

VULNERABILITY OF THE ROAD NETWORK TO COASTAL PROGRESS IN EAST QUEBEC IMPACT OF CLIMATE CHANGES

Jean-Pierre Savard & André Musy

Consortium Ouranos sur la climatologie régionale
et l'adaptation aux changements climatiques
550 rue Sherbrooke ouest, 19^{ième} étage,
Montréal (Qc) Canada H3A 1B9
Savard.jean-pierre@ouranos.ca

ABSTRACT

The road network of the Quebec maritime region is spread over 350 000 km², serving a population of 400 000. For historical, geological and socio-economic reasons, most national roads are located in the near-coastal area, with important sections of the road network located in erosion sensitive areas. Climate change is threatening to increase this problem in several ways. An anticipated rise of sea level, the disappearance of sea ice and shore fast ice, changes in cyclonic activity and the frequency of frost & thaw cycles as well as extreme precipitation events would combine to increase the rate of coastal erosion and the stress on coastal structures. A recent study conducted by Ouranos and its partners has assessed the vulnerability of coastal structures to climate change and its impact on coastal erosion. The project promotes a participative approach which includes local and regional shoreline users and decision makers in the progress of the project. The science team regularly communicate project results to stake holders such as storm and ice analysis, surge assessment and other findings of the project. These results are discussed with local decision makers and potential adaptation measures are evaluated. This dynamic interaction between research scientists and decision makers has resulted in a number of adaptation propositions that will be submitted for further implementation.

Text in French

1. INTRODUCTION

Le réseau routier québécois se caractérise d'abord par son étendue géographique par rapport à sa population. La région maritime du Québec (figure 1), qui comprend l'ensemble des villes et des villages situés à l'est du Saguenay, abrite une population totale de 400 000 habitants reliée par un réseau de routes nationales d'une longueur totale de 2500 km. La majeure partie de ce réseau routier est construite à moins de 500 m des côtes du golfe du Saint-Laurent et des estuaires qui se jettent dans le Golfe.



Figure 1 : Golfe du Saint-Laurent : Réseau de routes nationales longeant la zone côtière. Zones témoins encerclées.

Pour des raisons historiques, géographiques et géologiques, la plupart des villes et des villages de la région maritime sont alignés le long des côtes du golfe du Saint-Laurent. Les routes principales longent aussi les rives pour des raisons géologiques et géomorphologiques. Cette particularité est due en partie à la disponibilité de terrains à faible dénivelé et de matériaux granulaires qui facilitaient la construction des routes. Une bonne partie du réseau routier national est donc située à proximité du littoral et construite sur des matériaux meubles exposés à l'érosion.

Les changements climatiques posent un défi particulier pour l'ensemble des infrastructures côtières, incluant le réseau routier. L'augmentation probable du niveau de la mer (2, 7 et 13), la diminution de la période d'englacement et de la couverture de glace, les modifications de l'activité cyclonique (6) et plusieurs autres facteurs liés au climat laissent présager une augmentation probable du taux d'érosion et la dégradation des infrastructures côtières pour l'ensemble du golfe du Saint-Laurent. Cependant, cet effet ne

serait pas le même partout et varierait selon le type de côtes et leur sensibilité aux processus hydrodynamiques, hydrogéologiques et cryogéniques affectés par le climat (3). Une gestion efficace de la zone côtière dépend donc en bonne partie de la capacité d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la zone côtière.

1.1. Contexte géologique

Le retrait du glacier Laurentien, qui s'est amorcé il y a 14 500 ans a provoqué une transgression marine d'une centaine de mètres de hauteur (1). Toute la région du golfe du Saint-Laurent a été envahie par une mer intérieure appelée la mer de Goldthwait, qui s'est retirée il y a 9 000 ans, laissant d'épais dépôts d'argile, surmontés de sables et de graviers deltaïques qui ceinturent toute la côte nord du golfe du Saint-Laurent.

Dans le bas Saint-Laurent et en Gaspésie (voir figure 1), le retrait des glaciers n'a pas laissé de grands systèmes deltaïques aussi importants parce que les bassins versant sont plus petits, mais la succession de la transgression et des régressions marines de l'holocène a favorisé le développement de terrasses côtières plus ou moins larges adossées à un paysage de collines au relief très accentué (1 et 4). La côte est formée en majeure partie de roches sédimentaires d'âge Ordovicien à Carbonifère, constitués principalement d'alternances de grès, de conglomérats et de schistes argileux friables et sensibles à l'érosion. L'érosion de ces collines friables a laissé une bande parfois assez mince de terrain à faible relief séparant les rives du Golfe des zones montagneuses attenantes.

Le réseau routier du Québec maritime est donc presque entièrement construit sur ces dépôts meubles d'épaisseur très variable constitués d'argiles marines et de sables deltaïques récents sur la côte nord et de matériaux granulaires friables dérivés de l'érosion des falaises de grès et de schistes du Bas Saint-Laurent, de la Gaspésie, de la Baie de Chaleurs et des Îles de la Madeleine. Comme la majeure partie de ce réseau repose sur des sédiments meubles, il est aussi exposé à l'érosion des talus côtiers qui le bordent. Avec le temps, ces talus ont reculé sous l'effet de l'érosion pour rejoindre la route en de nombreux endroits.

2. VULNÉRABILITÉ DU RÉSEAU ROUTIER

Le réseau routier côtier présente certaines vulnérabilités aux processus climatiques. L'érosion côtière et les pluies diluviennes peuvent provoquer des effondrements de route en déstabilisant les dépôts meubles sur lesquels ces routes sont construites. Une étude menée par le Ministère de Transport du Québec montre que 57 km de routes municipales et 76 km de route nationale sont à risque sur la Côte Nord du Golfe d'ici 30 ans (5). Les autres secteurs de la région maritime (Bas Saint-Laurent, Gaspésie et les Îles de la Madeleine présentent tout autant de vulnérabilité (3). Cette évaluation est basée sur la fréquence des incidents passés et ne tient pas compte des changements climatiques probables. Ceux-ci peuvent considérablement modifier l'évaluation du risque.

2.1. Évaluation du risque : des méthodes désormais inadéquates

Les méthodes d'évaluation des risques appliquées jusqu'à ce jour sont remises en question par les changements climatiques subodorés. Les risques associés aux conditions climatiques étaient en règle générale évalués à l'aide de projections basées sur les conditions historiques. Par exemple, la hauteur des infrastructures côtières (le niveau d'une route, d'un remblai ou d'un quai) est généralement déterminée à l'aide d'une

analyse statistique des niveaux d'eau passés. Ces projections statistiques sont fondées sur l'hypothèse que la distribution statistique des risques futurs est identique à celle du passé.

La figure 2, tirée de Xu et Saucier, 2006 (20), présente un diagramme de dépassement des niveaux de surcotes obtenu à partir des données du marégraphe de Charlottetown, dans le sud du golfe du Saint-Laurent (une surcote, en anglais « storm surge », est une élévation anormale du niveau de la mer au-dessus de la marée prédite. Les surcotes sont généralement produites par des tempêtes sous l'effet de basses pressions atmosphériques et de forts vents. La figure 2 illustre les difficultés liées à l'estimation de la période de retour de niveaux extrêmes. Avant 1957, la période de retour de surcotes de plus de 1,4 m était d'environ cent ans. De 1957 à 2002, cette période de retour est passée à 10 ans. Ce changement ne tient pas compte de la variation du niveau de la mer puisque les valeurs représentées dans la distribution de Weibull (figure 2) sont obtenues en soustrayant le niveau moyen annuel du niveau maximum atteint pendant l'année (après avoir soustrait le niveau de la marée prédite). Ce diagramme permet de constater que les variations de la fréquence des surcotes entre la première et la seconde moitié du 20^{ème} siècle sont très significatives.

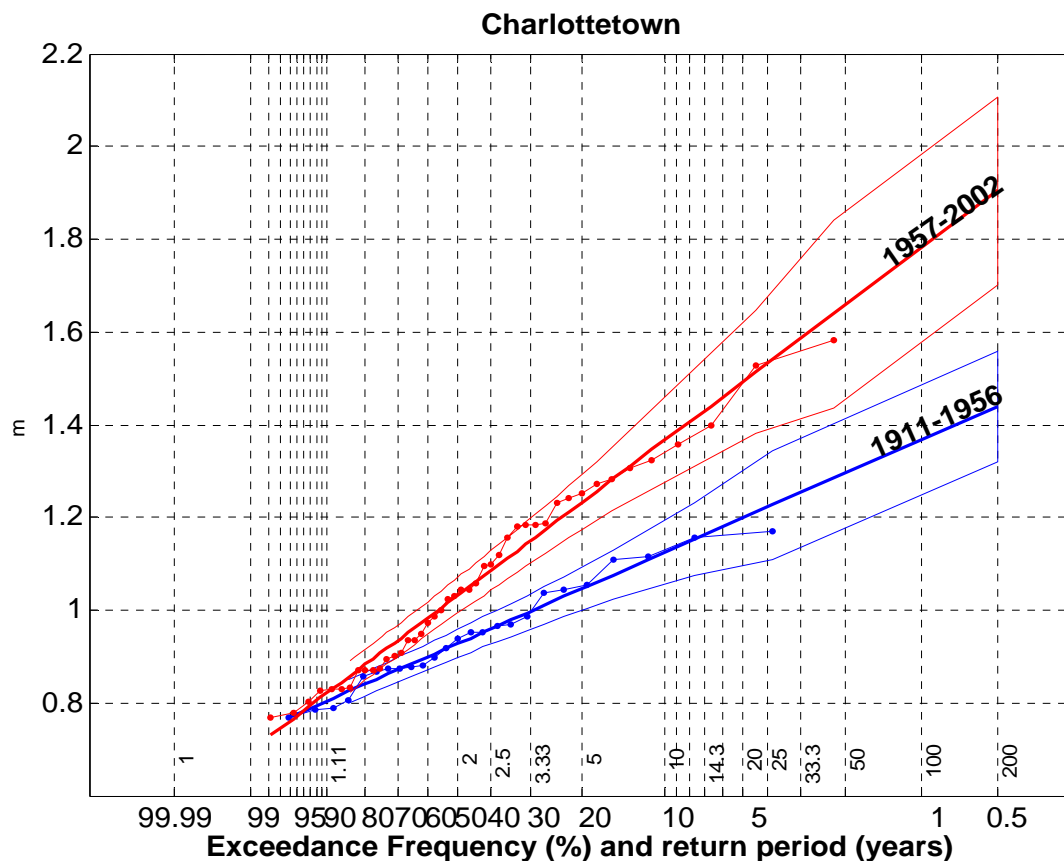


Figure 2 : Diagramme de dépassement des niveaux de surcotes (E) à Charlottetown, Île du Prince Edward

Si l'on tient compte du fait que le niveau moyen de la mer s'est élevé de plus d'une vingtaine de cm entre les deux périodes de mesure, cela signifie que la période de retour d'une surcote de plus de 1,4 m de hauteur est passée de 100 ans au début du vingtième siècle à moins de 5 ans actuellement. Et cette fréquence continuera d'augmenter avec le rehaussement plus rapide du niveau de la mer du 21^{ème} siècle. Ainsi, un ingénieur qui se

serait servi de la courbe de la figure 2 (1911-1957) pour construire une route en 1960 aurait été tenté de calculer le positionnement altimétrique de cette route en se servant du niveau de référence de 1,4 m (période de retour de 100 ans). En supposant que la fréquence des surcotes futures soit la même que celle de la période 1957-2002 au cours des 50 prochaines années, et en supposant un rehaussement moyen de 20 cm (7) du niveau moyen de la mer, cette route serait inondée en moyenne à tous les 4 ans et recouverte de 60 cm d'eau une fois tous les cent ans en moyenne.

La figure 3 illustre la position de la route 199 aux Îles de la Madeleine. Cet archipel, situé au centre du golfe du Saint-Laurent, est constitué de plusieurs îles reliées entre elles par de longues flèches sableuses couvertes de dunes appelées tombolos. Cette route 199 a été inondée à plusieurs reprises au cours des 10 dernières années (figure 3). Elle est le seul axe routier qui relie les habitants du sud et du nord de l'archipel à l'unique aéroport et l'unique hôpital de l'archipel, situés respectivement à Havre aux Maisons et à Cap aux Meules. Un effondrement de cette route pourrait avoir des conséquences importantes pour les communautés. Lors de fortes tempêtes, il n'y a parfois aucun autre moyen pour transporter un malade ou un blessé ou pour assurer des services essentiels à la population. La nationale 199 est soumise aux mêmes conditions d'occurrence de submersion que celles illustrées à la figure 2. Cette situation constitue un défi sérieux pour le Ministère des Transport et le Ministère de la Sécurité publique du Québec.



Figure 3 : Îles de la Madeleine, Golfe du Saint-Laurent, Québec. Route nationale 199

Les projections statistiques basées sur les conditions passées ne sont donc plus appropriées. Quelle sera alors la probabilité de surcotes extrêmes, de pluies diluviennes et les conditions de glaces, de vagues, de niveau d'eau et des taux d'érosion côtière au cours du prochain siècle? La réponse à ces questions requiert de nouveaux outils et des

méthodes fondées sur la modélisation du climat, le seul moyen actuellement disponible pour évaluer le climat futur.

2.2. De nouvelles approches : Évaluation des tempêtes

Des études récentes entreprises par Ouranos dans le golfe du Saint-Laurent permettent d'illustrer les méthodes en cours de développement pour doter les pouvoirs publics de nouveaux outils d'évaluation du risque et de détermination de critères de conception et de gestion des infrastructures côtières. Ouranos a entrepris, avec l'aide de ses partenaires, une étude d'envergure permettant d'évaluer l'impact de changements climatiques sur l'érosion du littoral et sur les infrastructures côtières. Cette étude réunit une équipe d'une quinzaine de chercheurs de diverses disciplines qui ont développés des méthodes et des outils d'analyse et de modélisation appropriés pour aborder un sujet aussi complexe.

Ces méthodes utilisent les données extraites de modèles de climat. Ces derniers sont les seules méthodes reconnues scientifiquement pour simuler adéquatement le climat futur. Il existe une panoplie de modèles climatiques comportant des modèles de circulations générale (GCM) et des modèles régionaux (RCM), qui se combinent pour affiner à l'échelle régionale les simulations planétaires. Bien que les simulations climatiques comportent une marge importante d'incertitudes, elles paraissent beaucoup plus fiables que de simples projections statistiques basées sur des observations passées.

L'étude d'Ouranos se fonde sur ces simulations climatiques et les scénarios qui en découlent pour estimer les conditions climatiques futures. Un volet majeur de cette étude est l'analyse de tempêtes. Elle vise à déterminer comment le régime des tempêtes sera affecté par les changements climatiques et comment ces changements affecteront à leur tour le régime des vagues et des surcôtes dans les zones côtières. L'étude des tempêtes porte sur trois sites témoins choisis en fonction de leurs positions géographiques et de la diversité des problématiques d'érosion et de gestion des infrastructures représentées. Ces sites témoins sont : Sept-Îles, sur la Côte Nord du Golfe, Percé, dans la baie des Chaleur et les Îles de la Madeleine, situées au centre du Golfe (voir figure 1).

L'analyse du régime des tempêtes consiste à élaborer une méthode qui permet de simuler les variations du régime des tempêtes sous l'effet des changements climatiques. L'objectif de cette étude est d'identifier, à l'aide de modèles climatiques, les caractéristiques des tempêtes qui contribuent à l'érosion côtière et qui peuvent causer des dommages aux infrastructures. On peut ensuite utiliser les modèles climatiques pour simuler le régime futur des tempêtes et pour ensuite évaluer leur probabilité d'occurrence.

L'analyse des tempêtes comporte plusieurs étapes. Dans un premier temps, une méthode a été développée pour établir un répertoire des tempêtes qui se sont produites dans le Golfe du Saint-Laurent et qui ont affecté les trois sites témoins. Puis un modèle de vagues d'Environnement Canada (8) a été utilisé pour établir une première liste de 65 tempêtes ayant produit des vagues de plus de 4 m de hauteur aux trois sites témoins entre janvier 2003 et décembre 2005. Ce modèle de vagues est piloté par le modèle météorologique régional d'Environnement Canada (GEM) et par le modèle océanique du Golfe du Saint-Laurent de l'ISMER (Institut des Sciences de la mer de Rimouski) et de l'Institut Maurice Lamontagne de Pêches et Océans Canada (15 et 16).

Cette première série de données a été utilisée pour caractériser les tempêtes afin de pouvoir les identifier directement à l'aide de modèles climatiques appropriés. La méthode choisie pour identifier et caractériser les tempêtes à l'aide de ces modèles s'appuie sur un algorithme développé par Sinclair (18 et 19). Cet algorithme utilise le géopotential en

surface et le vent à 500 hPa pour calculer divers paramètres descripteurs du système cyclonique. L'algorithme de Sinclair peut utiliser des données de grilles provenant de modèles météorologiques, de réanalyses ou de modèles climatiques.

Pour cette étude, l'analyse de trajectoire a d'abord été utilisée pour identifier 300 dépressions ayant passé à moins de 1000 km du centre du golfe du Saint Laurent en 2003-05. Parmi celles-ci, on a retrouvé les 65 tempêtes identifiées par le modèle de vagues. En analysant les caractéristiques de ces 65 tempêtes initiales, il a été possible de déterminer des paramètres qui les identifient spécifiquement et d'appliquer des critères de sélection permettant de retrouver ces tempêtes directement à partir des données provenant de modèles météorologiques ou climatiques.

Afin de tester la validité des méthodes d'identification des tempêtes, plusieurs modèles climatiques et météorologiques différents ont été utilisés et comparés. Ces modèles comprennent le modèle GEM en version globale (grille de 100 x 100 km de côté) et régional (grille de 18 x 18 km), les réanalyses NCEP et ERA-40 (avec deux domaines d'application de l'algorithme de Sinclair), les réanalyses NARR (grille de 32x32 km) et le modèle régional canadien du climat (MRCC, grille de 45 x 45 km) piloté par NCEP (14). Les périodes couvertes vont de 1961 à 2005 pour NCEP, 1961-2002 pour ERA-40, 1979-2002 pour NARR, 1961-90 pour le MRCC, 1996-2005 pour GEM régional et 2003-05 pour GEM global.

Une méthode indépendante d'identification des tempêtes basée sur les observations de pressions atmosphériques du golfe du Saint-Laurent a aussi été mise au point par Ouranos afin de valider les résultats des modèles. Les données de pression atmosphérique de trois stations météorologiques situées autour du Golfe ont été utilisées pour reconstituer la vitesse et la direction des vents à l'échelle du Golfe. La figure 4 illustre la relation entre les vents reconstitués et les vents observés est ($r^2 = 0,76$). Les tempêtes sont identifiées en utilisant des seuils basés sur la vitesse et la direction des vents reconstitués.

L'ensemble des données observées et des résultats de modélisation a permis de constituer un répertoire validé des tempêtes qui se sont produites entre 1961 et 2005 dans le golfe du Saint-Laurent. Pour chaque tempête du répertoire, on possède un ensemble de paramètres permettant de caractériser cette tempête (date de la tempête, position par rapport au Golfe, intensité, vitesse des vents, fréquence de tourbillon, pression atmosphérique au centre de la tempête, etc.). Ces paramètres permettent de comparer les résultats des diverses méthodes d'identification (modèle de vagues, vents reconstitués et modèles climatiques) afin d'évaluer l'efficacité des modèles pour reconnaître les tempêtes et estimer leurs caractéristiques.

L'analyse cas par cas d'un certain nombre de tempêtes qui affectent les trois sites témoins permet de regrouper l'ensemble des tempêtes selon trois catégories dénommées rouge, bleue et verte. Les trois types de tempêtes se distinguent par la direction des vents et des vagues qu'elles produisent dans le Golfe, par la position du centre tourbillonnaire de la tempête au moment où se produisent les vagues et par l'intensité des vents et de la fréquence du tourbillon. Les tempêtes de type rouge, bleu et vert produisent respectivement des vagues des secteurs sud-est, nord-est et nord-ouest. Les rouge affectent Sept-Îles et Percé, les bleu affectent Percé et le côté est des Îles de la Madeleine et les vert affectent la côte ouest des Îles de la Madeleine (voir figure 1).

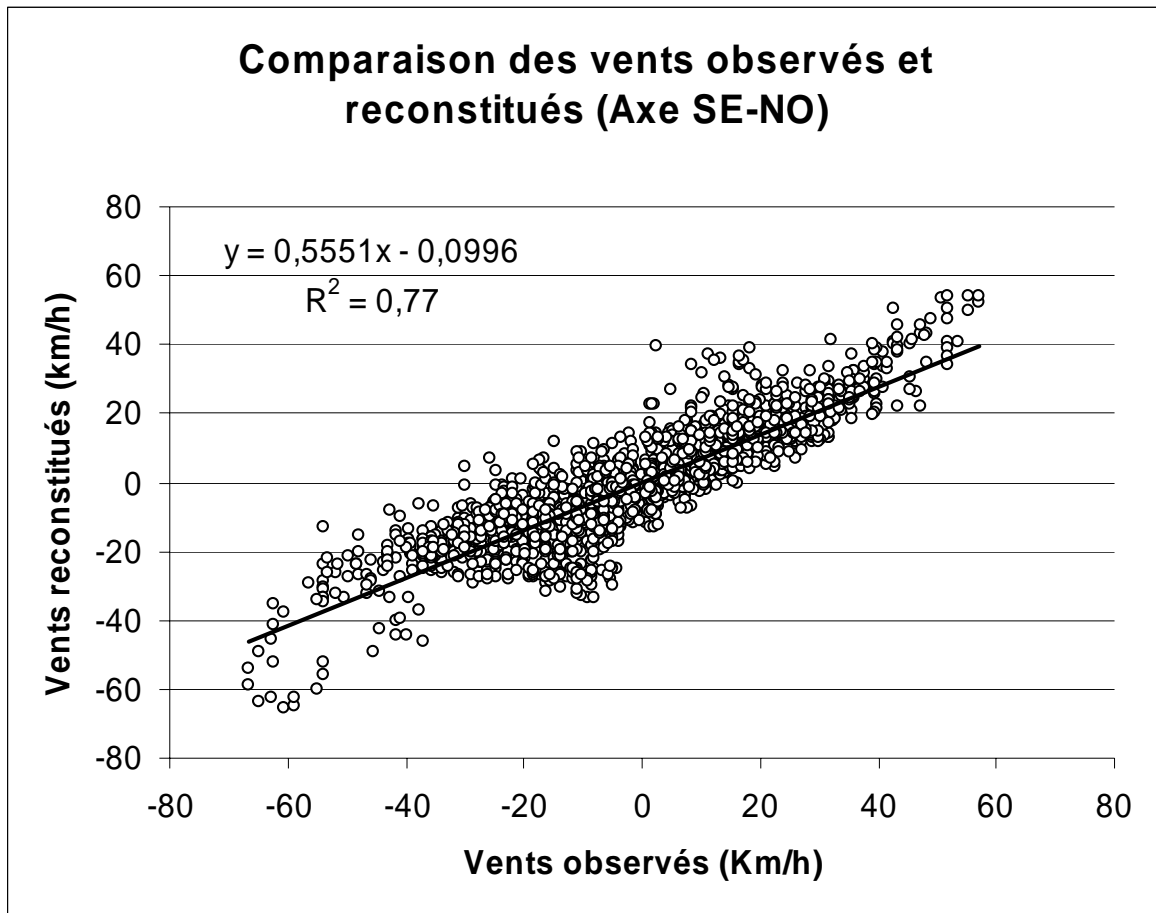


Figure 4 : Comparaison des vents observés à la station de East-Point, Île du Prince Edward et des vents reconstitués à partir des données de pression atmosphérique aux stations de Sept-Îles, Charlottetown et Stephenville entre 2003 et 2005.

La figure 5 propose un exemple d'utilisation du répertoire de tempêtes pour déterminer l'évolution du nombre de tempêtes rouges dans le golfe du Saint-Laurent. Ces données peuvent être comparées à l'évolution des taux d'érosion mesurés aux sites témoins ou dans les régions concernées ou pour évaluer les conditions auxquelles sont exposées les infrastructures côtières. Le répertoire des tempêtes constitue ainsi un outil de base très utile, qu'on peut exploiter de diverses manières. Par exemple, il permet de comparer le nombre de tempêtes se produisant lorsque le golfe du Saint-Laurent est couvert de glace et lors de conditions d'eau libre. Il permet également d'évaluer le régime des vagues et la fréquence des surcotes en utilisant les paramètres du répertoire pour les comparer aux observations des stations marégraphiques.

2.3. Simulation du régime futur des tempêtes

Le principal intérêt du répertoire de tempêtes est de fournir les données de validation permettant de simuler le régime futur des tempêtes à l'aide de modèles climatiques. Le modèle MRCC piloté par le modèle de circulation général du climat (CGCM2) a été utilisé pour appliquer l'algorithme de Sinclair et les algorithmes de contraintes afin de simuler l'évolution des tempêtes de 1961 à 1990 et de 2041 à 2070. En comparant ces deux périodes de 30 ans, on peut constater que le nombre de tempêtes de type rouge, bleu et

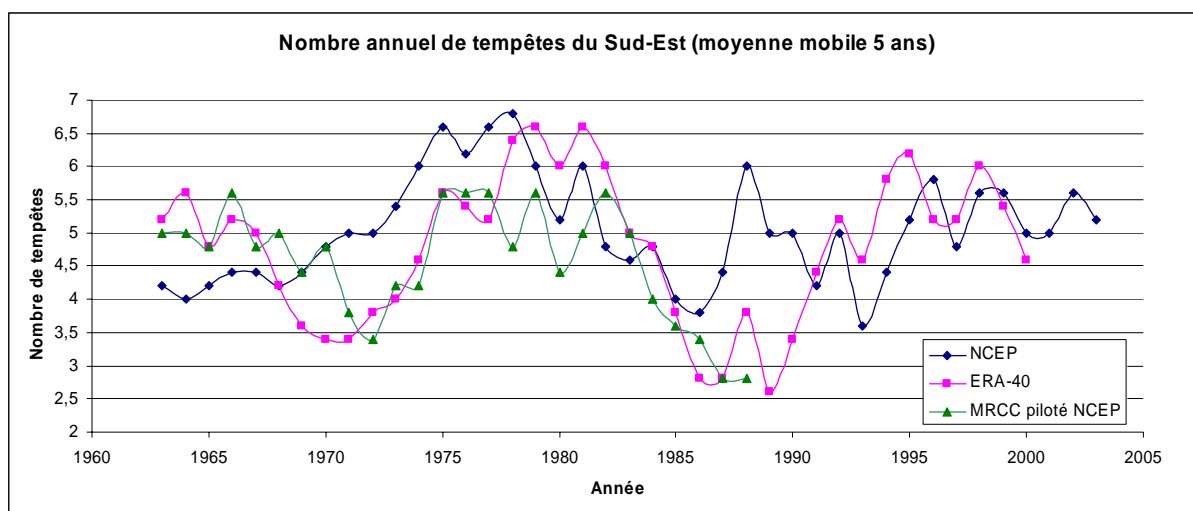


Figure 5 : Nombre annuel de tempêtes produisant de fortes vagues du sud-est dans le golfe du Saint-Laurent (moyenne mobile de 5 ans) lorsque les Golfe est libre de glace (concentration de moins de 30%).

vert diminue. Le tableau 1 montre que le nombre de tempêtes rouge (vent du sud-est) passe de 219 à 187 lorsqu'on compare la période de référence (1961-90) et la période future (2041-70). Pour les tempêtes bleu (vent du nord-est), le nombre total de tempêtes passe de 173 à 140 et pour les verte (vents du nord-ouest), de 814 à 743. Ces valeurs reflètent le nombre total de tempêtes en toutes saisons.

Le nombre de tempêtes obtenu à partir de modèles climatiques est assez proche des résultats des modèles de réanalyse pendant la période de référence 1961-90. Cependant, la distribution saisonnière des tempêtes est différente lorsqu'on utilise le modèle climatique et les réanalyses. Cette première simulation du régime futur des tempêtes du golfe du Saint-Laurent fourni déjà des informations très utiles pour la gestion du réseau routier. D'abord, la simulation indique que le réchauffement du climat aura vraisemblablement pour effet de réduire la fréquence des tempêtes dans le golfe du Saint-Laurent. De plus, cette première simulation indique que cette diminution du nombre de tempêtes n'est pas distribuée uniformément; les tempêtes de type rouge diminuent de 15 %, les bleu, de 19 % et les vert de 9%. Des simulations additionnelles à l'aide des plus récentes versions de GCM et du Modèle régional du Climat Canadien d'Ouranos permettront de vérifier si ces différences sont significatives.

Cette première simulation du régime des tempêtes futur met aussi en relief certains aspects saisonniers du régime futur des tempêtes. Les surcotes se produisent indifféremment en hiver et durant les autres saisons si les conditions de vent et de pression atmosphérique sont favorables. On s'attend donc à une diminution générale des surcotes qui atténuera l'effet du relèvement généralisé du niveau de la mer. Par contre, les vagues ne peuvent se former en présence de plus de 30 % de glace de mer (Jacob et al. (8)). En utilisant les scénarios climatiques sur le réchauffement hivernal fournis par Ouranos, Saucier et Senneville (17) ont reconstitué le développement des glaces dans le golfe du Saint-Laurent. Les simulations qu'ils ont réalisées à l'aide du modèle océanique de l'IML montrent que la durée de la saison de glace pourrait être réduite de 60 % d'ici 2050. La période pendant laquelle le golfe du Saint-Laurent est gelé s'étend actuellement de la mi-janvier à la fin de mars. Dans un climat aux hivers plus chauds de 2°C tel qu'anticipé par les scénarios médians pour 2050, le Golfe ne sera gelé que pendant le mois de février.

Tableau 1 : Résultat des simulations climatiques de tempêtes pour la période de référence 1961-90 et pour la période projetée 2039-70

Nombre de tempêtes	Rouge (vents forts du sud-est)			
	Période simulée	Total 30 ans incluant hiver	Total 30 ans excluant hiver	Durée de la période de glace
NCEP	1961-90	232	156	15 janv au 31 mars
ERA 40	1961-90	201	143	15 janv au 31 mars
MRCC piloté NCEP	1961-90	198	134	15 janv au 31 mars
MRCC piloté CGCM2	1961-90	219	173	15 janv au 31 mars
Scénario pessimiste	2039-2070	187	187	pas de glace
Scénario optimiste	2039-2070	187	171	1 févr au 28 févr

Nombre de tempêtes	Bleue (vents forts du NE)			
	Période simulée	Total 30 ans incluant hiver	Total 30 ans excluant hiver	Durée de la période de glace
NCEP	1961-90	211	137	15 janv au 31 mars
ERA 40	1961-90	163	122	15 janv au 31 mars
MRCC piloté NCEP	1961-90	169	101	15 janv au 31 mars
MRCC piloté CGCM2	1961-90	173	134	15 janv au 31 mars
Scénario pessimiste	2039-2070	140	140	pas de glace
Scénario optimiste	2039-2070	140	122	1 févr au 28 févr

Nombre de tempêtes	Vert (vents forts du NE)			
	Période simulée	Total 30 ans incluant hiver	Total 30 ans excluant hiver	Durée de la période de glace
NCEP	1961-90	802	461	7 janv au 7 avril
ERA 40	1961-90	740	425	7 janv au 7 avril
MRCC piloté NCEP	1961-90	762	432	7 janv au 7 avril
MRCC piloté CGCM2	1961-90	814	513	7 janv au 7 avril
Scénario pessimiste	2039-2070	743	743	pas de glace
Scénario optimiste	2039-2070	743	644	1 févr au 28 févr

Les résultats de Saucier et Senneville (17) ont été utilisés pour simuler les tempêtes qui se produisent uniquement lorsque les concentrations de glaces du Golfe sont inférieures à 30%. Ces données montrent que lorsqu'on tient compte de la disparition probable des glaces, le nombre de tempêtes capables de produire de fortes vagues (moins de 30% de glace) augmente même si le nombre total annuel de tempêtes diminue. La compilation et les procédures de validation de ces résultats ne sont pas encore terminées, mais ces premiers résultats nous donne un bon aperçu des tendances qui se dessinent pour les prochaines décennies.

La caractérisation des tempêtes permet donc d'identifier les zones côtières qui subiront l'impact le plus sévère de l'érosion des berges et des vagues sur les infrastructures. Nous espérons qu'elle permettra aussi d'évaluer de manière plus efficace l'intensité, la fréquence et la durée des tempêtes futures en réponse aux changements climatiques afin de fournir au Ministère des Transport du Québec les informations permettant de renforcer le réseau et de réduire les risques d'isolement plus ou moins prolongé des populations côtières suite à des ruptures du réseau routier.

3. DE L'ÉVALUATION D'IMPACT À L'ADAPTATION

Il est clair que la première étape menant à une meilleure adaptation du réseau routier aux modifications potentielles consiste à bien évaluer sa vulnérabilité et l'impact des changements climatiques. Cependant, une bonne analyse de risque et une bonne compréhension des causes de ce risque par les scientifiques ne suffisent pas. Il est tout aussi essentiel que les gestionnaires du réseau routier et les autres usagers et décideurs de la zone côtière puissent comprendre correctement la portée des risques et des enjeux des changements climatiques pour les infrastructures côtières. Une partie importante des difficultés d'adaptation découle du manque de communication entre les décideurs, usagers de la zone côtière et les scientifiques. Cette communication doit se faire dans les deux sens : les chercheurs ne peuvent concevoir des solutions acceptables s'ils ne comprennent pas la dynamique sociale, économique et culturelle des populations affectées; les populations et les décideurs doivent comprendre les bases scientifiques qui les amènent à prendre des mesures souvent contraignantes.

Dans le passé, lorsqu'une route était menacée par l'érosion des berges ou par d'autres processus naturels, la réponse des pouvoirs publics se limitait à deux types de réactions : protéger la route à l'aide d'enrochements linéaires ou de murs plus ou moins verticaux (ouvrages de maçonnerie) ou déplacer la route vers l'intérieur des terres si les ouvrages de protection s'avéraient trop coûteux ou peu efficaces. Cette pratique a dominé le mode d'intervention jusqu'au début des années 1990, alors que les préoccupations environnementales et socio-économiques sont devenues prioritaires.

De plus, la durée de vie utile des ouvrages de protection s'est souvent avérée plus courte que prévue. Beaucoup de ces ouvrages sont construits sur d'épais dépôts d'argiles sensibles qui finissent par perdre leur capacité portante avec le temps. Les glaces enfin peuvent aussi causer d'importants dommages aux infrastructures de protection.

Un autre aspect de la problématique de l'érosion côtière sur le réseau routier est l'interaction avec les activités des communautés côtières. Les routes régionales ne sont pas seulement des artères vitales permettant le transport des personnes et des biens marchands. Elles sont aussi des pôles de développements social et économique. On ne peut pas déplacer ou protéger une route sans affecter les activités des populations qui se sont installées en bordure de ces routes. Toute action ou décision concernant une route a un impact important sur les municipalités et les riverains, ainsi que sur les autres infrastructures côtières.

Dès lors, le choix du mode de gestion des problématiques d'érosion ou des risques affectant les infrastructures ne peut être simplement dicté par le désir de maintenir l'intégrité des infrastructures. Ce choix doit aussi tenir compte des environnements biophysique et socio économique qui s'y rattachent.

3.1. Les solutions de gestion intégrée

Dans les années 1990, le Ministère des Transport, en collaboration avec le ministère de la Sécurité publique du Québec et d'autres ministères du gouvernement du Québec (Environnement, Développement régional, etc.) a entrepris une révision des méthodes et des pratiques usuelles de gestion des routes côtières. Des études ont été menées pour circonscrire l'étendue du problème de l'érosion (10), son impact sur le réseau routier et pour identifier les méthodes permettant de minimiser les coûts des conséquences environnementales et socio économiques de l'érosion des berges sur le réseau routier (11-12). L'objectif ultime de ces efforts était de développer une gestion intégrée de la zone

côtière dans laquelle s'inscrit l'ensemble des usages et des besoins des utilisateurs dans une perspective de développement durable (12). Ce processus est assez complexe et requiert beaucoup de travail de conscientisation, de consultation et d'acquisition de connaissances scientifiques des processus qui contrôlent la dynamique géomorphologique de la zone côtière.

Le projet d'étude en cours sur l'impact des changements climatiques sur la zone côtière du golfe du Saint-Laurent comporte un important volet dédié à l'interaction avec les décideurs et les usagers de la zone côtière. Ce projet, initié et coordonné par Ouranos, a adopté une formule participative qui comportait, dès le début du projet, la tenue d'ateliers dans chacune des trois régions témoins. Ces ateliers regroupent des représentants de l'ensemble des usagers et des décideurs des divers paliers de gouvernement (fédéral, provincial, régional et municipal). Ils comprennent aussi des représentants des milieux industriels (pêche, tourisme, etc.) et des groupes de citoyens et de défense de l'environnement. Les participants aux ateliers ont défini les zones prioritaires à étudier, les problématiques prioritaires et ont élu les 8 membres de comités d'adaptation dont la mission est de participer directement aux réflexions et développements et de proposer les solutions d'adaptation aux changements climatiques sur la zone côtière. Environ 30% du budget de recherche a été consacré à ces ateliers et aux trois comités d'usagers et de décideurs. La figure 6 présente le schéma de réalisation du projet.

Le travail des comités d'usagers qui se réunissent périodiquement s'est révélé un élément clef du projet. Les conseils municipaux et plusieurs organisations gouvernementales ont demandé à l'équipe de projet de les assister dans la mise sur pied de mesures et de programmes d'adaptation connexes, incluant des schémas directeurs de municipalités, des projets de zonage, des programmes de restauration des milieux humides côtiers, des études spécifiques visant à élaborer des stratégies de préservation de plages et de systèmes côtiers, etc.

Au total, l'activité secondaire ou indirecte des comités a suscité des réinvestissements en recherche qui ont doublé la valeur initiale du projet. Parmi les conséquences induites par cette approche participative, des citoyens et des organismes de défenses des riverains qui étaient en conflit ouvert et parfois judiciaire avec les pouvoirs publics ont repris un dialogue constructif et se sont entendus sur des pistes de solutions.

La démarche participative est complexe, plus lourde et plus lente que les méthodes plus traditionnelles où les scientifiques s'adressent uniquement aux décideurs gouvernementaux via des rapports techniques proposant des solutions techniques et administratives. Cependant cette approche participative semble donner de meilleurs résultats lors de la mise en œuvre des solutions d'adaptation. Le principal mérite de cette approche est de placer l'information scientifique au cœur des débats, incluant les doutes et les difficultés méthodologiques que les chercheurs partagent entre eux et avec les membres des comités, les participants aux ateliers, les riverains et les élus locaux.

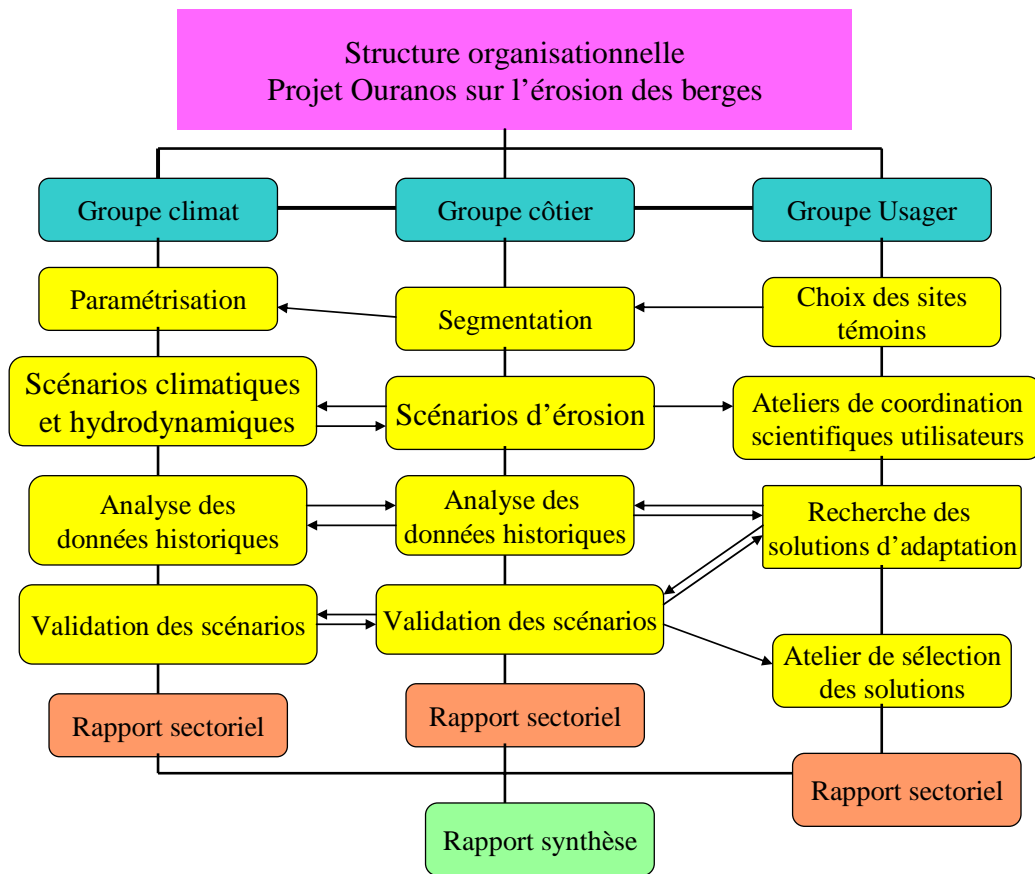


Figure 6 - Structure organisationnelle du projet

4. CONCLUSION

Les changements climatiques auront vraisemblablement un impact significatif sur le réseau routier national dans la région maritime du Québec et du golfe du Saint-Laurent. Les méthodes d'évaluation des risques et des conditions extrêmes pouvant menacer l'intégrité du réseau routier et des autres infrastructures critiques en zone côtière doivent être adaptées. Les méthodes traditionnelles consistant à utiliser des projections statistiques basées sur les données passées ne sont plus fiables. De nouvelles méthodes fondées sur les projections de modèles climatiques offrent une alternative intéressante.

Les premiers résultats montrent que le nombre de tempêtes diminuera dans le golfe du Saint-Laurent, ce qui aura pour effet de diminuer la fréquence des surcotes qui provoquent des épisodes de submersions. Par contre, le rehaussement du niveau de la mer aura un effet contraire et les études en cours visent à déterminer le résultat net de ces deux tendances opposées. En ce qui concerne les vagues causées par les tempêtes, les simulations montrent que le nombre total de fortes vagues augmentera sur certaines côtes en dépit de la diminution du nombre de tempêtes. Cette augmentation sera causée par la disparition progressive des glaces de mer qui allonge la période pendant laquelle les tempêtes peuvent engendrer de fortes vagues.

De plus, certains types de tempêtes, qui sont très abondantes en hiver, auront un impact de plus en plus important sur les berges sensibles. Les prochaines étapes de la recherche utiliseront des projections climatiques d'ensemble pour affiner ces résultats. Cependant, le projet en cours montre que la bonne connaissance du risque ne suffit pas à trouver les

bonnes solutions d'adaptation. Une approche participative, mettant à contribution l'ensemble des usagers et des décideurs présente un atout majeur pour élaborer des solutions d'adaptation durables face aux changements climatiques.

Remerciements : Ouranos tient à remercier le Ministère des Transport du Québec et plusieurs de ses spécialistes dont Christian Poirier, Louis Vigneau et Louis Belzile qui ont participé au projet d'Ouranos et fournit une partie des données de cette présentation. Notre reconnaissance s'adresse également au Ministère de la Sécurité publique du Québec qui est à l'origine du projet et plus particulièrement à François Morneau, qui coordonne ce projet avec une grande compétence et beaucoup de persévérance. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements pour leur travail remarquable à l'ensemble des chercheurs du projet qui oeuvrent au sein des organisations suivantes : l'université du Québec à Rimouski, l'Institut des Science de la mer de Rimouski, Pêches et Océans Canada, Environnement Canada et Ouranos.

RÉFÉRENCES

1. Bernatchez, P. (2005). Bilan des connaissances sur la déglaciation du Saint-Laurent et les variations du niveau marin relatif de la Mer de Goldthwait. Rapport de recherche pour le Parc Boréal du Saint-Laurent.
2. Bernatchez, P. (2003). Les impacts des changements climatiques sur les littoraux de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. Bulletin de l'AQQUA, 29 :8-9.
3. Bernatchez, P. et Dubois, J.M.-M. (2007). Seasonal quantification of coastal processes and cliff erosion on fine sediments shoreline in a cold temperate climate, North Shore of the St. Lawrence Maritime Estuary, Québec. Journal of Coastal Research.
4. Dionne, J.C. (2002). Une nouvelle courbe du niveau marin relatif pour la région de Rivière-du-Loup (Québec). Géographie physique et Quaternaire, vol. 56, no 1, p 33-44.
5. Dubois, J.-M.M., Bernatchez, P. et Bouchard, J.-D. (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.
6. Forbes, D.L., Parkes, G.S., Manson, G.K. et Ketch, L.A. (2004). Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. Marine Geology, 210 : 169-204.
7. IPCC. (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 and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
8. Jacob D., Perrie W., Toulany B., Saucier F., Lefebvre D. and Turcotte V. (2002). Wave Model Validation in The St-Lawrence River Estuary, 7th International Workshop on Wave Hindcasting and forecasting, CMOS 2002.
9. Morneau F. et al. (2001). Étude d'impacts sur l'environnement : programme de stabilisation des berges autour de la péninsule gaspésienne, Ministère des Transports, DGQE.Tome 1 150pp.
10. Morneau, F. et al. (2004). Problématique de l'érosion littorale en milieu marin, les faits saillants, Ministère de la Sécurité publique, 17 pp.
11. Morneau, F. (1999a). Programme de stabilisation des berges de la péninsule de Manicouagan 1989-1996. In Actes du Colloque sur l'érosion des berges, vers une gestion intégrée des interventions en milieu marin ; pp. 65-72.
12. Morneau, F. (1999b). Modèle d'analyse visant la gestion intégrée des zones côtières. In Actes du Colloque sur l'érosion des berges, vers une gestion intégrée des interventions en milieu marin ; pp. 122-131.
13. McCulloch M. M., Forbes, D.L., Shaw, R.W. 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.
14. Plummer D. A., Caya, D., Frigon, A., Côté, H., Giguère, M., Paquin, D., Biner, S., Harvey, R. et De Elia, R. (2006). Climate and Climate Change over North America as Simulated by the Canadian RCM, Journal of Climate, 19: 3112-3132.

15. Saucier, F.J., Roy, F., Gilbert, D., Pellerin, P. et Ritchie, H. (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): 3269-3289.
16. Saucier, F.J., Chassé, J., Couture, M., Dorais, R., D'Astous, A., Lefaivre, D. et Gosselin, A. (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 (C. A. Brebbia & P. Anagnostopoulos, Eds.), *J. Computational Mechanics*, Wessex Institute of Technology Press, 87-97.
17. Senneville, S. et Saucier, F.J., 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..
18. Sinclair, M.R. (1994). An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere., *Mon. Weather Rev.*, 122, 2239-2256.
19. Sinclair, M.R. (1997). Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. *Weather and Forecasting*, 12, 591-608.
20. Xu, Z., Saucier, F.J and Lefaivre, D. (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