *BioScience* 53, no. 12, p. 1181-1197

Service météorologique du Canada, 2005. Échelle de Beaufort. Document électronique consulté mars 2005, adresse Internet : <http://www.qc.ec.gc.ca>

Synnott, G. 1998. Monitoring de l'érosion des falaises des secteurs Cap-Bon-Ami, Cap Gaspé et du sentier « les Graves», rapports sommaires 1986-1998. Parcs Canada, 200 p.

Trzpit, J.-P. 1977. Les tempêtes nord-atlantiques :essai d'analyse géographique. *Le Norois*, 24, p. 33-52 et p.211-234.

Woodworth, P.L., Tsimplis, M.N., Flather, R.A. et Shennan, I. 1999. A review of the trends observed in British Isles mean sea level data measured by tide gauges. *Geophysical Journal International*, 136, p. 651-670.

Young, P. et Ashford, A. 2006. Application of airborne LIDAR for seacliff volumetric change and beach-sediment budget contributions. *Journal of Coastal Research*, vol. 22, p.307-318.