

**Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du
Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un
contexte de changements climatiques :**

Volume 3

**Développement d'une approche et d'un indice pour quantifier la
vulnérabilité des infrastructures routières à l'érosion et à la
submersion côtière dans un contexte de changements climatiques
sur 9 sites témoins**

Projet X008.1

Susan Drejza, M.Sc.

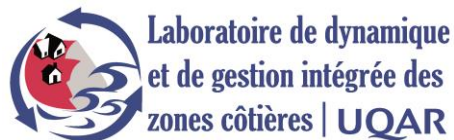
Stéphanie Friesinger, M.Sc.

et Pascal Bernatchez, Ph. D.

Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières

Université du Québec à Rimouski

Réalisé pour le compte du Ministère des Transports



Mars 2015

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports du Québec et a été financée par la Direction de l'environnement et de la recherche.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les opinions du ministère des Transports du Québec.

COLLABORATEURS

- **Pascal Bernatchez**, Ph.D., titulaire du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC), Université du Québec à Rimouski et Professeur titulaire de la Chaire en géoscience côtière du Québec
- **Susan Drejza**, M.Sc., professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR
- **Stéphanie Friesinger**, M.Sc. professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR
- **Guillaume Marie**, Ph.D. professeur, LDGIZC, UQAR
- **Stéfanie Van-Wiersts**, M.Sc., candidate au doctorat en environnement, LDGIZC, UQAR, relevés de terrain, traitement et analyse des données LiDAR, rédaction de la section sur les données LiDAR
- **Ursule Boyer-Villemaire**, M.Sc., candidate au doctorat en environnement, LDGIZC, UQAR
- **David Didier**, M.Sc., candidat au doctorat en environnement, LDGIZC, UQAR, assistant relevés terrain
- **Steeve Dugas**, B.Sc., professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR, assistant relevés terrain
- **David Lacombe**, B.Sc., technicien, LDGIZC, UQAR, assistant relevés terrain
- **Geneviève Boucher-Brossard**, M.Sc., LDGIZC, UQAR assistante relevés terrain
- **Patrick Bouchard**, technicien, LDGIZC, UQAR, assistant relevés terrain

RÉFÉRENCE SUGGÉRÉE

DREJZA, S., FRIESINGER, S., P. BERNATCHEZ et G. MARIE (2014), **Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques** : Développement d'une approche et d'un indice pour quantifier la vulnérabilité des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques sur 9 sites témoins. **Volume III. Projet X008.1.** Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Remis au ministère des Transports du Québec, mars 2015, 308 p.

CHARGÉ DE PROJET AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC

Michel Michaud, géog., M.ATDR

Conseiller en recherche
Service de la coordination de la recherche et de l'innovation
Direction de l'environnement et de la recherche
Ministère des Transports du Québec
930, chemin Ste-Foy, 6e étage
Québec (Québec) G1S 4X9
Téléphone : 418 644-0986 poste 4161
Télécopieur : 418 643-0345
Courriel : michel.michaud@mtq.gouv.qc.ca

COMITÉ DE SUIVI DU PROJET

- **Michel Michaud**, chargé de projet, direction de l'environnement et de la recherche, MTQ
- **Louis Belzile**, Direction du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine, MTQ
- **Claudine Forget**, Direction du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine, MTQ
- **Jonathan Saint-Laurent**, Direction du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine, MTQ
- **Louis Vigneau**, responsable du Centre de services des Îles-de-la-Madeleine, MTQ
- **Annie Lévesque**, Direction de la Côte-Nord, MTQ
- **Marie-Hélène Grenon**, Direction de la Côte-Nord, MTQ
- **Yannick Prémont**, technicien en géomatique, Direction des technologies de l'information, MTQ
- **Maude Boucher**, ingénieure, Direction du laboratoire des chaussées, MTQ
- **Michel Leclerc**, professeur honoraire, ing., Ph.D, INRS-ETE

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tous les membres du laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'UQAR pour leurs réflexions et discussions constructives sur la vulnérabilité et les méthodes de calculs qui ont accompagné la réalisation de ce rapport. Particulièrement Guillaume Marie et Ursule Boyer-Villemaire.

Nous remercions les aménagistes, les directeurs généraux et les services d'urbanisme des municipalités de Chandler, Maria, Carleton-sur-Mer, Rivière-à-Claude, Baie-des-Sables, Saint-Ulric, Port-Cartier, Rivière-au-Tonnerre, Rivière-Saint-Jean et Longue-Pointe-de-Mingan qui nous ont renseigné sur les réseaux connexes et les infrastructures municipales qui pouvaient être présentes sous les routes nationales que nous étudions.

Nous tenons également à remercier les personnes du MTQ qui nous ont consacré du temps pour répondre à notre questionnaire, le comité de suivi ainsi que les différents collaborateurs du ministère des Transports du Québec, qui ont participé aux différentes réunions de suivi de ce projet, nous aidant ainsi à affiner notre indice de vulnérabilité des routes à l'érosion et à la submersion.

Nous remercions le ministère des Transports du Québec (MTQ) pour le financement de ce projet de recherche dans le cadre du programme de recherche du MTQ en adaptation aux impacts des changements climatiques lié à la mise en œuvre de l'action 23 du Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012 (Fond vert) du Gouvernement du Québec.

RÉSUMÉ

Dans le contexte actuel où l'érosion et la submersion engendrent des problèmes pour certaines routes provinciales (274 segments de routes sont actuellement suivis par le ministère des Transports du Québec en ce qui a trait à la problématique de l'érosion) et dans le contexte à venir où l'on s'attend à une amplification des aléas due aux changements climatiques (hausse du niveau marin global, modification du régime des tempêtes, diminutions des glaces côtières...), le ministère des Transports du Québec a lancé cette étude afin de déterminer la vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques.

Il est important de distinguer l'exposition d'une infrastructure à un aléa de sa vulnérabilité. L'**exposition** d'une infrastructure à un aléa est la potentialité qu'un élément (un enjeu) puisse être affecté par cet aléa, tandis que la **vulnérabilité** d'un système correspond à son incapacité à faire face aux effets défavorables des aléas. La vulnérabilité d'un système est donc fonction du degré d'exposition, mais également de la sensibilité du système aux aléas (ou perturbations), des enjeux présents et de la capacité d'adaptation mise en œuvre pour réduire ou éliminer les effets néfastes de ces aléas sur le système.

L'objectif de ce rapport était de développer une approche et un indice pour quantifier la vulnérabilité des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques. Un **Indice de Vulnérabilité des Routes aux Aléas Côtiers** nommé **IVRAC** a ainsi été élaboré tant pour le court (2020), le moyen (2060) et le long terme (2100). Neuf sites témoins, situés dans les régions du Bas-Saint-Laurent, de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine et de la Côte-Nord, ont été utilisés pour mettre au point cet indice (Baie-des-Sables à Saint-Ulric, Rivière-à-Claude, Chandler, Carleton et Maria, la baie de Plaisance, Pointe-aux-Loups, Pentecôte, rivière au Bouleau et Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan).

Tout d'abord, une description et une analyse détaillée de la dynamique côtière et des processus présents sur les sites témoins ont été réalisées afin de caractériser de manière la plus précise possible les aléas d'érosion et de submersion qui peuvent affecter les infrastructures routières dans ces secteurs. Puis la route nationale étudiée (132, 199 ou 138 selon les sites) a été numérisée sur la ligne de rive latérale côté mer et divisée en segments de 100 m. L'analyse de la vulnérabilité a été effectuée pour chacun des segments.

L'indice proposé est composé de deux sous-indices (un pour l'aléa d'érosion et un pour l'aléa de submersion) qui sont combinés pour produire l'indice global (IVRAC). Chaque paramètre évalué s'est vu attribuer un score entre 1 et 5 selon sa propension à augmenter (5) ou non (1) la vulnérabilité de la route. Chaque sous-indice est la racine carrée du produit des scores de 10 différents éléments. Pour obtenir l'IVRAC, les sous-indices sont additionnés puis divisés par deux. L'outil devait contenir suffisamment de critères pour refléter la complexité du système naturel et humain, mais suffisamment peu pour pouvoir être opérationnel et permettre une mise à jour facile. Les différents paramètres utilisés sont :

- L'exposition aux aléas (score de 0 à 5)
- Les caractéristiques du segment de route :
 - quantité de véhicules circulant par jour (DJMA)
 - population résidant directement sur le segment
 - rang côtier (nombre de rangées d'infrastructures présentes entre la route et la côte)
 - présence d'infrastructures connexes sous la route (électricité, aqueduc, égout, câble, etc.)
 - facilité de rétablissement du service
 - sécurité des usagers (vis-à-vis de l'érosion ou de la submersion)
- Les caractéristiques du réseau :
 - présence ou non d'une voie de contournement et longueur de celle-ci
 - accès aux services essentiels (pompiers et hôpital)
- L'adaptation (présence éventuelle de structures de protection)

Pour les neuf sites témoins étudiés, l'IVRAC varie entre 0 et 159,1. Les résultats ont été classés en 5 niveaux selon les actions à entreprendre :

- Non vulnérable : aucune intervention nécessaire
- Faible : intervention à planifier à long terme
- Moyenne : intervention à planifier à moyen terme ou au cas par cas
- Élevée : intervention rapide nécessaire
- Critique : intervention immédiate nécessaire

Sur les 1224 segments de routes analysés, 5 ont un IVRAC critique dès 2020, 17 d'ici 2060 et 26 d'ici 2100. Si actuellement seulement 19,9 % des segments de routes sont vulnérables aux aléas côtiers, cette proportion monte à 35,9 % d'ici 2060 et à 54,0 % d'ici 2100.

Les auteurs sont conscients des limites de la méthode, mais l'outil que représente un tel indice est important pour déterminer les priorités d'actions qui devront être prises à l'avenir et déterminer sur quel paramètre intervenir. Une analyse de vulnérabilité est ainsi un bon outil d'aide à la décision, de hiérarchisation des enjeux et de priorisation des actions.

ABSTRACT

In the current context where coastal erosion and flooding cause problems for some provincial roads (274 road segments are currently being followed by the ministry of Transport of Québec in regard to the problem of erosion) and in the future context where an amplification of hazards due to climate change is expected (sea level rise, changes in storm patterns, decreases in coastal ice...), the Ministry of Transports of Quebec launched this study to determine the vulnerability of road infrastructure in Eastern Quebec to erosion and coastal flooding in the context of climate change.

It is important to distinguish the exposure of an infrastructure to a hazard from its vulnerability. The exposure of an infrastructure is the potentiality that a hazard could affect it; while the vulnerability of a system is its inability to cope with the adverse effects of the hazards. The vulnerability of a system is based on the degree of exposure but also the sensitivity of the system, the stakes present and of the adaptive capacity implemented to reduce or eliminate the negative effects of hazards on the system.

The objective of this research was to develop an approach and an index to quantify the vulnerability of road infrastructure to erosion and coastal flooding in the context of climate change. A vulnerability index of roads to coastal hazards named IVRAC has been developed for both the short (2020), average (2060) and long term (2100). Nine test sites, in the region of Bas-Saint-Laurent, Gaspésie—Îles-de-la-Madeleine and Côte-Nord, were used to develop this index (Baie-des-Sables and Saint-Ulric, Rivière-à-Claude, Chandler, Carleton and Maria, the baie de Plaisance, Pointe-aux-Loups, Pentecôte, rivière au Bouleau and Rivière-Saint-Jean to Longue-Pointe-de-Mingan).

First, a description and a detailed analysis of coastal dynamics and processes on the control sites was conducted to characterize in the most accurate way the erosion and flooding hazards that can affect road infrastructure in these sectors. Then the studied national road (132, 199 or 138 depending on the site) was digitized on the seaside lateral white line and divided into 100 m segments. The vulnerability was determined for each segment.

The proposed index is composed of two sub-indices (one for the hazard of erosion and the other for flooding hazard) which are combined to produce the global index (IVRAC). Each evaluated parameter was given a score between 1 and 5 according to its propensity to increase (5) or not (1) the vulnerability of the

road. Each sub-index is the square root of the product of the scores of 10 different elements. For the IVRAC, sub-indices are summed and then divided by two. The tool should contain sufficient criteria to reflect the complexity of the natural and human system, but little enough to be operational and allow easy updating. The parameters used are:

- Exposure to hazards (scores from 0 to 5)
- The characteristics of the road segment:
 - amount of vehicles per day
 - population residing directly on the segment
 - coastal rank
 - presence of related infrastructure under the road (electricity, water, sewer...)
 - ease of service restoration
 - user safety (toward erosion or toward submersion)
- Network characteristics:
 - Presence or absence of a bypass road and length of it
 - Access to essential services (fire station and hospital)
- Adaptation (possible presence of protective structures)

For the nine test sites studied, the IVRAC varies between 0 and 159.1. The results were classified into 5 levels depending on the actions to be undertaken:

- Not Vulnerable: no action required
- Low: intervention plan for the long term
- Average: intervention plan in the medium term or case by case
- High: rapid response required
- Critical: immediate intervention required

Among the 1224 road segments analyzed, 5 have a critical IVRAC by 2020, 17 by 2060 and 26 by 2100. Currently only 19.9 % of road segments are vulnerable to coastal hazards. This proportion rises to 35.9 % by 2060 and to 54.0 % by 2100.

The authors are aware of the limitations of the method, but the tool that represent such an index is important in prioritizing actions to be taken in the future and to determine on which parameter to intervene. Vulnerability analysis is thus a good tool for decision support, prioritization of issues and actions.

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'Indice de Vulnérabilité des Routes aux Aléas Côtiers (IVRAC) développé lors de cette étude a été appliqué à neuf sites témoins pour un total de 122,4 km de routes. Il a permis d'évaluer les segments les moins vulnérables et ceux qui le sont le plus pour chaque site et pour l'ensemble des routes étudiées. Plusieurs constats généraux concernant vulnérabilité des routes face aux aléas côtiers ont ainsi émergé des analyses effectuées.

Facteurs contribuent à augmenter la vulnérabilité des routes :

- Une route avec un fort débit journalier moyen.
- L'absence de voie de contournement.
- La coupure de l'accès aux services d'urgence (pompiers et/ou hôpital).
- Une route située dans un environnement de falaises soumises à des mouvements de terrain (danger pour les usagers, augmentation de la difficulté de réparation).

Facteurs contribuent à réduire la vulnérabilité des routes :

- La présence d'une voie de contournement (réseau robuste).
- La mise en place de mesures d'adaptation aux aléas.
- L'entretien des structures de protection présentes.

Prérequis nécessaires pour calculer l'IVRAC :

- Caractérisation du milieu physique dans lequel se situe la route (type de côte, processus, dynamique hydrosédimentaire...)
- Bonne connaissance de la dynamique des côtes afin de caractériser précisément les aléas d'érosion et de submersion présents. De nouvelles études seront nécessaires surtout en ce qui a trait à la submersion (pour une modélisation dynamique de la submersion et l'inclusion du *wave runup* notamment) et pour intégrer les foyers d'érosion (*erosion hotspot*) dans les projections.

Limites de la méthode de l'IVRAC et améliorations possibles :

- La méthode ne prend pas en compte d'autres aléas qui pourraient affecter la vulnérabilité globale de la route (tels que les coulées argileuses, avalanches, chutes de glace et de blocs de roche...).
- La méthode ne prend pas en compte l'effet domino (cascades de conséquences, secteurs qui pourraient se retrouver isolés à la suite de la rupture de plusieurs segments de route...)
- Il n'y a pas de prise en compte des facteurs financiers dans l'indice (ni le coût de la rupture pour l'économie, ni le coût de la réparation ou des mesures d'adaptation à mettre en place).

Solutions possibles selon l'analyse de la vulnérabilité :

- Mettre à jour annuellement (ou mettre en place) un plan de mesures d'urgence qui intègre les impacts des aléas côtiers sur les routes.
- Il est important de connaître les deux sous-indices (vulnérabilité à l'érosion / à la submersion) afin de mieux comprendre la situation du segment de route et de pouvoir en tenir compte dans la gestion et les types de solutions à envisager.
- Il est important que les solutions pour réduire la vulnérabilité envers un aléa n'aggravent pas les conséquences d'autres aléas (par exemple intervention rigide pour limiter l'érosion qui peut amplifier la submersion).
- L'analyse des scores des différents paramètres qui ont conduit au calcul de la vulnérabilité permet de bien comprendre les raisons qui ont conduit à un tel niveau de vulnérabilité et ainsi de savoir sur quels paramètres les interventions pourraient être faites pour la réduire.
- Déterminer le niveau d'acceptabilité vis-à-vis des conséquences de l'aléa peut permettre de déterminer les solutions à mettre en place (par exemple acceptation ou non d'une fermeture temporaire de la route).
- Évaluer la robustesse du réseau et la possibilité d'ajouter une voie de contournement pour les secteurs les plus vulnérables.
- Laisser un espace de liberté à la côte afin d'éviter que les reculs événementiels lors de tempêtes n'affectent la route (car ce type de recul peut survenir même dans les secteurs stables à long terme).
- Effectuer un suivi régulier de la situation pour ajuster le niveau de vulnérabilité et les solutions à mettre en place.
- Intégrer de manière préventive les adaptations aux aléas lors des entretiens réguliers.

Conclusions :

- L'indice de vulnérabilité doit servir comme outil d'aide à la décision et de priorisation d'interventions à court, moyen et long terme.
- L'IVRAC devrait être mis à jour au fur et à mesure que le contexte évolue (modification dans le débit journalier par exemple) ou que les données sont définies avec plus de précision (nouvelles analyses de submersion par exemple).
- L'étude de vulnérabilité est une première étape et elle peut être suivie par une estimation des coûts selon les solutions possibles et les périodes d'intervention projetées.
- Il serait intéressant d'appliquer l'IVRAC pour l'ensemble des routes de l'Est du Québec; voire de l'étendre aux autres enjeux présents en zone côtière afin de développer une approche qui intègre davantage l'aménagement et la planification du territoire dans son ensemble.

SYNTHESIS OF CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The vulnerability index of roads to coastal hazards (IVRAC) developed in this study was applied to nine test sites for a total of 122.4 km of roads. It assessed the least vulnerable segments and those that are the most vulnerable for each site and for all the studied roads. Several general observations concerning vulnerability of road facing coastal hazards have emerged from the analysis.

Factors that increase the vulnerability of roads:

- A road with a high average daily flow.
- Lack of bypass road.
- The cutoff of access to emergency services (fire fighter and/or hospital).
- A road built in cliffs environment subject to landslides (danger for users, increased difficulty of repair).

Factors that contribute to reduce the vulnerability of roads:

- The presence of a bypass road (robust network).
- The establishment of adaptation measures to hazards.
- Maintenance of the protective structures.

Prerequisites necessary to calculate IVRAC:

- Characterization of the physical environment in which the road lies (type of coast, processes, hydrosedimentary dynamic, ...)
- Good knowledge of the dynamics of the coast in order to accurately characterize erosion and flooding hazards. Further studies will be needed especially with respect to flooding (for dynamic modeling of the flooding and the inclusion of wave run-up in particular) and of erosion hotspots.

Limitations of the IVRAC method and possible improvements:

- The method does not take into account other hazards which could affect the overall vulnerability of the road (such as mudflow, avalanches, falling ice and boulders...).
- The method does not take into account the domino effect (cascading consequences, sectors could find themselves isolated following the breakdown of several road segments...)
- There is no consideration of financial factors in the index (neither the cost of the rupture of the road for the economy, nor the cost of the repair or of the adaptation measures to be put in place).

Possible solutions according to vulnerability analysis:

- Develop an emergency measures plan that includes the impacts of coastal hazards on the roads.
- It is important to know the two sub-indices (vulnerability to erosion / to flooding) to better understand the situation of the road segment and to take it into account in the management and the types of solutions.
- It is important that the solutions to reduce vulnerability to one hazard do not exacerbate other hazards consequences (eg. rigid defence structure to limit erosion which could increase flooding).
- Analysis of the scores of the different parameters that led to the calculation of the vulnerability index allows to understand the reasons that led to such a level of vulnerability and so to know on what parameters interventions could be made to reduce it.
- Determine the level of acceptability toward the consequences of the hazard can determine the solutions to implement (eg. acceptance or not of a temporary closure of the road).
- Assess the robustness of the network and the option to add a bypass road for the most vulnerable sectors.
- Leave a space of freedom to the coast to prevent that the event erosion happening during storms affects the road (because such erosion can occur even in long-term stable sectors).
- Conduct regular monitoring of the situation to adjust the level of vulnerability and the solutions to implement.
- Integrate preventively adaptations to the hazards during regular maintenance.

Conclusions:

- The vulnerability index should serve as a tool for decision support and prioritization of interventions in the short, medium and long term.
- IVRAC should be updated as the context changes (changes in the daily rate for example) or as the data are defined more precisely (new analyzes of flooding for example).
- The vulnerability study is a first step and can be followed by a cost analysis depending on the possible solutions and on the intervention periods projected.
- It would be interesting to apply IVRAC for all roads in Eastern Quebec; or to extend it to other stakes present in coastal areas to develop an approach that integrates the development and planning of the territory as a whole.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	15
LISTE DES FIGURES.....	19
LISTE DES TABLEAUX	25
LISTE DES ÉQUATIONS	29
LISTE DES ENCADRÉS	29
 GLOSSAIRE	 31
 1 Introduction	 35
1.1 Mise en contexte du projet	35
1.2 Objectifs du projet	36
1.3 Objectifs de ce rapport	37
 2 Concept de vulnérabilité	 41
2.1 <i>Vulnérabilité : concept théorique</i>	41
2.1.1 Définitions et schématisation	41
2.1.2 Équations de vulnérabilité	45
2.1.3 Problèmes de définition	46
2.1.4 Définition adoptée dans cette étude	47
2.2 <i>Pourquoi effectuer une analyse de vulnérabilité ?</i>	49
2.3 <i>Vulnérabilité aux aléas naturels</i>	50
2.3.1 Indices de vulnérabilité à des aléas naturels non côtiers	50
2.3.2 Indices de vulnérabilité aux aléas côtiers	53
2.4 <i>Vulnérabilité des routes</i>	59
2.4.1 Vulnérabilités des routes en tant que réseau	59
2.4.2 Vulnérabilités des routes aux changements climatiques	60
2.4.3 Vulnérabilité des routes à d'autres aléas	62
2.4.4 Vulnérabilité des routes aux aléas côtiers	63

3	Méthodologie de l'analyse côtière	67
3.1	<i>Caractérisation de la côte</i>	67
3.1.1	Type de côte.....	68
3.1.2	État de la côte	71
3.1.3	Artificialité de la côte	72
3.2	<i>Suivi de la côte avec des photographies</i>	72
3.2.1	Type de matériel/installations.....	73
3.2.2	Visualisation et analyse qualitative	74
3.3	<i>Dynamique hydrosédimentaire de la côte.....</i>	78
3.4	<i>Évolution de la côte.....</i>	79
3.4.1	Choix des photographies aériennes.....	79
3.4.2	Géoréférencement	81
3.4.3	Type de trait numérisé	81
3.4.4	Échelle de numérisation.....	82
3.4.5	Évolution historique de la côte	83
3.4.6	Méthodologie de la projection du trait de côte futur	83
3.5	<i>Données LiDAR des sites témoins</i>	84
3.5.1	Système utilisé pour l'acquisition	84
3.5.2	Méthodologie d'acquisition.....	88
3.5.3	Méthodologie de validation	89
3.5.4	Méthodologie de traitement.....	91
3.5.5	Méthodologie d'analyse de la disponibilité sédimentaire	94
4	Méthodologie de l'indice de vulnérabilité de la route aux aléas côtiers (IVRAC).....	99
4.1	<i>Principes généraux</i>	101
4.1.1	Segments de 100 m de route.....	101
4.1.2	Scores des différents paramètres allant de 1 à 5	101
4.1.3	Éléments non considérés.....	101
4.2	<i>Données nécessaires.....</i>	102
4.2.1	Exposition des infrastructures routières aux aléas côtiers.....	102
4.2.2	Caractéristiques du segment de route	113
4.2.3	Caractéristiques du segment de route au sein du réseau	120
4.2.4	Adaptation	122
4.3	<i>Calcul de l'indice de vulnérabilité.....</i>	122

5	Portraits des sites témoins	127
5.1	<i>Description du site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric</i>	<i>127</i>
5.1.1	Caractérisation physique.....	129
5.1.2	Caractérisation humaine	130
5.1.3	Évolution historique de la côte	131
5.2	<i>Description du site de Rivière-à-Claude</i>	<i>133</i>
5.2.1	Caractérisation physique.....	135
5.2.2	Caractérisation humaine	136
5.2.3	Évolution historique de la côte	138
5.3	<i>Description du site de Chandler</i>	<i>140</i>
5.3.1	Caractérisation physique.....	142
5.3.2	Caractérisation humaine	143
5.3.3	Évolution historique de la côte	144
5.4	<i>Description du site de Carleton à Maria</i>	<i>145</i>
5.4.1	Caractérisation physique.....	147
5.4.2	Caractérisation humaine	148
5.4.3	Évolution historique de la côte	149
5.5	<i>Description du site de la baie de Plaisance</i>	<i>151</i>
5.5.1	Caractérisation physique.....	153
5.5.2	Caractérisation humaine	155
5.5.3	Évolution historique de la côte	156
5.6	<i>Description du site de Pointe-aux-Loups</i>	<i>159</i>
5.6.1	Caractérisation physique.....	161
5.6.2	Caractérisation humaine	162
5.6.3	Évolution historique de la côte	163
5.7	<i>Description du site de Pentecôte</i>	<i>167</i>
5.7.1	Caractérisation physique.....	169
5.7.2	Caractérisation humaine	170
5.7.3	Évolution historique de la côte	171
5.8	<i>Description du site de rivière au Bouleau</i>	<i>173</i>
5.8.1	Caractérisation physique.....	175
5.8.2	Caractérisation humaine	176
5.8.3	Évolution historique de la côte	177
5.9	<i>Description du site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan</i>	<i>179</i>
5.9.1	Caractérisation physique.....	181
5.9.2	Caractérisation humaine	183
5.9.3	Évolution historique de la côte	183

6	Résultats : Indice de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers (IVRAC)..	185
6.1	<i>IVRAC pour l'ensemble des sites témoins</i>	185
6.1.1	Description des résultats	185
6.1.2	Sites et segments les plus vulnérables	195
6.1.3	Facteurs augmentant la vulnérabilité	205
6.1.4	Facteurs réduisant la vulnérabilité	206
6.1.5	Importance relative des différents aléas	207
6.2	<i>IVRAC pour chacun des sites témoins</i>	209
6.2.1	Baie-des-Sables à Saint-Ulric	209
6.2.2	Rivière-à-Claude	217
6.2.3	Chandler	223
6.2.4	Carleton à Maria	230
6.2.5	La baie de Plaisance	236
6.2.6	Pointe-aux-Loups	243
6.2.7	Pentecôte	250
6.2.8	Rivière au Bouleau	256
6.2.9	Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	261
7	Discussion	271
7.1	<i>Limite de la méthode et améliorations possibles</i>	271
7.2	<i>Recommandations sur la vulnérabilité aux aléas côtiers</i>	274
8	Conclusion	281
9	Références	283
10	Annexes	295
	<i>Annexe 1</i>	296
	<i>Description des données numériques</i>	296

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des sites témoins	39
Figure 2. Traditions du concept de vulnérabilité en recherche et leur évolution (Adger, 2006)	42
Figure 3. Représentation graphique de la conceptualisation de la vulnérabilité aux changements climatiques.....	43
Figure 4. Résumé schématique des relations conceptuelles entre la vulnérabilité, la résilience et la capacité d'adaptation (Gallopín, 2006)	44
Figure 5. Schématisation de la vulnérabilité théorique aux aléas côtiers utilisée pour cette étude.....	49
Figure 6. Exemple d'exposition physique aux cyclones tropicaux (Peduzzi et al., 2009)	51
Figure 7. Distribution spatiale des « disaster risk index » (DRI) (Peduzzi et al., 2009)	51
Figure 8. Les sept groupes d'indicateurs de l'outil de vulnérabilité aux inondations urbaines (Barroca et al., 2006).....	52
Figure 9. Vulnérabilité des comtés atlantiques basés sur les indicateurs physiques (CVI) et sociaux (CSovi) et leur intégration dans une vulnérabilité locale (PVI : place vulnerability index) (Boruf et al., 2005)	55
Figure 10. « Écran radar » de la vulnérabilité d'une commune (Meur-Férec et al., 2008)	56
Figure 11. Classification des variables des 3 différents sous-indices de vulnérabilité (McLaughlin et Cooper, 2010).....	57
Figure 12. Groupes d'impacts des changements climatiques sur les transports (Thornes et al., 2012)	61
Figure 13. Règle de notation en fonction du risque et de l'urgence (Thornes et al., 2012)	62
Figure 14. Actions préconisées selon le résultat de l'indice d'exposition aux glissements de terrain (Winter et al., 2005)	63
Figure 15. Cumul des infrastructures routières et ferroviaires situées dans les « zones basses » en kilomètres en France métropolitaine (CETMEF, 2009 in Leuxe, 2011) ...	64
Figure 16. Type de matériel de suivi photographique de la côte	73
Figure 17. Limites géomorphologiques observées en côte basse (exemple de Saint-Ulric)	75
Figure 18. Limites géomorphologiques observées en côte à falaise (exemple de Chandler).....	76
Figure 19. Limites géomorphologiques observées en côte artificialisée (exemple de Maria)	77
Figure 20. Trait utilisé pour le traçage de la côte et l'évolution historique selon différentes configurations de côte (modifié de Daigle et al., 2006).....	82
Figure 21. Capteurs et instruments du SMLT	85
Figure 22. Système de navigation inertiel GPS-INS.....	87
Figure 23. Récepteur Trimble R8.....	88

Figure 24. Points de validation (A. infrastructures permanentes et semi-permanentes; B. PVC)	90
Figure 25. Schéma méthodologique synthèse du traitement de données du SMLT	91
Figure 26. Filtre manuel pour la classification des objets sur la plage	93
Figure 27. Limite utilisée pour l'analyse de la disponibilité sédimentaire, exemple de Rivière-à-Claude	95
Figure 28. Schéma méthodologique de calcul de l'IBSP.....	96
Figure 29. Schéma méthodologique de calcul du volume des plages	97
Figure 30. Haut : route 132 à Sainte-Flavie après la tempête du 6 décembre 2010. Bas : Route 132 en septembre 2010 avec la présence d'un enrochement et d'un muret de bois (© LDGIZC-UQAR).....	106
Figure 31. Murets de béton de protection de la route 132 partiellement détruits à la suite de la tempête du 6 décembre 2010 en Haute-Gaspésie (© MTQ)	107
Figure 32. Entre Marsoui et Rivière-à-Claude à la suite de la tempête du 6 décembre 2010, érosion de l'accotement en arrière d'un enrochement (© MTQ)	108
Figure 33. Contours des variations isostatiques de l'est du Canada en mm/an (vertical crustal movements) (Koohezare et al., 2008)	111
Figure 34. Débris de bois et blocs d'enrochement sur une route suite à la tempête du 6 décembre 2010 à Rimouski (© LDGIZC-UQAR)	119
Figure 35. Projection de roches sur la chaussée de la 132 entre Marsoui et Rivière-à-Claude (© MTQ).....	119
Figure 36. Vagues déferlant par-dessus le mur de protection de la route 132 à Maria durant la tempête du 6 décembre 2010 (© Stéphane Montmagny)	120
Figure 37. Site de Baie-des-Sables et Saint-Ulric	127
Figure 38. Vue héliportée de la côte de Saint-Ulric (A) et de Baie-des-Sables (B et C) (© LDGIZC-UQAR, septembre 2010)	128
Figure 39. Types de côtes du site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric	129
Figure 40. Sites suivis et détours possibles du site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric	131
Figure 41. Taux de migrations historiques (1948-2012) et de la période récente (1993-2012) du site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric	132
Figure 42. Site de Rivière-à-Claude.....	133
Figure 43. Photographies du site de Rivière-à-Claude. A – secteur de falaise végétalisée avec terrasse de plage au pied; B et C– secteur de route 132 passant au pied d'un très haut talus rocheux (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	134
Figure 44. Types de côte du site de Rivière-à-Claude	135
Figure 45. Sites suivis et détours du site de Rivière-à-Claude.....	137
Figure 46. Panneau routier avertissant l'aléa de submersion/déferlement de vagues au niveau de la route 132 entre Marsoui et Rivière-à-Claude.	138
Figure 47. Remblai majeur pour la route 132 à Marsoui. En haut en 2009 et en bas en 1939.	139
Figure 48. Site de Chandler	140
Figure 49. Photos du site de Chandler. A – secteur de terrasse de plage à l'ouest du site, B et C – falaise rocheuse naturelle et enrochée (© LDGIZC – UQAR, A et B : septembre 2011, C : septembre 2010)	141
Figure 50. Types de côte du site de Chandler	142

Figure 51. Sites suivis et détours du site de Chandler	144
Figure 52. Site de Carleton et Maria	145
Figure 53. Photos du site de Carleton et Maria. A – secteur de falaises meubles, B et C – secteurs de terrasse de plage avec mur de protection (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	146
Figure 54. Types de côte du site de Carleton et Maria	147
Figure 55. Site suivi et détour du site de Carleton et Maria	149
Figure 56. Site de la baie de Plaisance	151
Figure 57. Photos du site de la baie de Plaisance. A – sur l'île du Havre-Aubert falaises rocheuses, B- tombolo entre Havre-Aubert et Cap-aux-Meules C- tombolo en érosion (© LDGIZC-UQAR, septembre 2010)	152
Figure 58. Types de côte du site de la baie de Plaisance	154
Figure 59. Sites suivis et détour du site de la baie de Plaisance	155
Figure 60. Évolution du volume de plage (m ³) entre 2008 et 2012 du nord (BP01) au sud (BP29) de la baie de Plaisance	156
Figure 61. Évolution de la largeur des plages (m) entre 2008 et 2012 du nord (BP01) au sud (BP29) de la baie de Plaisance	157
Figure 62. Taux de migration probables de la baie de Plaisance (d'après Bernatchez et al., 2012).	158
Figure 63. Site de Pointe-aux-Loups	159
Figure 64. Photos du site de Pointe-aux-Loups A - secteur de tombolo enroché pour protéger la route 199 B – secteur de tombolo en érosion C – secteur de falaise rocheuse (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	160
Figure 65. Types de côte du site de Pointe-aux-Loups	162
Figure 66. Sites suivis et détours du site de Pointe-aux-Loups	163
Figure 67. Évolution probable de la côte (selon Bernatchez et al., 2012)	164
Figure 68. Évolution du volume des plages (m ³) de la cellule Fatima entre 2008 et 2012	165
Figure 69. Évolution de la largeur des plages (m) de la cellule de Fatima entre 2008 et 2012	165
Figure 70. Évolution du volume des plages (m ³) de la cellule de Pointe-aux-Loups entre 2008 et 2012	166
Figure 71. Évolution de la largeur des plages de la cellule de Pointe-aux-Loups entre 2008 et 2012	166
Figure 72. Site de Pentecôte	167
Figure 73. Photos du site de Pentecôte : A – secteur de terrasse de plage à la Pointe-aux-Anglais, B – secteur de terrasse de plage naturelle avec habitations de villégiature entre la route et la mer et C – embouchure d'un cours d'eau côtier (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	168
Figure 74. Type de côte du site de Pentecôte	169
Figure 75. Sites suivis et détour du site de Pentecôte	171
Figure 76. Évolution de la côte du site de Pentecôte	172
Figure 77. Site de rivière au Bouleau	173
Figure 78. Photos du site de rivière au Bouleau : A - vue vers l'ouest, B – flèche littorale à l'embouchure de la rivière au Bouleau et C – vue vers l'est (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	174

Figure 79. Types de côte du site de rivière au Bouleau	175
Figure 80. Plage de blocs à l'est du site de rivière au Bouleau (© LDGIZC-UQAR) ..	176
Figure 81. Sites suivis et détour du site de rivière au Bouleau	177
Figure 82. Évolution de la flèche littorale et des bancs sableux à l'embouchure de la rivière au Bouleau	178
Figure 83. Site de Rivière-Saint-Jean et Longue-Pointe-de-Mingan	179
Figure 84. Photos du site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan : A – secteur des Cayes, falaises meubles, B – basse falaise meuble et C – terrasse de plage (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	180
Figure 85. Types de côte du site de Rivière-Saint-Jean et Longue-Pointe-de-Mingan	181
Figure 86. Sites suivis et détour du site de Rivière-Saint-Jean et Longue-Pointe-de- Mingan.....	183
Figure 87. Niveau de vulnérabilité des routes par classe de l'IVRAC selon les trois horizons de temps.....	186
Figure 88. Niveau de vulnérabilité de routes vulnérables par classes de l'IVRAC selon les trois horizons de temps	186
Figure 89. IVRAC 2020 des 9 sites témoins	191
Figure 90. IVRAC 2060 des 9 sites témoins	192
Figure 91. IVRAC 2100 des 9 sites témoins	193
Figure 92. Segments avec une vulnérabilité critique actuellement - segments MAR078 et 079 (haut) et segment MAR087 (bas) (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	196
Figure 93. Segments avec une vulnérabilité critique d'ici 2060 - segments RSJ091 et 092 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	197
Figure 94. Évolution historique de la côte entre 1948 et 2005 à Rivière-Saint-Jean .	197
Figure 95. Segments avec une vulnérabilité critique d'ici 2060 - segments BDP005 à 013 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	198
Figure 96. Segments avec une vulnérabilité critique d'ici 2100 – segment RSJ105 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	199
Figure 97. Niveau de vulnérabilité à la submersion des routes par classe selon les trois horizons de temps.....	201
Figure 98. Segments avec une vulnérabilité à la submersion critique actuellement – segments RAC040 et 041 (haut) et RAC114 à 118 (bas) (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010).....	202
Figure 99. Niveau de vulnérabilité à l'érosion des routes par classe selon les trois horizons de temps.....	203
Figure 100. Segment avec une vulnérabilité à l'érosion critique d'ici 2060 – segment RSJ020 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	204
Figure 101. Segment avec une vulnérabilité à l'érosion critique à d'ici 2100 – segments MAR001 à 003 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	205
Figure 103. Segment BDS011, vulnérabilité élevée en 2100 (mais faible en 2020 et 2060) (© LDGIZC – UQAR)	212
Figure 102. Segments BDS087 à 089, vulnérabilité élevée en 2100 (mais nulle en 2020 et 2060) (© LDGIZC – UQAR)	213
Figure 104. Segments BDS132 à 134, vulnérabilité nulle (2020, 2060 et 2100) (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	214

Figure 105. IVRAC totaux et partiels du site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric	216
Figure 106. Vagues déferlant par-dessus le mur de protection de la route 132 sur la rive nord de la Gaspésie durant la tempête du 6 décembre 2010 (© LDGIZC-UQAR)	219
Figure 107. Secteur non vulnérable RAC095 à 097	220
Figure 108. IVRAC du site de Rivière-à-Claude	222
Figure 109. Segment CHA022 (© LDGIZC – UQAR)	226
Figure 110. Segment CHA020 (© LDGIZC – UQAR)	226
Figure 111. Segments CHA-14 et 015 (© LDGIZC – UQAR)	227
Figure 112. Chemin de la Débouché – photo de Google Street View	228
Figure 113. IVRAC du site de Chandler	229
Figure 114. Segments moins vulnérables dus à la présence d'une terrasse de plage en avant du mur (© LDGIZC –UQAR)	233
Figure 115. Route du 2 ^{ème} rang à Maria – photo de Google Street View	234
Figure 116. IVRAC du site Carleton à Maria	235
Figure 117. Submersion par la lagune et par une brèche dans les dunes – distance importante, pas de déferlement	239
Figure 118. Submersion par la lagune – dunes du côté de la baie empêchant la submersion.....	239
Figure 119. IVRAC du site de la baie de Plaisance	241
Figure 120. IVRAC du site suivi par MTQ, plage de la Martinique	242
Figure 121. Vulnérabilité élevée PTL123 et-124 (IVRAC 2100) (© LDGIZC- UQAR, septembre 2010)	245
Figure 122. Vulnérabilité élevée PTL182 (IVRAC 2100) (© LDGIZC- UQAR, septembre 2010)	246
Figure 123. Exposition à la submersion à moyen terme et érosion à long terme (© LDGIZC- UQAR, septembre 2010)	246
Figure 124. Érosion via l'intérieur de la lagune (PTL072 et 073) (© LDGIZC- UQAR, septembre 2010)	247
Figure 125. Sites protégés – si non entretenus deviendraient des sites très vulnérables - haut : vue vers l'intérieur – bas : vue vers l'extérieur (© LDGIZC- UQAR, septembre 2010)	248
Figure 126. IVRAC du site de Pointe-aux-Loups	249
Figure 127. IVRAC 2020 aux embouchures des cours d'eau du site de Pentecôte... 252	
Figure 128. Segment PEN048, vulnérabilité élevée dès 2020 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	253
Figure 129. PEN024 et 025 – exemple d'embouchure de cours d'eau – route vulnérable à moyen terme (IVRAC 2060) (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	254
Figure 130. PEN061 et 062, vulnérabilité moyenne (IVRAC 2060 et 2100) – pas de cours d'eau (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	254
Figure 131. IVRAC du site de Pentecôte	255
Figure 132. BOU001 et 002, vulnérables respectivement d'ici 2060 et 2100 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	257
Figure 133. BOU003 et 004 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	259
Figure 134. IVRAC du site de rivière au Bouleau	260
Figure 135. RSJ197 à 203, IVRAC élevé (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)	263

<i>Figure 136. IVRAC du site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan.....</i>	<i>264</i>
<i>Figure 137. IVRAC de la partie est du site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan.....</i>	<i>265</i>
<i>Figure 138. IVRAC de la partie ouest du site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan</i>	<i>266</i>
<i>Figure 139. Reprise rapide de l'érosion (RSJ160 et 161).....</i>	<i>268</i>
<i>Figure 140. Distance entre la route et la côte selon les événements d'érosion et de mouvements de masse (coulée argileuse).</i>	<i>269</i>
<i>Figure 141. Mouvements de versant à proximité de la route 132 dans le nord de la Gaspésie (blocs de glace – blocs de roche – avalanche –coulée de débris).....</i>	<i>274</i>

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Scores des facteurs utilisés pour construire l'indice de vulnérabilité sociale côtière (CSoVI) (Boruff et al., 2005).....	54
Tableau 2. Paramètres physiques utilisés pour créer l'indice de vulnérabilité physique de la côte (CVI) (Boruff et al., 2005).	54
Tableau 3. Principaux descripteurs utilisés dans la matrice d'évaluation de la vulnérabilité (Meur-Férec et al., 2008).....	56
Tableau 4. Scores pour la vulnérabilité au niveau local (McLaughlin et Cooper, 2010)	58
Tableau 5. Définition des principaux types de côtes	68
Tableau 6. Définition des états possibles de la côte.....	72
Tableau 7. Définition des états possible de l'artificialité de la côte (ouvrage de protection)	72
Tableau 8. Nombre de caméras par site témoin et dates d'installations	74
Tableau 9. Liste des photographies aériennes utilisées pour les différents sites témoins.....	79
Tableau 10. Paramètres techniques du capteur laser Riegl VQ-250	86
Tableau 11. Date d'acquisition et longueur de côte couverte par secteur.....	89
Tableau 12. Nombre de points de contrôle pris au DGPS et points géodésiques utilisés	90
Tableau 13. Paramètres utilisés pour calculer l'IVRAC	100
Tableau 14. Reculs événementiels possibles selon les sites et les types de côte	104
Tableau 15. Détails du score « Exposition à l'érosion » selon les différents horizons d'étude.....	108
Tableau 16. Détails du score « Exposition à la submersion »	110
Tableau 17. Variations isostatiques pour les différents sites témoins (d'après Koohzare et al., 2008, sauf Îles-de-la-Madeleine d'après Juneau 2012).....	111
Tableau 18. Détails du score « Largeur de plage »	112
Tableau 19. Détails du score « Distance à la côte »	113
Tableau 20. Détails du score « Débit journalier moyen annuel - DJMA »	114
Tableau 21. Détails du score « Population directement affectée »	114
Tableau 22. Nombre moyen de personnes dans les ménages privés	115
Tableau 23. Détails du score « Rang côtier »	116
Tableau 24. Détails du score « Réseau connexe »	116
Tableau 25. Détails du score « Facilité à rétablir le service »	117
Tableau 26. Détails du score « Sécurité des usagers – érosion »	118
Tableau 27. Détails du score « Sécurité des usagers – submersion »	118
Tableau 28. Détails du score « Voie de contournement »	121
Tableau 29. Détails de scores « Accès à un hôpital » et « Accès aux pompiers »	121
Tableau 30. Niveau de vulnérabilité.....	125
Tableau 31. Proportion de routes vulnérables	185
Tableau 32. Nombre de segments de routes selon leur niveau de vulnérabilité	187
Tableau 33. IVRAC selon les sites et les périodes	189

Tableau 34. Nombre de segments de routes selon leur niveau de vulnérabilité à la submersion.....	200
Tableau 34. Nombre de segments de routes selon leur niveau de vulnérabilité à l'érosion.....	203
Tableau 34. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric	209
Tableau 35. Distance entre la route et la côte – site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric	210
Tableau 36. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric	211
Tableau 37. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Rivière-à-Claude.....	217
Tableau 38. Distance entre la route et la côte – site de Rivière-à-Claude	217
Tableau 39. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de Rivière-à-Claude	218
Tableau 40. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Chandler	223
Tableau 41. Distance entre la route et la côte – site de Chandler.....	224
Tableau 42. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de Chandler.....	225
Tableau 43. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Carleton à Maria.....	230
Tableau 44. Distance entre la route et la côte – site de Carleton et Maria.....	230
Tableau 45. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de Carleton à Maria.....	231
Tableau 46. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site la baie de Plaisance	236
Tableau 47. Distance entre la route et la côte – site de la baie de Plaisance	236
Tableau 48. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de la baie de Plaisance	237
Tableau 49. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Pointe-aux-Loups	243
Tableau 50. Distance entre la route et la côte – site de Pointe-aux-Loups.....	243
Tableau 51. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de Pointe-aux-Loups.....	244
Tableau 52. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Pentecôte	250
Tableau 53. Distance entre la route et la côte – site de Pentecôte	250
Tableau 54. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de Pentecôte	251
Tableau 55. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de rivière au Bouleau.....	256
Tableau 56. Distance entre la route et la côte – site de rivière au Bouleau	258
Tableau 57. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de rivière au Bouleau	258

<i>Tableau 58. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan</i>	<i>261</i>
<i>Tableau 59. Distance entre la route et la côte – site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan.....</i>	<i>261</i>
<i>Tableau 60. Valeur des IVRAC et des sous indices érosion et submersion pour le site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan.....</i>	<i>262</i>

LISTE DES ÉQUATIONS

<i>Équation 1. Vulnérabilité théorique selon Adger (2006)</i>	45
<i>Équation 2. Vulnérabilité théorique selon Fontaine et Steinemann (2009)</i>	45
<i>Équation 3. Équation du risque selon l'UNDRO (1979)</i>	45
<i>Équation 4. Vulnérabilité théorique des infrastructures routières aux aléas côtiers</i>	48
<i>Équation 5. Équation pondérée de la vulnérabilité de chaque bâtiment aux glissements de terrain selon Papathoma-Khöle et al. (2007)</i>	52
<i>Équation 6. Indice de vulnérabilité côtière selon Boruff et al. (2005)</i>	53
<i>Équation 7. Calcul de l'indice de vulnérabilité à l'érosion côtière (McLaughlin et Cooper, 2010)</i>	58
<i>Équation 8. Indice de bilan sédimentaire des plages</i>	95
<i>Équation 9. Degré d'exposition d'une infrastructure à l'érosion</i>	103
<i>Équation 10. Degré d'exposition à la submersion</i>	109
<i>Équation 11. Indice de vulnérabilité à l'érosion d'ici 2020</i>	123
<i>Équation 12. Indice de vulnérabilité à l'érosion d'ici 2060</i>	123
<i>Équation 13. Indice de vulnérabilité à l'érosion d'ici 2100</i>	123
<i>Équation 14. Indice de vulnérabilité à la submersion d'ici 2020</i>	124
<i>Équation 15. Indice de vulnérabilité à la submersion d'ici 2060</i>	124
<i>Équation 16. Indice de vulnérabilité à la submersion d'ici 2100</i>	124
<i>Équation 17. Calculs des différents IVRAC 2020, 2060 et 2100</i>	124

LISTE DES ENCADRÉS

<i>Encadré 1. Définition des aléas côtiers étudiés</i>	36
<i>Encadré 2. Définitions clés</i>	38
<i>Encadré 3. Termes utiles pour la dynamique hydrosédimentaire</i>	78
<i>Encadré 4. Définitions des traits utilisés</i>	82

GLOSSAIRE

Aléa : Un aléa est un phénomène naturel susceptible d'affecter son environnement. L'érosion ou la submersion sont des aléas.

Bas estran : Partie inférieure de la plage s'étirant généralement de la flexure vers la limite inférieure des basses mers. Le bas estran peut également être rocheux.

Cellule hydrosédimentaire : Il s'agit de compartiments de côte ayant un fonctionnement relativement autonome par rapport aux compartiments voisins (SDAGE, 2005), mais leur limite peut parfois se déplacer ou encore la cellule peut recevoir ou perdre des sédiments au profit des cellules adjacentes selon les conditions environnementales. Du point de vue du transport sédimentaire, les limites de la cellule sont donc perméables par rapport à l'unité hydrosédimentaire qui est imperméable. Les limites correspondent généralement à une inversion des dérive littorales ou encore à un cap rocheux. Les cellules peuvent parfois être appelées sous-unités hydrosédimentaires.

Dérive littorale principale : Les houles obliques, les courants (de marée et autres), les vents et le déferlement causent un courant parallèle à la côte qui déplace les sédiments côtiers (sables, graviers, galets) dans une direction privilégiée. Le terme désigne à la fois le courant parallèle à la côte et le déplacement des sédiments qui est causé par ce courant.

Dérive littorale secondaire : Générée par les mêmes facteurs que la dérive littorale principale, la dérive secondaire résulte de conditions environnementales minoritaires dans leur durée ou leur intensité. Les conditions de vent, de marées et de courants peuvent changer selon la saison ou les conditions météo-marines (tempête notamment).

Enjeu : Un enjeu est un élément anthropique ou naturel qui peut être exposé à un aléa; c'est ce que l'on risque de perdre.

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

Exposition : L'exposition est la potentialité qu'un élément (un enjeu) puisse être affecté par un aléa.

Flexure : La flexure est la limite géomorphologique entre le haut estran et le bas estran. Elle correspond à un changement de la pente de la plage (point d'inflexion), parfois accompagné d'un changement de granulométrie (texture). Il peut aussi s'agir de la limite entre un haut estran sédimentaire et un bas estran rocheux. Elle se situe approximativement sous le niveau moyen des eaux.

Haut estran : Partie supérieure de la plage allant de la ligne de rivage à la flexure.

LDGIZC : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, à l'Université du Québec à Rimouski.

Ligne de rivage : Cette limite géomorphologique correspond à la limite de végétation herbacée dense, à la base d'une structure de protection rigide ou à la base d'une falaise. Elle correspond approximativement à la limite des hautes mers maximales ou pleine mer supérieure de grande marée. Pour les marais maritimes, la ligne de rivage correspond à la limite entre le schorre supérieur et inférieur, soit approximativement à la limite des pleines mers supérieures de marées moyennes.

Na : Non applicable. Si le renseignement ne s'applique pas à cette situation.

Nd : Non déterminé. Si le renseignement n'a pas pu être obtenu.

Plage : Portion d'un rivage, de faible pente, constituée de sédiments fins (limons, sables) ou plus grossiers (galets, blocs) où les vagues déferlent. Aussi appelée estran ou zone intertidale, la plage comprend le haut et le bas estran.

PMSGM : Pleine mer supérieure de grande marée.

PMSMM : Pleine mer supérieure de marée moyenne.

Proxy : Variable de substitution.

Remblai : Côte artificielle qui constitue un empiétement dans le milieu côtier ou marin.

Risque : Combinaison de la probabilité d'occurrence d'un aléa et des conséquences pouvant en résulter sur les éléments vulnérables d'un milieu donné (MSP, 2008).

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

Trait de côte : Cette limite géomorphologique correspond au sommet du talus côtier ou au sommet d'une structure de protection rigide. C'est la limite de la zone d'influence des processus côtiers, la limite entre la côte et l'arrière côte.

Unité hydrosédimentaire : Secteur de côte dans lequel le transit sédimentaire est limité à ses extrémités par deux éléments morphologiques infranchissables (cap rocheux, pointe, rivière, bathymétrie, artificialité) et à l'intérieur duquel se font les échanges sédimentaires le long de la côte (Dubois, 1973; SDAGE, 2005). Les unités sont indépendantes du point de vue du transport sédimentaire, c'est-à-dire que toute modification du mouvement de sédiments dans une unité est sans conséquence directe sur les unités voisines. Une unité peut être subdivisée en plusieurs cellules hydrosédimentaires. Également nommées « Unité géomorphologique naturelle » selon Mercier (1987).

Vulnérabilité : La vulnérabilité d'un système correspond à son incapacité à faire face aux effets défavorables des aléas. La vulnérabilité d'un système est donc fonction du degré d'exposition et de sensibilité du système aux aléas (ou perturbations), mais aussi des enjeux présents et de la capacité d'adaptation du système.

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte du projet

Au cours des deux dernières décennies, plusieurs études ont porté sur la vulnérabilité des régions côtières à la hausse du niveau marin et aux tempêtes (Arkema *et al.*, 2013; Colle *et al.*, 2008; Harvey et Nicholls, 2008; Dolan et Walker, 2004; Klein et Nicholls, 1999). Ces études sont d'autant plus pertinentes considérant que la hausse du niveau marin mondial s'est accélérée au cours de la dernière décennie passant de 1,9 mm/an depuis 1961 à 3,2 mm/an entre 1993 et 2011 (Church et White, 2011; Rahmstorf *et al.*, 2012; Merrefield *et al.*, 2009). En 2007, les projections du GIEC estimaient pour 2100 une élévation moyenne du niveau marin mondial pouvant varier selon les scénarios de 0,18 (min) à 0,59 m (max) (GIEC, 2007). Les dernières projections du GIEC (2013) estiment plutôt que la hausse du niveau de la mer pourrait varier selon les scénarios de 0,28 à 0,98 m pour 2100 (Church et Clark, 2013). Or, plusieurs experts sur les niveaux marins indiquent des valeurs plus élevées que celles du GIEC (2013) (Horton *et al.*, 2014; Nicholls *et al.*, 2010). Ces valeurs peuvent atteindre en moyenne 1,2 à 1,5 m pour 2100, mais jusqu'à 2 m pour les limites supérieures des projections (Parris *et al.*, 2012; Vermeer et Rahmstorf, 2009; Grinstead *et al.*, 2009; Pfeffer *et al.*, 2008). Les connaissances scientifiques permettent d'anticiper une recrudescence de certains aléas côtiers à court et moyen terme ainsi qu'une augmentation de leur intensité (GIEC, 2007, 2013; Lozano *et al.*, 2004). Ces changements environnementaux entraîneront des modifications dans le rythme d'érosion et la fréquence de submersion des côtes basses. Or, 43 % du littoral du Québec maritime serait potentiellement à risque de submersion, dont 31 % du littoral de la Côte-Nord, 66 % pour le Bas-Saint-Laurent, 39 % pour la Gaspésie et 70 % aux îles de la Madeleine. De plus, près de 50 % des côtes de l'Est du Québec sont sensibles à l'érosion (si l'on exclut les côtes rocheuses ignées) (Drejza *et al.*, 2014). Or, dans l'Est du Québec, l'occupation humaine et les infrastructures de communications se concentrent en zone côtière. Plus du tiers de la population du Québec maritime vit à moins de 500 m des berges du Saint-Laurent et plus de 90 % à moins de 5 km (Bourque et Simonet, 2008). De plus, près de 60 % des routes nationales sont situées à moins de 500 m des côtes (Drejza *et al.*, 2014). C'est pourquoi, afin de renforcer les pratiques de gestion de risque en zone côtière, il devient essentiel d'intégrer l'érosion et la submersion dans une analyse globale du risque côtier (Dawson *et al.*, 2009). Ainsi, cette recherche vise à mieux connaître, à comprendre et à quantifier la vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière (encadré 1)

dans un contexte de changements climatiques. Le territoire d'étude couvre les régions de la Côte-Nord (de Tadoussac à Natashquan), du Bas-Saint-Laurent, de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine.

Encadré 1. Définition des aléas côtiers étudiés

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

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

1.2 Objectifs du projet

Afin de déterminer la vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques, cette recherche s'attardera à remplir quatre objectifs :

- **Objectif 1.** Cartographier le trait de côte actualisé des régions de l'Est du Québec (Côte-Nord, Bas-Saint-Laurent, Gaspésie, Îles-de-la-Madeleine) et déterminer la distance qui le sépare du réseau routier national.
- **Objectif 2.** Bonifier et appliquer une approche de gestion côtière basée sur les unités et les cellules hydrosédimentaires dans les secteurs où les aléas côtiers sont susceptibles de présenter un risque pour les infrastructures routières des régions de l'Est du Québec.
- **Objectif 3.** Développer une approche et un indice pour quantifier la vulnérabilité des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques.
- **Objectif 4.** Faire une analyse et une synthèse des stratégies d'adaptation des infrastructures routières aux risques naturels côtiers en Europe et formuler des recommandations sur les stratégies d'adaptation, les mesures et les solutions d'adaptation potentielles pour les régions côtières de l'Est du Québec.

Le présent rapport porte seulement sur l'objectif 3.

Concernant les informations sur les côtes de l'Est du Québec, la distance du réseau routier avec la côte, son altitude, la dynamique hydrosédimentaire et l'exposition des routes à l'érosion et à la submersion côtière c'est-à-dire pour **les objectifs 1 et 2**, il faut se référer au rapport « Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements

climatiques : **Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec, Volume I**, Projet X008.1 » (Drejza, Friesinger et Bernatchez, 2014).

Concernant les informations internationales sur les stratégies d'adaptation des infrastructures routières c'est-à-dire **l'objectif 4**, on trouvera l'information dans le rapport « Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : **Analyse des stratégies internationales et recommandations en matière de réduction de la vulnérabilité des infrastructures de transport face aux risques naturels côtiers, Volume II**, Projet X008.1 » (Boyer-Villemaire, Marie et Bernatchez, 2014).

Ce découpage du projet X008.1 « *Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques* » en trois rapports a pour but de faciliter la recherche d'informations pertinentes, l'utilisation des informations par les directions territoriales et la diffusion de l'information sur des objectifs précis auprès de partenaires.

1.3 Objectifs de ce rapport

Ce rapport de recherche vise à développer une approche et un indice de vulnérabilité des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques pour neuf sites témoins dans l'Est du Québec. En effet, l'indice de vulnérabilité permet de prévoir, selon des critères objectifs, les stratégies, mesures ou solutions d'adaptation sur les sites prioritaires du ministère. Les études récentes déterminent le niveau de vulnérabilité par des analyses multicritères en croisant des informations sur la dynamique des aléas et des systèmes côtiers, les enjeux socio-économiques de la zone côtière (ici les infrastructures routières), les mesures existantes sur la gestion des risques et l'aménagement du territoire, incluant les solutions d'adaptation, et finalement par l'intégration du savoir local et la perception des aléas des acteurs concernés par les aléas (Meur-Férec *et al.*, 2008). Ce volet est nécessaire et préalable au développement d'outils de gestion et de prévention des risques naturels côtiers.

L'approche développée permettra de prévoir à partir de quel moment les infrastructures pourraient être menacées si aucune intervention n'est réalisée. Ceci permettra ainsi d'élaborer des échéanciers pour la mise en place de solutions d'adaptation aux changements climatiques et d'établir une priorisation d'interventions en fonction du niveau de vulnérabilité des infrastructures routières aux aléas côtiers en tenant compte de scénarios de changements climatiques.

La méthodologie proposée a été appliquée aux 9 sites témoins présentés à la figure 1. Il y a Baie-des-Sables et Saint-Ulric, Rivière-à-Claude, Chandler, Carleton et Maria, la baie de Plaisance, Pointe-aux-Loups, Pentecôte, rivière au Bouleau et Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan. Cette étape permettra de valider et bonifier la méthode dans les principaux contextes côtiers représentatifs de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent à risque d'érosion et de submersion côtière. Les sites ont été sélectionnés en fonction des recommandations des responsables des deux directions territoriales du MTQ et des résultats préliminaires obtenus aux objectifs 1 et 2. Il s'agit de compléter les données d'exposition à l'érosion et à la submersion qui ont été générées pour les objectifs 1 et 2 (Drejza *et al.*, 2014). Dans le but de répondre aux besoins du milieu, des entrevues ont été réalisées et l'équipe de recherche est restée en communication constante avec le comité de suivi et les responsables du projet au MTQ.

Encadré 2. Définitions clés

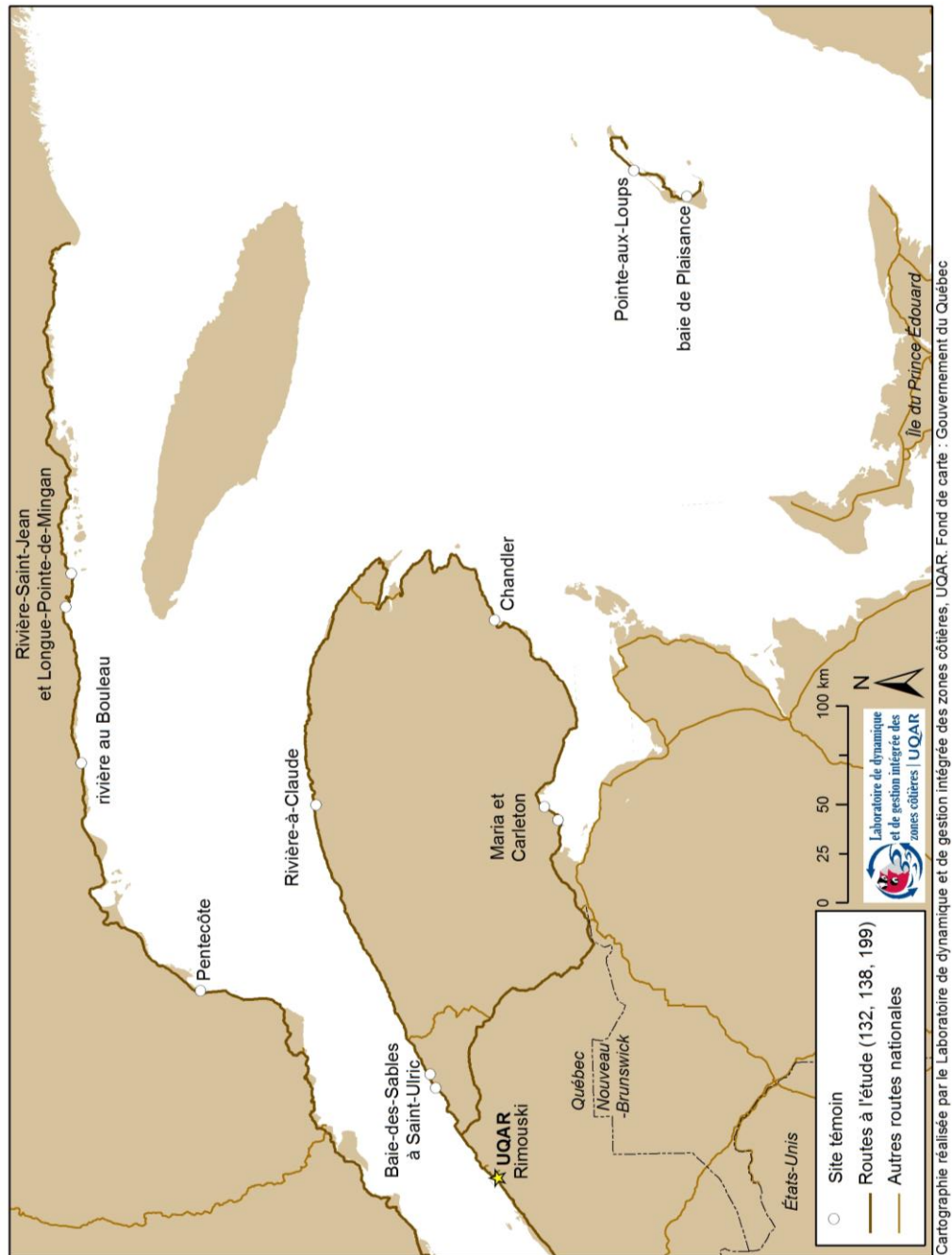
Aléa: un aléa est un phénomène naturel susceptible d'affecter son environnement. L'érosion ou la submersion sont des aléas.

Enjeu : Un enjeu est un élément anthropique ou naturel qui peut être exposé à un aléa; c'est ce que l'on risque de perdre.

Risque : Combinaison de la probabilité d'occurrence d'un aléa et des conséquences pouvant en résulter sur les éléments vulnérables d'un milieu donné (MSP, 2008).

Exposition : L'exposition est la potentialité qu'un élément (un enjeu) puisse être affecté par un aléa.

Vulnérabilité : La vulnérabilité d'un système correspond à son incapacité à faire face aux effets défavorables des aléas. La vulnérabilité d'un système est donc fonction du niveau d'exposition et de sensibilité du système aux aléas (ou perturbations), mais aussi des enjeux présents et de la capacité d'adaptation du système.



2 CONCEPT DE VULNÉRABILITÉ

Ce chapitre présente une revue synthétique de la littérature sur la vulnérabilité afin de contextualiser et d'appuyer notre étude. Tout d'abord le concept théorique de vulnérabilité sera présenté. Ensuite nous exposerons des exemples d'études présentant des indices de vulnérabilité face aux aléas naturels. Et finalement des exemples d'études spécifiques sur la vulnérabilité des routes seront abordés.

2.1 Vulnérabilité : concept théorique

2.1.1 Définitions et schématisation

Le concept de vulnérabilité s'est grandement développé avec les recherches sur les changements climatiques (GIEC, 2001; Schröter et Metzger, 2004; Füssel, 2007) et il est influencé par plusieurs sphères de recherches différentes (figure 2). La plupart des effets indésirables des changements climatiques sont d'amplifier des phénomènes naturels déjà présents. La vulnérabilité aux phénomènes et aléas naturels actuels a donc également connu un développement important depuis le début des années 2000. Plusieurs études récentes ont été réalisées sur la vulnérabilité aux aléas côtiers dans différentes régions du monde, notamment aux États-Unis (Boruff *et al.*, 2005), en Amérique du Sud (Argentine, Buenos Aires : Diez *et al.*, 2007; Brésil : Muehe, 2010), en Europe (France : Paskoff, 2004; Meur-Férec *et al.*, 2008; Irlande : Devoy, 2008; Irlande du Nord : McLaughlin *et al.*, 2002; Angleterre : de la Vega-Leinert et Nicholls, 2008; Pologne : Pruszek et Zawadzka, 2008 : Turquie : Ozyurt et Ergin, 2009; Karaca et Nicholls, 2008; Allemagne : Sterr, 2008), en Afrique (Palmer *et al.*, 2011; Jallow *et al.*, 1999), en bordure de l'Océan indopacifique (McLeod *et al.*, 2010; Yamano *et al.*, 2007) et en Australie (Sano *et al.*, 2011; Voice *et al.*, 2006).

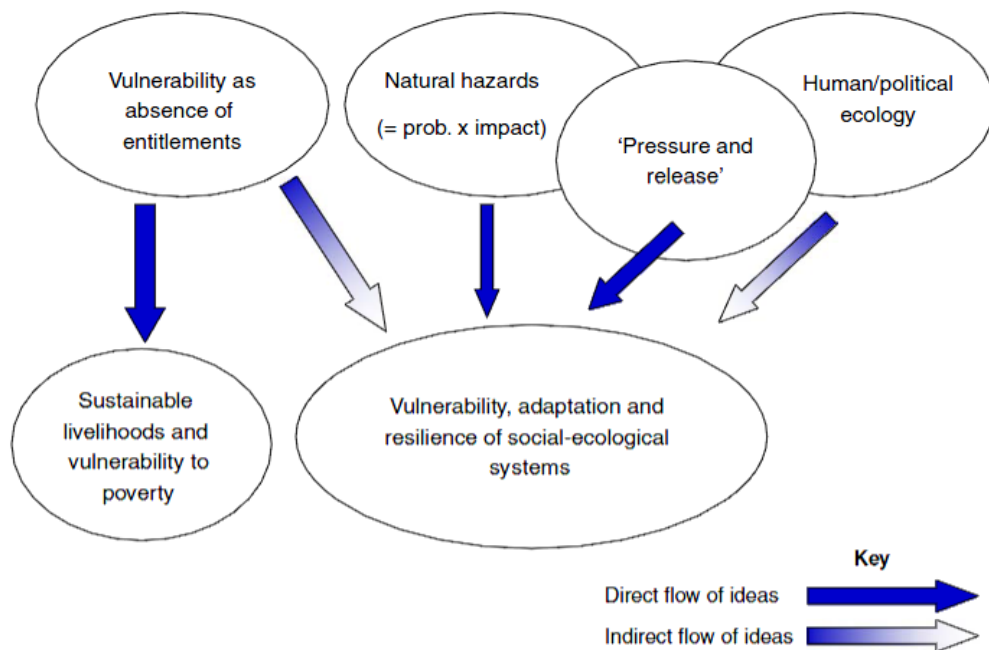


Figure 2. Traditions du concept de vulnérabilité en recherche et leur évolution (Adger, 2006)

D'après le « Guide Méthodologique général pour la réalisation des Plans de Prévention des Risques » (ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement de France, 1997), l'aléa est défini par un « phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données ». Les enjeux sont les « personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, etc. susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel ». Le risque naturel est « la perte en vies humaines, en biens et en activités consécutives à la survenance d'un aléa naturel ». Le risque est donc lié à la conjonction de présence d'un aléa et d'enjeux. La vulnérabilité « au sens le plus large exprime le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux (humains, biens, milieux) ». Dans cette perspective plus synthétique et plus sociale, la vulnérabilité exprime alors la sensibilité globale d'une société face à un aléa (ou des aléas), en fonction de l'intensité et de la fréquence du phénomène en cause, de la valeur des biens et du nombre de personnes potentiellement affectées, des capacités de résistance au phénomène et des capacités de rétablissement des conditions minimales de fonctionnement de la société (ou résilience). Par « vulnérabilité du territoire », on entend dans la suite de ce rapport les conséquences physiques des aléas côtiers (érosion, submersion marine) sur les enjeux d'un territoire exposé (Gouvernement français, 2012). La vulnérabilité est souvent exprimée en ce qui a trait aux impacts des

changements climatiques, cependant, il est possible d'utiliser la même définition pour en ce qui a trait aux aléas actuels. Ainsi la définition proposée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007) est : « La vulnérabilité est la mesure dans laquelle un système est sensible et incapable de faire face aux effets défavorables des changements climatiques, y compris la variabilité et les événements extrêmes. ». Cette définition peut également s'utiliser avec l'érosion et la submersion. Saldana-Zorrillo (2006) définit la vulnérabilité économique comme la susceptibilité d'un agent économique d'absorber des chocs exogènes compte tenu de sa propriété des actifs, de sa capacité de production, de son niveau de connaissances et d'informations et des mesures mises en place pour éviter, gérer ou atténuer les effets négatifs résultants d'un type de choc en particulier dans le cadre d'un système de droit.

Le GIEC détaille ce qui compose la vulnérabilité aux changements climatiques soit l'exposition à un élément et la sensibilité de cet élément à la perturbation qui déterminent les impacts potentiels. Ces derniers sont atténués par la capacité d'adaptation pour résulter en la vulnérabilité (figure 3). Ce modèle conceptualisé par le GIEC (2001) sera illustré par Ionescu *et al.*, (2005) et réutilisé par d'autres auteurs par la suite (tels que Fontaine et Steinemann, 2009).

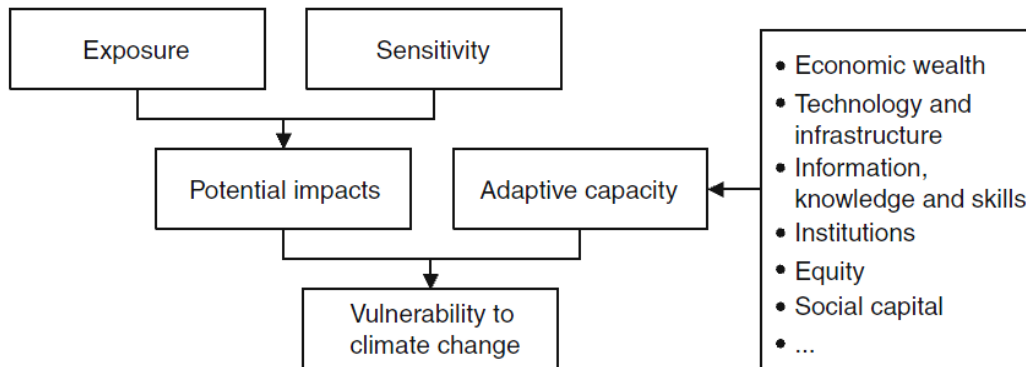


Figure 3. Représentation graphique de la conceptualisation de la vulnérabilité aux changements climatiques

(conceptualisé par le GIEC, 2001; illustré par Ionescu *et al.*, 2005)

La vulnérabilité d'un système est donc fonction du degré d'exposition et de sensibilité du système aux aléas (ou perturbations), mais aussi de la capacité d'adaptation (Adger, 2006 ; Smit et Wandel, 2006), ou pour certains, de la capacité de réponse aux aléas (Gallopın, 2006). Elle est donc étroitement interreliée à la résilience côtière (Gallopın, 2006) (figure 4).

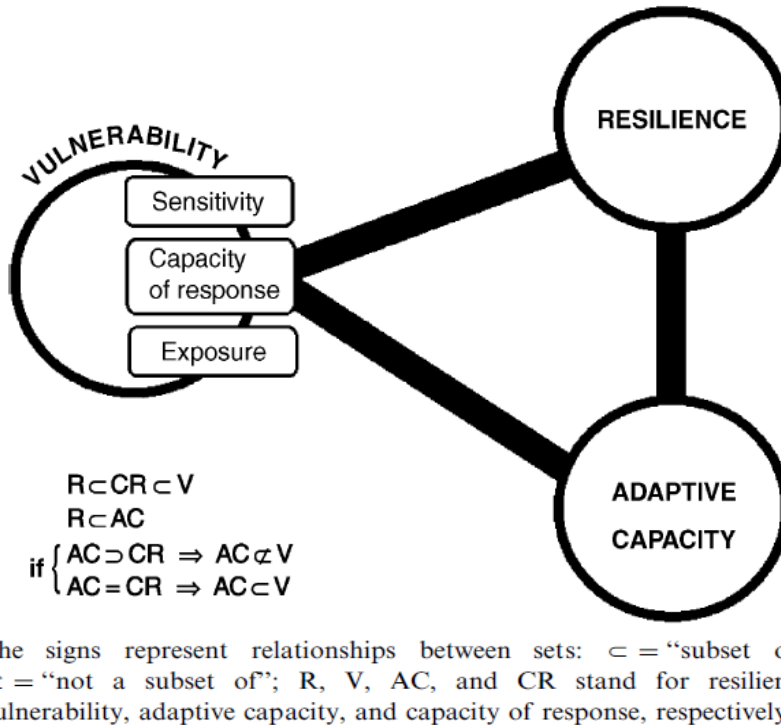


Figure 4. Résumé schématique des relations conceptuelles entre la vulnérabilité, la résilience et la capacité d'adaptation (Gallopın, 2006)

Selon Barroca *et al.* (2006), la vulnérabilité est une notion complexe qui pour chaque aléa définit les impacts en résultant. En général, le terme « vulnérabilité » est la « susceptibilité de dégradation ou de dommages par des facteurs ou des influences néfastes » (selon le Regional Vulnerability Assessment of United States Environmental Protection Agency, dans Barroca *et al.*, 2006).

Pour Thorne *et al.* (2012), la vulnérabilité climatique se définit comme la mesure à laquelle un système est susceptible ou non de faire face aux effets néfastes du changement climatique. La vulnérabilité ne dépend pas seulement de la sensibilité du système, mais aussi de sa capacité d'adaptation.

2.1.2 Équations de vulnérabilité

Selon Adger (2006), la vulnérabilité est le plus souvent conceptualisée comme étant constituée par des composants qui incluent : (1) l'exposition à des perturbations ou à un facteur de stress externe, (2) la sensibilité à la perturbation et (3) la capacité de s'y adapter. Cela peut se schématiser par l'équation 1.

Équation 1. Vulnérabilité théorique selon Adger (2006)

$$\text{Vulnérabilité} = \frac{\text{sensibilité au stress}}{\text{état par rapport au seuil} * \text{probabilité d'exposition au stress}}$$

Pour Fontaine et Steinemann (2009), la vulnérabilité peut se synthétiser par l'équation 2. Ainsi, une exposition aux aléas plus élevée et une sensibilité plus importante conduisent à des impacts potentiels plus importants et donc à une vulnérabilité plus importante. Au contraire, une capacité d'adaptation plus importante mène à une vulnérabilité plus faible. Dans l'équation 2, l'exposition et la sensibilité ne sont pas pondérées différemment, mais cela pourrait être fait (Fontaine et Steinemann, 2009).

Équation 2. Vulnérabilité théorique selon Fontaine et Steinemann (2009)

$$V = (E + S)/A$$

avec V = vulnérabilité, E = exposition; S=sensibilité et A=capacité d'adaptation.

Selon l'UNDRO (United Nations Disaster Relief Organization, 1979 cité par Papathoma-Khöle *et al.*, 2007), le risque est le résultat de la multiplication de l'aléa naturel par les enjeux (éléments menaces) et par la vulnérabilité (équation 3). En ce sens, la définition utilisée par l'UNDRO n'est pas la même que dans les équations précédentes, mais représente plutôt le « résultat (potentiel) de l'occurrence d'un événement, exprimé avec des méthodes qualitatives, semi-quantitatives ou quantitatives en termes de pertes, de désavantages ou de gain, de dommages, de blessures ou de pertes de vie ». Selon la définition que nous retiendrons, cela correspondrait donc plutôt au terme « impacts ».

Équation 3. Équation du risque selon l'UNDRO (1979)

$$R = H * E * V$$

Avec R = risque, H = aléas naturels, E = élément à risque et V = vulnérabilité

2.1.3 Problèmes de définition

Malgré le développement et l'utilisation croissante d'indices de vulnérabilité, ce concept demeure souvent peu opérationnel, notamment en raison de la confusion dans la définition du terme, mais aussi en raison de l'échelle d'application (Hinkel, 2011). Ainsi, lorsque les paramètres utilisés pour définir l'indice de vulnérabilité sont quantifiés à partir d'un territoire trop grand, les résultats peuvent difficilement être utilisables par des gestionnaires à l'échelle locale ou des communautés, notamment pour mettre en place des solutions d'adaptation.

La vulnérabilité est un concept dont la définition peut varier selon les auteurs et les objectifs poursuivis par les différentes études. Il est parfois mal utilisé pour désigner « l'exposition » ou encore « la sensibilité » (Karim et Mimura, 2008; Abuodha et Woodroffe, 2010).

Par exemple, Gornitz (1990) développe un indice de vulnérabilité côtière, basé uniquement sur des paramètres physiques de la côte. À partir de ce dernier, Shaw *et al.* (1998) vont développer un indice de sensibilité des côtes canadiennes à la hausse du niveau de la mer où ils décrivent la sensibilité aux changements climatiques comme étant le degré auquel une côte peut connaître des changements physiques tels que l'inondation, l'érosion, la migration de plage ou la déstabilisation de dune. Sur le même modèle, Long et Xhardé (2007) proposent eux aussi un indice de vulnérabilité côtière aux risques pour neuf sites témoins dans la baie de Chaleurs. Dans les faits, ces différents indices sont plutôt des indices de sensibilité des côtes.

Dans certains articles tels qu'« *Impacts of climate change and sea-level rise on cyclonic storm surge floods in Bangladesh* » de Karim et Mimura (2008), la définition de la vulnérabilité est confondue avec « sensibilité » et avec « exposition » selon les sections de l'article. Par exemple, dans la phrase « The people who live in the exposed coast are considered as vulnerable partly or fully to surge flooding. », le terme *vulnérable* équivaut à *sensible*. Alors que dans la phrase « The western coastal zone is particularly vulnerable to surge flooding due to its low-lying land and very poor defences against surge waves », le terme *vulnérable* équivaut à *exposé*.

Dans d'autres études sur les risques naturels, l'analyse est effectuée via le prisme de la vulnérabilité du système, le terme « vulnérabilité » étant ici pris

dans une acception globale (D'Ercole et Pigeon, 1999; Meur-Férec *et al.*, 2008, Hénaff et Philippe, 2014).

Ainsi il est important de préciser la définition de vulnérabilité que l'on souhaite utiliser dans une étude, mais aussi de toujours bien spécifier l'élément vulnérable dont il est question et par rapport à quel aléa l'analyse est basée. « La Vulnérabilité doit toujours être évaluée en relation avec une menace spécifique (ou aléa) : quels groupes de personnes sont vulnérables à quoi et pourquoi » (Fédération internationale de la Croix-Rouge, 1996 in Barroca *et al.*, 2006).

2.1.4 Définition adoptée dans cette étude

Nous avons développé une approche et une méthode pour évaluer la vulnérabilité des infrastructures routières basées sur une revue de la littérature mondiale, en ayant non seulement une approche rétrospective, mais aussi une approche prospective avec l'utilisation de scénarios climatiques appréhendés pour le Québec maritime (Bernatchez *et al.*, 2008a; Savard *et al.*, 2009). Pour cela, il est important que les notions utilisées soient clairement définies :

→ **EXPOSITION** : L'exposition est la potentialité qu'un élément d'infrastructure routière soit affecté par l'aléa et l'intensité avec laquelle l'élément sera affecté. Le degré d'exposition actuel des infrastructures à l'érosion est basé sur le résultat de l'équation 9 en ce qui a trait à l'érosion et de l'équation 10 pour la submersion, toutes deux présentées à la section 4 (Drejza *et al.*, 2014). Le degré d'exposition dépend ainsi tant de la sensibilité de la côte à l'aléa que de la localisation de l'infrastructure considérée. Le degré d'exposition d'une infrastructure à l'érosion peut se traduire en une période résiduelle avant que l'infrastructure soit atteinte par le recul du trait de côte ou de la ligne de rivage. L'exposition à la submersion est la possibilité de submersion selon l'altitude et certains éléments de la configuration de la côte.

→ **ENJEUX** : Les enjeux sont les éléments anthropiques ou naturels susceptibles d'être affectés par les aléas. Ils peuvent être sensibles à l'érosion, à la submersion ou aux deux aléas. Dans le cadre de cette étude, seuls les enjeux anthropiques liés au réseau routier sont considérés. Ainsi, il y a les enjeux locaux directement liés à la route et à ses caractéristiques et ceux liés à la fonction de la route au sein d'un réseau. Il s'agit de ce que l'on risque de perdre (Metzger et D'Ercole, 2011).

→ **IMPACTS** : Les impacts sont la conséquence des aléas sur les enjeux. Il peut s'agir des impacts de l'érosion, des impacts de la submersion ou des impacts des deux aléas. La détermination d'impacts potentiels des aléas côtiers est plus aisée qu'elle ne pourrait l'être pour d'autres aléas. En effet, si la côte recule et que l'érosion touche la route, l'effet qui en découle est de rendre la route impraticable. Au contraire, si un ouragan affecte une région, les impacts sont beaucoup plus difficiles à déterminer, car beaucoup de paramètres entrent en considération. Pour cela, l'impact potentiel est plus facile à déterminer dans notre cas.

→ **CAPACITÉ D'ADAPTATION** : La capacité d'adaptation est l'ensemble des mesures mises en place tant structurelles qu'organisationnelles dans le but de minimiser les conséquences prévisibles d'un ou plusieurs aléas. La capacité d'adaptation détermine la portion d'impacts potentiels qui deviennent des impacts réels (Fontaine et Steinemann, 2009). La capacité d'adaptation des communautés côtières peut être influencée par les perceptions/représentations que ces communautés ont des aléas et des risques.

→ **VULNÉRABILITÉ** : La vulnérabilité d'un système correspond à son incapacité à faire face aux effets défavorables des aléas. La vulnérabilité d'un système est donc fonction du degré d'exposition et de sensibilité du système face aux aléas (ou perturbations), mais aussi des enjeux présents et de la capacité d'adaptation du système.

→ **ÉQUATION THÉORIQUE PROPOSÉE** : Notre démarche peut donc être conceptualisée par l'équation 4 et schématisée par la figure 5. Ainsi, l'exposition aux aléas multipliée par les enjeux détermine les impacts potentiels. À ce résultat, on soustrait les mesures d'adaptations mises en place et qui influencent l'importance des impacts engendrés par les aléas.

**Équation 4. Vulnérabilité théorique des infrastructures routières aux aléas
côtiers**

Vulnérabilité des infrastructures routières = (degré d'exposition aux aléas *
enjeux) - capacité d'adaptation.

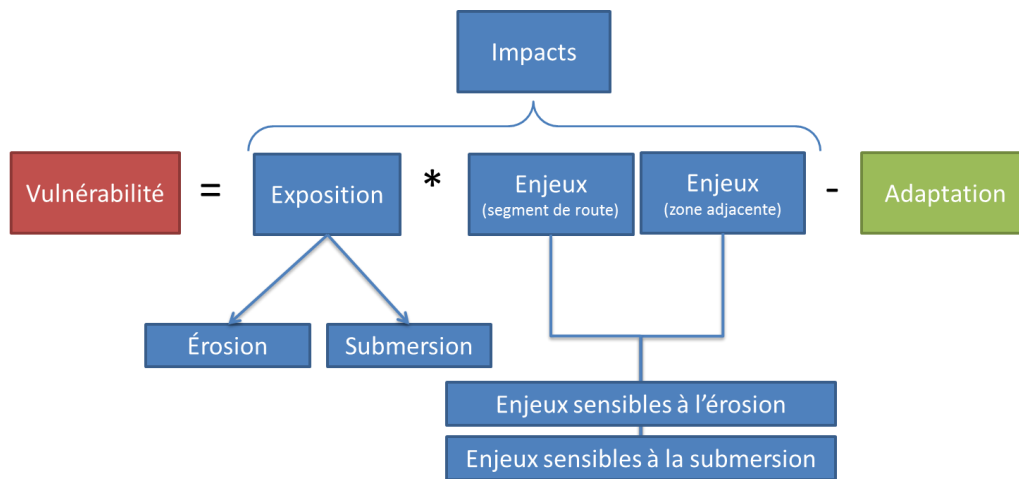


Figure 5. Schématisation de la vulnérabilité théorique aux aléas côtiers utilisée pour cette étude

2.2 Pourquoi effectuer une analyse de vulnérabilité ?

La réalisation d'une étude de vulnérabilité permet de fournir aux autorités un support de décision en regard de l'identification des risques et des vulnérabilités, de la priorisation de mesures de réduction des risques et de la planification de mesures d'urgence vis-à-vis des infrastructures dont elles sont responsables. Les analyses de vulnérabilité permettent non seulement de connaître les aléas, mais aussi les causes de la vulnérabilité (Fontaine et Steinemann, 2009), et ainsi de mieux planifier les interventions et de réduire les impacts. Les gestionnaires ont demandé des outils pour une meilleure évaluation de la vulnérabilité (Barroca *et al.*, 2006), ainsi, une analyse de vulnérabilité et des indices de vulnérabilité répondent à cette demande en apportant une évaluation objective de la situation. De plus, une étude de vulnérabilité permet d'investir au bon endroit. Selon Winter *et al.* (2005) le score obtenu lors d'une étude de vulnérabilité devrait permettre de déterminer les différentes actions qui devraient être entreprises. « Une fois qu'un classement des risques est établi pour une gamme de sites, les priorités peuvent être définies dans le cadre de la maintenance planifiée et les travaux d'équipement. Les secteurs et les sites considérés comme les plus vulnérables peuvent ensuite être soumis à des mesures de gestion et d'atténuation bien ciblées et bien justifiées » (Winter *et al.*, 2005). « Les décisions de planification liées à réparer, protéger, ou déplacer ces routes peuvent être réalisées d'une manière rentable basée sur une étude de la

vulnérabilité ainsi que des besoins présents et futurs de transport. Les coûts dépendent des processus côtiers locaux menaçant l'autoroute » (US Federal Highway Administration, 2008). Le développement d'un indice de vulnérabilité devrait donc servir à prévoir le risque entre autres pour les infrastructures de transport et à augmenter la résilience côtière en renforçant la capacité d'adaptation des gestionnaires et des collectivités aux aléas côtiers.

2.3 Vulnérabilité aux aléas naturels

Le concept théorique de vulnérabilité, et ses différentes définitions, tel que présenté dans la section précédente peut être appliqué à différentes perturbations dont les aléas naturels. Ainsi plusieurs méthodes ont été élaborées pour caractériser et quantifier la vulnérabilité aux aléas naturels en général et aux aléas côtiers en particulier. Il s'agit principalement de la création d'indices qui synthétisent plusieurs éléments (Peduzzi *et al.*, 2009, Boruff *et al.*, 2005, Barroca *et al.*, 2006...). Nous présenterons d'abord des exemples d'indices élaborés pour des aléas naturels non côtiers puis nous nous attarderons sur quelques exemples relatifs aux aléas côtiers.

2.3.1 Indices de vulnérabilité à des aléas naturels non côtiers

De nombreux chercheurs ont tenté de définir des indices de vulnérabilité en fonction des aléas présents sur le territoire à l'étude et des enjeux concernés. Nous ne retiendrons que trois études dont la méthodologie nous a inspirée.

Selon l'article « Assessing global exposure and vulnerability towards naturel hazards: the Disaster Risk Index » de Peduzzi *et al.* (2009), la fréquence des cyclones pour chaque cellule est multipliée par la population présente sur chaque cellule dans le but d'obtenir l'exposition physique (Peduzzi *et al.*, 2009) (figure 6). La quantité de population exposée est ainsi déterminée. Par la suite, chaque cellule est additionnée pour obtenir une exposition pour chaque pays (figure 7) (Peduzzi *et al.*, 2009).

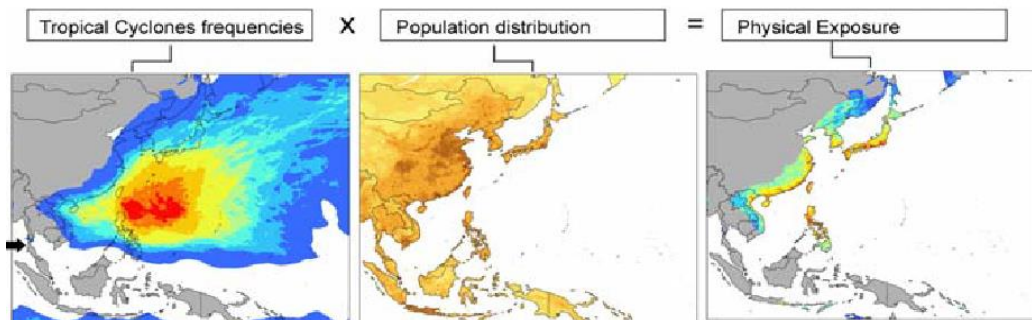


Figure 6. Exemple d'exposition physique aux cyclones tropicaux (Peduzzi *et al.*, 2009)

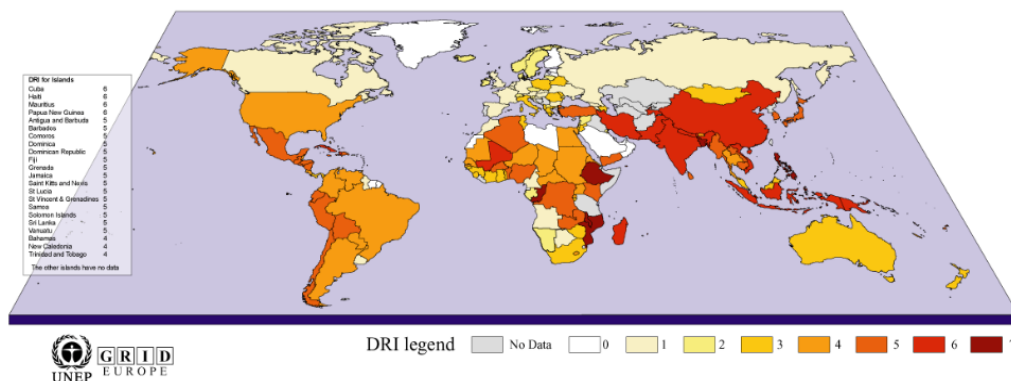


Figure 7. Distribution spatiale des « disaster risk index » (DRI) (Peduzzi *et al.*, 2009)

L'étude de Barroca *et al.* (2006) sur la vulnérabilité aux inondations urbaines en France, présente sept groupes d'indicateurs à intégrer dans une étude complète sur la vulnérabilité (figure 8). L'outil informatique développé intègre les points de vue de différents acteurs (économistes, aménagistes, experts, politiciens, etc.). De plus, l'outil proposé, bien qu'intégrant de multiples paramètres, permet au gestionnaire d'extraire une information partielle sur un seul aléa ou un seul élément de la vulnérabilité, selon ses besoins.

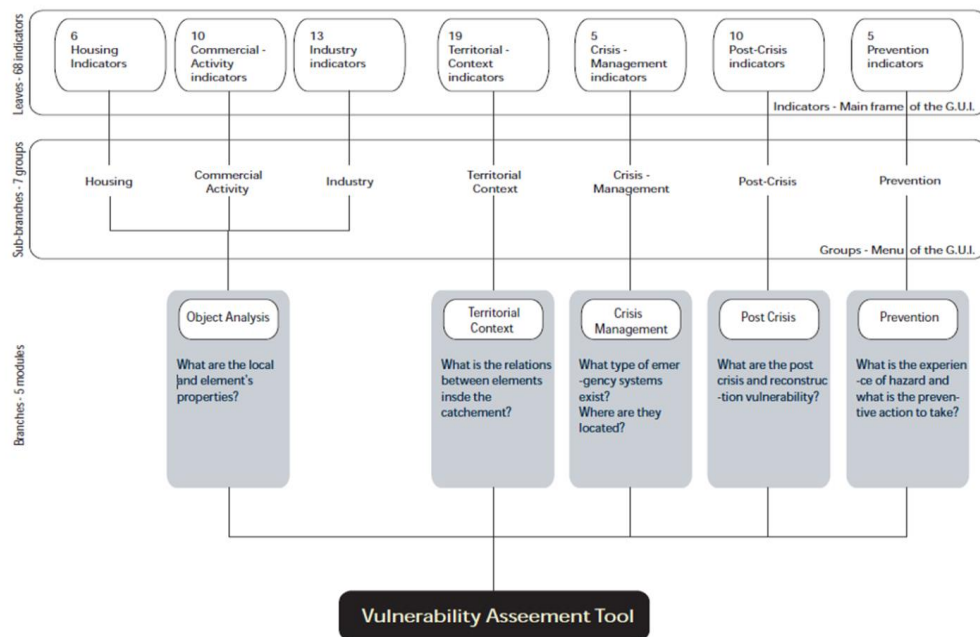


Figure 8. Les sept groupes d'indicateurs de l'outil de vulnérabilité aux inondations urbaines (Barroca et al., 2006)

Dans leur étude de 2007, Papathoma-Khöle *et al.* déterminent trois types de vulnérabilité différents (physique, humaine et économique) qui composent la vulnérabilité globale à un aléa, selon les objectifs des études et les besoins des personnes à qui elles sont destinées. L'étude de Papathoma-Khöle *et al.* (2007) sur la vulnérabilité des communautés aux glissements de terrain détermine pour chaque élément à risque (ici des bâtiments) sa vulnérabilité propre. La connaissance de l'aléa naturel (c.-à-d. les glissements de terrain) est un prérequis primordial, mais n'est pas suffisante pour une gestion efficace. Les éléments que Papathoma-Khöle *et al.* (2007) incluent dans leur formule sur la vulnérabilité des bâtiments aux glissements de terrain sont pondérés selon ce qui a plus ou moins d'impact sur la vulnérabilité totale (équation 5).

Équation 5. Équation pondérée de la vulnérabilité de chaque bâtiment aux glissements de terrain selon Papathoma-Khöle *et al.* (2007)

$$Vb = (5 * a) + (4 * b) + (3 * c) + (2 * d) + (1 * e)$$

$$Vh = Vb * population$$

a : les matériaux du bâtiment; *b* : les bâtiments environnants; *c* : la description du côté du bâtiment qui fait face à la pente; *d* : l'existence de signes précurseurs de glissements de terrain et *e* : le nombre d'étages du bâtiment
population = nombre d'habitants par bâtiment

2.3.2 Indices de vulnérabilité aux aléas côtiers

Plusieurs études ont développé des indices de vulnérabilité spécifiquement en lien avec les aléas côtiers. Trois exemples qui nous ont été utiles pour développer notre propre méthodologie sont présentés ici.

Selon l'article de Boruff *et al.* (2005), la vulnérabilité globale à l'érosion des comtés côtiers des États-Unis qu'ils ont étudiés dépend à la fois de leur vulnérabilité physique (qui correspond plutôt à la sensibilité) et de leur vulnérabilité sociale. Les deux indices combinés donnent la vulnérabilité globale du lieu. Pour Boruff *et al.* (2005), la vulnérabilité d'un environnement dépend à la fois des composantes sociales et physiques. Ainsi, leur PVI (*place vulnerability index*) se compose à parts égales d'un sous-indice social (CsoVI) et physique (CVI) (tableaux 1 et 2, figure 9). Dans chacun des sous-indices, les éléments retenus (respectivement 10 et 6) ne sont pas pondérés, les éléments qui sont inclus ont donc un poids équivalent (équation 6).

Équation 6. Indice de vulnérabilité côtière selon Boruff *et al.* (2005)

$$PVI = CVI + CSoVI$$

(les 2 variables ont été centrées réduites pour les rendre comparables)

$$CVI = \sqrt{(a * b * c * d * e * f) / n}$$

$$CSoVI = a + b + c + d + e + f + g + h + i + j$$

Étant donné la multitude de paramètres sociaux existants, une analyse en composante principale (PCA) a été utilisée pour départager les variables les plus importantes parmi les 39 paramètres sociaux qui étaient disponibles, ainsi les 10 facteurs les plus importants ont été conservés (tableau 1) (Boruff *et al.*, 2005).

Tableau 1. Scores des facteurs utilisés pour construire l'indice de vulnérabilité sociale côtière (CSoVI) (Boruff *et al.*, 2005)

Factor/label	Scaling Method	Percentage Explained Variance
Factor 1: Poverty	None	15.79
Factor 2: Age	Absolute value	14.83
Factor 3: Development density	None	14.20
Factor 4: Asian and immigrants	None	9.71
Factor 5: Rural/urban dichotomy	Absolute value	7.09
Factor 6: Race and gender	Absolute value	5.35
Factor 7: Population decline	Inverse	5.04
Factor 8: Ethnicity (Indian) and farming	Absolute value	3.72
Factor 9: Infrastructure employment reliance	None	3.36
Factor 10: Income	Inverse	3.16

Tableau 2. Paramètres physiques utilisés pour créer l'indice de vulnérabilité physique de la côte (CVI) (Boruff *et al.*, 2005).

Variable	Measurement	Source
Mean tidal range	Meters	Tide gauges
Coastal slope	Percent	Topography, bathymetry
Rate of relative sea-level rise	Δ mean water elevation	Tide gauges
Shoreline erosion and accretion rates	Meters/year	Coastal Erosion Information System (CEIS)
Mean wave height	Meters	Wave Information Study (WIS)
Geomorphology (erodability)	Ordinal value	Geology, topography

* Based on data from Thieler and Hammer-Klose (1999, 2000a, 2000b).

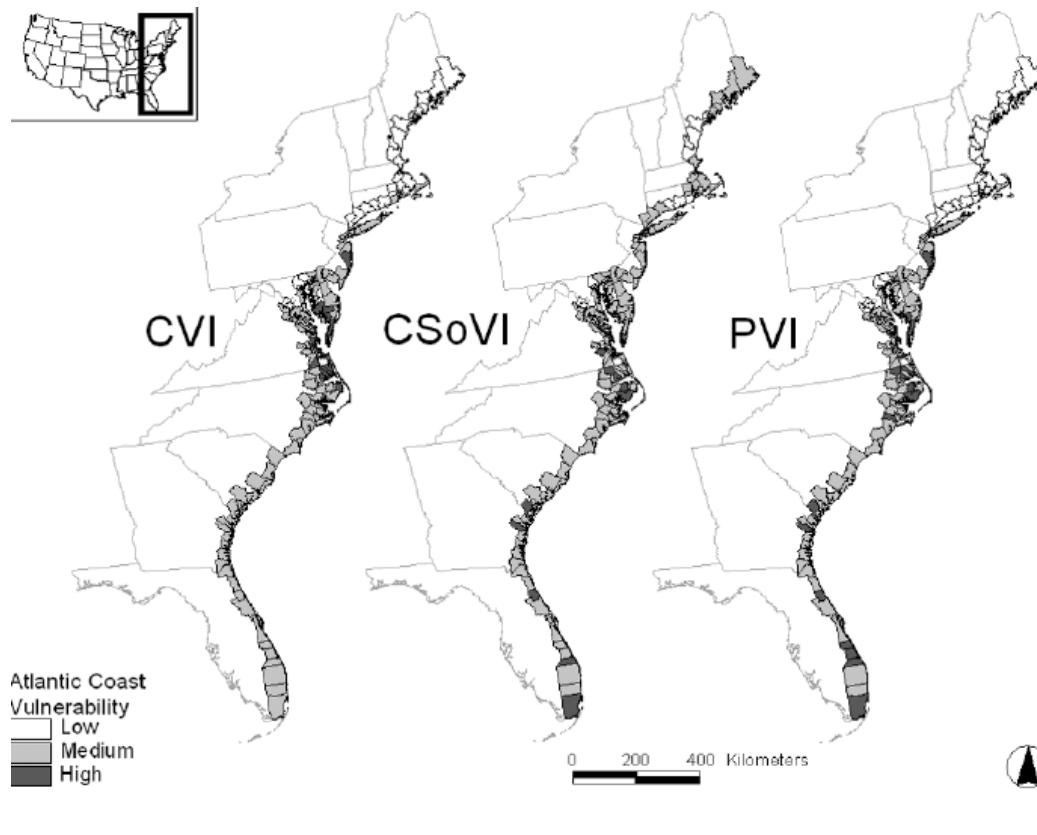


Figure 9. Vulnérabilité des comtés atlantiques basés sur les indicateurs physiques (CVI) et sociaux (CSoVI) et leur intégration dans une vulnérabilité locale (PVI : place vulnerability index) (Boruf *et al.*, 2005)

L'étude de Meur-Férec *et al.* (2008) sur l'évaluation de la vulnérabilité côtière en France, croise 5 facteurs qui composent la vulnérabilité :

- 1- L'aléa potentiel
- 2- Les enjeux existants
- 3- Les techniques de gestion du risque utilisées
- 4- Les événements passés et les témoignages des désastres
- 5- La perception du risque (c'est-à-dire la sensibilisation et la représentation des risques) par la population et les acteurs concernés.

Les descripteurs considérés pour chacun des 5 paramètres sont détaillés au tableau 3 et ils se voient attribuer un score allant de 0 à 5. Les résultats sont représentés sur un « écran radar » (figure 10), qui permet de visualiser aisément les points forts et les points faibles qui contribuent à augmenter ou à diminuer la vulnérabilité (soit graphiquement la surface du pentagone) à l'échelle d'une communauté (ici des communes de France).

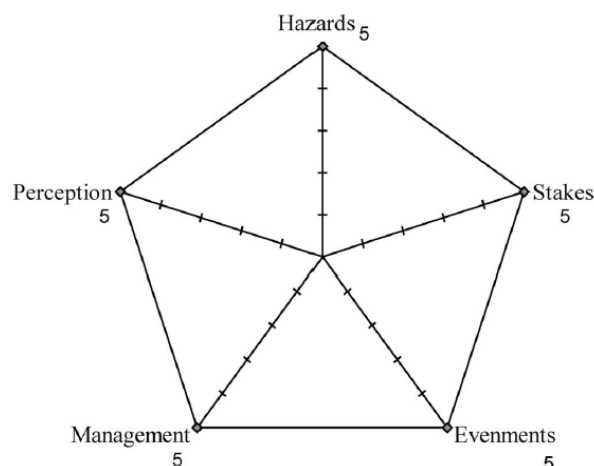


Figure 10. « Écran radar » de la vulnérabilité d'une commune (Meur-Férec et al., 2008)

Tableau 3. Principaux descripteurs utilisés dans la matrice d'évaluation de la vulnérabilité (Meur-Férec et al., 2008)

Hazards Grid	Stakes Grid	Events Grid	Management Grid	Perceptions Grid
A - Natural characteristics of the coast: Lithology, tectonics: ⇒ resistant or fragile rock Morphology: altitude, width of the littoral zone, profile, morphology of the foreshore and the back-shore, relative sea level variations, vegetation ⇒ resistance or frailty of the morphology Morphodynamic factors: exposure of the coastline to swells, littoral drift, tidal currents, tidal range, storm surges, storms, undertow, exposure of the coast to dominant winds, pluviometric crises, water table ⇒ protected or exposed coastline Evolutionary characteristics: rate of coastline evolution, type of evolution, sediment budget: ⇒ stability, retreat or progradation B - Protective coastal engineering: static protective structures, protective structures in front of cliffs, seawalls groynes, drainage network, fences, brushwood, beach renourishment ⇒ important and effective or negative effects C - Activities encouraging erosion: Human activities like dredging, intensive trampling ⇒ strong or weak erosive influence D - Indirect hazards/risks: Presence of dangerous activities, such as industrial or nuclear plans ⇒ weak or strong domino effect	A - Direct economic stakes: Economic uses of the coastal fringe: agriculture, camping, public networks and infrastructure, shops, industries, housing ⇒ importance of the direct economic stakes Pressure from real estate development: construction along 400 m of the coast (surface and density), evolution of real estate prices, number of building permits issued ⇒ more or less heavy pressure from real estate development Underlying economic threats to other users in the event of submersion inland: agriculture, camping, public networks and infrastructure, shops, industries, housing ⇒ importance of the underlying economic stakes near the coast B - Recreational/spontaneous use connected to the available facilities: Numbers of visitors and uses: eroding natural reserves that are open to the public, developed seashores, coastal tourist circuits, beaches, cliff bases, quality of the landscapes ⇒ recreational value of nature Value of cultural heritage: linked to architecture, history, archeology, landscape, and science ⇒ social value of that heritage C - Safety of the population: Number of people using coastal footpaths and surrounding areas, sections of the beach at the cliff base, population threatened by collapsing terrain or flooding ⇒ population at risk	A - Occurrence of hazardous events: (even low or no stakes events): dates of the events, meteo-oceanic conditions, nature of the event, amplitude of the event, declarations of natural disasters ⇒ high or low occurrence frequency B - Major events: date, length, meteo-oceanic conditions, nature of the event, amplitude of the event, declarations of natural disasters, amplitude of the damage, estimated economic losses ⇒ much or little damage C - Disaster documentation: iconography, newspaper clippings, news reports, official statistics, "legal" documents, archives and local "souvenirs", eyewitness accounts, university research, morphological signs ⇒ systematic or haphazard anticipation of the event	A - Protective coastal engineering: static protective structures, protective structures in front of cliffs, seawalls groynes, drainage network, fences, brushwood, beach renourishment ⇒ important and effective or negative effects B - Existence of risk management documents prior to the RPP: existence of land-use plans/local development plans limiting development along the coast ⇒ partial or total consideration of risks C - Risk Prevention Plans (RPP): progress, organization, stakeholders ⇒ ahead of schedule or behind schedule D - Administrative informational documents: Departmental and communal information packets concerning major risks, ⇒ complete, prepared in advance, available, or nonexistent E - Local initiatives: public information, monitoring of at-risk, sectors, local aid and rescue plans, local risk management plans, associations ⇒ strong or weak commitment	A - Population characteristics: Demographics: numbers, distribution, density, sex, age Social: profession, level of education Habitat: type, status, length of time in the residence Commitments: member of an association for the protection of the environment, quality of life B - Uses within the community: homes, workshops, shop and office space, leisure activities, intra- and intergenerational mobility in terms of housing and within the community C - Representations: Awareness of coastal risks, acceptability, hierarchical rank of the perceived risk Characterization of risk Perception of risk: direct or indirect Management of risk: knowledge of and assessment of management techniques, degree of competence, mode of competence acquisition, evaluation of effectiveness D - Practices when facing risk: techniques for managing individual and collective risks, practices that exacerbate risk, the underlying logic of these practices

La méthode développée par Meur-Férec *et al.* (2008) inclut beaucoup d'informations pertinentes qui sont à considérer pour la vulnérabilité. Cependant, les éléments évoqués s'appliquent mal pour de petites portions de côte de 100 m telles que nous voudrions le développer pour les routes du MTQ. Le résultat est visuellement comparable, mais ne donne pas un résultat chiffré ce qui rendrait la comparaison quantitative difficile entre des centaines de segments de routes par exemple. Finalement, le résultat n'est pas évolutif et ne donne qu'une vulnérabilité actuelle et non de manière prospective.

Dans l'étude de McLaughlin et Cooper (2010) sur le développement d'un indice de vulnérabilité multi-échelle pour l'érosion côtière, la vulnérabilité est fonction de caractéristiques côtières (soit la résilience et la susceptibilité), des forçages côtiers et des facteurs socio-économiques. C'est en se basant sur ces trois éléments que l'indice de vulnérabilité à l'érosion côtière qu'ils ont développé intègre trois sous-indices à savoir les caractéristiques physiques de la côte, les forçages hydrodynamiques côtiers et les caractéristiques socio-économiques (figure 11) (McLaughlin et Cooper, 2010). Selon McLaughlin et Cooper (2010), il n'y a pas d'indice de vulnérabilité qui peut convenir à toutes les échelles spatiales c'est pourquoi leur indice a été développé pour 3 échelles différentes avec différents indicateurs pour un même sous-indice selon l'échelle considérée. Les différents paramètres sont comptabilisés de 1 à 5 pour créer chaque sous-indice (exemple des paramètres pour l'échelle locale au tableau 4). Les 3 sous indices sont ensuite intégrés dans un indice global (équation 7).



Figure 11. Classification des variables des 3 différents sous-indices de vulnérabilité (McLaughlin et Cooper, 2010)

Tableau 4. Scores pour la vulnérabilité au niveau local (McLaughlin et Cooper, 2010)

Variable		1	2	3	4	5
Coastal characteristics	Landform	High resistance cliff Seawall	Low resistance cliff	Multiple sand dune ridges	Single sand dune ridges Gravel and boulder ridges	Mudflat Saltmarsh Beach – no dunes
	Elevation (m)	>30	20 to <30	10 to <20	5 to <10	<5
	Rivers	Absent				Present
	Inland buffer (m from MHW)	300 to >1000		50 to <300		0 to <50
Coastal forcing	Storm probability (based on coastal orientation)	North easterly	Northerly Easterly	North westerly South easterly	Southerly South westerly	Westerly
	Morphodynamic state (Dean's parameter)	Inland areas and rocky cliffs	Dissipative or Reflective	Intermediate	Reflective Intermediate Dissipative	Dissipative Reflective
Socio-economic	Cultural heritage	Absent				Present
	Landuse	Rocky cliffs	Scrub	Beach Sand dunes Forest Rough	Agricultural land Tee boxes Fairways Amenity grass	Urban Residential Carparks Greens
	Population	Absent				Present
	Roads	Absent	Footpaths	Minor access roads	B-class roads	A-class roads

Équation 7. Calcul de l'indice de vulnérabilité à l'érosion côtière (McLaughlin et Cooper, 2010)

Vulnérabilité côtière

$$= (\text{sous indice de caractéristiques côtières} \\ + \text{sous indice de forçage côtier} \\ + \text{sous indice socio économique}) / 3$$

L'indice développé par McLaughlin et Cooper (2010) est très intéressant, notamment par son côté multi-échelles. Cependant, les lacunes résident dans son application qui est seulement actuelle et ne tient pas compte du moyen et long terme, ni de ce qui est vulnérable rapidement ou dans longtemps. De plus, il ne tient pas compte d'autres aléas côtiers tels que la submersion. Les caractéristiques côtières de l'indice local semblent être un *proxy** pour l'évolution côtière et l'érosion prévue. Étant donné que nous disposons pour tous nos sites d'étude d'une évolution historique de la côte et d'une évolution probable, il apparaît moins précis d'utiliser un type de côte et une résistance globale à l'érosion alors que nous disposons d'une évolution annuelle de la côte et d'une évolution possible en cas de tempête.

Par ailleurs, dans l'étude de McLaughlin et Cooper (2010), les routes sont classées selon leur importance. Dans notre propre étude, les routes gérées par le MTQ sont semblables et ce paramètre est donc non pertinent. Enfin, la population est caractérisée comme étant absente ou présente (tableau 4), cependant nous pensons que la densité de population est importante en terme de degré de vulnérabilité et devrait être intégrée, par exemple en prenant en compte le nombre de personnes le long du tronçon de route.

2.4 Vulnérabilité des routes

La vulnérabilité spécifique des routes est un élément qui a été étudié par plusieurs auteurs. Nous en présenterons quelques-uns qui ont permis de contextualiser et d'appuyer notre étude. Tout d'abord, nous aborderons la vulnérabilité des routes en terme de réseau, puis envers les changements climatiques avant de nous attarder à des exemples de vulnérabilité de routes envers des aléas naturels non côtiers et pour finir avec quelques exemples d'études de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers.

2.4.1 Vulnérabilités des routes en tant que réseau

Une des particularités des infrastructures de transports est leur fonctionnement en réseau. Ainsi, à la différence d'autres types d'analyse de vulnérabilité (pour une région en général par exemple), celles liées spécifiquement aux transports doivent considérer cette particularité dans son évaluation de la vulnérabilité. En effet, un segment d'infrastructure ne peut pas fournir son service à la communauté même s'il est en bon état s'il se retrouve isolé du reste du réseau. Les routes sont interreliées, donc la vulnérabilité totale du système est toujours celle de son plus faible chaînon. Si un segment est vulnérable alors le réseau pourra lui aussi l'être (selon sa robustesse). En effet, peu importe que 99 % de la route entre 2 villes soit non vulnérable, si le 1 % restant l'est, le lien entre 2 villes le sera lui aussi. Cette interconnectivité des réseaux essentiels peut être évaluée à partir de la durée entre la rupture du réseau et l'enchaînement des impacts (Robert et Morabito, 2011).

Ainsi l'effet du réseau est important en raison du rôle de connexion des routes. L'effet « domino » peut l'être aussi étant donné que la route assure des services dont l'interruption peut elle aussi générer des problématiques dans d'autres secteurs qui peuvent paraître éloignés du réseau routier (physiquement et/ou conceptuellement). Ceci est accentué par l'isolement des

communautés le long des routes côtières, particulièrement dans l'Est du Québec.

Selon Snelder (2010), les causes de vulnérabilité du réseau routier des Pays-Bas sont le manque de capacité restante ainsi que le manque de voies alternatives dans le réseau secondaire. Selon l'auteur, les facteurs de robustesse sont la redondance, la flexibilité (présence de réponse instantanée à une perturbation), la résilience, la compartementalisation et les mesures préventives. L'importance des routes alternatives (autrement dit la redondance du réseau) est importante dans la robustesse du réseau (Snelder, 2010). Selon Snelder (2010), lorsque le réseau est robuste cela évite des coûts majeurs en conditions d'incidents.

En raison de l'interconnectivité des réseaux routiers et de l'exposition à l'isolement des communautés côtières en cas de rupture du réseau, l'intégrité des services rendus par le réseau routier devrait être considérée comme un élément indispensable d'une gestion durable du réseau routier en contexte de changements climatiques (Boyer-Villemaire *et al.*, 2014).

2.4.2 Vulnérabilités des routes aux changements climatiques

Les impacts des changements climatiques sur les réseaux de transports sont nombreux et concernent plusieurs champs différents allant des ressources en énergie, aux véhicules ou aux passagers et employés en passant par les infrastructures (figure 12, Thornes *et al.*, 2012). Les aléas côtiers n'en sont qu'une petite partie. Cependant, selon Thornes *et al.* (2012), ce sont les aléas naturels tels que l'inondation et la submersion qui représentent le risque le plus élevé et le besoin d'une décision le plus rapidement (figure 13). Viennent ensuite la subsidence et les glissements de terrain ainsi que l'érosion côtière avec un risque tout aussi élevé, mais une urgence de décision moyenne (figure 13).

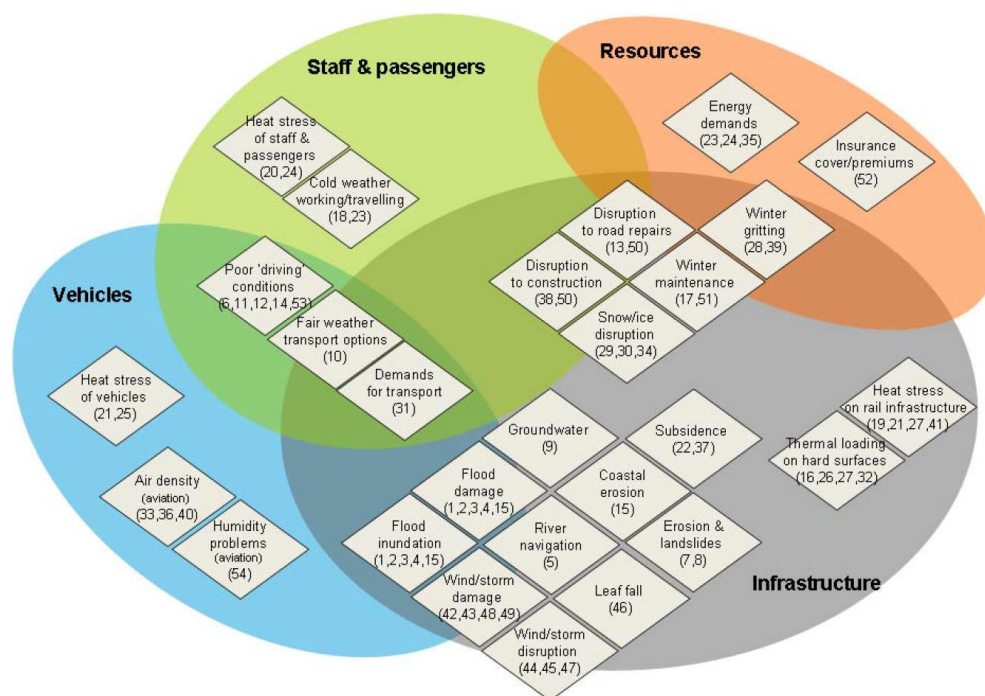


Figure 12. Groupes d'impacts des changements climatiques sur les transports (Thornes *et al.*, 2012)

Risk (qualitative estimate)	High	Heat Stress of Staff & Passengers (20,24) Insurance Cover/Premiums (52) Erosion & Landslides (7,8) Poor 'driving' Conditions (6,11,12,14,53)	Subsidence and landslides (22,37) Energy Demands (23,24,35) Thermal Loading on Hard Surfaces (16,26,27,32) Heat Stress on Rail Infrastructure (19,21,27,41) Coastal erosion (15)	Flooding and inundation (1,2,3,4,15)
	Medium	Demands for Transport (31) Wind/storm damage (42,43,48,49) Leaf fall (46) Snow/Ice Disruption (29,30,34) Winter Maintenance (17,51) Winter Gritting (28,39) Wind/storm disruption (44,45,47) Heat Stress of Vehicles (21,25) Air Density (aviation) (33,36,40) Fair Weather Transport Options (10) Disruption to Road Repairs (13,50) Disruption to Construction (38,50)	Cold Weather Working/Travelling (18,23)	
	Low	River navigation (5) Groundwater (9) Humidity Problems (aviation) (54) High winds at Ports increased storminess (55)		
		Low	Medium	High
		Urgency of decisions		

Figure 13. Règle de notation en fonction du risque et de l'urgence (Thornes et al., 2012)

Note : les scores sont déterminés seulement selon la perspective des ressources en transport.

Les principales variables étudiées par Thornes et al. (2012) dans leur évaluation des risques du réseau routier en zone côtière associés aux changements climatiques en Grande-Bretagne concernent la quantification des coûts liés aux délais et à l'interruption de service en cas d'inondation et de submersion. Les informations sur les impacts de l'érosion ou les autres impacts liés à la submersion (tels que la hausse du niveau de la mer) ne sont pas encore pris en compte.

2.4.3 Vulnérabilité des routes à d'autres aléas

Dans l'étude sur l'exposition aux glissements de terrain du gouvernement écossais (Winter et al., 2005), beaucoup d'éléments sont considérés et ressemblent ainsi à une étude sur la vulnérabilité. Sont, entre autres pris en compte, en plus de l'aléa physique en tant que tel, le type de route, sa largeur,

la vitesse des véhicules, le débit journalier, la présence d'autres infrastructures en amont de la route et la présence d'éléments de dangerosité en aval d'un potentiel glissement (plans d'eau, rivière...). Selon le résultat obtenu, des actions différentes sont préconisées (figure 14). Les actions peuvent agir soit sur l'exposition soit sur l'aléa selon l'intensité du risque appréhendé.

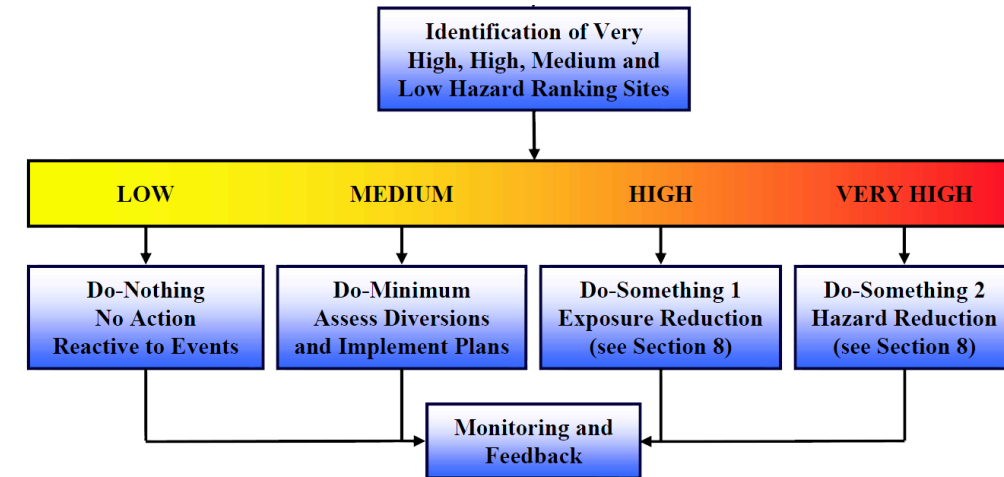


Figure 14. Actions préconisées selon le résultat de l'indice d'exposition aux glissements de terrain (Winter et al., 2005)

2.4.4 Vulnérabilité des routes aux aléas côtiers

Une étude traitant de la vulnérabilité des routes aux aléas côtiers a été menée pour les autoroutes et routes nationales en Caroline du Nord, É.-U. (Overton et Fisher, 2005). L'objectif était d'identifier les « hot spots » présents sur le réseau routier supérieur. Leur étude s'est basée sur seulement deux variables soit (1) les taux d'érosion à long terme versus la distance de la route à la côte et (2) les impacts des tempêtes/ouragans à court terme (par le biais de simulations). L'analyse de la vulnérabilité potentielle a été effectuée sur 20 ans (Overton et Fisher, 2005).

Une autre étude réalisée aux É.-U. avait pour objectif d'étudier la vulnérabilité des routes et ponts côtiers (AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007). Le but était entre autres, tout comme l'étude en Caroline du Nord (Overton et Fisher, 2005), d'identifier la vulnérabilité relative des routes principales à l'érosion à long terme et aux effets des ouragans. Cette étude voulait utiliser un modèle pour estimer la localisation de toutes les sections de routes vulnérables afin, dans un

deuxième temps, d'identifier les protections et leurs coûts pour planifier la gestion sur une période de temps prédéfinie. Les détails du modèle dépendent de la configuration locale et des processus côtiers impliqués (AASHTO, 2007).

Finalement, une étude de l'*US Federal Highway Administration* (2008) reprend et poursuit dans la même méthodologie proposée par Overton et Fisher (2005) et par l'AASHTO (2007). Cette étude propose d'utiliser la position future du trait de côte afin d'évaluer la vulnérabilité des autoroutes et routes principales côtières des États-Unis. Le but de cette étude est qu'une fois la vulnérabilité connue, des solutions (relocalisation ou structures côtières) soient décidées. Selon eux, cette information et sa représentation graphique peuvent être d'une grande valeur dans la planification des réponses à apporter (US Federal Highway Administration, 2008).

En France, une étude du groupe d'experts en adaptation au changement climatique des infrastructures de transport (CETMEF, 2009 in Leuxe, 2011) présentait le tableau reproduit à la figure 15 comme résultat sur la « vulnérabilité » des réseaux routiers et ferroviaires du territoire français à la submersion marine. La méthodologie étant de superposer les réseaux aux zones potentiellement submergées.

	Niveaux marins centennaux -1m	Niveaux marins centennaux	Niveaux marins centennaux +1m
Autoroutes	160	301	355
% du linéaire national	1,3%	2,5%	2,9%
Routes Nationales	79	148	198
% du linéaire national	0,7%	1,3%	1,7%
Départementales	2074	3314	4338
% du linéaire national	0,5%	0,9%	1,1%
Autres	7032	11559	15522
% du linéaire national	1,12%	1,84%	2,47%
Voies ferrées	812	1482	1967
% du linéaire national	2,6%	4,8%	6,3%

Figure 15. Cumul des infrastructures routières et ferroviaires situées dans les « zones basses » en kilomètres en France métropolitaine (CETMEF, 2009 in Leuxe, 2011)

Ces quatre études sur la « vulnérabilité » des routes des États-Unis et de la France à l'érosion côtière semblent être plutôt de « l'exposition » à l'érosion que de la vulnérabilité selon les définitions que nous avons retenues. Elles sont en cela très similaires à celle qui a été réalisée dans le *volume I* de la présente étude (Drejza et al., 2014) et qui se concentrait sur l'exposition des

routes à l'érosion. Tout comme l'étude d'Overton et Fisher (2005), celles de l'AASHTO (2007) et de l'*US Federal Highway Administration* (2008) semblent plutôt se concentrer sur l'exposition des routes aux aléas, car elles ne tiennent pas compte des services offerts par le réseau routier, du type d'enjeux ou de la capacité d'adaptation. La différence est ainsi liée aux différences de définitions employées (voir section 2.1.3) ce qui explique le peu d'éléments inclus dans ces études de vulnérabilité et la simplicité des éléments à utiliser pour déterminer, selon leurs auteurs, la « vulnérabilité » d'une route à l'érosion. Elles n'en restent pas moins, comme nous l'avons fait avec le *volume I* du présent projet, une étude préliminaire essentielle pour toute autre étude plus poussée sur la vulnérabilité en tant que telle.

3 MÉTHODOLOGIE DE L'ANALYSE CÔTIÈRE

Afin que l'analyse de la vulnérabilité puisse être effectuée pour les différents sites témoins de l'étude, il a fallu décrire avec précision le milieu physique de ces sites ainsi que l'évolution géomorphologique de la côte. Une bonne analyse des processus et des aléas côtiers des sites à l'étude est donc un prérequis pour évaluer la vulnérabilité des infrastructures routières aux aléas côtiers et devrait être entreprise avant toute analyse de vulnérabilité.

3.1 Caractérisation de la côte

Une caractérisation côtière a été réalisée. Le principe de la segmentation côtière consiste à délimiter des segments homogènes selon plusieurs variables et en fonction des différentes parties de la zone côtière. Un nouveau segment est déterminé dès qu'une des variables change sur une longueur minimale de 5 m. Un point GPS est pris sur le terrain au début et à la fin de chaque segment. La ligne de base utilisée est la ligne de rivage pour les côtes basses ou les côtes sans falaise (terrasses de plage, flèches littorales, marais maritimes, tombolo) et le trait de côte pour les côtes à falaise (falaises meubles, falaises rocheuses). Cette ligne est tracée dans un SIG (ArcGIS 10) sur les images les plus récentes disponibles dans le secteur, puis segmentée selon les points GPS qui identifient les débuts et les fins de segments. La codification des différentes variables et des descripteurs recueillis va permettre de développer une base de données au sein du SIG intégrant à la fois une description du type de côte, de l'état de la côte, des processus d'érosion, de la hauteur du trait de côte, de la largeur de la plage, de la stratigraphie au niveau du trait de côte et de la plage ainsi que du type et de l'état de l'artificialité. Il est possible ensuite de réaliser différentes analyses spatiales et de représenter de manière cartographique les différentes caractéristiques de la zone côtière ainsi que les facteurs géologiques, hydrodynamiques, morphosédimentologiques, morphogénétiques et anthropiques qui peuvent modifier la dynamique de la zone côtière.

Dans certains secteurs, la caractérisation a été effectuée par photo-interprétation en utilisant à la fois les photographies hélicoptérées obliques à haute résolution (réalisées en septembre 2010 par le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR) et les photographies aériennes verticales hautes résolutions. Ceci a été effectué dans un SIG (ArcGIS 10) avec une résolution de 5 m.

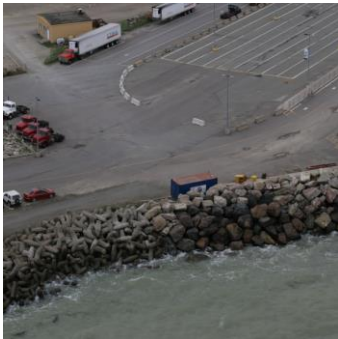
La caractérisation comprend à la fois le type de côte (tableau 5) et l'état de la côte (tableau 6). De plus, il a été indiqué si la côte est artificialisée ou non par un ouvrage de protection. Dans ce cas, tous les types d'artificialités sont pris en compte, quel que soit leur état et quel que soit le fait qu'elles soient ou non adaptées au type de côte dans lequel ils sont implantés et aux aléas qui y surviennent. Enfin, si nécessaire, le type et l'état de l'artificialité sont décrits dans 2 colonnes (tableau 7).

3.1.1 Type de côte

Tableau 5. Définition des principaux types de côtes

Type de côte*	Exemple photographique	Définition
Marais maritime		Les marais maritimes sont des zones d'accumulation de sédiments fins colonisées par de la végétation herbacée.
Terrasse de plage		Accumulation de sable et/ou de gravier littoral formée d'un replat généralement végétalisé qui est très rarement submergé par les marées. Le replat est parfois bordé sur sa partie inférieure par un talus d'érosion (microfalaise) de moins de 2 m de hauteur et sa surface est parfois affectée par l'activité éolienne. La terrasse de plage peut être suivie à l'arrière-plage ou l'arrière-côte d'une falaise morte ou d'un terrain plat.
Tombolo et cordon littoral		Accumulation basse de sable et/ou de gravier qui relie la côte à un îlot souvent rocheux ou deux îlots rocheux entre eux. Ce type de côte est souvent bordé d'une lagune. Le cordon littoral peut ne pas être attaché à la côte et est souvent parallèle à celle-ci.

Type de côte*	Exemple photographique	Définition
Flèche littorale		Accumulation de sable et/ou de gravier qui s'attache à la côte et qui s'étire généralement parallèlement à la côte; l'extrémité est libre.
Côte dunaire		Une côte dunaire est une côte qui se forme où une importante quantité de sable est disponible. Elle est principalement formée de sable qui s'est accumulé au fil du temps par des processus éoliens. Elle forme des falaises sableuses lorsqu'elle est en érosion et peut aussi être végétalisée.
Côte morainique		Une côte morainique est une côte qui a été formée par le passage de l'inlandsis Laurentidien ou d'une calotte glaciaire qui a érodé le socle rocheux et laissé un dépôt glaciaire lors de sa fonte. Ces dépôts peuvent être glaciaires ou fluvioglaciaires. Les dépôts de blocs et de galets sont maintenant soumis à l'action des vagues qui a souvent lessivé les sédiments plus fins.
Falaise meuble		Escarpement de dépôts non consolidés (argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs). Les escarpements de moins de 5 m de hauteur sont classifiés comme basse falaise meuble.
Falaise meuble à base rocheuse		Escarpement de dépôts non consolidés (argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs) dont la base est constituée de roche consolidée. Les escarpements de moins de 5 mètres sont classifiés comme des basses falaises meubles à base rocheuse.

Type de côte*	Exemple photographique	Définition
Falaise rocheuse		Escarpement de roche consolidée. On retrouve des roches sédimentaires, métamorphiques et ignées. Les escarpements de moins de 5 m de hauteur sont classifiés comme basse falaise rocheuse.
Falaise rocheuse à sommet meuble		Escarpement rocheux surmonté d'un dépôt meuble sur moins de la moitié de la hauteur, mais qui influence le mode de recul de la falaise. Les escarpements de moins de 5 m de hauteur sont parfois classifiés comme basses falaises rocheuses à sommet meuble.
Falaise nd	-	Escarpement dont la nature n'a pas pu être déterminée. Les escarpements de moins de 5 m de hauteur sont classifiés comme basses falaises nd.
Côte rocheuse sans falaise		Côte rocheuse sans falaise, à pente douce possédant parfois des écueils rocheux. Elle peut être constituée de roche sédimentaire résistante (Bas-Saint-Laurent et Gaspésie), métamorphique ou ignée (Côte-Nord) et être stable à moyen terme (roches sédimentaires résistantes) ou à long terme (roches ignées).
Artificielle		Une côte est qualifiée comme artificielle seulement lorsqu'il n'est plus possible de déterminer quel est le type de côte qui était présent avant les modifications anthropiques.

Type de côte*	Exemple photographique	Définition
Remblai		Lorsqu'un remblai important a été effectué en direction de la mer et que le type de côte original n'est plus discernable. Ces côtes sont toujours artificialisées pour maintenir le remblai en place.

* Il est à noter qu'en présence d'une structure de protection côtière, le type de côte d'origine est attribué au segment de côte lorsque cela est possible. La présence et le type de structure sont alors renseignés dans d'autres colonnes de la base de données (« Artif » et « TypeArtif »). Lorsqu'il n'est pas possible de déterminer le type de côte original (qui était présent avant l'action anthropique), et seulement dans ces situations, la côte est considérée comme artificielle.

3.1.2 État de la côte

Lorsqu'une côte présente un ouvrage de protection ou qu'il s'agit d'une côte artificielle (infrastructure majeure), elle est considérée comme étant d'un état stable tant que la structure de protection limite effectivement le processus d'érosion. Cependant, si la structure ne joue pas son rôle de protection adéquatement et que des processus d'érosion sont tout de même présents sur la côte et visibles sur les photographies, la côte peut alors être caractérisée comme semi-végétalisée voire même active, si la structure de protection n'est pas du tout efficace.

Il est important de noter que des côtes peuvent être en progradation sur le long terme, mais sans que cela ne soit identifiable actuellement sur le terrain ou à partir de photographies héliportées. Elles sont alors souvent considérées comme végétalisées. Les côtes désignées en accumulation sont celles qui présentent des signes d'accumulation identifiables sur le terrain ou sur les photographies héliportées (extrémités de flèches littorales, bancs en accumulation...).

Dans certains secteurs, l'état de la côte a été distingué entre les côtes stables et les côtes végétalisées. Bien que la méthodologie de cette étude regroupe ces deux catégories, lorsque l'information était disponible, elle a été conservée et est présentée dans le rapport.

Tableau 6. Définition des états possibles de la côte

État de la côte	Définition
Accumulation	Processus d'accumulation actifs
Stable ou végétalisé	Pas de processus d'érosion actifs Végétalisé à plus de 75 %
Semi-végétalisé	25 à 75 % de végétation, processus d'érosion actifs
Actif/vif	Moins de 25 % de végétation. Processus d'érosion actifs. La falaise est vive.

3.1.3 Artificialité de la côte

L'appréciation de l'état des ouvrages de protection (artificialité) présents sur les côtes se fait seulement de manière visuelle. Il ne s'agit pas d'une évaluation précise de l'intégrité de la structure d'un point de vue de l'ingénierie et elle n'est pas garante de sa stabilité future. Un ouvrage de protection considéré comme en bon état peut, tout à fait, être complètement détruit par une tempête importante.

Tableau 7. Définition des états possible de l'artificialité de la côte (ouvrage de protection)

État de l'infrastructure	Définition
Bon	> 75 %. Pas de signes apparents d'altération de l'infrastructure.
Partiellement endommagé	50 à 75 %. L'infrastructure est ponctuellement altérée (affaissement).
Très endommagé	25 à 50 %. L'infrastructure est altérée sur 50 à 75 % de sa surface et ne protège plus la côte.
Complètement endommagé	Moins de 25 %. La structure est complètement affaissée. Ne protège plus la côte.

3.2 Suivi de la côte avec des photographies

Entre une et trois caméras ont été installées sur chacun des sites témoins (tableau 8) afin de documenter l'évolution de la côte de manière quasi continue. Les lieux d'installation des caméras ont été choisis pour être représentatifs des sites témoins, leur localisation précise est indiquée sur les cartes des sites témoins du chapitre 5.

3.2.1 Type de matériel/installations

Il s'agit de caméras numériques de modèle Reconyx PC800 (figure 16) avec une qualité d'image de 3,1 MP. La fréquence de la prise de photographies est de 15 minutes entre 3h00 et 21h00. Les données en provenance des caméras sont enregistrées sur des cartes mémoire SD et sont recueillies tous les 3 à 4 mois. Les caméras sont montées sur un poteau de bois installé spécifiquement dans le cadre de cette recherche ou sur un élément fixe déjà présent sur le site (panneau publicitaire, arbre). Lorsque deux caméras sont installées au même emplacement, elles le sont avec une visée de sens opposés (figure 16).

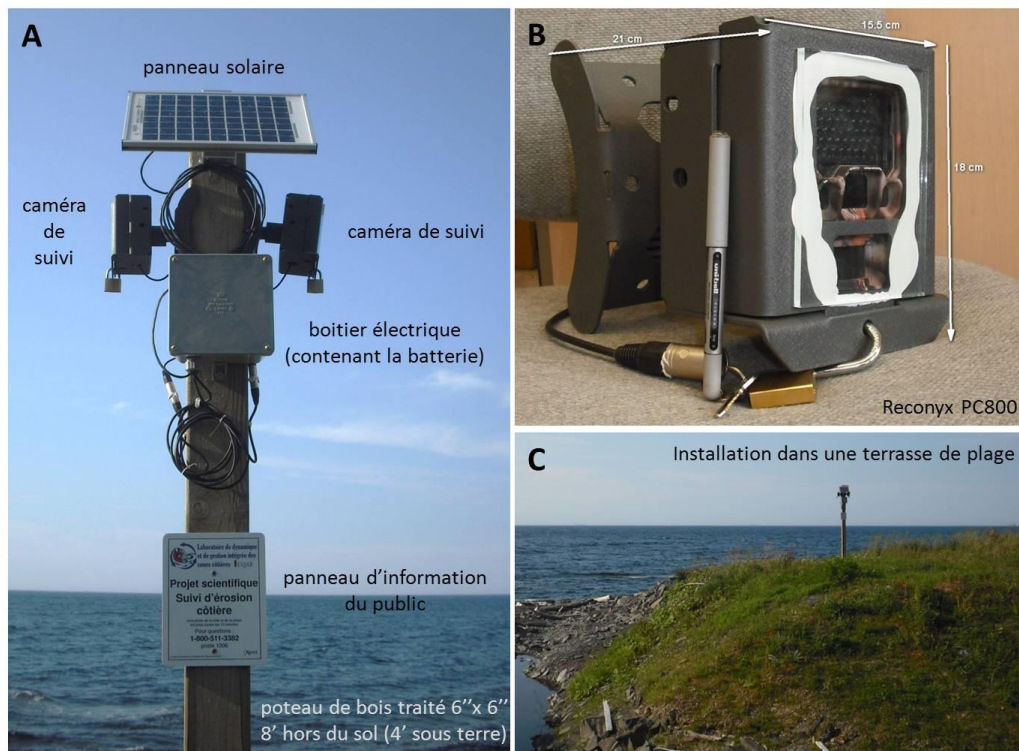


Figure 16. Type de matériel de suivi photographique de la côte

Tableau 8. Nombre de caméras par site témoin et dates d'installations

Site témoin	Nombre de caméras	Visée des caméras	Date d'installation des caméras
Baie-des-Sables	2	visées opposées : est - ouest	17 août 2011
Rivière-à-Claude	3	2 de visées opposées (est-ouest) sur le bord de la route entre Rivière-à-Claude et Marsoui 1 vers l'ouest, vers la baie de Rivière-à-Claude	18 août 2011
Chandler	1	Vers l'est	6 décembre 2011
Maria	3	visées opposées sur le bord de la route vers la pointe verte	7 décembre 2011
Pointe-aux-Loups	2	visées opposées : est-ouest	16 novembre 2008
Baie de Plaisance	3	visées opposées (nord-sud) et vers le nord pour celle située au sud de l'artificialité du MTQ	4 juin 2011
Pentecôte	2	visées opposées : nord-sud	13 novembre 2011
rivière au Bouleau	1	vers l'est	14 novembre 2011
Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	3	2 de visées opposées (est-ouest à LPM) 1 vers l'est (RSJ)	11 et 12 novembre 2011
TOTAL	20		

3.2.2 Visualisation et analyse qualitative

L'identification des événements de recul, de submersion, des processus côtiers responsables de la variation du trait de côte et de la plage, des conditions de glaces et des conditions climatiques est effectuée à la suite du visionnement des photographies à l'aide du logiciel VirtualDub (version 1.10.4). Ce logiciel de montage vidéo permet de manière conviviale la juxtaposition des photographies d'un secteur, une à la suite de l'autre, à la manière d'une vidéo continue permettant de visualiser les diverses conditions météorologiques et océanographiques touchant le littoral.

Les images ont permis de délimiter les unités naturelles de la plage et de suivre qualitativement leur évolution (figure 17, figure 18 et figure 19). Ces caméras ont ainsi servi à la compréhension des processus d'érosion ainsi que de la dynamique glacielle et des vagues, mais pourront aussi servir ultérieurement pour l'analyse et la mise en œuvre de solutions d'adaptation.



Figure 17. Limites géomorphologiques observées en côte basse (exemple de Saint-Ulric)



Figure 18. Limites géomorphologiques observées en côte à falaise (exemple de Chandler)

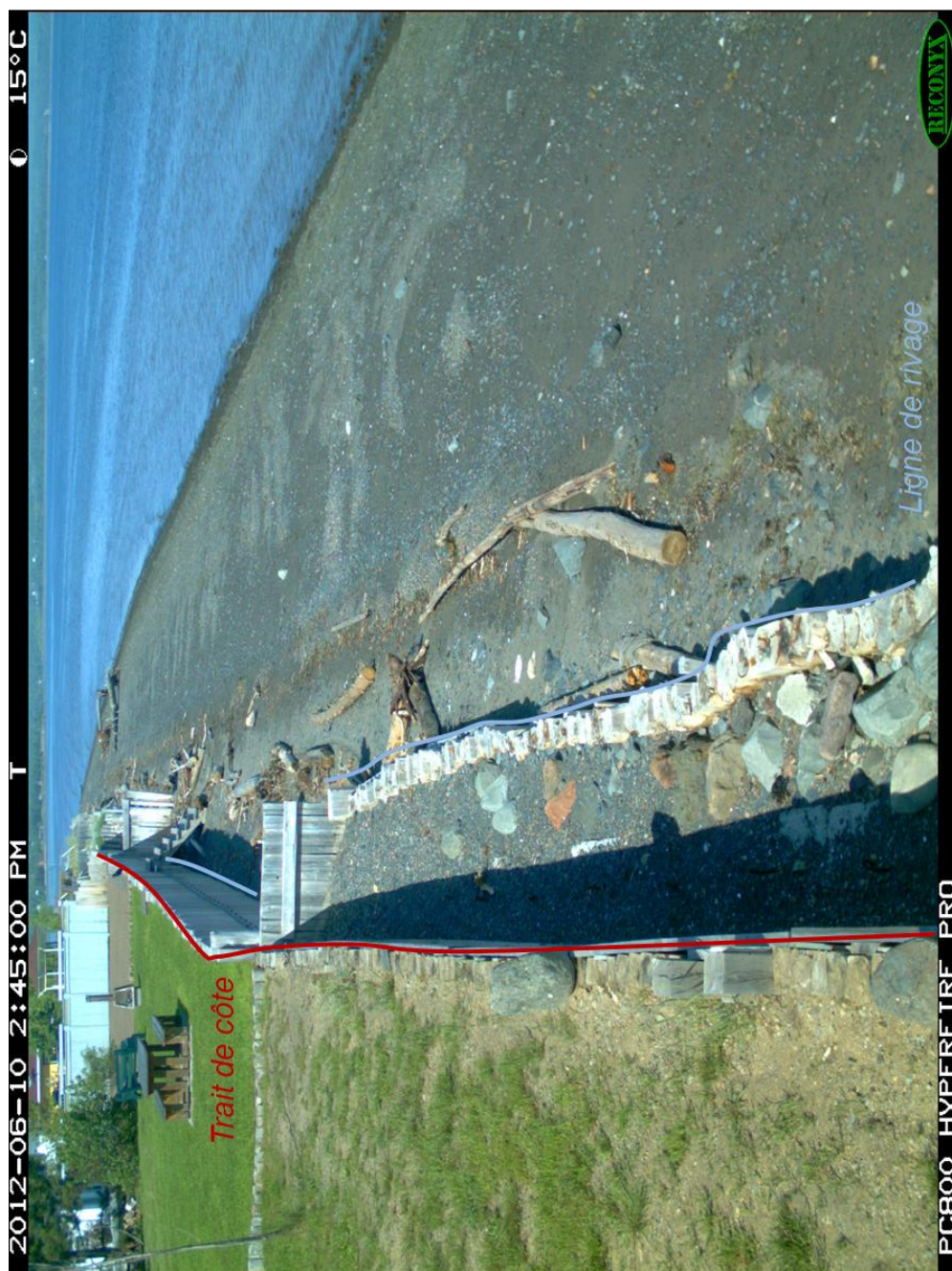


Figure 19. Limites géomorphologiques observées en côte artificialisée (exemple de Maria)

3.3 Dynamique hydrosédimentaire de la côte

La dynamique hydrosédimentaire, à savoir les unités et cellules hydrosédimentaires, les dérives littorales principales et secondaires, les sources sédimentaires, les réservoirs sédimentaires, etc. ont été caractérisés et cartographiés. La méthodologie détaillée se trouve dans le *volume I* du présent projet (Drejza et al., 2014).

Encadré 3. Termes utiles pour la dynamique hydrosédimentaire

Définitions

Unité hydrosédimentaire :

- Secteur de côte dans lequel le transit sédimentaire est limité entre deux éléments morphologiques (cap rocheux, pointe, rivière, bathymétrie...) infranchissables.
- Les unités sont indépendantes du point de vue du transport sédimentaire, c'est-à-dire que toute modification du mouvement de sédiments dans une unité est sans conséquence directe sur les unités voisines.
- Une unité peut être subdivisée en plusieurs cellules hydrosédimentaires.
- Également nommées « Unité géomorphologique naturelle » selon Mercier (1987).

Cellule hydrosédimentaire :

- Les cellules peuvent parfois être appelées sous-unités hydrosédimentaires.
- Il s'agit de compartiments de côte ayant un fonctionnement relativement autonome par rapport aux compartiments voisins (SDAGE, 2005), mais leur limite peut parfois se déplacer ou encore la cellule peut recevoir ou perdre des sédiments au profit des cellules adjacentes selon les conditions environnementales.
- Du point de vue du transport sédimentaire, les limites de la cellule sont donc perméables par rapport à l'unité hydrosédimentaire qui est imperméable.
- Les limites correspondent généralement à une inversion des dérives littorales ou encore à un cap rocheux.

Dérive littorale principale :

- Les houles obliques, les courants (de marée et autres), les vents et le déferlement causent un courant parallèle à la côte qui déplace les sédiments côtiers (sable, gravier, galets) dans une direction privilégiée.
- Le terme désigne à la fois le *courant parallèle* à la côte et le *déplacement des sédiments* qui est causé par ce courant.

Dérive littorale secondaire :

- Générée par les mêmes facteurs que la dérive littorale principale, la dérive secondaire résulte de conditions environnementales minoritaires dans leur durée ou leur intensité.
- Les conditions de vent, de marées et de courants peuvent changer selon la saison ou les conditions météorologiques (tempête notamment).

3.4 Évolution de la côte

Pour déterminer avec le plus de précision possible l'aléa d'érosion présent sur la côte des sites témoins, le calcul de l'évolution de la côte a été effectué à l'aide de photographies aériennes historiques.

3.4.1 Choix des photographies aériennes

Le choix des photographies s'est effectué selon les grandes périodes d'anomalies climatiques et de couverture de glace de l'Est du Québec ainsi que de la disponibilité des photographies et de leur échelle selon les sites. Les différentes photographies retenues sont présentées au tableau 9.

Tableau 9. Liste des photographies aériennes utilisées pour les différents sites témoins

Site témoin	Dates	Échelle	Commentaires
1- Baie-des-Sables à Saint-Ulric	1948	1 : 35 000	
	1963	1 : 15 840	orthorectifiées par le MRNF
	1977	1 : 10 000	
	1985-86	1 : 15 000	
	1993	1 : 15 000	
	2009	résolution au sol de 15 cm	
	2012	résolution au sol de 15 cm	
2- Rivière-à-Claude	1939	1 : 20 000	disponible seulement pour la partie à l'ouest de la pointe des Bernier
	1948	1 : 40 000	
	1963	1 : 15 840	orthorectifiées par le MRNF
	1977	1 : 10 000	
	1986	1 : 15 000	
	1992	1 : 15 000	
	2009	résolution au sol de 15 cm	

Site témoin	Dates	Échelle	Commentaires
3 -Chandler	1934	1 : 15 000	
	1963	1 : 15 840	orthorectifiées par le MRNF
	1978	1 : 10 000	
	1986	1 : 15 000	
	1992	1 : 15 000	
	2008	résolution au sol de 15 cm	images infrarouges du LDGIZC
4 -Carleton à Maria	1934	1 : 15 000	
	1963	1 : 15 840	orthorectifiées par le MRNF
	1978-79	1 : 10 000	
	1986	1 : 15 000	
	1992-93	1 : 15 000	
	2007	résolution au sol de 15 cm	images infrarouges du LDGIZC
5- la baie de Plaisance	1963	1 : 15 840	
	1977	1 : 10 000	
	1983	1 : 10 000	
	1992	1 : 15 000	
	2001	1 : 40 000	
	2008	résolution au sol de 15 cm	images infrarouges du LDGIZC
6- Pointe-aux-Loups	1963	1 : 15 840	
	1977	1 : 10 000	
	1983	1 : 10 000	
	1992	1 : 15 000	
	2001	1 : 40 000	
	2008	résolution au sol de 15 cm	images infrarouges du LDGIZC
7- Pentecôte	1930	1 : 12 000	
	1950/52	1 : 40 000	
	1965	1:15 840	
	1972-73	1 : 15 000	
	1982	1 : 40 000	
	1987	1 : 15 000	
	1996	nd	
	2001	1 : 40 000	orthophotographies du MRNF
	2008	1 : 15 000	
	2009	résolution au sol de 10 cm	mosaïque du MTQ (seulement lorsque la route est à moins de 150 m de la côte)

Site témoin	Dates	Échelle	Commentaires
8- rivière au Bouleau	1950	1 : 40 000	
	1976	1 : 15 000	
	1982	1 : 40 000	
	1987	1 : 15 000	
	1997	1 : 40 000	
	2005	1 : 40 000	orthophotographies du MRNF
	2009	résolution au sol de 10 cm	mosaïque du MTQ
9- Rivière-Saint- Jean à Longue- Pointe-de-Mingan	1949-49	1 : 40 000	
	1967	1 : 15 840	
	1976	1 : 5 000	
	1983	1 : 40 000	
	1989	1 : 5 000	
	1997	1 : 40 000	
	2005	1 : 40 000	orthophotographies du MRNF
	2009	résolution au sol de 10 cm	mosaïque du MTQ (seulement lorsque la route est à moins de 150 m de la côte)

3.4.2 Géoréférencement

Les photographies aériennes anciennes sont d'abord numérisées à une résolution d'au minimum 600 dpi, puis leur géoréférencement est réalisé dans un SIG (ArcGIS 10) en se basant sur les mosaïques orthorectifiées les plus récentes disponibles pour le site (de 2007 à 2009), en utilisant un maximum de points d'ancrage présents sur les deux couvertures aériennes. La partie centrale des photographies aériennes a été privilégiée, car cela permet de réduire au minimum la distorsion radiale.

3.4.3 Type de trait numérisé

Par la suite le trait de côte ou la ligne de rivage ont été numérisés. La ligne utilisée dépend du type d'environnement côtier et correspond à la ligne marquant l'évolution du milieu naturel (encadré 4 et figure 20).

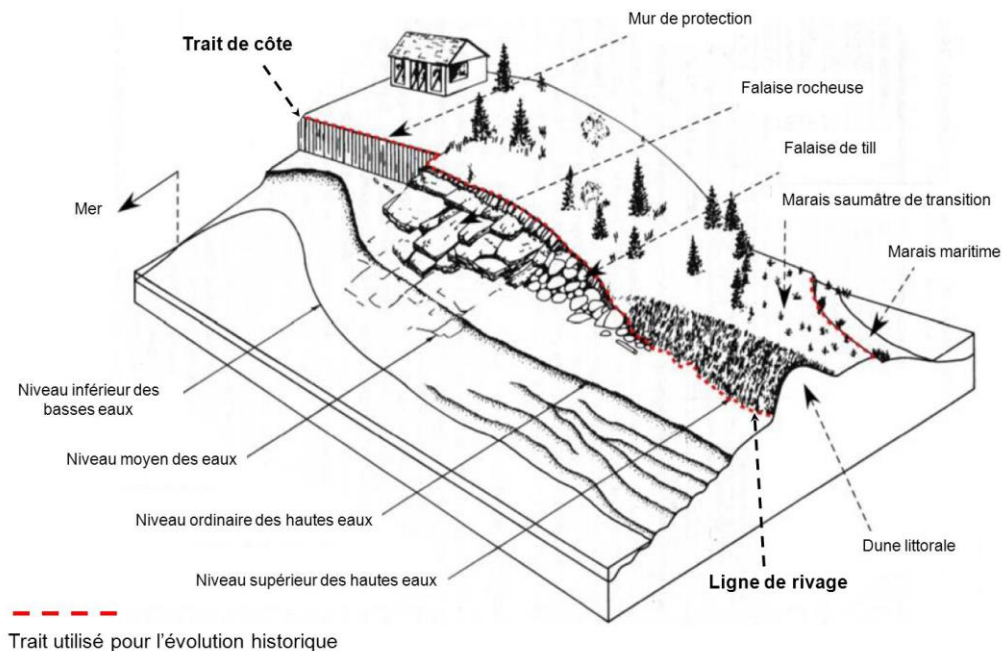


Figure 20. Trait utilisé pour le traçage de la côte et l'évolution historique selon différentes configurations de côte (modifié de Daigle et al., 2006)

Encadré 4. Définitions des traits utilisés

Ligne de rivage : Cette limite géomorphologique correspond à la limite de végétation herbacée dense, à la base d'une structure de protection rigide ou à la base d'une falaise. Elle correspond approximativement à la limite des hautes mers maximales.

Trait de côte : Sommet du talus côtier ou sommet d'une structure de protection rigide. Limite entre la côte et l'arrière côte, limite de la zone d'influence des processus côtiers.

3.4.4 Échelle de numérisation

La numérisation de la ligne de rivage ou du trait de côte s'est effectuée à l'échelle la plus précise possible. Pour les photographies à haute résolution, cela s'est effectué au 1 : 600. Pour les photographies au 1 : 40 000 cela a dû être réalisé au 1 : 1 200.

3.4.5 Évolution historique de la côte

3.4.5.1 Logiciel DSAS

Le calcul de l'évolution historique est réalisé à l'aide du logiciel « *Digital Shoreline Analysis System* » (DSAS) développé par la Commission géologique des États-Unis (USGS) (Thieler *et al.*, 2005). Ce logiciel permet de générer automatiquement des transects à un intervalle fixe (ici : 50 m) qui recoupent perpendiculairement les traits de côte des différentes années. L'écart entre chacun des tracés est ensuite calculé et rapporté à une variation annuelle, ce qui génère une base de données sur l'évolution historique de la ligne de rivage ou du trait de côte. L'évolution historique de la côte permet de quantifier le rythme de déplacement du trait de côte et de la ligne de rivage des différents types de systèmes côtiers.

3.4.5.2 Correction des taux

Les taux ont été corrigés selon les erreurs de géoréférencement lorsque cela était possible en se servant de points que l'on savait être fixes entre les deux séries de photographies aériennes.

3.4.6 Méthodologie de la projection du trait de côte futur

Afin de projeter l'évolution passée de la côte et de déterminer quel serait le taux de migration le plus probable pour le futur, deux méthodes ont été utilisées :

- Pour les sites déjà analysés par des études récentes, ce sont ces résultats qui ont été conservés. Cela est le cas pour le site n° 4 « Carleton et Maria » (Bernatchez *et al.*, 2012a), les sites n° 5 et 6 « Martinique » et « Pointe-aux-Loups » (Bernatchez *et al.*, 2012b) et pour la moitié est du site n° 9 « Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan » (Bernatchez *et al.*, 2012c).
- Pour les autres sites, une moyenne mobile sur 5 points de mesures (250 m) a été réalisée. Le taux de migration de la période la plus représentative du futur a été utilisé. La moyenne mobile tient compte des changements de dynamique hydrosédimentaire (dérives littorales, présence de structure perpendiculaire à la côte...) ainsi que des types de côte. La valeur d'érosion la plus importante parmi les points de

mesure situés en avant de la route est utilisée ou la valeur d'accumulation la plus faible (si tous les points sont en accumulation), dans le but d'adopter une valeur conservatrice.

Périodes utilisées :

- Site n° 1 : Baie-des-Sables et Saint-Ulric : période 1993-2012.
- Site n° 2 : Rivière-à-Claude : moyenne mobile 1 soit de 1992-2009
- Site n°3 : Chandler : moyenne mobile 1 soit de 1992-2008
- Site n° 7 : Pentecôte : moyenne mobile 1 soit de 2001-2008
- Site n° 8 : rivière au Bouleau : moyenne mobile 1 soit période 1997-2005
- Site n° 9 : partie ouest de Magpie à Rivière-Saint-Jean – moyenne mobile 1 soit période 1997-2005

3.5 Données LiDAR des sites témoins

Des relevés LiDAR de haute précision ont été effectués sur les 9 sites témoins par le LDGIZC.

3.5.1 Système utilisé pour l'acquisition

Le système mobile de laser terrestre (SMLT) est constitué de trois composantes principales : un balayeur laser, un système de navigation inertiel GPS-INS (composé d'un IMU et d'un récepteur GPS) et une caméra (figure 21) (Van-Wierst et Bernatchez, 2011). Pour que le système inertiel mesure les mouvements des autres capteurs (laser et caméra), l'ensemble des instruments est fixé sur une structure en aluminium dans la boîte arrière du véhicule (figure 21). Une génératrice Honda 2000 assure le courant électrique. L'ensemble de ces capteurs est branché à un ordinateur-serveur ainsi qu'à un multiplexeur Trimble M119 où converge l'information des différents instruments vers la plate-forme d'acquisition. Les logiciels d'enregistrement utilisés sont T3D CAM Capture et T3D Laser Capture conçus par la firme québécoise Géo-3D Inc. (Trimble Canada). Le logiciel d'acquisition GPS-INS est le LV POS View d'Applanix.

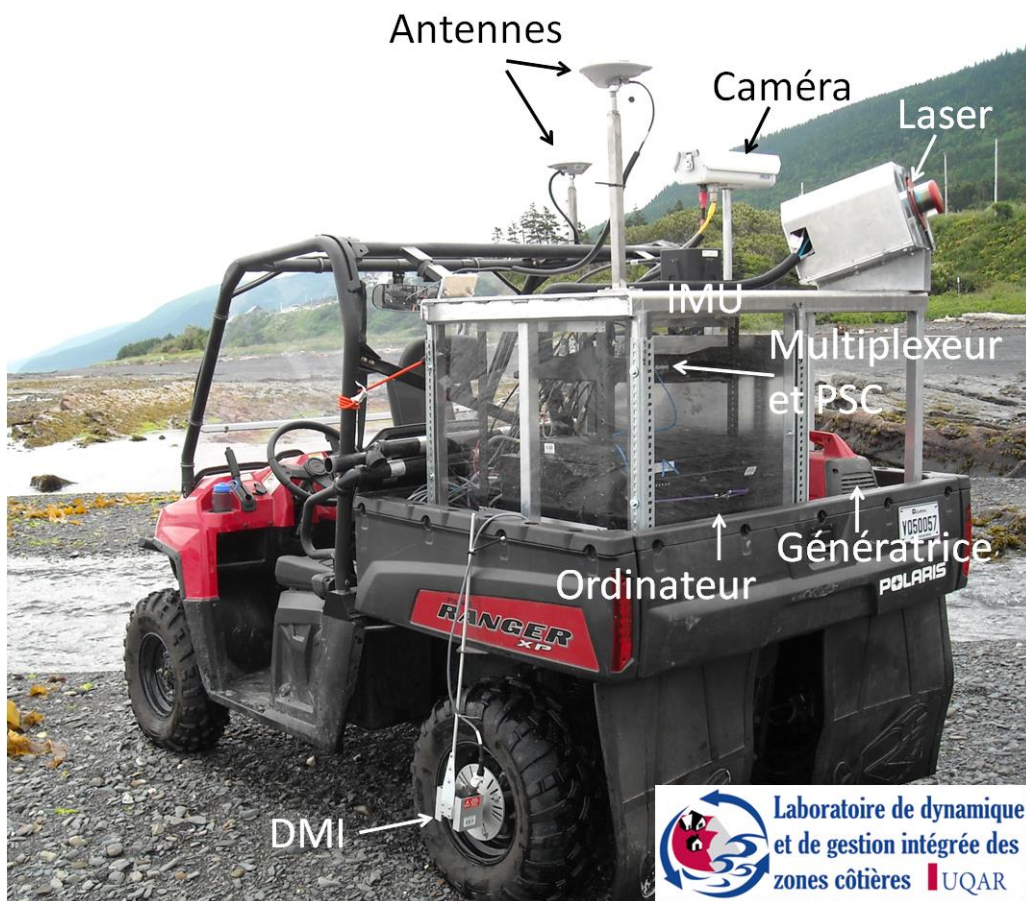


Figure 21. Capteurs et instruments du SMLT

Source : Van-Wiererts et Bernatchez (2011)

Le capteur laser Riegl VQ-250 à miroir rotatif est installé à l'extrémité arrière du véhicule sur une plate-forme fixe d'aluminium. Ces paramètres techniques sont présentés au tableau 10. La fréquence de balayage utilisé est de 100 hertz pour permettre l'acquisition de 300 000 points par seconde à une vitesse du véhicule variant entre 5 et 40 km/h. Le capteur est positionné avec un angle de tangage de $17,58^\circ$, un angle de lacet de $157,28^\circ$ et un angle de roulis quasi nul de $-0,31^\circ$ afin de maximiser l'angle de balayage qui est de 360° . La hauteur d'acquisition correspond à la hauteur approximative du balayeur par rapport au sol. Une caméra est utilisée en complément au capteur laser afin d'aider à l'interprétation du nuage de points. La caméra couleur vidéographique PointGrey Grasshopper GRAS-50S5C-C à capteur CCD est d'une résolution de 2448 par 2048. Elle est installée à un angle de $90,8^\circ$ en lacet et de $-2,8^\circ$ en

roulis du côté arrière droit du véhicule. Son angle de tangage est nul. Sa vitesse est programmée pour acquérir une trame à tous les trois mètres.

Tableau 10. Paramètres techniques du capteur laser Riegl VQ-250

Paramètres techniques du capteur Riegl VQ-250	
Longueur d'onde	0,9 μm
Angle de balayage	360°
Hauteur d'acquisition	2 m
Exactitude	10 mm
Vitesse d'acquisition	100 scan/sec
Acquisition	300 000 points/sec

Source : Bernatchez *et al.* (2012 d)

Pour enregistrer les mouvements et la position du véhicule, le système de navigation inertiel GPS-INS installé sur le véhicule est le POS-LV 220 du manufacturier Applanix. Ce système est composé du récepteur GPS, de deux antennes GPS Trimble Zephyr model 2, d'une centrale inertielle (IMU) et d'un instrument de mesure de distance (DMI). Les données GPS brutes sont enregistrées dans un petit ordinateur appelé *POS System Computer* (PSC). Pour corriger la trajectoire du système de navigation mobile par post-traitement des données GPS-INS, un récepteur de base statique Trimble R8 est positionné sur un point géodésique connu. L'utilisation de cette base sur un point connu contribue à l'amélioration de la précision du système (figure 22). Deux antennes (une primaire et une secondaire) sont installées sur le véhicule à deux mètres de distance. La distance entre les deux antennes est utilisée par le système GAMS (*GNSS Azimuth Measurement Subsystem*) afin d'augmenter la précision des données associées à la direction horizontale (azimut). La position exacte de l'antenne primaire par rapport au centre de phase du IMU est connue ainsi que la distance entre l'antenne primaire et la secondaire. La présence de la deuxième antenne permet de corriger les données GPS même si le véhicule est arrêté ou qu'il avance lentement. La centrale inertielle permet de corriger les angles de tangage, de roulis et de lacet. Un DMI génère un certain nombre de pulsations à chaque rotation de la roue qu'il multiplie par un facteur d'échelle pour convertir les pulsations en distance parcourue en mètre. Le DMI est utilisé pour augmenter la précision du système ainsi qu'assurer la correction des données lors d'une courte perte de signal GPS. Selon la fiche technique du système POS-LV 220, lorsque les données sont corrigées en post-traitement la précision théorique est de 0,02 m en X et Y ainsi que de 0,05 m en Z.

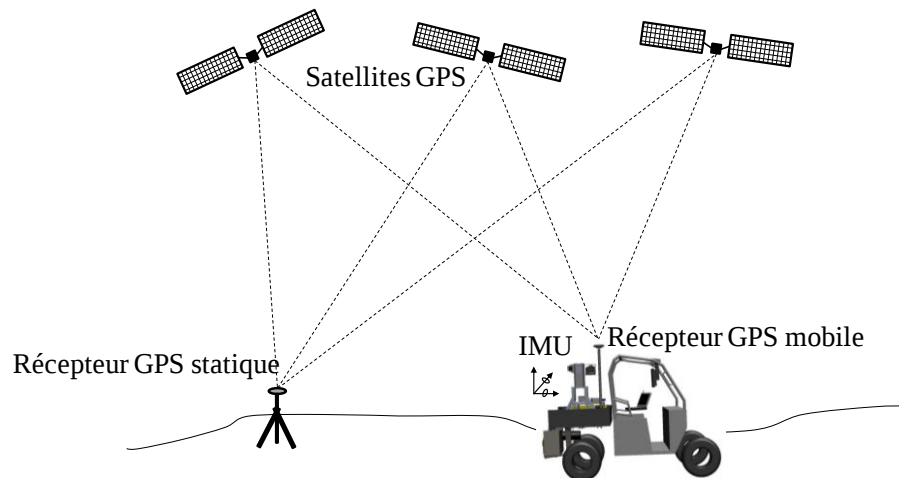


Figure 22. Système de navigation inertiel GPS-INS

Source : Van-Wierds (2012)

GPS-différentiel

Le GPS-différentiel utilisé est le récepteur Trimble R8 GNSS Modèle 3 incluant un émetteur/récepteur radio UHF interne de 430-450 MHz (figure 23 A et B). Le modèle de radio est le Trimble HPB 430-450 MHz qui est utilisé en mode répéitrice (figure 23 B). Le récepteur permet la poursuite des constellations GPS L2C et L5, GLONASS L1 et L2 ainsi que GALILEO (satellites expérimentaux GIOVE-A et GIOVE-B) autant pour le récepteur de base que pour le mobile. Pour des raisons techniques, deux carnets d'acquisition différents ont été utilisés, le TSC2 et le TSC3. Lors des relevés, le GPS-différentiel est utilisé en deux modes distincts, RTK et enregistrement. Le mode RTK est utilisé pour les points de contrôle et permet la correction en temps réel. Le temps d'acquisition de chaque point est de 5 secondes. Les fichiers sont ensuite téléchargés directement en fichier de forme (*shapefiles*) compatible au logiciel ArcGIS. Le mode enregistrement est utilisé pour créer le fichier d'observation de la base du SMLT. Le fichier sortant est de type T02 et est transformé en format RINEX pour être utilisé dans le logiciel de post-traitement POSPAC MMS 5.4.



Figure 23. Récepteur Trimble R8

(A. récepteur mobile; B. récepteur de base et radio UHF)

3.5.2 Méthodologie d'acquisition

Les levés du SMLT correspondent avec les périodes de basses mers lors de la marée de vives-eaux. Dans le cadre de ce projet, trois périodes de marée de vives-eaux ont été utilisées. Les dates d'acquisition par secteur, la longueur de côte et la superficie couverte sont présentées au tableau 11 ainsi que sur des cartes en annexe 2 du volume I de la présente étude (Drejza *et al.*, 2015). Pour chacun des secteurs, la superficie couverte correspond à la superficie totale et non seulement à celle de la plage qui sera utilisée pour l'analyse de la disponibilité sédimentaire. Tout d'abord, du 31 juillet au 3 août 2011, les sites témoins du Bas-Saint-Laurent et du nord de la Gaspésie ont été relevés. Ensuite, du 28 août au 2 septembre 2011, ce sont les sites de la Côte-Nord qui ont été visités. Enfin, les secteurs de la baie des Chaleurs ont été relevés du 27 au 29 septembre 2011. Les deux secteurs aux Îles-de-la-Madeleine ont été réalisés au printemps 2012. Pour l'ensemble des secteurs, le haut estran est complètement couvert par le levé LiDAR. Le bas estran est couvert jusqu'à la limite de l'eau et le haut de plage ainsi que l'arrière-plage sont couverts jusqu'à ce qu'un obstacle, comme une falaise ou de la végétation, bloque l'onde du laser. Par ailleurs, à Saint-Ulric, un relevé a aussi été effectué à partir de l'accotement de la route 132 et couvre donc une partie de la terrasse et le nuage de points rejoint celui acquis sur la plage vers le nord (Bernatchez *et al.*, 2012 d).

Tableau 11. Date d'acquisition et longueur de côte couverte par secteur

Site témoin	Date d'acquisition	Longueur de côte couverte
Bas-Saint-Laurent		
1- Baie-des-Sables à Saint-Ulric	2 et 3 août 2011	16,8 km
Gaspésie		
2- Rivière-à-Claude	31 juillet et 1 ^{er} août	4,2 km
3- Chandler	27 septembre 2011	1,73 km
4- Carleton à Maria	28 et 29 septembre 2011	12,2 km
Îles-de-la-Madeleine		
5- baie de Plaisance	3 juin 2012	24,6 km
6- Pointe-aux-Loups	5, 6 et 7 juin 2012	39,7 km
Côte-Nord		
7- Pentecôte	30 août 2011	13,8 km
8- rivière au Bouleau	28 août 2011	1,6 km
9- Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	31 août, 1 ^{er} et 2 septembre 2011	26,8 km
TOTAL		141,5 km

3.5.3 Méthodologie de validation

Afin de valider la précision du nuage de points laser, une multitude de points de contrôle sont pris à l'aide d'un DGPS RTK R8 de Trimble. Deux catégories de points sont acquises, sur des infrastructures déjà existantes permanentes ou semi-permanentes (figure 24 A) et sur des cibles carrées fabriquées en PVC installés par l'équipe de l'UQAR (figure 24 B) (Bernatchez *et al.*, 2012 d). Le nombre de points de contrôle acquis pour chacun des secteurs à l'étude est présenté au tableau 12. Sur les infrastructures, le point est pris sur un coin ayant un angle droit qu'il sera facile de repérer ensuite sur le nuage laser en 3D, notamment des coins de ponceau, des coins de marche d'escalier, des coins de murs de protection, etc. Pour chaque cible, huit points sont pris, quatre sur les coins supérieurs du PVC et 4 sur le sol à l'extérieur du PVC. Les points acquis au DGPS sont ensuite comparés aux points laser afin de valider la calibration effectuée précédemment. Généralement, l'erreur provient d'une baisse de la précision du système GPS-INS. Différentes raisons peuvent expliquer cela, notamment un sol cahoteux et une vitesse du véhicule trop faible.

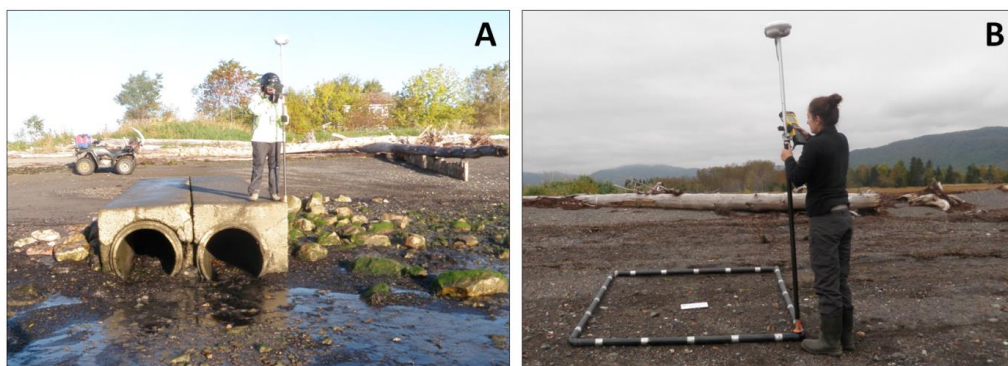


Figure 24. Points de validation (A. infrastructures permanentes et semi-permanentes; B. PVC)

Tableau 12. Nombre de points de contrôle pris au DGPS et points géodésiques utilisés

Secteur	Points D-GPS			Point géodésique
	PVC	Infrastructures	Total	
Bas-Saint-Laurent				
1- Baie-des-Sables à Saint-Ulric	54	134	188	78K0042 et 99K0115
Gaspésie				
2- Rivière-à-Claude	48	147	195	99K0152
3- Chandler	56	10	66	87K0892
4- Carleton à Maria	124	177	301	99K0220 et 99K0221
Îles-de-la-Madeleine				
5- Baie de Plaisance	108	19	127	point créé par notre équipe 94K0016,
6- Pointe-aux-Loups	263	35	298	64K0022 et point créé par notre équipe
Côte-Nord				
7- Pentecôte	136	49	185	73K0189
8- rivière au Bouleau	87	32	119	80L354
9- Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	452	67	519	80K0148 et 80L412

3.5.4 Méthodologie de traitement

Le traitement des données SMLT est effectué en trois grandes étapes; la calibration, la transformation et le traitement. Le schéma de la figure 25 est une synthèse de la méthodologie utilisée lors du traitement et chacune des grandes étapes est expliquée ensuite.

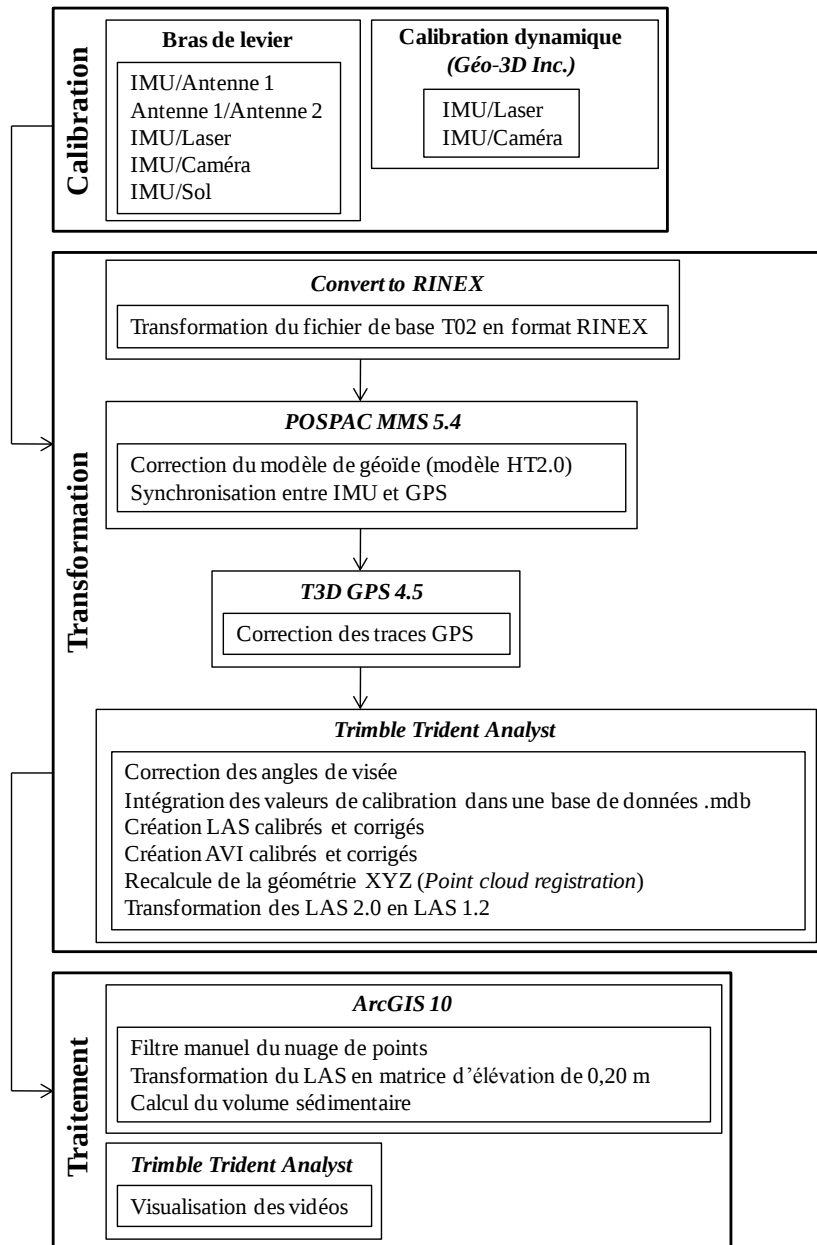


Figure 25. Schéma méthodologique synthèse du traitement de données du SMLT

Source : modifié de Van-Wierst (2012)

Calibration

La calibration du système a été effectuée en juillet 2011 par la firme Géo-3D Inc (Trimble Canada). La première étape est de mesurer précisément les bras de levier (distance entre chaque capteur) et d'intégrer les valeurs dans le logiciel d'acquisition LV POS View ainsi que dans la base de données de CAM Capture. La méthode utilisée pour le capteur laser ainsi que pour la caméra est une calibration dynamique. Un relevé a été effectué dans un stationnement où des sphères réfléchissantes sont installées au sol et où un site de calibration avec des points de contrôle ont été parfaitement géopositionnés à l'avance. Des clips d'acquisition sont récoltés dans toutes les directions au travers du réseau de sphères. Les données du GPS sont ensuite corrigées par la station de référence GPS permanente de Montréal du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF). Le post-traitement de la calibration s'effectue dans l'extension *Laser Calibration* du logiciel Trident 4.6 de Géo-3D Inc (Trimble Canada). Tout d'abord, les sphères sont détectées à partir de la réflectivité. Ensuite, l'application trouve les angles idéaux en roulis, tangage et lacet pour reformer les sphères le plus parfaitement possible. Une fois ce calibrage relatif terminé, les angles trouvés sont appliqués à un clip qui a traversé le site de calibration et la précision obtenue est validée en absolu à partir des points de contrôle. Les angles obtenus par cette calibration sont ensuite réutilisés pour l'ensemble des relevés du SMLT dans le cadre de ce projet et la précision a été vérifiée pour chacun des sites témoins.

Transformation

Au début de l'étape de transformation des données, le fichier de la base du DGPS Trimble R8 doit être transformé en format RINEX. Dans le logiciel POSPAC MMS4.5, le fichier de base et les fichiers du POS LV220 sont intégrés afin de les synchroniser et de corriger les données mobiles avec la base par post-traitement pour en sortir une solution corrigée en fichier texte (.txt). Pour transformer l'altitude ellipsoïdale en altitude orthométrique, le modèle de géoïde HT2.0 est utilisé. Dans T3D GPS 4.5, la solution de post-traitement est utilisée pour corriger les lignes GPS des fichiers LAS et AVI.

En utilisant les données de validation terrain, si la différence entre le nuage de points et les points de contrôle pris sur le terrain montre une différence trop élevée (plus de 0,10 m dans ce cas-ci), une correction est effectuée en post-traitement. Ce processus a été effectué pour deux secteurs, le secteur de Saint-Ulric et celui de Rivière-à-Claude. Le traitement s'effectue dans l'extension Point Cloud Registration du logiciel Trident 4.6 ou 4.7 qui utilise les points de contrôle acquis sur le terrain au DGPS pour recalculer la géométrie

des points laser. Pour pouvoir ouvrir les fichiers LAS dans l'extension de traitement laser LP360 dans le logiciel ArcGIS 10, les fichiers LAS 2.0 ont été convertis en format LAS 1.2.

Traitement

La dernière étape est le traitement pour ensuite pouvoir utiliser les données laser aux fins du calcul de la disponibilité sédimentaire. Tout d'abord, une classification manuelle des points est réalisée afin d'exclure les éléments qui ne doivent pas être inclus dans le calcul du volume de sable. Cette étape s'effectue dans l'extension LP360 du logiciel ArcGIS. La figure 26 montre un exemple, dans le secteur de Maria, où différents objets tels que les blocs rocheux en violet, les débris ligneux en orange et les objets anthropiques en vert sont classifiés. Lorsque tous les objets ont été classifiés, seuls les points laser au sol sont utilisés pour générer une matrice d'élévation à une résolution spatiale de 0,25 m.

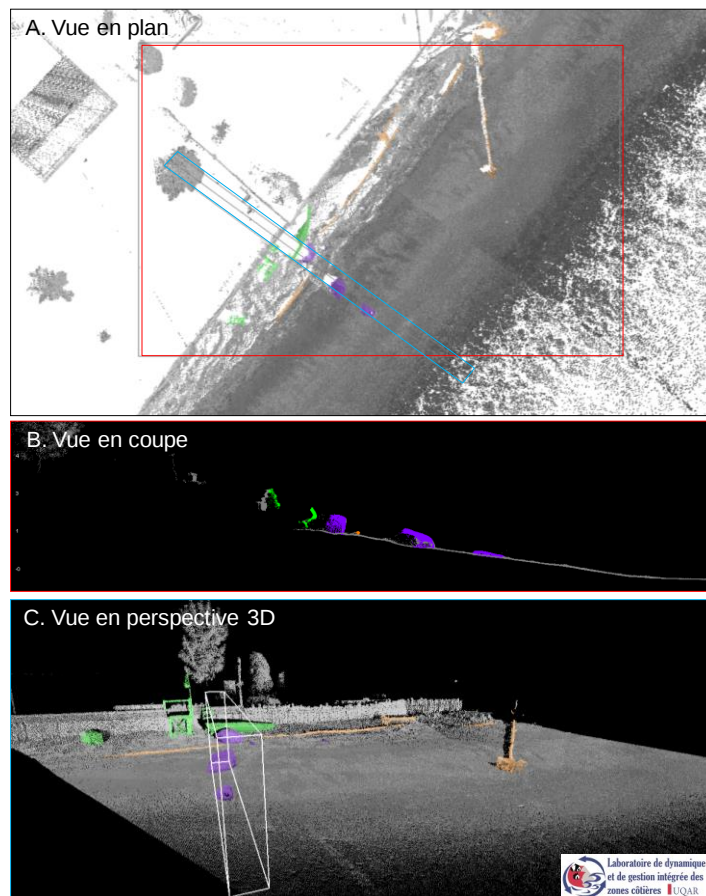


Figure 26. Filtre manuel pour la classification des objets sur la plage

Source : Bernatchez et al (2012 d)

3.5.5 Méthodologie d'analyse de la disponibilité sédimentaire

3.5.5.1 Limites géomorphologiques

Pour calculer la disponibilité sédimentaire des plages, les limites géomorphologiques sont tracées à partir de la topographie 3D et de la vidéographie. La ligne de rivage* et la flexure* sont tracées dans le logiciel Trident 4.7 qui permet de créer des fichiers d'édition et ensuite de les transformer en fichiers de formes (*shapefiles*) compatibles à ArcGIS. La ligne de rivage correspond à la limite de la végétation dense, à la base d'une structure de protection rigide ou à la base d'une falaise. La flexure est définie par un changement de texture ainsi qu'une rupture de pente et est utilisée comme limite entre les bas et haut estrans. Le haut estran* correspond à la partie supérieure de la plage (entre la ligne de rivage et la flexure). La figure 27 montre les limites géomorphologiques et anthropiques utilisées pour l'analyse de la disponibilité sédimentaire. Les avantages d'utiliser ces limites sont qu'elles sont facilement identifiables à partir des données LIDAR et des images et qu'elles définissent une entité géomorphologique (la plage) dont la variabilité est fonction du bilan sédimentaire et des processus morphodynamiques pour une cellule hydrosédimentaire donnée. Elles permettent ainsi de comparer, sur une même base, à l'intérieur d'une même cellule hydrosédimentaire ou entre les cellules les caractéristiques morphosédimentaires des plages. De plus, ces limites sont aussi identifiables par photo-interprétation de sorte qu'il est possible de réaliser une évolution historique du haut estran qui constitue un excellent *proxy** du bilan sédimentaire d'une plage (Bernatchez et Fraser, 2012).

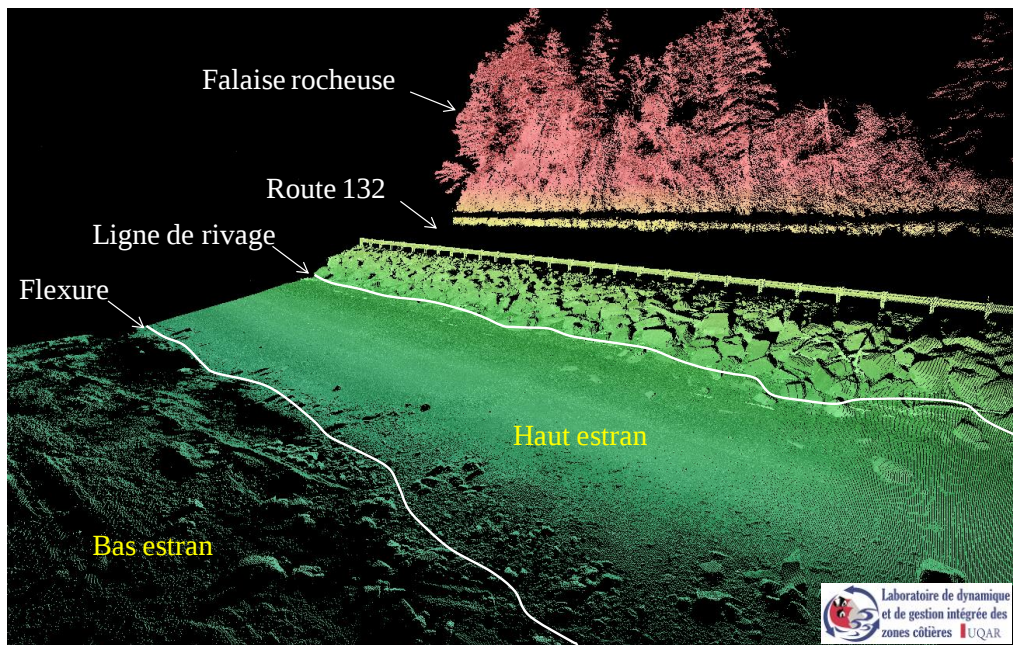


Figure 27. Limite utilisée pour l'analyse de la disponibilité sédimentaire, exemple de Rivière-à-Claude

Source : Van-Wierts et Bernatchez (2011)

3.5.5.2 Indice de bilan sédimentaire des plages (IBSP)

Comme il est techniquement et financièrement difficile d'obtenir un bilan sédimentaire complet de l'ensemble de la zone côtière, un indice de bilan sédimentaire des plages (IBSP) a été développé par Bernatchez *et al.* (2011) et modifié par Van-Wierts (2012). Cet indice s'avère un excellent *proxy** pour connaître la répartition de la disponibilité sédimentaire au sein d'un système côtier et pour identifier les secteurs déficitaires et les secteurs bien alimentés en sédiments. L'IBSP se traduit par l'équation 8. Pour le calculer, l'altitude de la flexure est soustraite de l'altitude de la ligne de rivage pour ensuite être multipliée par la largeur du haut estran (figure 28). Le résultat est divisé par 2.

Équation 8. Indice de bilan sédimentaire des plages

$$IBSP = ((z_{LR} - z_F) * LP) / 2$$

Où z_{LR} : altitude de la ligne de rivage
 z_F : altitude de la flexure
 LP : largeur du haut estran

Cinq classes, variant entre *très faible* et *très élevé*, sont définies à partir de l'écart type et de la moyenne de l'ensemble des transects par site témoin. Lorsque l'indice présente une valeur élevée, cela indique qu'il y a une disponibilité sédimentaire élevée et au contraire, un indice faible se traduit par un déficit sédimentaire.

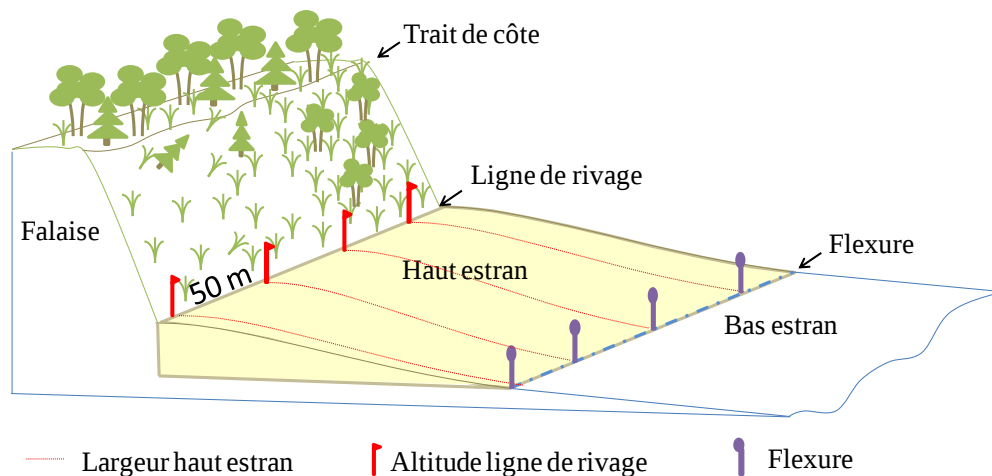


Figure 28. Schéma méthodologique de calcul de l'IBSP

Source : Van-Wiersts (2012)

3.5.5.3 Volume des plages

Chacun des secteurs d'étude est divisé en polygones recouvrant le haut estran, à largeur fixe de 50 m mesurée à partir de la ligne de rivage. Les limites utilisées sont présentées à la figure 29. Une matrice d'élévation est conçue pour chacun des polygones afin d'utiliser dans le calcul du volume la topographie de la surface de la plage. L'outil de calcul de volume de l'extension *3D Analyst* d'ArcGIS permet d'extraire le volume en m^3 sous une matrice d'élévation en utilisant un facteur d'élévation de un ($z = 1$). L'altitude de la flexure est utilisée comme niveau de base du calcul du volume. Pour chacun des polygones, la moyenne de 5 points d'altitude est calculée pour connaître cette valeur. Pour comparer les polygones entre eux, chaque volume obtenu par 50 m linéaires est normalisé en m^3/m en divisant ce volume par 50.

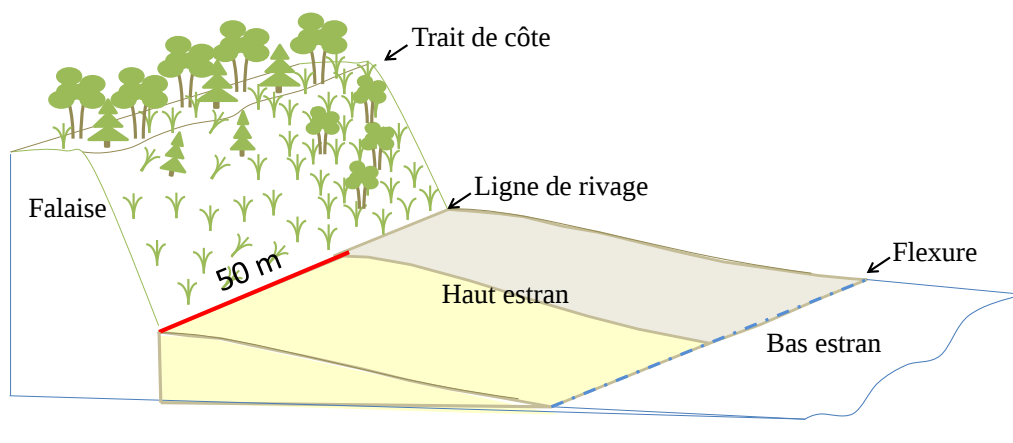


Figure 29. Schéma méthodologique de calcul du volume des plages

Source : Van-Wierst (2012)

Le volume sédimentaire des plages est également dépendant du substrat sous-jacent (socle rocheux, blocs...). La caractérisation détaillée de la côte et la réalisation de sondages verticaux sur la plage vont permettre de connaître la lithostratigraphie de la plage. Ces informations seront intégrées dans les analyses, soit directement dans le volume si cela est possible, soit dans un indice.

4 MÉTHODOLOGIE DE L'INDICE DE VULNÉRABILITÉ DE LA ROUTE AUX ALÉAS CÔTIERS (IVRAC)

À la suite de la revue de la littérature sur le sujet, un Indice de Vulnérabilité du réseau Routier aux Aléas Côtiers, soit l'IVRAC, a été élaboré pour les neuf sites témoins du projet de recherche. L'indice a été décliné selon trois horizons temporels :

- le premier, l'**IVRAC 2020**, prend en compte la submersion actuelle et l'érosion d'ici 2020. Ceci dans une optique de gestion urgente des secteurs les plus vulnérables. On pourra parler de vulnérabilité à court terme.
- le deuxième, l'**IVRAC 2060**, prend en compte la submersion en 2060 avec les variations isostatiques locales de la croûte terrestre et la hausse mondiale du niveau de la mer ainsi que l'érosion de la côte d'ici 2060. Ceci dans une optique de gestion préventive du réseau routier et de planification des interventions. On pourra parler de vulnérabilité à moyen terme.
- le dernier, l'**IVRAC 2100**, représente la vulnérabilité aux aléas côtiers d'ici 2100 et prend en compte la submersion avec la hausse du niveau marin et les variations isostatiques en 2100 et l'érosion de la côte d'ici 2100. Ce dernier indice est plus lointain et comprend donc une plus grande incertitude, mais il permet une planification à long terme. On pourra parler de vulnérabilité à long terme.

La méthodologie utilisée pour l'élaboration de l'IVRAC découle des définitions et des concepts qui ont été retenus pour cette étude et qui ont été présentés à la section 2.1.4 du présent rapport (voir p. 47). Nous présenterons d'abord les principes généraux de l'élaboration de notre indice puis seront présentées les données nécessaires au calcul et enfin le calcul détaillé sera présenté. Les différents paramètres retenus pour faire partie de l'IVRAC sont présentés au tableau 13.

Tableau 13. Paramètres utilisés pour calculer l'IVRAC

	Paramètre	Sous-indice érosion	Sous-indice submersion
Exposition aux aléas	Date d'exposition de la route à l'érosion Nécessite les éléments suivants : - Distance entre la route et la côte (en m) - Recul événementiel - Taux de migration probable (en m/an) - Présence (ou non) de structures de protection du MTQ	X	
	Épaisseur potentielle d'eau sur la route Nécessite les éléments suivants : - Altitude de la route - Hauteur de submersion possible au-dessus de la pleine mer supérieure de grande marée selon les données terrain disponibles - Impact local des structures de protection sur la hauteur de submersion - Hausse du niveau marin (pour 2060 et 2100) - Variation isostatique (pour 2060 et 2100)		X
	Largeur de la plage		X
	Distance entre la route et la côte (en termes d'atténuation de la nappe d'eau et des vagues)		X
Caractéristiques du segment de route	Quantité de véhicules circulant par jour	X	X
	Population résidant directement sur le segment de route	X	X
	Propension à réparer la route aisément	X	
	Rang côtier (nombre de rangées d'infrastructures présentes entre la route et la côte)	X	X
	Présence d'infrastructures connexes (aqueduc, égout, électricité...)	X	
	Sécurité des usagers vis-à-vis de l'érosion	X	
	Sécurité des usagers vis-à-vis de la submersion (déferlement violent)		X
Caractéristiques du réseau	Présence d'une voie de contournement (et si oui de quelle longueur)	X	X
	Accès aux pompiers (ou détour et si oui de quelle longueur)	X	X
	Accès à l'hôpital (ou détour et si oui de quelle longueur)	X	X

4.1 Principes généraux

4.1.1 Segments de 100 m de route

Le tracé des routes a été numérisé sur la ligne blanche latérale (*ligne de rive*) du côté du fleuve sur les photographies aériennes les plus récentes disponibles selon les sites (tableau 9). La numérisation s'est effectuée à l'échelle 1 : 600. Les segments de routes servant au calcul de l'indice de vulnérabilité ont une longueur de 100 m. La taille des segments utilisés pour déterminer les indices de vulnérabilité peut faire varier les résultats, néanmoins la distance de 100 m a été retenue.

Toutes les informations ont été intégrées dans une base de données spatiale sous forme de fichier de forme (*shapefile*) pour chacun des 9 sites témoins. La description des champs est présentée à l'annexe 1.

4.1.2 Scores des différents paramètres allant de 1 à 5

Chaque paramètre nécessaire est identifié et mesuré pour chaque segment de 100 m de route. Puis les éléments sont mis en classe (1 à 5) afin de pouvoir être intégrés dans l'équation. Des scores variant de 1 à 5 ont été utilisés pour calculer des indices de vulnérabilité dans plusieurs recherches (Boruff *et al.*, 2005; McLaughlin et Cooper, 2010; Meur-Férec *et al.*, 2008; McLaughlin *et al.*, 2002; Fontaine et Steinemann, 2009). Pour chaque paramètre, le 1 est le moins susceptible d'augmenter la vulnérabilité de la route et le 5 le plus susceptible.

Pour l'exposition seulement, les scores incluent la possibilité du « 0 ». Ceci n'est le cas que lorsque ce paramètre peut annuler complètement toute vulnérabilité aux aléas côtiers, quels que soient les autres paramètres. Si le paramètre n'influence pas la vulnérabilité, il est plutôt classé « 1 ». L'équation de la vulnérabilité étant une multiplication, le 0 annule toute vulnérabilité et le 1 ne modifie pas le résultat.

4.1.3 Éléments non considérés

Certains indicateurs peuvent être inadaptés dans le cadre de notre étude, car s'ils sont constants sur tout le territoire, il n'y a pas de différence selon les secteurs. Par exemple, les politiques nationales du gouvernement du Canada,

ou celles du Québec, notamment les politiques du MTQ, affectent de manière égale toutes les routes nationales. Ces éléments ne sont donc pas inclus comme paramètres dans notre indice de vulnérabilité.

De plus, certains éléments ont été exclus volontairement, car ils étaient redondants avec d'autres ce qui aurait surévalué certains aspects. Par exemple, le nombre de maisons et le nombre d'habitants sur le segment sont corrélés entre eux. Ainsi, un seul a été, au final, conservé dans l'analyse pour éviter d'accorder un poids trop important à ce paramètre. L'information recueillie pour ces paramètres a été conservée dans la base de données et peut être consultée au besoin.

Nous avons opté pour un nombre limité de critères également afin de garder l'indice proposé opérationnel. En effet, comme cela a été évoqué par Hénaff et Philippe (2014), « il est conseillé d'opter pour des solutions pragmatiques, seules à même de garantir la reproductibilité d'une méthode, la mise à jour régulière des données et des diagnostics qui en découlent, ainsi que la transparence de la méthodologie et par conséquent, son acceptabilité sociale et sa faisabilité opérationnelle ». Les critères utilisés nous semblent un compromis acceptable entre la complexité du système étudié et le temps nécessaire à collecter les données, les traiter et les garder à jour.

4.2 Données nécessaires

Les données qui ont été retenues comme influençant la vulnérabilité des segments de route sont présentées ci-après en trois parties, tout d'abord les données liées à l'exposition aux aléas côtiers, puis celles liées aux caractéristiques propres au segment et enfin, celles liées aux caractéristiques en termes de réseau.

4.2.1 Exposition des infrastructures routières aux aléas côtiers

Afin de déterminer la vulnérabilité du réseau routier aux aléas, il est tout d'abord nécessaire de déterminer si les routes sont exposées à cet aléa ou non. Par la suite, il faut savoir si elles y seront sensibles. Pour ce qui a trait à l'exposition, ce rapport se situe dans la suite du *volume I* du présent projet (Drejza *et al.*, 2014) et les mêmes équations d'exposition sont ainsi utilisées (équation 9 et équation 10). Cependant, les données d'érosion utilisées pour le *volume I* ont été précisées grâce à de nouvelles analyses (sections 3.4.5 et

3.4.6). Pour ce qui a trait à la sensibilité des routes aux aléas, l'érosion et la submersion entraînant une perte d'usage respectivement permanente et temporaire, elles sont considérées comme sensibles aux deux aléas côtiers que nous étudions.

Pour les résultats de l'exposition à l'érosion et à la submersion de l'ensemble des 2 245 km de routes nationales et autoroutes de l'Est du Québec, se rapporter au *volume I* du présent projet (Drejza *et al.*, 2014) ainsi qu'à ses annexes cartographiques.

4.2.1.1 Érosion

Les indices de vulnérabilité à l'érosion côtière retrouvés dans la littérature n'utilisent pas de mesure de taux d'érosion obtenus localement pour leurs calculs, mais plutôt des paramètres tels que la géologie, le type de côte, la hauteur des vagues, l'orientation de la côte, le marnage, la lithologie, etc. dans le but d'en faire un sous-indice sur la vulnérabilité physique de la côte à l'érosion (Boruff *et al.*, 2005; Meur-Férec *et al.*, 2008; McLaughlin et Cooper, 2010) et servent ainsi de proxy pour obtenir une idée de l'érosion côtière pour des secteurs manquant d'information. Étant donné que nous disposons de l'information sur les taux de migrations probables locaux, il nous est apparu que ce serait l'information la plus précise à utiliser.

Le degré d'exposition actuel des infrastructures sera basé sur l'analyse des résultats de l'objectif 1, soit sur la distance des infrastructures par rapport au trait de côte, qui, couplée aux taux de recul observés, se traduit en une période résiduelle avant que l'infrastructure soit atteinte (Leclerc et Dupuis, 2008). La date de l'exposition est ainsi déterminée selon le taux d'érosion probable de la côte en avant du segment de route. Ce taux probable a été déterminé en combinant toutes les données disponibles pour les sites témoins à savoir l'évolution historique de la côte et l'évolution récente (voir section 3.4.6). L'équation développée dans le *volume I* du présent projet (Drejza *et al.*, 2014) intègre, en plus du taux annuel probable de migration, le recul possible en un seul événement de tempête dans ce type d'environnement (équation 9).

Équation 9. Degré d'exposition d'une infrastructure à l'érosion

Degré d'exposition = (Distance entre l'infrastructure et la côte - recul d'un seul événement érosif important) / Taux de migration moyen annuel le plus probable

(source : Drejza *et al.*, 2014)

➤ DISTANCE

La **distance utilisée** est la distance la plus faible entre la ligne blanche et la côte pour le tronçon de 100 m dans son ensemble. En effet, c'est à cet endroit que les aléas sont les plus susceptibles de se produire. De plus, étant donné le fonctionnement des routes, si une portion du segment de 100 m est érodée, alors c'est l'ensemble du segment qui peut être considéré comme non praticable et qui n'assure plus son service de transport.

Les approches des ponts et les ponts (rivière Saint-Jean et rivière Saint-Cœur sur le site n°9 ainsi que de la rivière au Bouleau sur le site n°8), n'ont pas été considérés dans l'analyse. Les segments ont été identifiés comme « pont » ou « approche de pont ». En effet, la problématique y est différente (dynamique côtière différente et présence d'agents d'érosion fluviaux) et ne peut pas être abordée avec les autres segments. Leur distance à la côte se réduit jusqu'à devenir nulle au droit du début du pont. Leur vulnérabilité devrait être étudiée spécifiquement comme cela est préconisé par l'U.S. Federal Highway Administration (2008).

➤ ÉVÉNEMENT

Les reculs événementiels pour chaque type de côte de chacun des sites sont présentés au tableau 14.

Tableau 14. Reculs événementiels possibles selon les sites et les types de côte

Site témoin	Type de côte	Recul (m)
1- Baie-des-Sables à Saint-Ulric	Terrasse de plage	12.8
	Basse falaise meuble	12.8
2- Rivière-à-Claude	Terrasse de plage	14.2
	Falaise rocheuse	2.2
	Falaise meuble à base rocheuse	2.5
	Remblai	4.4
	Falaise meuble	4.85
3 -Chandler	Terrasse de plage	6.35
	Falaise rocheuse	4.3
	Falaise rocheuse à sommet meuble	3.7
	Falaise meuble à base rocheuse	2.5
4 -Carleton à Maria	Terrasse de plage	12.2
	Falaise meuble	8.4
	Basse falaise meuble	3.3

Site témoin	Type de côte	Recul (m)
5- baie de Plaisance	Falaise rocheuse	4.4
	Falaise rocheuse à sommet meuble	8.4
	Tombolo/cordon littoral	16,9
6- Pointe-aux-Loups	Falaise rocheuse	4.4
	Dunaire à base rocheuse	8.4
	Falaise rocheuse à sommet meuble	8.4
	Tombolo/cordon littoral	16,9
7- Pentecôte	Basse falaise meuble	11.5
	Falaise meuble	11.5
	Terrasse de plage	12.05
8- rivière au Bouleau	Côte à remblai	11.5
	Basse falaise de till	11.5
	Microfalaise till	12.05
	Terrasse de plage	12.05
9- Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	Côte rocheuse ignée	0.00
	Basse falaise meuble	11.5
	Falaise meuble	11.5
	Terrasse de plage	12.05
	Falaise sable/argile ou silt argileux	13.7

➤ STRUCTURES DE PROTECTION

Concernant l'érosion, étant donné que l'expérience montre que même des structures mises en place par le MTQ peuvent être endommagées durant des événements de tempête importants (figure 30, figure 31 et figure 32, Quintin *et al.*, 2012) et la route se retrouver ainsi affectée par les processus côtiers, il n'est pas possible de considérer une route située en arrière d'une structure de protection comme totalement soustraite à l'érosion. Cependant, même si la côte peut être affectée par l'érosion événementielle, il est admis qu'après tout événement d'érosion, le ministère comblera le terrain manquant pour remettre la ligne de rivage à sa position pré-événement. Ainsi, dans ces secteurs, le trait de côte ne recule pas de manière annuelle. C'est pourquoi dans les secteurs où une **infrastructure de protection mise en place par le MTQ** est présente sur la côte avec pour but d'arrêter l'érosion côtière, le taux d'évolution de la côte retenu est ramené à 0 m/an (seulement si la structure est présente sur l'ensemble du segment de 100 m ou sur sa majeure partie) et seul le recul événementiel est ainsi considéré. Ont seulement été prises en compte les protections du MTQ. En effet, pour les autres protections, il n'est pas possible de déterminer si elles ont été bien dimensionnées, sont entretenues adéquatement et si elles vont continuer d'être entretenues à l'avenir.

Ainsi, si la côte est artificialisée et que la route se situe à une distance inférieure à un recul événementiel possible dans ce type d'environnement l'exposition à l'érosion sera donc considérée comme imminente (tableau 15). Par contre, si la côte est artificialisée, mais que la route se situe à une distance plus grande qu'un événement, alors l'exposition à l'érosion est nulle, car la structure sera certainement reconstruite à son emplacement initial et la route ne pourra pas être affectée.



**Figure 30. Haut : route 132 à Sainte-Flavie après la tempête du 6 décembre 2010.
Bas : Route 132 en septembre 2010 avec la présence d'un enrochement et d'un
muret de bois (© LDGIZC-UQAR)**



Figure 31. Murets de béton de protection de la route 132 partiellement détruits à la suite de la tempête du 6 décembre 2010 en Haute-Gaspésie (© MTQ)



Figure 32. Entre Marsoui et Rivière-à-Claude à la suite de la tempête du 6 décembre 2010, érosion de l'accotement en arrière d'un enrochement (© MTQ)

Selon les résultats de l'équation 9, l'année potentielle à laquelle la route devrait être exposée à l'érosion est mise en classe et un score est associé à chaque catégorie selon que l'on cherche l'exposition à l'érosion d'ici 2020, celle d'ici 2060 ou d'ici 2100 (tableau 15).

Tableau 15. Détails du score « Exposition à l'érosion » selon les différents horizons d'étude

Score d'exposition à l'érosion [<i>ScoreEro20</i>], [<i>ScoreEro60</i>] et [<i>ScoreEro00</i>]			
Définition	Score 2020	Score 2060	Score 2100
imminent	5	5	5
d'ici 2020	4	5	5
2020 à 2040	0	4	4
2040 à 2060	0	3	3
2060 à 2100	0	0	2
plus de 2100	0	0	0

Pour les deux sites témoins des Îles-de-la-Madeleine qui peuvent être exposés à l'érosion tant du côté intérieur de la lagune que du côté extérieur, le score lié à l'érosion est ajusté pour tenir compte des deux possibilités d'érosion. Le score utilisé est ainsi celui de la période la plus récente à laquelle la route est potentiellement exposée.

4.2.1.2 Submersion

L'exposition de la route à la submersion est liée à l'altitude relative des infrastructures par rapport aux épisodes de submersion. La quasi-totalité des sites témoins présentait des données d'altitudes LiDAR. Quelques secteurs éloignés de la côte sur le site n° 9 (Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan) n'étaient pas couverts par les données laser et des données topographiques ont ainsi été utilisées, mais, étant donné l'altitude relativement élevée, cela n'affectera pas la précision de l'évaluation de la submersion. Ceci a été le cas également pour quelques points dans le secteur de falaise du site n°4 (Carleton à Maria). Cependant, pour le site de rivière au Bouleau, aucune donnée LiDAR n'étant disponible, toutes les altitudes proviennent d'un modèle numérique d'élévation basé sur les courbes de niveau aux 10 m de la BDTQ (marge d'erreur + ou – 5 m). La précision est donc moindre que pour les autres sites.

La détermination de la submersion est complexe et nécessiterait des études précises de vagues à la côte, mais qui sont inexistantes actuellement au Québec. C'est pourquoi, ici, la méthode utilisée a été la même que pour la première partie de l'étude (équation 10 et volume I : Drejza *et al.*, 2014) à laquelle la largeur de la plage a été ajoutée pour tenir compte de son rôle d'atténuation des vagues et du *run-up*, comme cela a été démontré par Didier (2014), ainsi que la distance entre l'infrastructure routière et la côte pour tenir compte du rôle d'atténuation de la nappe d'eau avec l'éloignement.

Équation 10. Degré d'exposition à la submersion

$$\begin{aligned} \text{Épaisseur d'eau sur la route} = & \\ & (\text{Niveau des pleines mers supérieures de grande marée} + \text{cote de submersion} \\ & \text{mesurée sur le terrain}) + (\text{hausse du niveau marin} + \text{variation isostatique}) \\ & - \text{altitude de la route} \end{aligned}$$

(modifié de Drejza *et al.*, 2014)

Les scores ont été déterminés selon l'épaisseur d'eau potentielle sur la route (tableau 16). En effet, plus l'épaisseur est importante plus souvent la route peut se retrouver submergée par des événements, mêmes moins importants, et plus la durée de submersion sera longue. Pour le paramètre *[ScoreSub20]*, il s'agit donc d'une exposition actuelle à la submersion. Lorsque l'altitude du segment conduisait à le considérer comme potentiellement submersible, mais que celui-ci n'était pas connecté à l'eau parce que situé derrière une dune, une digue ou un autre élément topographique infranchissable par la nappe d'eau, alors le score d'exposition à la submersion était abaissé à 0 manuellement. À noter que dans certains cas, ce secteur déprimé pourrait être potentiellement submergé par remontée capillaire de la nappe d'eau dans les sédiments.

Tableau 16. Détails du score « Exposition à la submersion »

Exposition à la submersion (épaisseur potentielle d'eau) <i>[ScoreSub20]</i>, <i>[ScoreSub60]</i> et <i>[ScoreSub00]</i>	
Selon l'équation 10	Score
pas d'eau	0
marge d'erreur du LiDAR (jusqu'à 0,20 m possible)	1
0 à 0,2 m d'eau	2
0,20 à 0,50 m ou submersion par franchissement de l'ouvrage*	3
0,50 à 1,00 m	4
plus de 1,00 m d'eau	5

* 1 m de plus de hauteur d'eau si à moins de 10 m d'un ouvrage rigide de protection contre l'érosion (Drejza et al., 2014)

L'épaisseur d'eau future potentielle sur les routes a été déterminée pour l'IVRAC 2060 et 2100. Pour cela, les mouvements isostatiques et la hausse du niveau marin global ont été ajoutés à la submersion potentielle actuelle. Les mêmes catégories d'épaisseur ont été utilisées pour déterminer les scores d'exposition à la submersion (tableau 16).

➤ ISOSTASIE

Les mouvements isostatiques utilisés sont ceux tirés de Koohzare et al. (2008), présentés à la figure 33. Pour chaque site, les valeurs isostatiques sont présumées constantes et sont présentées au tableau 17.

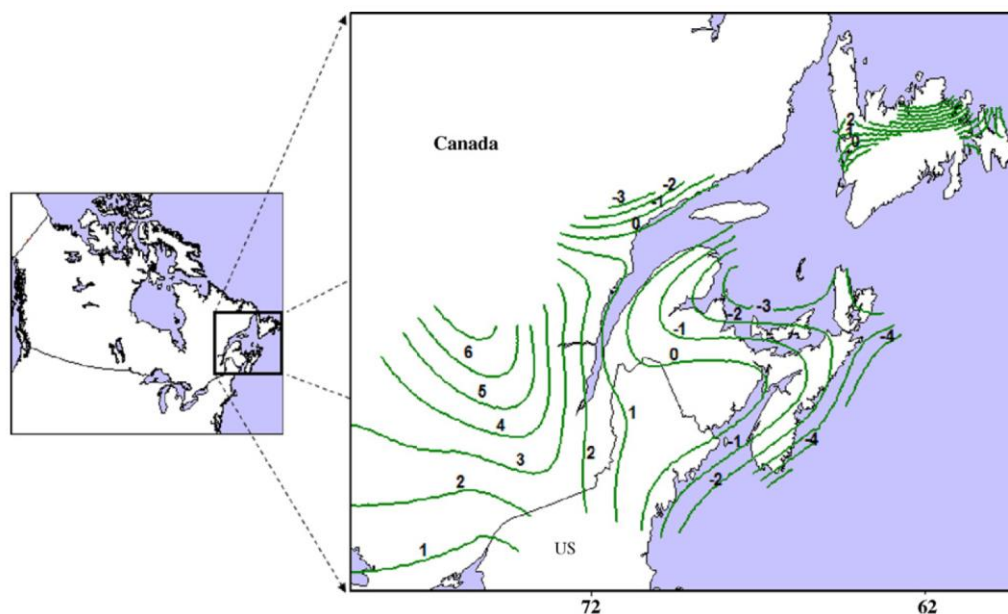


Figure 33. Contours des variations isostatiques de l'est du Canada en mm/an (vertical crustal movements) (Koozhare et al., 2008)

Tableau 17. Variations isostatiques pour les différents sites témoins (d'après Koozhare et al., 2008, sauf Îles-de-la-Madeleine d'après Juneau 2012)

Site	variation isostatique en mm/an	Variation pour 2060 (en m) à compter de 2010 [Iso_2060]	Variation pour 2100 (en m) à compter de 2010 [Iso_2100]
1- Baie-des-Sables à Saint-Ulric	0	0	0
2- Rivière-à-Claude	0	0	0
3 -Chandler	-2,5	-0,13	-0,23
4 -Carleton à Maria	-1,75	-0,09	-0,16
5- baie de Plaisance	-3,5*	-0,18	-0,32
6- Pointe-aux-Loups	-3,5*	-0,18	-0,32
7- Pentecôte	+0,5	0,03	0,05
8- rivière au Bouleau	-0,5	-0,03	-0,05
9- Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	0	0	0

* Il s'agit de la variation du niveau marin relatif (cela comprend la subsidence et la hausse eustatique).

➤ VARIATION DU NIVEAU MARIN

Concernant la **hausse moyenne du niveau marin global**, la valeur retenue est la valeur médiane du scénario RCP8.5 du GIEC qui a été utilisée. Pour 2100, il s'agit d'une hausse prévue de **0,74 m** (avec un intervalle de confiance variant de 0,52 et 0,98 m) (GIEC, 2013). Pour 2060, la hausse prévue est de **0,30 m** (avec un intervalle de confiance entre 0,22 et 0,38 m) (GIEC, 2013).

➤ LARGEUR DES PLAGES

La **largeur des plages** est un paramètre qui modifie le patron de submersion. Ainsi, dans les secteurs qui ne présentent pas du tout de plage, les vagues ne sont pas atténuées avant d'arriver à la côte et la submersion sera probablement supérieure au niveau moyen utilisé pour le *[ScoreSub]* (tableau 16). Ainsi, nous avons ajouté un paramètre lié aux largeurs des plages (tableau 18) qui ont été mesurées à l'aide du SMLT lors des campagnes de terrain sur les différents sites (section 3.5). Si les secteurs n'étaient pas accessibles au véhicule (ce qui s'est produit à quelques endroits pour le site n°2 de Rivière-à-Claude) alors les largeurs de plages présentes sur les photographies aériennes les plus récentes ont été utilisées (2009). La largeur retenue est la largeur la plus faible de celles mesurées en avant du segment de route (voir section 3.5.5.2).

Tableau 18. Détails du score « Largeur de plage »

Largeur de plage <i>[ScorePlage]</i>	
<i>Définition</i>	<i>Score</i>
pas de plage	5
moins de 10 m	4
10 à 20 m	3
20 à 30 m	2
plus de 30 m de plage	1

➤ DISTANCE ENTRE LA ROUTE ET LA CÔTE

La **distance entre la route et la côte** doit également être intégrée. Étant donné que la submersion côtière est un phénomène temporaire qui ne dépasse pas quelques heures, la nappe d'eau et l'eau projetée par les vagues ne peuvent habituellement pas atteindre des distances trop importantes de la côte. Ainsi, la distance minimale dans le segment de 100 m entre la route et la côte a été utilisée comme paramètre.

Tableau 19. Détails du score « Distance à la côte »

Distance routel/côte [<i>ScoreDist</i>]	
Définition	Score
moins de 10 m	5
10 à 20 m	4
20 à 50 m	3
50 à 100 m	2
plus de 100 m	1

Advenant une précision de l'information sur la submersion à la suite de l'élaboration d'un modèle de vagues et de *run-up* pour les sites témoins, les données utilisées actuellement (tableau 16, tableau 18 et tableau 19) devraient être remplacées dans l'équation par les données plus précises d'épaisseur d'eau potentielle sur la route.

Les structures de protection contre la submersion (digues, aboiteaux...) ne sont pas présentes dans les secteurs que nous avons étudiés. Si tel était le cas, elles pourraient elles aussi être intégrées dans l'équation comme paramètre s'appliquant pour le sous-indice de vulnérabilité à la submersion en ajustant l'épaisseur d'eau possible sur la route selon la hauteur de la protection.

4.2.2 Caractéristiques du segment de route

Les différentes caractéristiques de la route qui la rendent plus vulnérable aux aléas côtiers ont été identifiées et un score a été déterminé pour chaque paramètre.

4.2.2.1 Les deux aléas côtiers

➤ QUANTITÉ DE VÉHICULES

La **quantité de véhicules** qui transitent chaque jour sur un tronçon routier est un paramètre important afin de déterminer la quantité de personnes qui seraient affectées par une rupture de service, qu'elle soit liée à l'érosion ou à la submersion. Ainsi, nous avons utilisé les « Débits journaliers moyens annuels » (ou DJMA) fournis par les directions régionales du MTQ. Ces

données ont été mesurées sur le terrain par le MTQ qui les a fournies pour cette étude. Le ministère mesure également les « Débits journaliers moyens estivaux » (DJME) et les « Débits journaliers moyens hivernaux » (DJMH) afin de déterminer l'achalandage routier de manière saisonnière. Il a été retenu d'utiliser le DJMA et les scores associés sont expliqués au tableau 20. De nouveaux scores pourraient être déterminés avec les DJME ou les DJMH et remplacer le DJMA selon les besoins, par exemple pour déterminer des indices de vulnérabilité saisonniers. La répartition des scores s'est effectuée en tenant compte des débits possibles pour l'ensemble de nos sites pour l'ensemble des saisons.

Tableau 20. Détails du score « Débit journalier moyen annuel - DJMA »

Débit journalier moyen annuel [ScoreDJMA]	
Définition	Score
moins de 1000	1
1000 à 2000	2
2000 à 4000	3
4000 à 6000	4
plus de 6000	5

➤ **POPULATION AFFECTÉE**

La **population directement affectée** est celle qui réside sur le segment de 100 m de route ou qui ne peut se rendre chez elle qu'en empruntant ce segment de route. Les scores associés à la population directement affectée sont présentés au tableau 21.

Tableau 21. Détails du score « Population directement affectée »

Population directement affectée [ScoreHabit]	
Définition	Score
moins de 2	1
2 à 5	2
5 à 7	3
7 à 10	4
plus de 10	5

La valeur de population est une valeur moyenne qui découle du nombre de bâtiments et du nombre moyen de personnes par ménage dans la municipalité concernée (tableau 22).

**Tableau 22. Nombre moyen de personnes dans les ménages privés
(2011, Statistiques Canada)**

Municipalité	Nombre moyen de personnes par ménage (2011)
Saint-Ulric	2,2
Baie-des-Sables	2,3
Marsoui	2,2
Rivière-à-Claude	1,7
Chandler	2,2
Maria	2,2
Carleton-sur-Mer	2,1
Grosse-Île	2,3
Îles-de-la-Madeleine	2,3
Port-Cartier (inclus Pointe-aux- Anglais et Rivière-Pentecôte)	2,3
Rivière-au-Tonnerre (inclus le secteur de la rivière au Bouleau)	2,0
Rivière-Saint-Jean	2,2
Longue-Pointe-de-Mingan	2,3
Mingan (réserve autochtone)	3,4

Pour les établissements d'hébergements (hôtels, motels), le nombre de chambres est considéré avec une personne par chambre. Pour les hôpitaux est considéré le nombre de chambres disponibles tout comme pour les établissements d'hébergement de personnes âgées. Pour les commerces et industries de petite taille ainsi que pour les fermes présentes, il a été retenu par défaut comme population présente, le nombre moyen de personnes par ménage. Pour de plus grandes entreprises, le nombre d'employés aurait été retenu, mais aucune n'était présente sur les sites témoins étudiés.

➤ RANG CÔTIER

Le « **rang côtier** » détermine la présence d'autres rangées d'infrastructures entre la côte et la route. Par exemple, une route en position « rang 1 » est le premier élément bâti que l'on retrouve à proximité de la côte. Au contraire, une route « rang 3 » est une route qui se trouve, par rapport à la côte, derrière deux éléments comme une autre route (secondaire) et une série de maisons. Ainsi ce paramètre influence la vulnérabilité, car plus la route se retrouve en arrière d'autres structures (p.e. route, maison, motel, commerce, résidences pour personnes âgées, roulottes « fixes », cantine, restaurant, halte routière, chemin de fer...), moins il est probable que l'érosion puisse venir affecter la

route de manière rapide c'est pourquoi les scores sont inversement proportionnels au rang côtier (tableau 23).

Tableau 23. Détails du score « Rang côtier »

Rang côtier [ScoreRang]	
Définition	Score
rang 1	5
rang 2	4
rang 3	3
rang 4	2
rang 5 et +	1

4.2.2.2 Érosion

➤ INFRASTRUCTURES CONNEXES

Il s'agit ici des infrastructures d'aqueduc sanitaire, d'égouts, d'électricité, de téléphone et de câblodistribution. Tous ces services passent souvent au même endroit que les routes nationales et leur intégrité peut être compromise par les aléas. Leur implantation est souvent liée au tracé de la route nationale. Plus un nombre important de réseaux est présent, plus la vulnérabilité globale sera importante, car les impacts seront multiples pour les populations. Les détails des paramètres sont expliqués au tableau 24.

Tableau 24. Détails du score « Réseau connexe »

Réseau connexe [ScoreResEs]	
Définition	Score
aucun réseau - ou juste pluvial	1
1 réseau	2
2 réseaux	3
3 réseaux	4
4 ou 5 réseaux	5

Si le réseau est sous la route, il est inclus, quelle que soit sa localisation précise. Si le réseau est un égout pluvial, il n'est pas inclus, car le service n'est pas essentiel à la population. Si le réseau est aérien, mais situé du côté terre de la route, il n'est pas inclus dans le décompte pour établir le score, par contre s'il est du côté de la mer, il est inclus. Ce n'est pas inclus dans le sous-indice de submersion étant donné qu'une submersion temporaire n'est pas considérée comme affectant l'usage ou la pérennité du service.

➤ RÉTABLISSEMENT DU SERVICE

La **facilité à rétablir le service**, grâce à une voie temporaire ou permanente à l'endroit de la rupture est importante, car elle rend compte de la durée de la rupture de service. La structure du terrain est le paramètre le plus important pour cela. En effet, la stabilité des sols (falaise soumise à des glissements de terrain), l'irrégularité du sol, et la possibilité de remblayer le terrain érodé pour faire circuler de nouveau des véhicules sont variables selon la configuration du site. L'état a donc été déterminé avec les visites terrains et les données topographiques et de sol des différents sites. L'information a été complétée lors des entrevues avec les gestionnaires locaux du MTQ. Les scores sont détaillés au tableau 25.

Tableau 25. Détails du score « Facilité à rétablir le service »

Facilité à réparer la rupture de service [ScoreRuptu]	
Définition	Score
Pas de difficultés : côte basse - relativement facile à réparer	1
Peu de difficultés : falaises rocheuse ou sableuse, sommet plat, pas de risque de glissement	2
Quelques difficultés (lagune, cours d'eau, étang, terrain avec beaucoup de relief...)	3
Difficultés cumulées (par exemple : relief important + cours d'eau)	4
Très difficile : falaises soumises à glissement – sols instables	5

➤ SÉCURITÉ DES USAGERS À L'ÉROSION

La **sécurité des usagers** est liée au risque pour l'intégrité et la vie des usagers liés à l'aléa considéré. Cet élément a été détaillé de manière différente selon si l'on considère l'érosion ou la submersion. Pour l'érosion, c'est le risque lié aux processus qui engendrent l'érosion qui est considéré. Si l'érosion est graduelle, le danger est faible, alors que si l'érosion se produit par glissement de terrain, éboulement ou ravinement alors cela peut être soudain et former une profonde dénivellation dans la chaussée. Ainsi, cela peut être dangereux pour les automobilistes d'y chuter. À l'inverse, dans une terrasse de plage, cela est moins risqué, car un trou serait peu profond. Les scores de ce paramètre sont présentés au tableau 26.

Tableau 26. Détails du score « Sécurité des usagers – érosion »

Sécurité liée aux processus d'érosion [ScoreSecEr]	
Définition	Score
côte basses côtes rocheuses ignées	1
côte à falaise rocheuse sédimentaire côte à falaise meuble sableuse côte en pente forte à partir du trait de côte	3
côte à falaise meuble avec glissements possibles	5

4.2.2.3 Submersion

➤ SÉCURITÉ DES USAGERS À LA SUBMERSION

Pour ce qui a trait à la submersion, c'est le déferlement violent qui est pris en compte quant à la sécurité des usagers. Ce déferlement peut de plus être associé à la présence de débris importants voire de blocs d'enrochements mal dimensionnés comme on a pu le voir sur une route municipale de Rimouski à la suite de la tempête du 6 décembre 2010 (figure 34) ou sur la route 132 dans le nord de la Gaspésie (figure 35). La proximité à la côte de l'infrastructure routière est nécessaire à un déferlement violent sur celle-ci. De plus, le fait que la côte soit artificialisée augmente le déferlement (par réduction de la plage, abaissement de celle-ci et amplification de la hauteur des vagues de par la présence de la structure). Les vagues déferlant sur les véhicules constituent également un danger (figure 36). Les scores de ce paramètre sont présentés au tableau 27. Le déferlement n'affecte la route que si elle se situe à une faible distance de la côte et qu'aucun élément ne vient y faire obstacle (p. ex. maisons) c'est pourquoi ces critères sont utilisés pour déterminer le score de sécurité des usagers liés à la submersion (tableau 27). L'artificialité amplifiant le déferlement violent, ce critère est également inclus dans la décision.

Tableau 27. Détails du score « Sécurité des usagers – submersion »

Sécurité liée au déferlement [ScoreSec20] [ScoreSec60] [ScoreSec00]	
Définition	Score
Franchissement de l'ouvrage de protection contre l'érosion : - route potentielle submersible - moins de 10 m entre la route et la côte « rang 1 » - côte artificialisée	5
Franchissement de la ligne de rivage : - route potentielle submersible - moins de 10 m entre la route et la côte « rang 1 » - côte naturelle	3
Autres situations	1



Figure 34. Débris de bois et blocs d'enrochement sur une route suite à la tempête du 6 décembre 2010 à Rimouski (© LDGIZC-UQAR)



Figure 35. Projection de roches sur la chaussée de la 132 entre Marsoui et Rivière-à-Claude (© MTQ)



Figure 36. Vagues déferlant par-dessus le mur de protection de la route 132 à Maria durant la tempête du 6 décembre 2010 (© Stéphane Montmagny)

4.2.3 Caractéristiques du segment de route au sein du réseau

Deux éléments ont été considérés dans l'évaluation de la robustesse du réseau routier au niveau des sites témoins étudiés. Tout d'abord, la présence ou non de **voies de contournement** possibles lors d'une interruption de service liée à l'érosion ou à la submersion [*ScoreConto*]. Ensuite, a été considérée la possibilité de conserver **l'accès aux services de secours essentiels**, à savoir les pompiers [*ScorePompi*] et les services d'hôpital comprenant un service d'urgence 24/24 [*ScoreHopit*].

➤ VOIE DE CONTOURNEMENT

Les voies de contournement qui ont été considérées dans l'étude sont seulement les routes situées du côté terre de la route étudiée. En effet, les routes situées du côté mer sont considérées comme étant déjà affectées par l'aléa. De plus, seules les routes de compétence nationale ou municipale (selon les données fournies par le MTQ) et les rues situées dans les noyaux villageois (quel que soit leur statut) ont été considérées comme des voies possibles de contournement. Les scores ont été donnés selon la longueur en

kilomètres du détour qui devrait être fait si le segment est coupé pour en atteindre l'autre extrémité (tableau 28). Le calcul de la longueur a été effectué manuellement et les classes correspondent à des temps de parcours moyens d'un véhicule roulant à 90 km/h (10 minutes, 20 minutes, ½ heure environ, 1 h environ, plus d'une heure, impossible en voiture).

Tableau 28. Détails du score « Voie de contournement »

Voie de contournement [ScoreConto]	
Longueur en kilomètres	Score
<15 km	1
15 à 30 km	1.5
30 à 50 km	2
50 à 100 km	3
>100 km	4
aucune	5

➤ **ACCÈS AUX SERVICES DE SECOURS**

L'accès aux services de secours essentiels (pompiers et hôpital) étant une priorité, leur accès est inclus dans la vulnérabilité grâce à une matrice qui reprend à la fois la longueur du détour nécessaire pour accéder au service ou être rejoint par le service, mais aussi selon le nombre de personnes concernées par ce détour (tableau 29). Ce nombre de personnes a été calculé en fonction du nombre moyen de personnes par ménage dans la municipalité concernée (tableau 22) et du nombre de bâtiments affectés par la rupture.

Tableau 29. Détails de scores « Accès à un hôpital » et « Accès aux pompiers »

Accès à un hôpital / aux pompiers [ScoreHopit] et [ScorePompi]						
nombre de personnes affectées	Longueur du détour à faire					
	< 15 km	15 à 30 km	30 à 50 km	50 à 100 km	> 100 km	impossible
moins de 25	1	2	3	4	5	5
25 à 100	2	2	3	4	5	5
100 à 500	2	3	3	4	5	5
500 à 1000	2	4	4	4	5	5
plus de 1000	2	5	5	5	5	5

4.2.4 Adaptation

Les mesures d'adaptation déjà mises en place ainsi que la capacité d'adaptation ont été évaluées à l'aide de campagnes de terrain et d'entrevues avec les gestionnaires locaux du MTQ.

L'adaptation par la mise en place de mesures rigides contre l'érosion (murs, enrochements) est intégrée dans l'indice via le taux de migration futur de la côte qui est considéré comme nul (voir section 4.2.1.1)

L'analyse des sites témoins et les entrevues réalisées ont permis de faire ressortir certaines mesures d'adaptation non structurelles déjà mises en place pour certains sites. Ce type d'adaptation non structurel ne sera pas pris en compte dans le calcul de l'indice présenté ici, mais discuté pour chacun des sites témoins ainsi que pour l'ensemble des sites témoins. Cette approche est apparue plus efficace en terme de gestion : connaître la vulnérabilité du site et la panoplie d'interventions possibles afin de faire des choix éclairés quant aux mesures à poursuivre/mettre en place.

Les mesures d'adaptation non structurelles qui ont été soulevées sont :

- **Suivi régulier de l'érosion sur le terrain** (peut être couplé à d'autres suivis par exemple celui de la patrouille de roches en Haute-Gaspésie). Ce suivi serait idéalement effectué à une plus haute fréquence selon la vulnérabilité et l'exposition des segments aux aléas (journalier, événementiel, mensuel, annuel).
- **Plan alternatif de transport** (détour, mode de transport alternatif ou autre action). Ce plan peut être créé de manière autonome ou intégrée dans les plans de mesures d'urgence des communautés.
- Pour la submersion : **charrues** disponibles pour « ouvrir » la route en cas de submersion, s'il y a une absence de déferlement.
- **Signalisation**
- Fermeture temporaire de la route (**barrières**)

4.3 Calcul de l'indice de vulnérabilité

Une fois tous les paramètres intégrés dans la base de données, le calcul de l'indice de vulnérabilité est effectué. Plusieurs indices sont calculés comme intermédiaires avant d'arriver à l'indice global qui inclut à la fois l'érosion et la submersion. Il est ainsi possible de connaître la vulnérabilité à l'un ou l'autre des aléas.

Les différents éléments inclus dans le calcul de vulnérabilité sont multipliés entre eux puis divisés par le nombre d'éléments considérés (ici 10), le résultat est la racine carrée du calcul. Cette méthode de calcul est utilisée par Boruff *et al.* (2005) et Gornitz (1990). Le résultat est un chiffre sans unité qui ne représente rien en lui-même et qui peut varier théoriquement de 0 à 988,2. Dans les faits, aucun de nos sites témoins n'atteint cette valeur maximale, les valeurs varient plutôt entre 0 et 122,5 pour la vulnérabilité à l'érosion, entre 0 et 265,2 pour la vulnérabilité à la submersion et entre 0 et 159,1 pour l'IVRAC. Il n'y a pas de pondération pour les différents paramètres, car les paramètres retenus sont considérés d'importance égale.

L'indice de vulnérabilité des routes à l'érosion résulte du calcul de l'équation 11, l'équation 12 et l'équation 13. Il s'agit respectivement de la vulnérabilité à l'érosion d'ici 2020, 2060 et 2100.

Équation 11. Indice de vulnérabilité à l'érosion d'ici 2020

$$VulnEro20 = \sqrt{\frac{([ScoreEro20] * [ScoreDJMA] * [ScoreConto] * [ScoreHabit] * [ScoreRuptu] * [ScoreRang] * [ScoreResEs] * [ScoreSecEr] * [ScoreHopit] * [ScorePompi])}{10}}$$

Équation 12. Indice de vulnérabilité à l'érosion d'ici 2060

$$VulnEro60 = \sqrt{\frac{([ScoreEro60] * [ScoreDJMA] * [ScoreConto] * [ScoreHabit] * [ScoreRuptu] * [ScoreRang] * [ScoreResEs] * [ScoreSecEr] * [ScoreHopit] * [ScorePompi])}{10}}$$

Équation 13. Indice de vulnérabilité à l'érosion d'ici 2100

$$VulnEro00 = \sqrt{\frac{([ScoreEro00] * [ScoreDJMA] * [ScoreConto] * [ScoreHabit] * [ScoreRuptu] * [ScoreRang] * [ScoreResEs] * [ScoreSecEr] * [ScoreHopit] * [ScorePompi])}{10}}$$

L'indice de vulnérabilité des routes à la submersion résulte du calcul de l'équation 14, l'équation 15 et l'équation 16. Il s'agit respectivement de la vulnérabilité à la submersion pour 2020, 2060 et 2100.

Équation 14. Indice de vulnérabilité à la submersion d'ici 2020

VulnSub20

$$= \sqrt{\frac{([ScoreSub20] * [ScorePlage] * [ScoreDist] * [ScoreDJMA] * [ScoreConto] * [ScoreHabit] * [ScoreRang] * [ScoreSec20] * [ScoreHopit] * [ScorePompi])}{10}}$$

Équation 15. Indice de vulnérabilité à la submersion d'ici 2060

VulnSub60

$$= \sqrt{\frac{([ScoreSub60] * [ScorePlage] * [ScoreDist] * [ScoreDJMA] * [ScoreConto] * [ScoreHabit] * [ScoreRang] * [ScoreSec60] * [ScoreHopit] * [ScorePompi])}{10}}$$

Équation 16. Indice de vulnérabilité à la submersion d'ici 2100

VulnSub00

$$= \sqrt{\frac{([ScoreSub00] * [ScorePlage] * [ScoreDist] * [ScoreDJMA] * [ScoreConto] * [ScoreHabit] * [ScoreRang] * [ScoreSec00] * [ScoreHopit] * [ScorePompi])}{10}}$$

L'indice de vulnérabilité du réseau routier aux aléas côtiers (IVRAC) d'érosion et de submersion résulte de la moyenne des deux sous-indices de vulnérabilité d'érosion et de submersion, il est présenté à l'équation 17. La valeur maximale théorique possible pour les différents IVRAC est de 988,2, mais pour les sites étudiés, elle est de 159,1.

Équation 17. Calculs des différents IVRAC 2020, 2060 et 2100

$$IVRAC_{2020} = ([VulnEro20] + [VulnSub20])/2$$

$$IVRAC_{2060} = ([VulnEro60] + [VulnSub60])/2$$

$$IVRAC_{2100} = ([VulnEro00] + [VulnSub00])/2$$

Les indices de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers ainsi que les deux sous-indices d'érosion et de submersion ont été répartis en différentes classes selon leur niveau de vulnérabilité et les actions à entreprendre concernant les segments de routes. Cinq niveaux de vulnérabilité ont été retenus selon les actions à entreprendre soit : nul, faible, moyen, élevé et critique (tableau 30).

Tableau 30. Niveau de vulnérabilité

Niveau de vulnérabilité	Actions à entreprendre	Classe de valeurs
Nul non vulnérable	aucune	0
Faible	intervention à planifier à long terme suivi à effectuer	0 à 10
Moyen	intervention à planifier à moyen terme ou au cas par cas	10 à 25
Élevé	intervention rapide nécessaire	25 à 50
Critique	intervention immédiate nécessaire	supérieure à 50

5 PORTRAITS DES SITES TÉMOINS

Voici la présentation des différents sites témoins, de leurs caractéristiques physiques, humaines et de l'évolution historique de la côte. Dans le but d'avoir un portrait détaillé du territoire avant d'examiner leur vulnérabilité aux aléas côtiers, il faut en effet connaître les conditions physiques et humaines qui peuvent être déterminantes.

5.1 Description du site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric

Ce site s'étend sur 16 km de côtes dans les municipalités de Baie-des-Sables et de Saint-Ulric, dans la MRC de La Matanie (figure 37). Il commence au quai de Baie-des-Sables à l'ouest et s'étend jusqu'à l'entrée du village de Saint-Ulric à l'est et correspond ainsi à la cellule hydrosédimentaire de la Tartigou. 15 km de la route 132 sont à l'étude dans ce secteur.

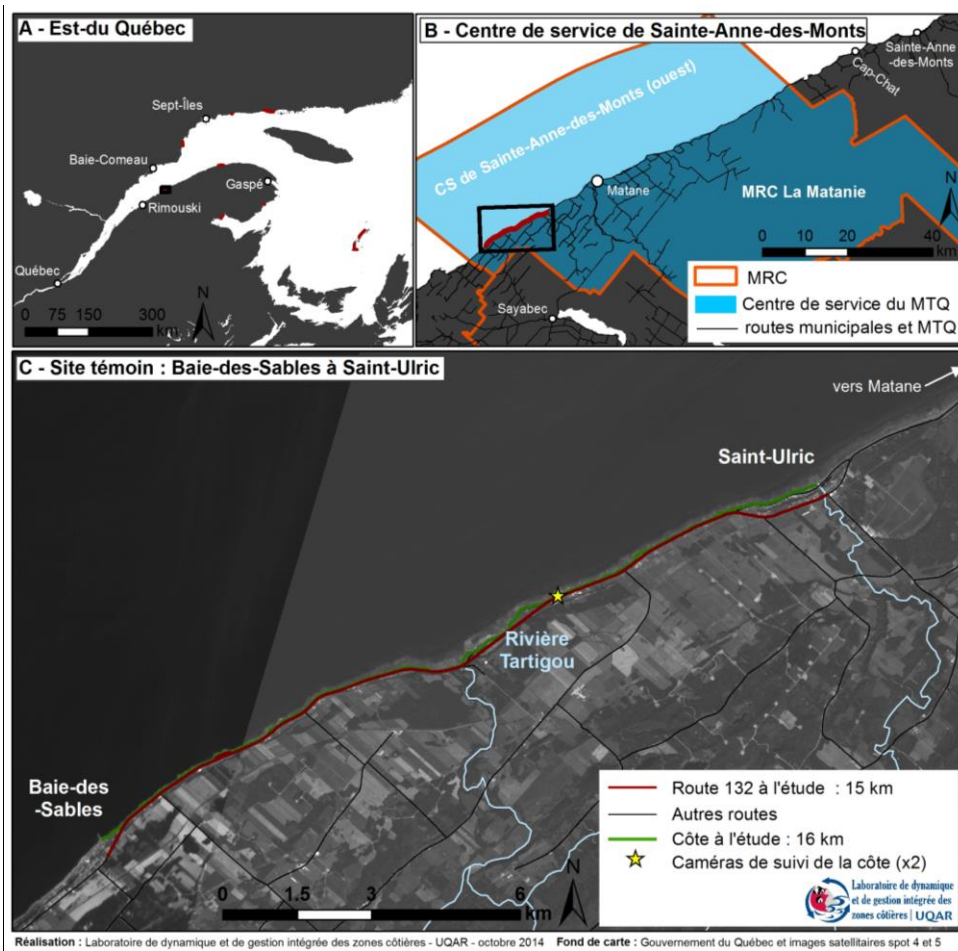


Figure 37. Site de Baie-des-Sables et Saint-Ulric

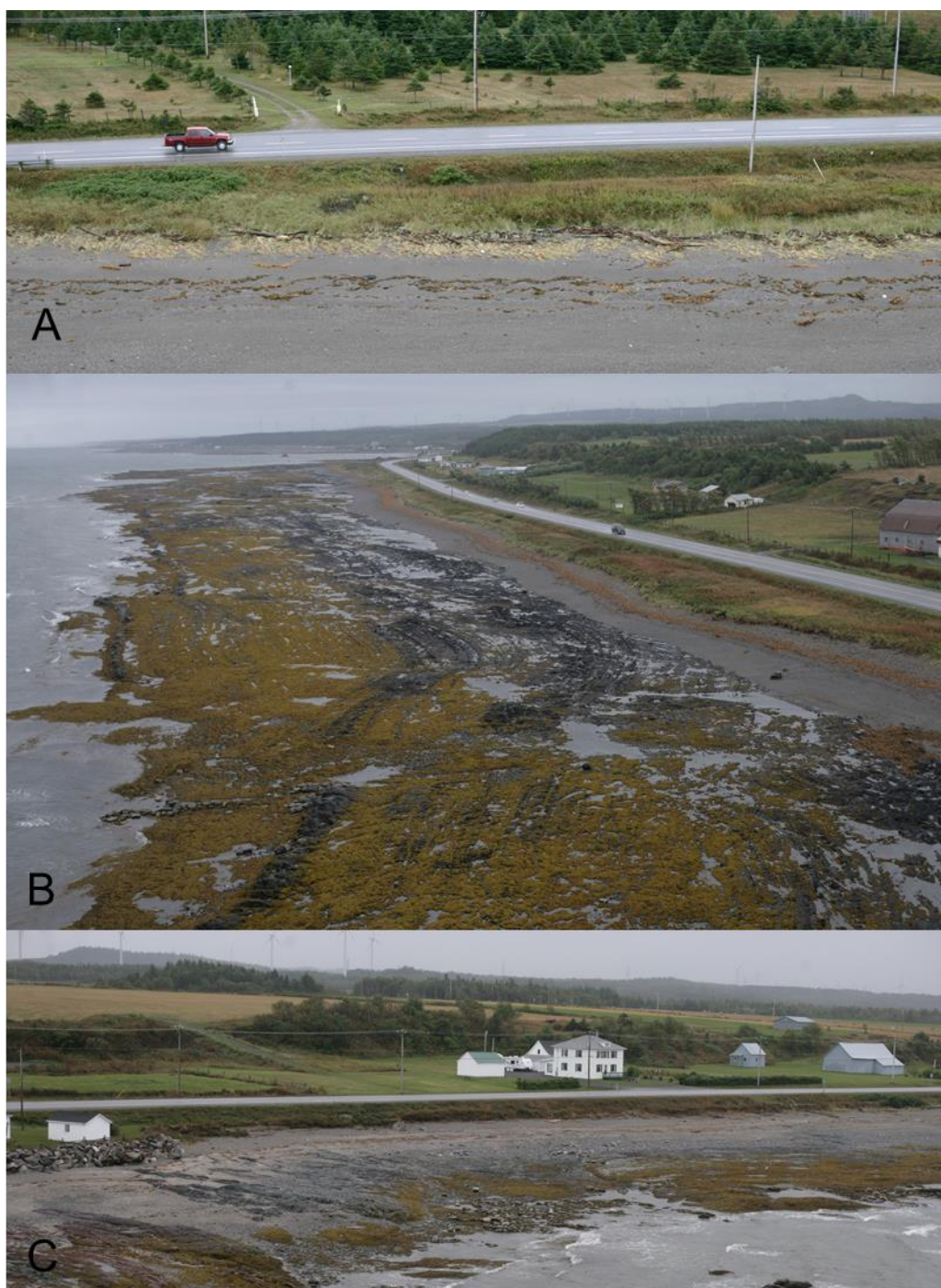


Figure 38. Vue héliportée de la côte de Saint-Ulric (A) et de Baie-des-Sables (B et C) (© LDGIZC-UQAR, septembre 2010)

5.1.1 Caractérisation physique

Les côtes sont des terrasses de plage à 91,9 % (14,7 km sur les 16,0 km de côte) (figure 38 et figure 39). Les autres types de côtes présents sont des petits secteurs de basse falaise meuble (1,1 km), de basse falaise meuble à base rocheuse (0,1 km), de basse falaise rocheuse (0,02 km) et de côte rocheuse sans falaise (0,1 km). La côte est stable ou végétalisée sur 41,1 %, semi-végétalisée sur 31,8 % et active ou vive sur 26,9 %. La côte était artificialisée sur 1,9 km (11,8 %) en 2010 avant la tempête du 6 décembre, mais après, l'artificialité a augmenté et en 2012, 2,7 km de côte présentaient des structures de protection contre l'érosion (16,7 %). Le haut estran est sableux de largeur variant entre 0,82 et 44,4 m pour une largeur moyenne de 22,1 m (écarte type de 6,7). Localement, des crans rocheux importants sont présents. Les volumes des plages de Saint-Ulric varient entre 0 et 3855,7 m³, pour une moyenne de 1066 m³ et un écart type de 578. Pour Baie-des-Sables, les plages varient entre 249 et 5394 m³ pour une moyenne de 1741 et un écart type de 793. La majorité des plages sont de volumes modérés. Le bas estran est majoritairement une plate-forme rocheuse, mais localement il y a présence de blocs. Le site est divisé au centre par l'embouchure de la rivière Tartigou. Cependant, dû au large estran présent, la dérive littorale qui se fait vers le sud-ouest n'est pas interrompue, le site ne forme donc qu'une seule cellule hydrosédimentaire de 16 km : la cellule de la Tartigou (fiche °024, annexe 4 de Drejza *et al.*, 2014). Les sources sédimentaires sont l'érosion de la côte, et quelques cours d'eau, le principal étant la rivière Tartigou. La côte est orientée sud-ouest/nord-est.

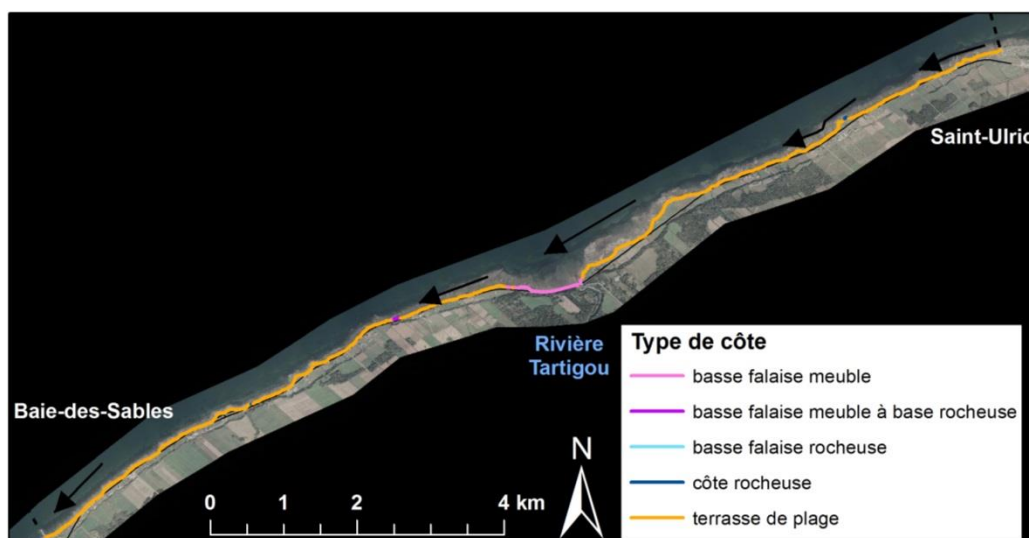


Figure 39. Types de côtes du site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric

Ce site correspond aux cartes d'hydrodynamique n°19, d'exposition à l'érosion et à la submersion n°19 et d'exposition des sites suivis n°24 à 30 du *volume I* du présent projet (Drejza *et al.*, 2014).

L'indice de budget sédimentaire des plages (IBSP) moyen est de 27,9 et varie en 0,03 et 99,5 avec un écart type de 15,7. Les volumes des plages de ce site témoin sont d'en moyenne de 1333,3 m³, mais varient entre 0,1 et 5394,3 m³ avec un écart type de 746,9 m³. Il est à noter qu'un segment d'environ 3 km n'a pas été caractérisé dû à un problème mécanique. Les plages les plus petites se situent au niveau de saillants/pointes rocheux qui limitent la présence de sédiments granulaires. Les plages les plus importantes se situent au niveau du quai de Baie-des-Sables qui retient les sédiments apportés par la dérive.

5.1.2 Caractérisation humaine

Le site se situe dans la MRC de la Matanie. Le site témoin comprend (en 2011) dix morceaux de route 132 qui sont suivis pour l'érosion côtière par la direction territoriale du MTQ (figure 40) à savoir :

- D0101 : Est du village de Baie-des-Sables
- D0100 : Mon Jardin Secret
- D0106 Halte du Meunier
- D0102 : Ferme Chamberland
- D0104 : Fraisière bio
- D0105 : Rivière Tartigou
- D0201 : Ouest de la Pointe au Naufrage
- D0202 : Saint-Ulric 1
- D0203 : Saint-Ulric 2
- D0204 : Saint-Ulric 3

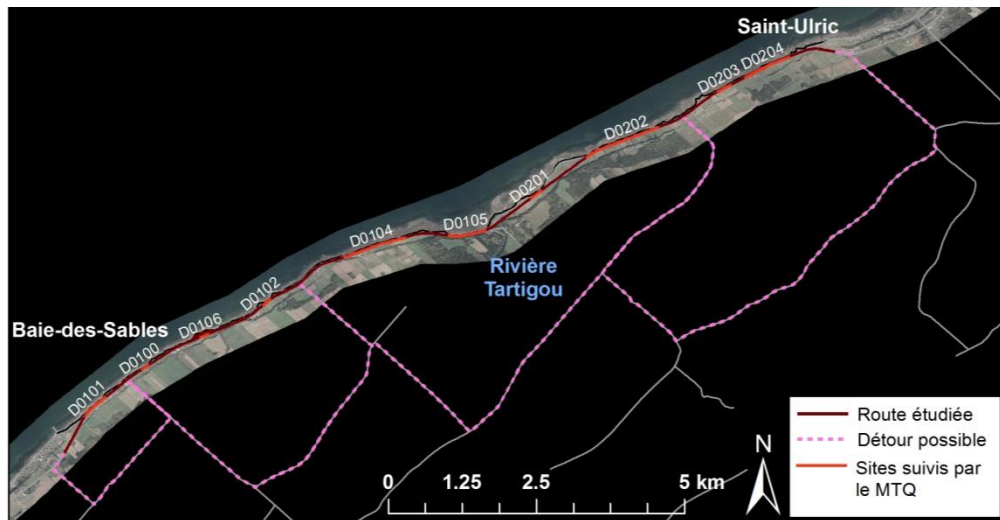


Figure 40. Sites suivis et détours possibles du site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric

Il inclut une halte routière du MTQ. Cette halte est saisonnière et se situe à un peu plus de 2 km à l'est du village de Baie-des-Sables. Le réseau de routes secondaires est bien développé avec une arrière-côte habitée et cultivée. Comme on peut le voir sur la figure 40, plusieurs possibilités de voie de déviation sont disponibles pour l'ensemble de la route 132 à l'étude.

5.1.3 Évolution historique de la côte

Le taux de migration moyen de la période historique la plus longue soit entre 1948 et 2012 est de 0.01 m/an (soit inférieur à la marge d'erreur maximale qui est de 0,10 m pour cette période). Les taux varient entre -0.24 et 0.28 m/an selon les secteurs (figure 41). L'enveloppe moyenne de changements de la côte entre 1948 et 2012 est de 8,9 m (écart type de 3,8). Il n'y a pas de différence significative entre les secteurs artificialisés et ceux qui ne le sont pas, cependant le secteur de remblais important visible à l'embouchure de la Tartigou sur les photographies aériennes a été enlevé de l'analyse. Le taux de migration moyen de la période la plus représentative est de -0,16 m/an avec une variation entre -0,68 et 0,28 m/an selon les endroits. La période la plus représentative pour l'érosion future est 1993-2012 (Marie *et al.*, 2014). La marge d'erreur maximale pour cette période est de 0.08 m/an. Ce taux de migration est celui des côtes à terrasse de plage étant donné qu'elles représentent la très grande majorité de ces côtes.

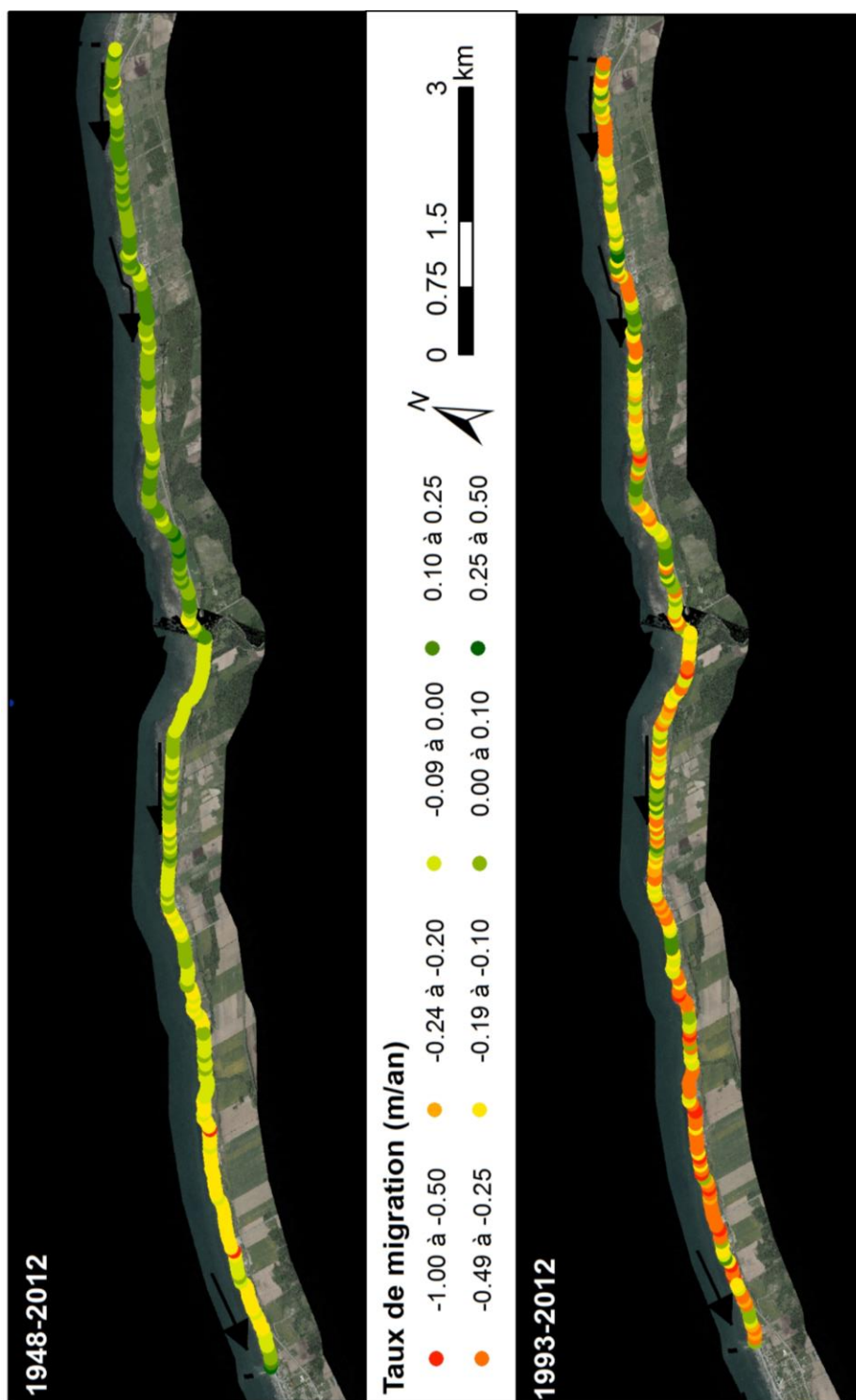


Figure 41. Taux de migrations historiques (1948-2012) et de la période récente (1993-2012) du site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric

5.2 Description du site de Rivière-à-Claude

Le site témoin est situé dans les municipalités de Rivière-à-Claude et de Marsoui (figure 42). Il se situe dans la MRC de la Haute-Gaspésie. Le site fait 14,1 km de long et comprend 13,4 km de la route 132.

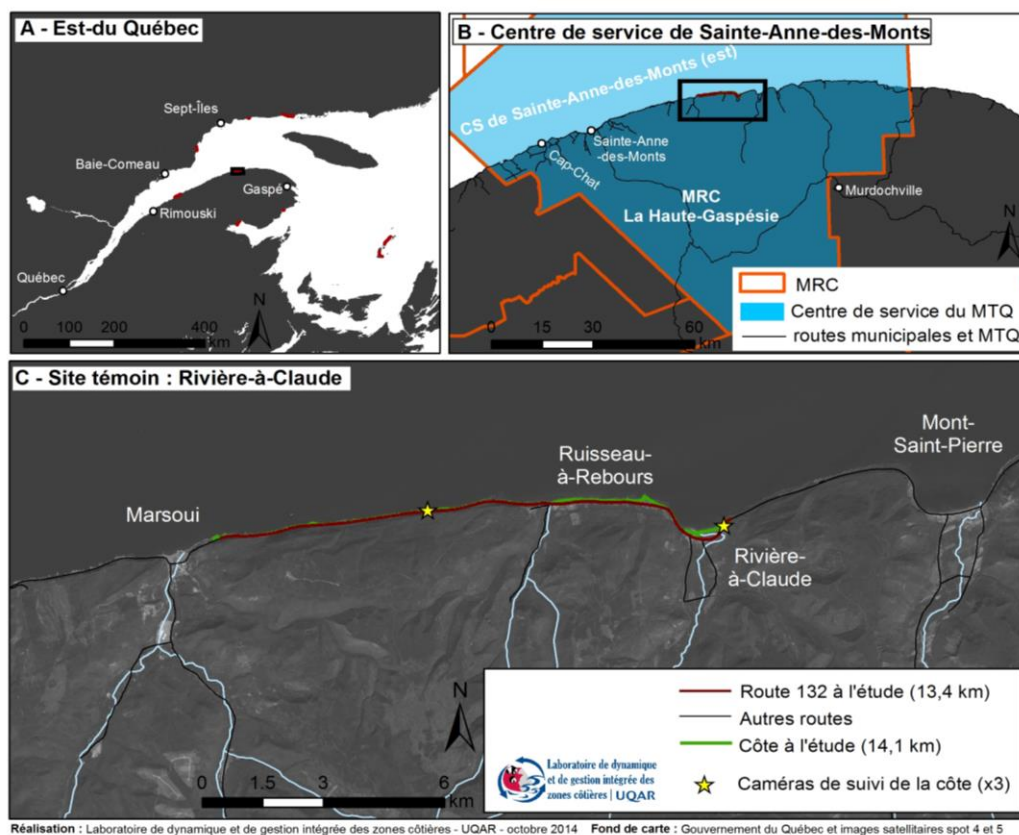


Figure 42. Site de Rivière-à-Claude

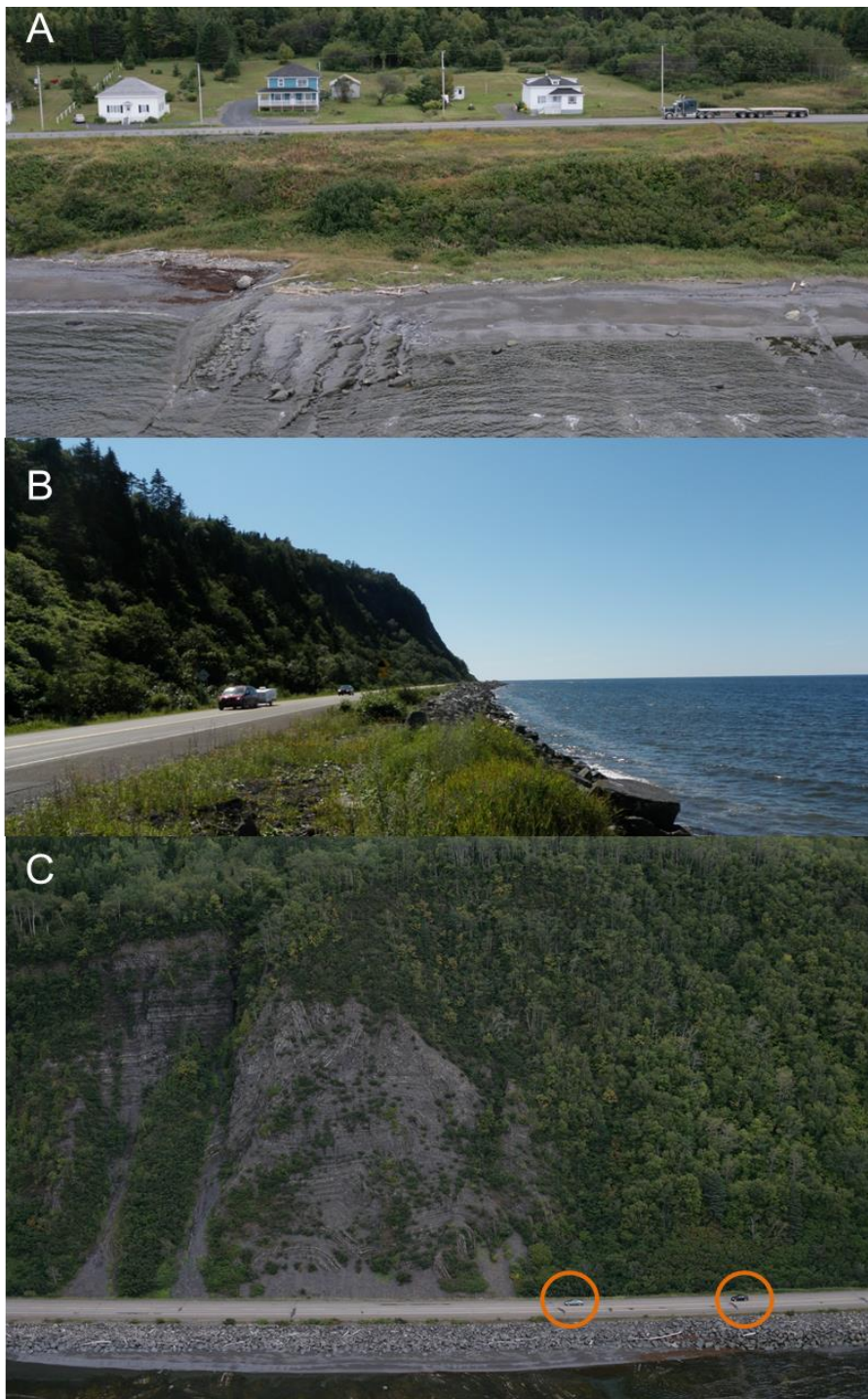


Figure 43. Photographies du site de Rivière-à-Claude. A – secteur de falaise végétalisée avec terrasse de plage au pied; B et C– secteur de route 132 passant au pied d'un très haut talus rocheux (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

5.2.1 Caractérisation physique

Dans toute sa partie ouest, ce site est constitué d'un remblai enroché au pied d'une falaise rocheuse, puis au niveau de Ruisseau-à-Rebours, la côte est une terrasse de plage d'une dizaine à une trentaine de mètres de largeur située au pied d'une falaise morte. Finalement, dans la partie est, il s'agit d'une terrasse de plage de fond de baie au niveau du village de Rivière-à-Claude. Les côtes sont principalement constituées de remblai au pied d'une falaise rocheuse (8,7 km, soit 61,7 %) (figure 43 et figure 44). Il y a également des terrasses de plage sur 4,1 km (29,1 %), des falaises rocheuses sur 0,5 km (3,9 %) ainsi que des falaises meubles (2,5 %), des côtes rocheuses sans falaise (2,2 %) et des falaises meubles à base rocheuse (0,6 %). La majorité de la côte est stable ou végétalisée (67,3 %), près d'un quart est active ou vive (24,7 %) et 8 % est semi-végétalisée. Le site est artificialisé de manière très importante avec 58,7 % de côtes présentant une structure de protection. On retrouve principalement des enrochements (91,9 % des structures), mais aussi quelques secteurs de remblai (4,2 %), avec des murs de béton (2,3 %) ou avec des murets de bois (1,7 %). La quasi-totalité des structures présentes est en bon état (99,8 %).

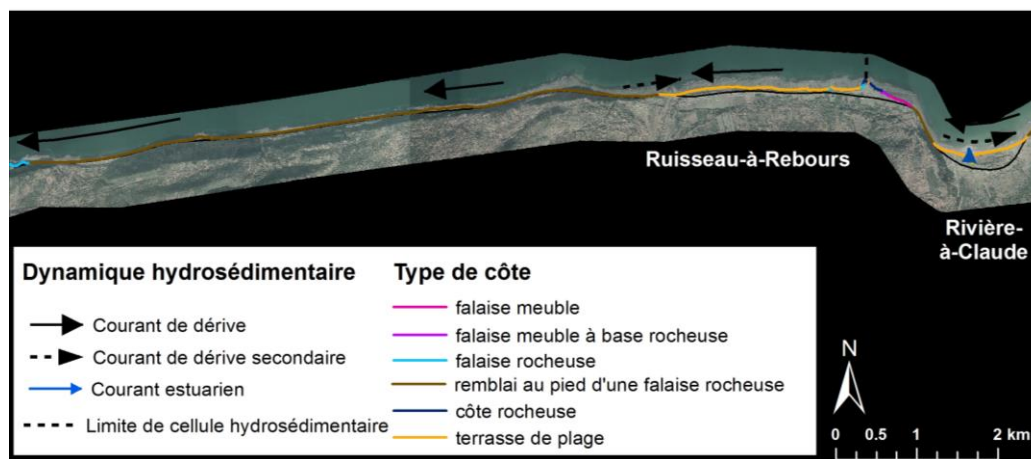


Figure 44. Types de côte du site de Rivière-à-Claude

Les plages sont quasiment absentes au pied de l'enrochement qui protège le remblai de la route 132, excepté à certains endroits où l'on retrouve de petites plages qui semblent retenues par la présence de crans rocheux sur l'estran. Devant le site du MTQ n° C0401 (figure 45), les plages sont souvent absentes (21 %), mais lorsqu'elles sont présentes, elles mesurent en moyenne 13,8 m de largeur, leur IBSP moyen est de 15,7 et le volume moyen est de 1238,6 m³ pour un total de 65 466,1 m³. L'absence de plage au pied des infrastructures

qui protègent la route 132 fait que les vagues arrivant à la côte ont plus de puissance, car elles ne sont pas atténuées. Même si l'enrochement est entretenu et protège de l'érosion, il est important de considérer que la route est plus exposée à la submersion et au déferlement par les vagues. Par contre, on retrouve des plages en avant de la terrasse de plage (secteur de Ruisseau-à-Rebours et de la baie). Dans ces secteurs, les plages varient entre 6,5 et 46,0 m pour une largeur moyenne de 22,9 m. L'IBSP moyen est de 30,4 dans les secteurs présentant une plage, ceci est un des plus faibles de tous les sites témoins (les indices moyens varient entre 23,1 et 99,9). Les plages sont plus étroites aux deux extrémités de la baie, mais aussi au pied de l'enrochement à l'ouest de l'embouchure du ruisseau à Rebours. Dans ce dernier site, elles diminuent de largeur jusqu'à disparaître environ 400 m à l'ouest. Les plages les plus larges se situent dans la baie de Rivière-à-Claude. Celles au niveau de la terrasse de plage, au pied de la falaise morte, sont moyennes.

Le site est situé dans l'unité hydrosédimentaire du nord de la Gaspésie, en partie dans 2 cellules hydrosédimentaires à savoir celle de Ruisseau-à-Rebours à l'ouest et celle de Rivière-à-Claude à l'est (fiches n°039 et 040, annexe 4 de Drejza *et al.*, 2014). La limite entre les deux cellules se situe au niveau d'un petit cap rocheux (figure 44). Dans les deux cellules, la dérive littorale principale s'effectue vers l'ouest et une dérive littorale secondaire est présente vers l'est. À l'embouchure de la rivière à Claude, un courant estuarien est présent (figure 44).

La cellule de Ruisseau-à-Rebours est très artificialisée pour protéger la route 132. La dynamique naturelle est donc modifiée et les sources sédimentaires (surtout linéaires) sont limitées. Les plages sont presque absentes au pied des infrastructures, mais s'élargissent dans les secteurs avec une terrasse de plage au pied de la falaise rocheuse et qui ne sont pas artificialisés.

Ce site correspond aux cartes d'hydrodynamique n°29, d'exposition à l'érosion et à la submersion n°29 et d'exposition des sites suivis n°49 et 50 du *volume I* du présent projet (Drejza *et al.*, 2014).

5.2.2 Caractérisation humaine

Le site témoin comprend deux segments de route 132 qui sont suivis pour l'érosion par la direction territoriale du MTQ (figure 45), à savoir :

- C0401 : Marsoui à Ruisseau-à-Rebours
- C0501 : Rivière-à-Claude

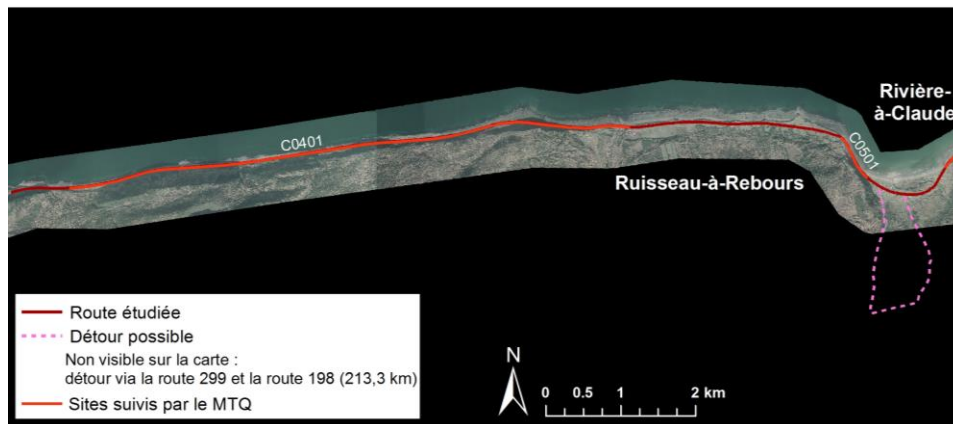


Figure 45. Sites suivis et détours du site de Rivière-à-Claude

La construction de la route sur la haute plage qui était présente au début du 20^{ème} siècle et l'abandon du chemin qui passait en arrière-pays, au sommet des plateaux ont engendré ce secteur de route côtière exposé aux aléas côtiers (figure 46) et de versant. En effet, en 1861, lorsque le chemin maritime avait été tracé, l'arpenteur et ingénieur en chef avait mentionné qu'« aucun tracé routier ne pourrait être praticable le long de la mer », car « il est très dangereux de circuler à leur base [des falaises] » (Pelletier, 2012). La route sur la plage présente à l'époque était tout de même empruntée, selon les marées, mais elle passait à la fois sur des débris de versants et sur des petits secteurs de haut de plage (Pelletier, 2012). À l'époque, c'est seulement à l'est de Rivière-à-Claude (et jusqu'à l'Anse Pleureuse) que la route est considérée comme obligée de passer par la côte à cause du relief de l'arrière-pays qui devient trop accidenté (Pelletier, 2012). Ainsi, entre Marsoui et Ruisseau-à-Rebours, c'est la route Philibert Henley qui se trouvait en arrière-côte qui était utilisée. À Marsoui, un morceau existe encore aujourd'hui, mais il ne débouche plus à Rivière-à-Claude. « En 1930, on inaugurerait cette route 132 sous l'appellation de boulevard Perron, en l'honneur du ministre du même nom. Un chemin tortueux et à peine carrossable qui permettait néanmoins d'effectuer le tour de la Gaspésie en voiture. En saison, il va s'en dire, car à bien des endroits il a fallu attendre 1947 avant qu'elle soit déneigée en hiver. » (Pelletier, 2012). Par la suite, c'est entre 1963 et 1977 que la route a été élargie et installée sur l'important remblai que l'on connaît aujourd'hui (Pelletier, 2012).



Figure 46. Panneau routier avertissant l'aléa de submersion/déferlement de vagues au niveau de la route 132 entre Marsoui et Rivière-à-Claude.

Actuellement, l'arrière-pays est très peu développé et l'on y retrouve surtout des secteurs de coupes forestières. Hormis la route 132, aucune route (ni nationale, ni municipale ni autre) ne relie les vallées de la Marsoui et de Rivière-à-Claude. Le détour minimal en cas de rupture de route, est ainsi de 213 km (par les routes 299, la route lac Saint-Anne, du MTQ puis la route 198). Un détour de 4,2 km est disponible seulement pour une petite portion au centre du village de Rivière-à-Claude (figure 45).

5.2.3 Évolution historique de la côte

La côte de ce secteur a connu une évolution fortement marquée par l'artificialisation. En effet, les 8 km de côtes à l'ouest du site sont un remblai majeur qui a été mis en place entre 1963 et 1977 pour la construction de la route à son emplacement actuel. À certains endroits, le remblai a atteint plus de 50 m de largeur (figure 47). L'évolution de ces secteurs n'est donc pas incluse dans les taux de migration moyens de la côte.

Le taux de migration moyen entre 1948 et 2009 est quasi nul (0,01 m/an). Quel que soit le type de côte, aucun taux ne dépasse la marge d'erreur maximale possible pour cet intervalle de calcul (soit 0,12 m/an). Seuls les secteurs de falaise rocheuse s'approchent d'une mesure significative avec -0,10 m/an en moyenne. On peut donc considérer que les secteurs qui n'ont pas connu de modifications anthropiques majeures sont relativement stables.

Pour la période la plus récente (1992-2009), que nous considérons comme la plus représentative de l'érosion future, les taux sont également très faibles (moyenne de $-0,04$ m/an variant entre 0 et $-0,07$ m/an) et ne dépassent pas la marge d'erreur de cet intervalle.

Concernant l'évolution récente de la côte à l'aide du réseau de suivi de l'érosion du LDGIZC, seules 12 stations se situent sur le territoire à l'étude. Trois d'entre elles se situent sur la terrasse de plage au pied de la falaise à Ruisseau-à-Rebours et montrent une migration moyenne de $-0,29$ m/an entre 2005 et 2013. Étant donné leur disposition, il n'est pas possible d'extrapoler l'information au reste de ce secteur de terrasse de plage. Les 9 autres stations se situent dans la terrasse de plage de la baie de Rivière-à-Claude et montrent une migration moyenne de $-0,70$ m/an entre 2003 et 2013. Ainsi, les données mesurées par les stations de mesures montrent que l'érosion récente serait plus importante que l'érosion historique mesurée entre 1992 et 2009 pour le même secteur ($-0,70$ vs $-0,11$). Ceci peut s'expliquer par le fait que depuis 2009, le secteur a subi la tempête de décembre 2010 qui a provoqué une érosion moyenne de $-3,4$ m dans la baie.

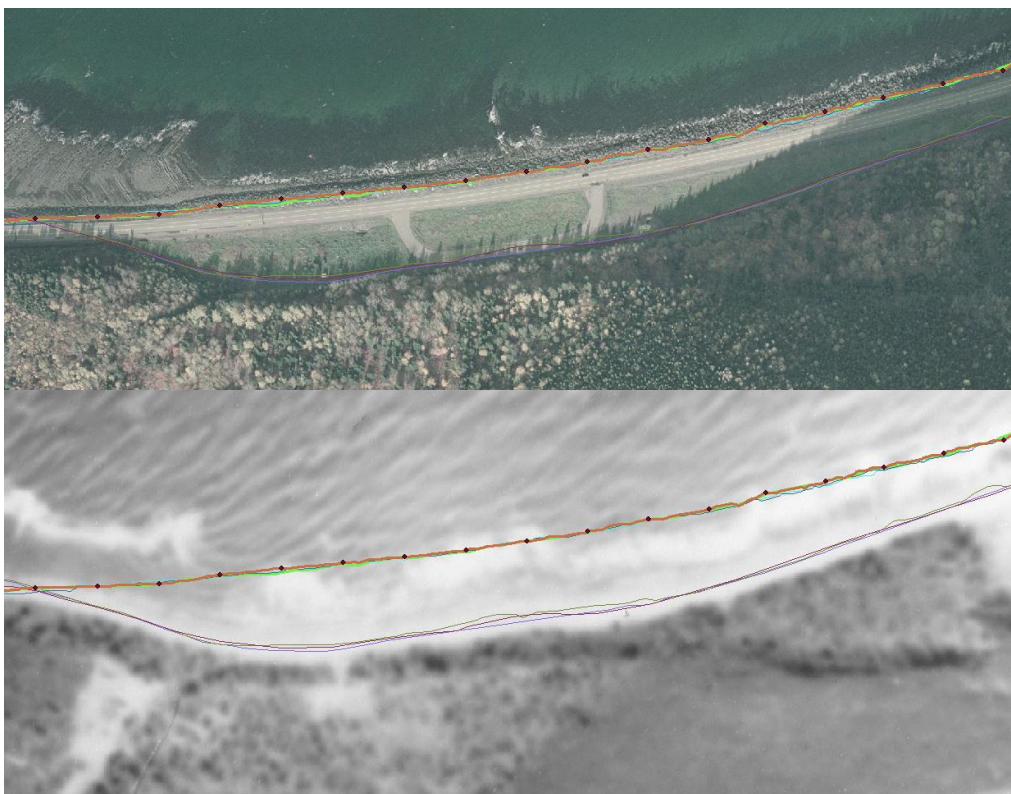


Figure 47. Remblai majeur pour la route 132 à Marsoui. En haut en 2009 et en bas en 1939.

5.3 Description du site de Chandler

Ce site témoin se situe dans la municipalité de Chandler, dans la MRC du Rocher-Percé. Il fait 3,4 km de longueur et débute immédiatement à l'est du quai (figure 48). Dans ce secteur, 2,5 km de route 132 sont à l'étude.

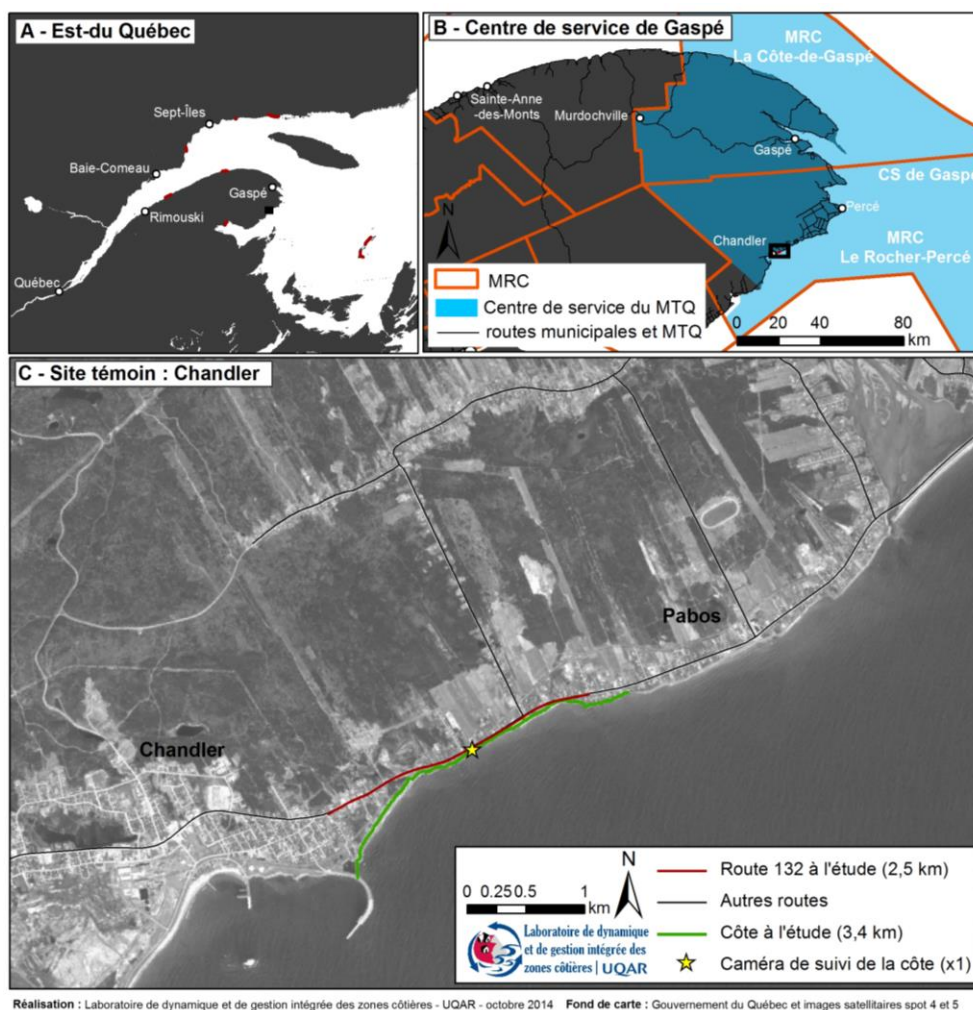


Figure 48. Site de Chandler

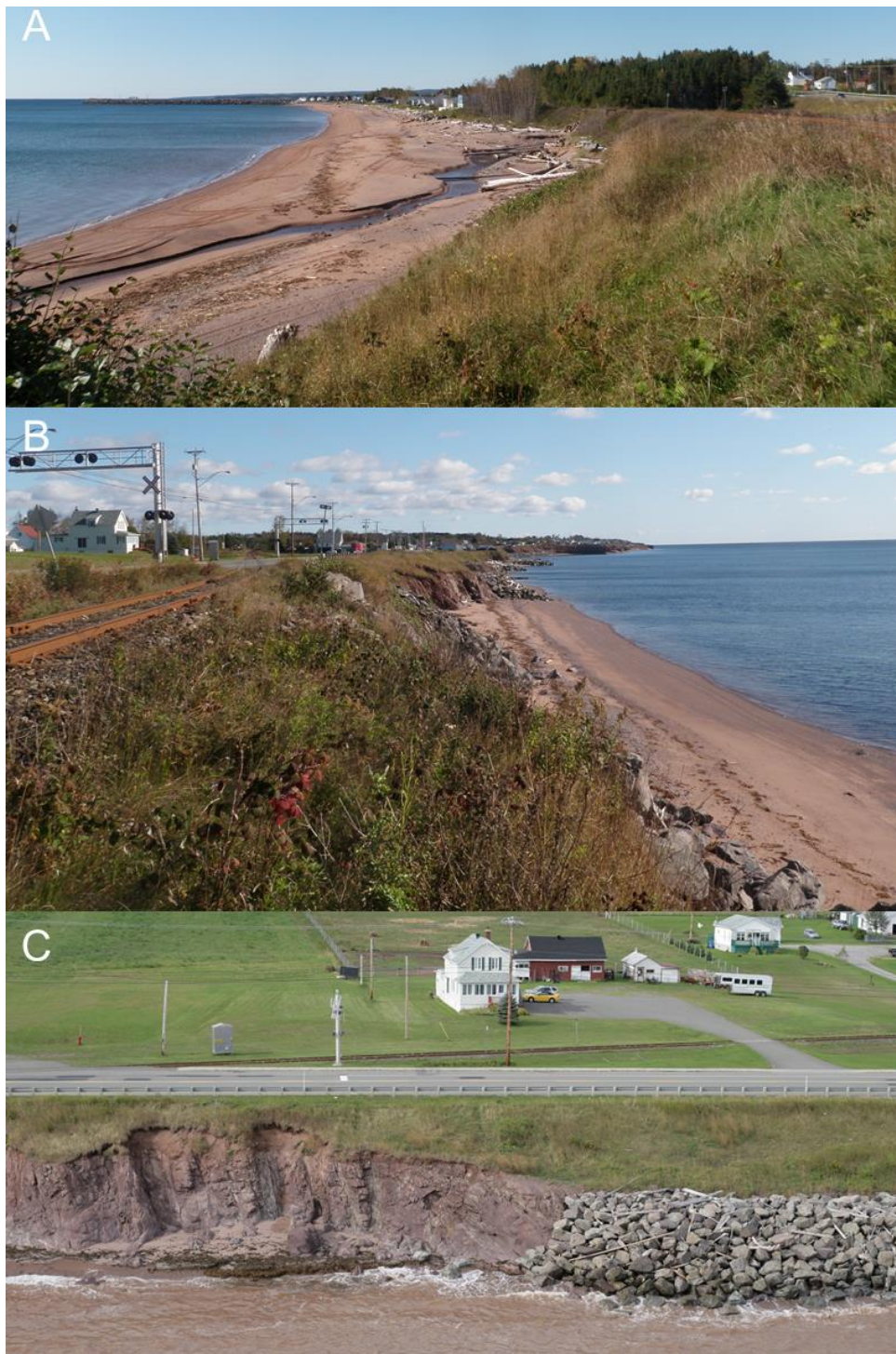


Figure 49. Photos du site de Chandler. A – secteur de terrasse de plage à l'ouest du site, B et C – falaise rocheuse naturelle et enrochée (© LDGIZC – UQAR, A et B : septembre 2011, C : septembre 2010)

5.3.1 Caractérisation physique

La côte du site de Chandler fait 3,4 km de longueur. Dans la partie ouest du site, la côte est constituée d'une terrasse de plage de 1,0 km alors que l'est du site est constitué de falaises rocheuses sédimentaires (figure 49 et figure 50). Il est à noter que localement un enrochement est présent au pied du talus rocheux et qu'à l'extrémité est, une terrasse de plage est présente au pied de la falaise. Les types de côte principaux sont les falaises rocheuses avec 1,2 km de côte (36,6 %) et les terrasses de plage avec 1,2 km (35,6 %), suivent les falaises rocheuses à sommet meuble avec 0,6 km (19,0 %) puis viennent le remblai (5,7 %), les falaises meubles à base rocheuse (2,3 %) et les côtes rocheuses sans falaise (0,8 %). Plus de la moitié des côtes sont actives ou vives (51,7 %), un quart est stable ou végétalisé (25,1 %) et le reste est semi-végétalisé (22,4 %) ou en progradation (0,8 %). Une part importante de ce secteur est artificialisé (40,0 %), majoritairement avec des enrochements (84,6 %) et majoritairement des structures en bon état (86,9 %).

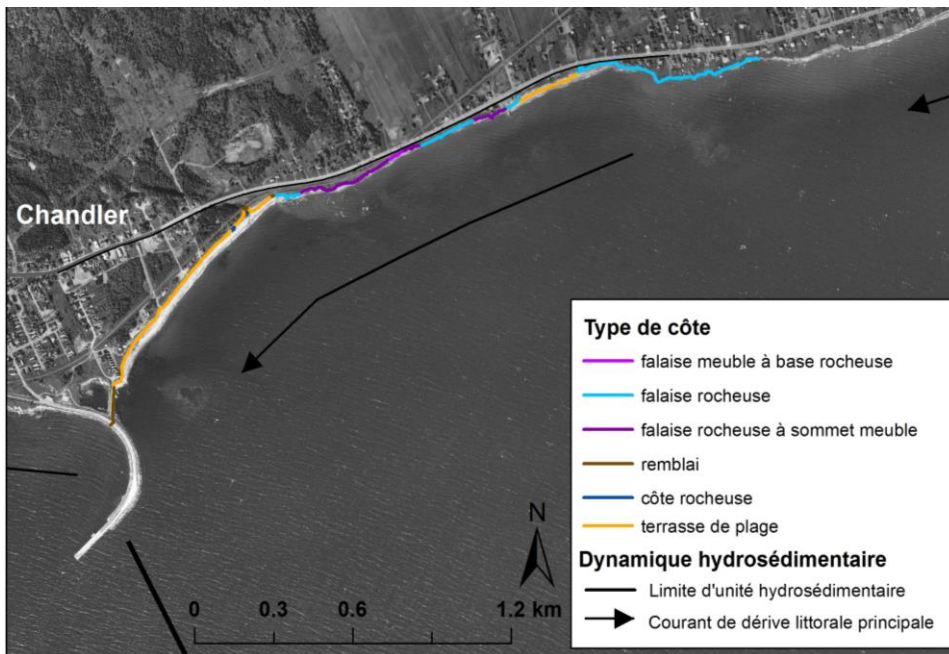


Figure 50. Types de côte du site de Chandler

D'un point de vue de dynamique hydrosédimentaire, le site se situe à la fin de l'unité hydrosédimentaire de Pabos (unité qui ne comprend aucune cellule). La limite ouest se situe au niveau du quai de Chandler depuis sa construction entre 1963 et 1978. La dérive littorale va d'est en ouest (fiche n°073, annexe 4 de Drejza *et al.*, 2014).

Ce site correspond aux cartes d'hydrodynamique n°49, d'exposition à l'érosion et à la submersion n°49 et d'exposition des sites suivis n°86 du *volume I* du présent projet (Drejza *et al.*, 2014).

Au niveau de la terrasse de plage à l'ouest du site, le volume moyen est de 2955,0 m³ (pour 100 m de côte). Au niveau de la terrasse de plage au pied des falaises dans l'est du site, le volume moyen est plus faible, soit en moyenne de 1654,9 m³ (pour 100 m de côte). Au niveau des falaises au centre du site, il n'a pas été possible d'aller effectuer des mesures avec le système de laser mobile et les données aéroportées de 2007 n'ont pas permis non plus de mesurer des volumes ni des IBSP. Cependant, il est possible d'effectuer une comparaison avec des largeurs de plage. Au niveau de l'ensemble des falaises, la moyenne des largeurs de plage est ainsi de 14,7 m variant entre 0 et 24,3 m. Au niveau du site suivi par le MTQ n° B0903 qui est enroché, les plages sont les moins larges (variant d'aucune plage à des plages de 6 m) alors que les plages au pied de falaises naturelles mesurent en moyenne 18,3 m variant de 11,7 à 24,3 m. La terrasse de plage à l'ouest présente les plages les plus larges du site avec 41,0 m en moyenne (variant entre 31,4 et 58,6) et la terrasse de plage de l'est du site, située en amont de l'épi, mesure en moyenne 27 m et varie entre 21 et 30,8 m. Le quai de Chandler dans la partie ouest vient probablement amplifier l'accumulation, bien que les plages étaient déjà larges en 1934 et 1963 avant la mise en place du quai (un saillant rocheux était déjà présent). Par contre à l'est, des plages étaient présentes au pied des falaises avant l'épi, mais étaient nettement plus étroites que depuis la mise en place de l'épi (entre 1992 et 2001).

5.3.2 Caractérisation humaine

Sur ce site, deux secteurs sont suivis par la direction territoriale du MTQ (figure 51), soit les sites :

- B0903 Chandler
- B0902 Grand Pabos

La voie ferrée est présente entre la route 132 et la côte sur 1,4 km, puis les deux voies se croisent et le chemin de fer s'éloigne de la côte alors que la route s'en approche (figure 51).

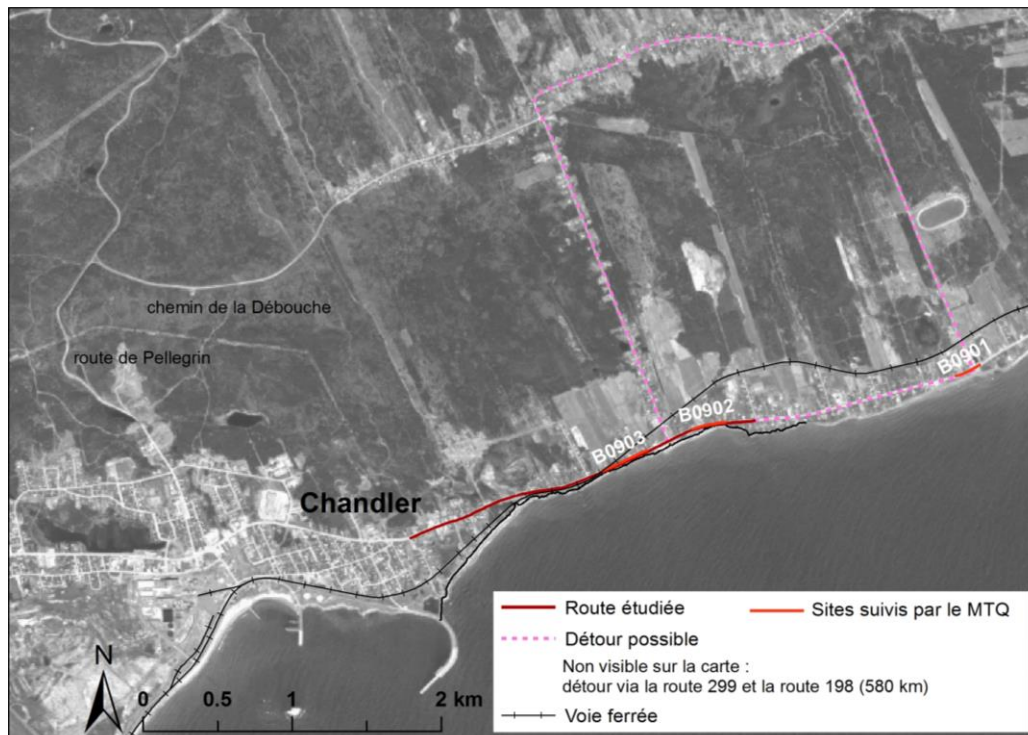


Figure 51. Sites suivis et détours du site de Chandler

L'occupation de l'arrière-pays est développée de manière discontinue dans ce secteur, si bien qu'au niveau du site étudié on constate une différence entre l'est et l'ouest du site. Dans l'ouest, aucune autre route ne permet un court détour. Mais à l'est du site, au niveau de la partie Pabos, un rang est présent en arrière côte et permet ainsi un détour de 9,1 km (figure 51). Cependant au niveau de la ville de Chandler, il n'est plus présent (le chemin de la Débouche et la route des Pellegriin ne sont pas asphaltés). Le détour minimal en cas de rupture de la route 132, si l'on considère que les chemins de terre non asphaltés ne sont pas praticables, est ainsi de 580 km.

5.3.3 Évolution historique de la côte

L'évolution historique de la côte montre une érosion côtière très faible avec une moyenne de -0,05 m/an entre 1934 et 2008. L'érosion semble constante au cours du temps, puisque la période récente de 1992 à 2008 est également de -0,05 m/an en moyenne. Les falaises connaissent une migration moyenne légèrement plus importante que les terrasses de plage avec des taux moyens entre -0,06 et -0,12 m/an dans les différentes falaises contre 0,03 m/an pour les terrasses de plages (1992-2008).

Concernant l'évolution récente de la côte à l'aide du réseau de suivi de l'érosion du LDGIZC, 8 stations se situent dans les falaises et montrent un taux de migration moyen de -0,13 m/an (2005 à 2013). Dans le secteur de terrasse de plage, 6 stations de mesures indiquent une migration moyenne de -0,41 m/an.

5.4 Description du site de Carleton à Maria

Ce site témoin fait 10,3 km de longueur et se situe dans les municipalités de Carleton-sur-Mer et de Maria dans la MRC d'Avignon (figure 52). Le site s'étend du sud-ouest, dans les falaises meubles, à partir de la limite de la cellule littorale, jusqu'à la flèche littorale de Pointe-Verte au nord-est en passant par un grand secteur de terrasse de plage. Dans ce secteur, 10,2 km de route 132 sont à l'étude.

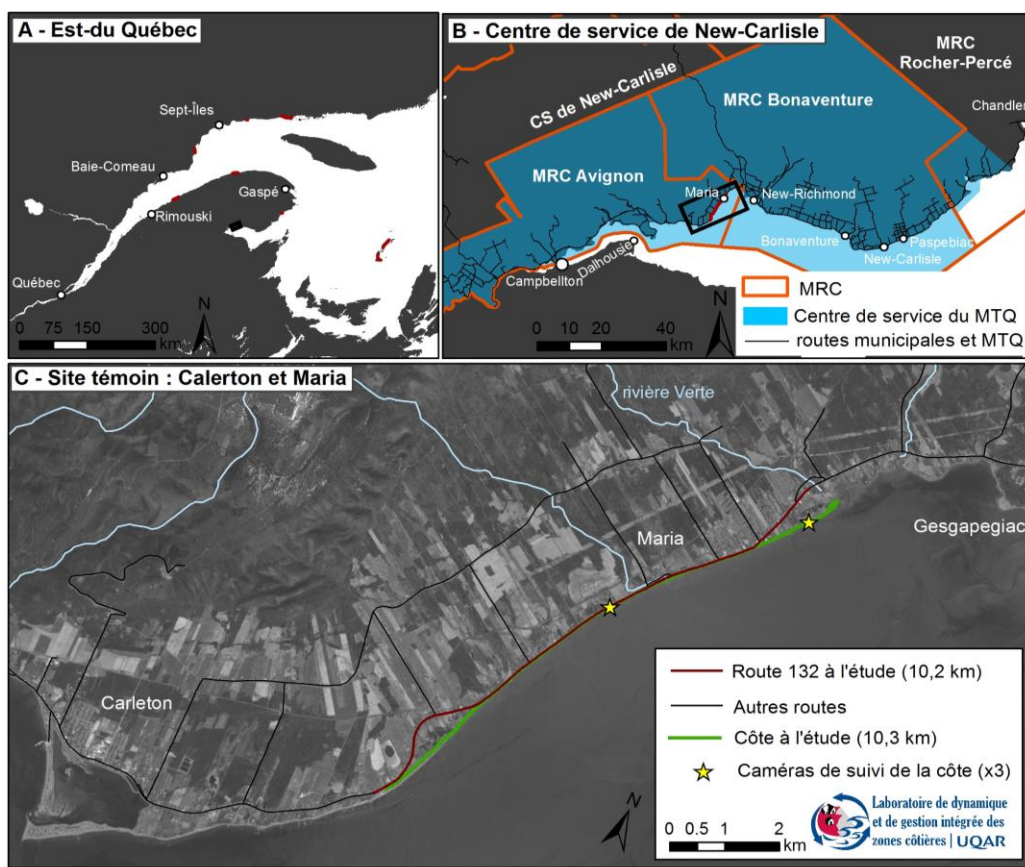


Figure 52. Site de Carleton et Maria



Figure 53. Photos du site de Carleton et Maria. A – secteur de falaises meubles, B et C – secteurs de terrasse de plage avec mur de protection (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

5.4.1 Caractérisation physique

Dans la partie ouest, la côte est constituée de falaises de dépôts meubles communément appelées « les Caps » ou « Caps-de-Maria » sur 2,3 km (22,6 %). Puis, la falaise diminue en hauteur pour devenir une basse falaise meuble sur 0,2 km (2,4 %) (figure 53 et figure 54). Toute la partie centrale est constituée de terrasses de plages de 6,9 km (soit 66,7 %), en grande majorité bordées d'un mur pour protéger la route 132. Ainsi, 87,6 % des terrasses de plage sont artificialisées dans le site à l'étude (soit 6 km) et à 91,1 % il s'agit de murs de bois et/ou de béton (5,5 km), le reste étant artificialisé par des enrochements (0,5 km) ou des blocs déversés (0,1 km). À l'extrémité est du site se trouve une flèche littorale de 0,9 km (8,4 %) qui abrite un marais maritime. Cette flèche est appelée « Pointe Verte ».

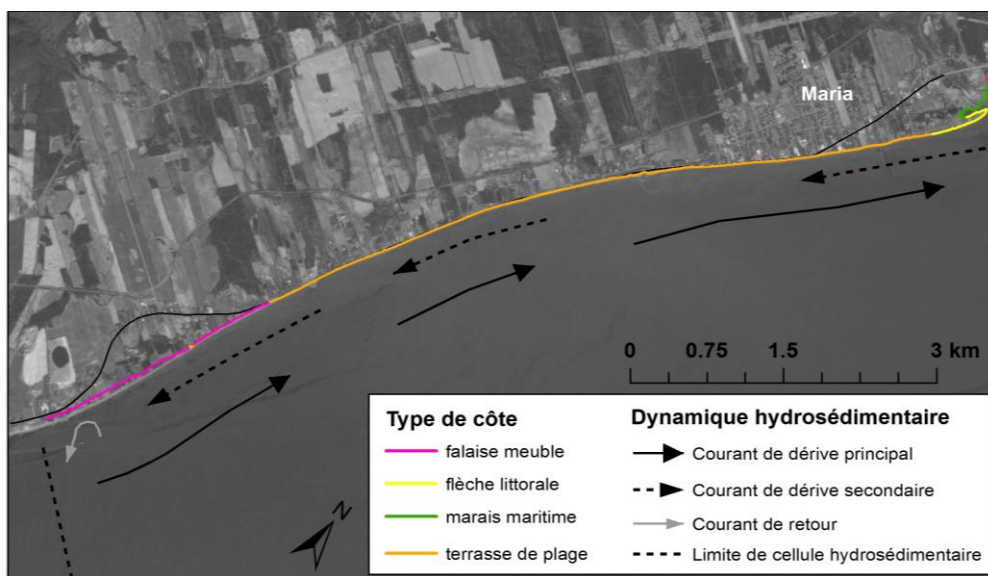


Figure 54. Types de côte du site de Carleton et Maria

La côte à l'étude est principalement stable du fait de structures de protection (53,1 %). Le reste des côtes se répartit entre un état végétalisé (15,8 %), semi-végétalisé (14,6 %) et en accumulation (12,3 %). Seul 0,4 % des côtes présentent des signes d'érosion. Cette très faible proportion s'explique par la très importante artificialisation de la côte qui présente des structures de protection sur près des 2/3 de sa longueur (6,7 km, soit 64,6 %). Ainsi, les secteurs qui ont été en érosion ont très probablement été artificiellement stabilisés.

D'un point de vue de dynamique hydrosédimentaire, le site se situe au début de la cellule de Maria/Gesgapegiag (fiche n°086, annexe 4 de Drejza *et al.*, 2014). La limite de la cellule se situe au niveau d'une divergence des dérives littorales principales au pied des falaises meubles. La dérive littorale principale va du sud-ouest vers le nord-est (figure 54). Une dérive littorale secondaire est présente en sens inverse sur tout le site d'étude. Au niveau de la limite de la cellule, on retrouve des courants de retour. La cellule littorale se continue vers l'est après notre site témoin jusqu'à l'embouchure de la rivière Cascapedia.

Ce site correspond aux cartes d'hydrodynamique n°59 et 60, d'exposition à l'érosion et à la submersion n°59 et 60 et d'exposition des sites suivis n°104 du volume I du présent projet (Drejza *et al.*, 2014).

L'IBSP moyen est de 33,2, mais varie entre 1,7 et 156,9 avec un écart type de 17,5. Le volume moyen pour chaque compartiment de 100 m de côte est de 1566,5 m³ et varie entre 135,6 et 7685,1 m³ avec un écart type de 689,2. La largeur des plages varie entre 6,7 m et 100,9 m avec une moyenne de 23,1 m (écart type de 9,1). Les plages mesurent en moyenne 23,8 m au pied des falaises de sable (17,5 à 44 m) et 22,3 m au pied de la terrasse de plage artificialisée. Mais, les largeurs sont localement plus faibles en avant des artificialités où l'on retrouve la largeur minimum (6,7 m) ainsi que toutes les plages de moins de 10 m. Concernant les plages de moins de 15 m, on les retrouve au pied des murs de la terrasse de plage, mais aussi au pied des infrastructures de protection sur la flèche et en aval de la dérive sur la pointe de la flèche.

5.4.2 Caractérisation humaine

Le secteur de route 132 bordé par un mur (figure 53 B et C) est d'ailleurs suivi par la direction territoriale du MTQ pour le risque d'érosion et de submersion (site A1301) (figure 55). Ce site mesure 5,7 km de long et il est divisé en 6 segments.

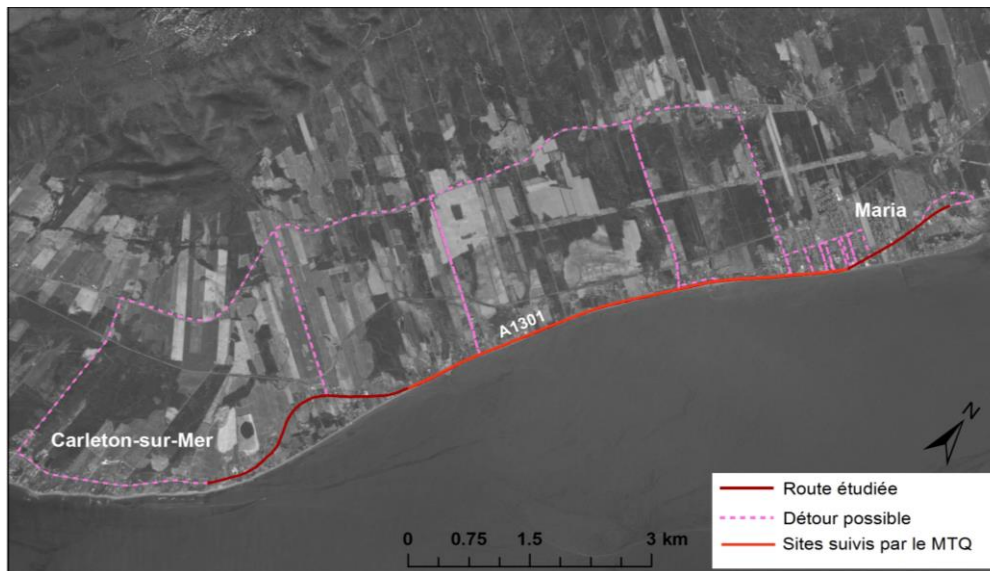


Figure 55. Site suivi et détour du site de Carleton et Maria

L'arrière-pays est relativement plat et monte en pente douce de la côte jusqu'au pied du plateau (environ à 3 km dans les terres). Il est occupé par des activités agricoles. Ainsi, des routes secondaires existent au niveau de Carleton-sur-Mer et de Maria (principalement le 2^{ème} rang). Ceci excepté à partir des étangs aérés et de la rivière Branche Guité où le 2^{ème} rang devient non carrossable.

5.4.3 Évolution historique de la côte

La côte du site à l'étude est relativement stable, en effet, les taux de migration moyens pour l'ensemble des types de côtes varient entre -0,08 m/an (1934 à 1963), -0,03 m/an (1934 à 2007) et 0,01 m/an (1992-1993 à 2007). Ainsi, la période la plus ancienne est globalement plus intense, mais pas de manière significative. La différence provient particulièrement de la flèche littorale qui connaissait entre 1934 et 1963 une période d'érosion (taux moyen de -0,23 m/an) alors que dans la période récente elle est en accumulation de 0,26 m/an. Les terrasses de plage qui ne sont pas artificialisées connaissent une faible érosion (taux de migration moyen de -0,04 m/an entre 1992/3 et 2007). Celles qui sont artificialisées sont stables, voire légèrement en accumulation (taux moyen de 0,04 m/an entre 1992/3 et 2007 et de 0,02 m/an entre 1934 et 2007). La différence entre la période ancienne, la période récente et la période la plus longue n'est pas représentative pour les terrasses de plages (si l'on exclut celles qui ont été artificialisées qui sont stables). Les

falaises meubles qui ne sont artificialisées que sur environ 10 % ne connaissent pas de différence d'évolution selon si elles sont artificialisées ou non, le recul moyen est de -0,11 m/an durant la période récente. Ce taux est équivalent à celui de la période ancienne (-0,10 m/an entre 1934 et 1963) et la période la plus longue (-0,07 m/an entre 1934 et 2007). Ainsi, leur évolution semble stable au cours du temps.

Concernant l'évolution récente de la côte à l'aide du réseau de suivi de l'érosion du LDGIZC, 21 stations de mesures sont présentes dans les secteurs de terrasse de plage et ont mesuré une migration moyenne de -0,17 m/an entre 2005 et 2013. Dans le secteur de terrasse de plage, 11 stations entre 2005 et 2013 ont enregistré une migration moyenne de -0,54 m/an. Mais selon les endroits et les années les mesures annuelles varient entre -10,88 m et 4,1 m. Le taux de migration moyen pour les 4 stations situées au niveau de la flèche est de 0,03 m, soit une relative stabilité, mais selon les endroits et les années les mesures annuelles varient entre -1,34 m et 2,2 m. Pour les falaises meubles, les 23 stations de suivi indiquent une migration moyenne de -0,16 m/an.

5.5 Description du site de la baie de Plaisance

Ce site témoin se situe sur l'archipel des îles de la Madeleine dans la municipalité et la MRC des Îles-de-la-Madeleine. La côte est d'une longueur de 17,7 km et se situe du côté est des îles, dans la baie de Plaisance (figure 56). Dans ce secteur, 16,4 km de route 199 sont à l'étude.

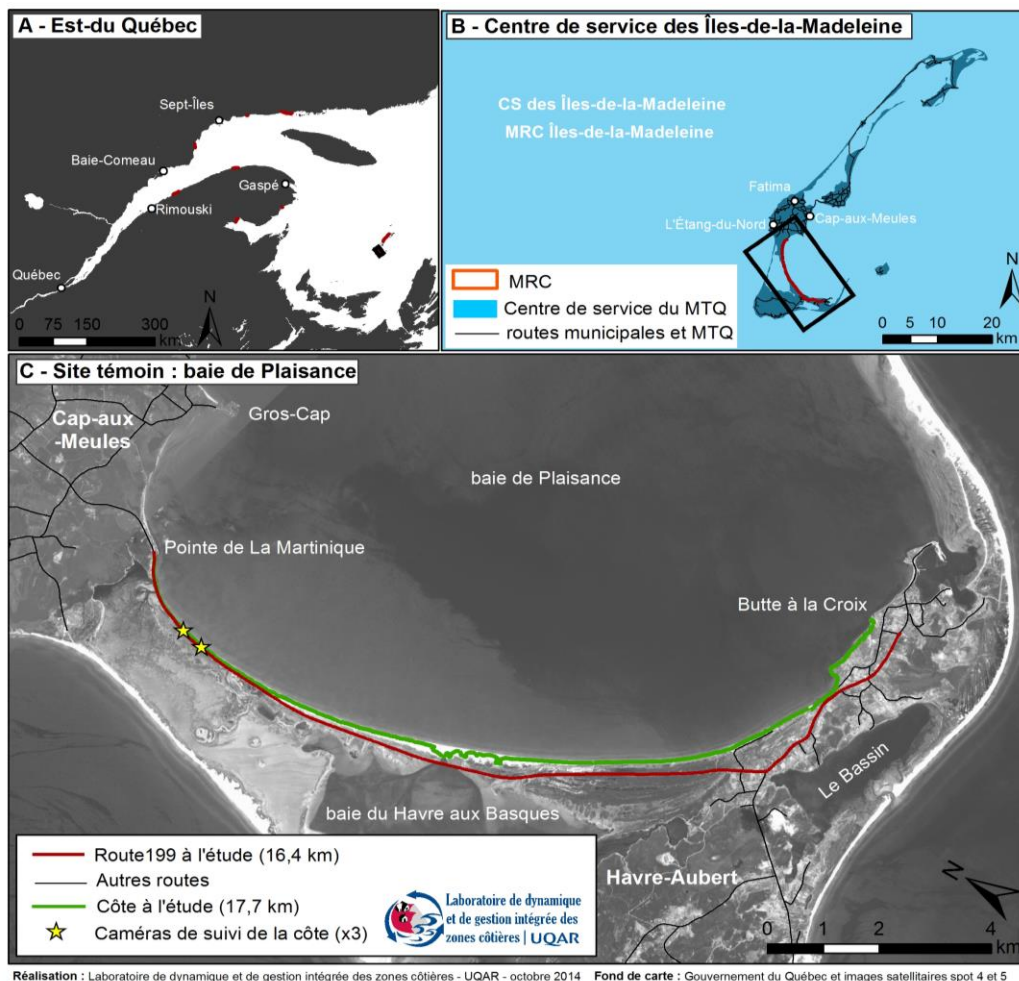


Figure 56. Site de la baie de Plaisance



Figure 57. Photos du site de la baie de Plaisance. A – sur l'île du Havre-Aubert falaises rocheuses, B- tombolo entre Havre-Aubert et Cap-aux-Meules C- tombolo en érosion (© LDGIZC-UQAR, septembre 2010)

5.5.1 Caractérisation physique

Le site à l'étude correspond à la cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance (fiche n°096, annexe 4 de Drejza *et al.*, 2014), il s'étend de la pointe de La Martinique au nord jusqu'à la butte à la Croix au sud. La dérive littorale principale est convergente vers le centre de la baie, au niveau de l'ancien goulet (figure 58). Ainsi dans la moitié nord, la dérive principale est orientée vers le sud et dans la moitié sud, la dérive est orientée vers le nord-nord-ouest. Au centre, on retrouve des dérives littorales secondaires divergentes.

Les côtes sont principalement des tombolos / cordons littoraux (83,5 % soit 14,7 km). Les tombolos/cordon littoraux sont dunifiés. Ce cordon s'étire entre deux noyaux rocheux, à savoir le cap de la Martinique sur l'île de Cap-aux-Meules au nord et l'île du Havre-Aubert au sud (figure 57 et figure 58). Il fait partie d'un système de double tombolo qui relie les deux îles entre elles. Ainsi, à l'est, le cordon sableux est ouvert sur la baie de Plaisance et le golfe du Saint-Laurent, mais à l'ouest, il est bordé par un marais maritime et la lagune de la baie du Havre aux Basques qui est elle-même délimitée par un autre cordon sableux à l'ouest (la Dune de l'Ouest). Au niveau des noyaux rocheux, on retrouve des falaises rocheuses sédimentaires (6,8 % soit 1,2 km) et des falaises rocheuses à sommet meuble (8,9 % soit 1,6 km). Au pied des falaises, on retrouve un petit secteur de terrasse de plage de 0,1 km (0,8 %). La côte de cette cellule est majoritairement végétalisée (66,6 %). Environ un cinquième de la côte est en érosion (18,1 %), 7,7 % sont semi-végétalisés, 0,4 % en accrétion. De plus, 7,3 % ont été artificiellement stabilisées par des infrastructures de protection. Cela correspond à 1 segment d'enrochement de 1,3 km au niveau de la plage de la Martinique. Cet enrochement semble en bon état sur toute sa longueur et a été mis en place par le MTQ afin de protéger la route 199.

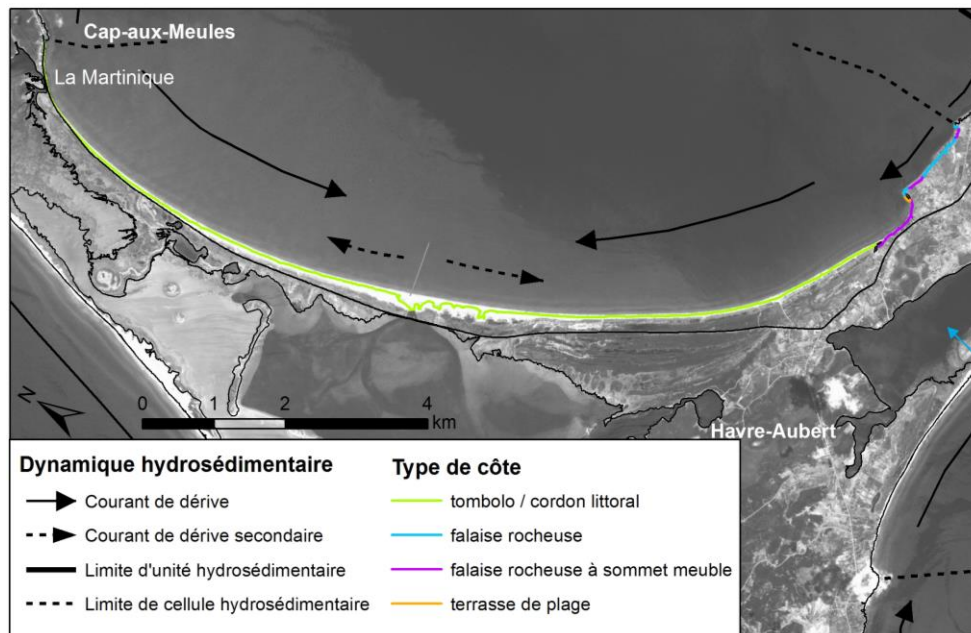


Figure 58. Types de côte du site de la baie de Plaisance

L'IBSP moyen du site de la baie de Plaisance est de 40,4 et il varie entre 1,9 et 107,3 avec un écart type de 18,8. Le volume moyen pour chaque segment de 100 m de côte est de 2184,2 m³ et varie entre 112,9 et 8180,5 m³ avec un écart type de 1048,7. La largeur moyenne des plages est de 50,9 m. Cependant au niveau de l'enrochement de la Martinique, dans le nord du site témoin, la largeur moyenne n'est que de 11,9 m et varie entre 7,4 et 17,5 m lorsque la plage est présente. Pour les 500 m les plus au nord du tombolo, juste avant le cap rocheux, il n'y a plus de plage au pied de l'enrochement. La largeur moyenne des autres plages est de 53,1 m et varie entre 21,3 et 222,4 m avec un écart type de 22,4. Comme 248 mesures de plages ont été faites dans des secteurs naturels et seulement 14 au pied de l'enrochement, la moyenne globale des plages de la baie correspond plutôt à celle des plages naturelles avec une moyenne de 50,9 m. L'IBSP et les volumes sont également plus faibles en avant des enrochements que pour le reste de la baie : IBSP de 4,9 versus 42,4 et volume moyen de 218,9 m³ versus 2295,1 m³.

Ce site correspond aux cartes d'hydrodynamique n°65, d'exposition à l'érosion et à la submersion n°65 et d'exposition des sites suivis n°110A et B et 11A et B du *volume I* du présent projet (Drejza *et al.*, 2014).

5.5.2 Caractérisation humaine

Dans ce site, deux secteurs sont suivis par la direction territoriale du MTQ (figure 59), à savoir :

- F0102 : Le pont-jetée du Havre-au-Basques (3,0 km)
- F0103 : La Martinique (1,9 km)

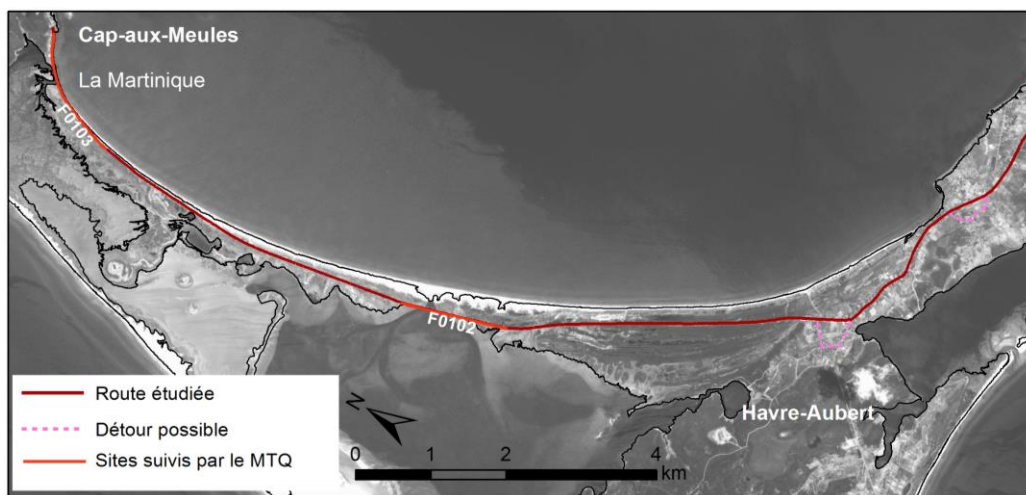


Figure 59. Sites suivis et détour du site de la baie de Plaisance

Ce site est principalement constitué de terres publiques non bâties. Ainsi, seule l'extrémité sud du tombolo, là où il se rattache à côte, comprend des constructions résidentielles. Par contre, les secteurs rocheux comprennent du bâti résidentiel non dense.

Dans ce secteur, la route 199 constitue le seul lien entre les îles du Cap-aux-Meules et du Havre-Aubert. Ainsi, aucune voie de contournement n'est possible en cas d'interruption du service excepté pour deux petits secteurs sur l'île de Havre-Aubert (figure 59). La seule possibilité est un transport maritime entre le port de Cap-aux-Meules et celui du Havre-Aubert. C'est ce qui est prévu dans le plan de secours advenant le cas d'une interruption qui se prolongerait (L. Vigneau, comm. personnelle, 2014). En effet, l'île centrale (Cap-aux-Meules) présente tous les services gouvernementaux, dont le seul service d'hôpital de l'archipel.

5.5.3 Évolution historique de la côte

La comparaison des données de largeur et de volume des plages entre 2008 et 2012, soit entre les données aéroportées obtenues en 2008 lors du relevé effectué par le laboratoire (voir méthodologie du relevé dans Bernatchez *et al.*, 2010) et celui réalisé avec le LiDAR terrestre pour ce projet, est présentée à la figure 60 et la figure 61. Globalement, les plages sont similaires entre les deux relevés, bien que le sud de la baie présente une légère augmentation de la largeur et du volume des plages, alimenté par l'érosion moyenne de 0,44 m/an des falaises situées en amont.

L'analyse des volumes permet aussi de faire ressortir les différences au sein de la cellule. Ainsi, on peut constater que le centre de la baie est bien une zone de convergence des dérives littorales et présente une plage très large (près de 140 m en 2012 au niveau de l'ancien goulet) avec un grand volume de sable. Bien que la plage se soit élargie entre 2008 et 2012, le volume lui a légèrement diminué, la plage a donc probablement seulement changé de forme. Dans le nord, soit au niveau de l'enrochement qui protège la route 199, les plages sont absentes puis s'élargissent lentement au niveau de l'effet de bout.

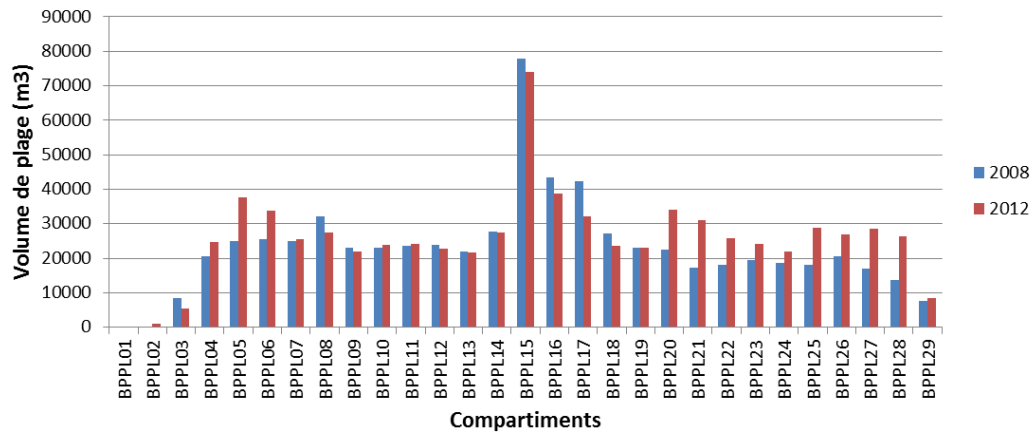


Figure 60. Évolution du volume de plage (m³) entre 2008 et 2012 du nord (BP01) au sud (BP29) de la baie de Plaisance

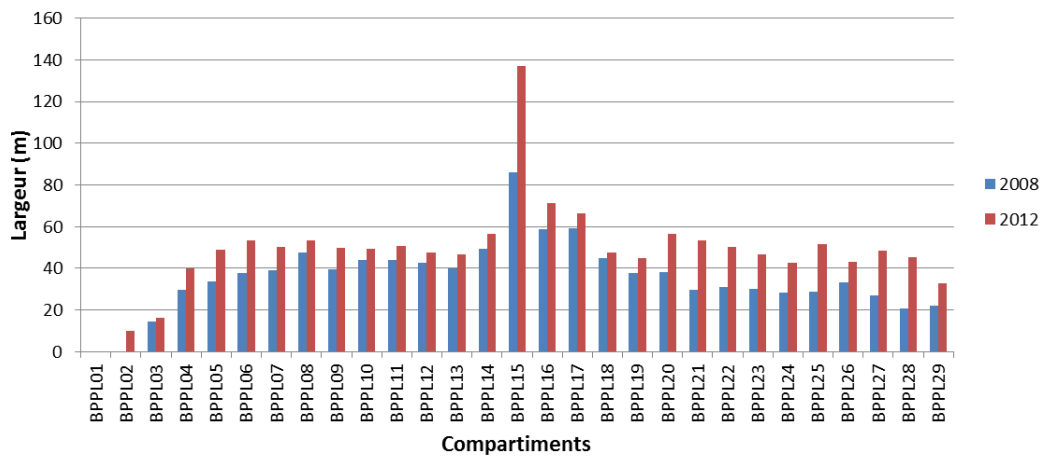


Figure 61. Évolution de la largeur des plages (m) entre 2008 et 2012 du nord (BP01) au sud (BP29) de la baie de Plaisance

Pour plus d'information sur cette cellule et son évolution historique, consultez Bernatchez *et al.* (2010).

Les côtes de cette cellule sont prévues d'évoluer au rythme moyen de - 0,22 m/an selon l'étude de Bernatchez *et al.* (2012 b). Cependant, cette moyenne masque une grande disparité, puisque selon les unités géomorphologiques homogènes cela varie entre une accumulation moyenne de 1,08 m/an et une érosion moyenne de -1,29 m/an (figure 62). Cela varie aussi beaucoup selon les types de côtes avec une évolution moyenne de - 0,58 m/an pour les falaises rocheuses (entre -0,63 et -0,46 m/an selon les unités géomorphologiques homogènes), -0,29 m/an pour les falaises rocheuses à sommet meuble (-0,20 à -0,32 m/an), -0,09 m/ pour l'unité homogène de terrasse de plage et -0,10 m/an pour les tombolos. Pour ce dernier type de côte, le résultat est le plus variable puisque le centre de la baie a des taux probables de 1,08 m/an alors que les extrémités ont des taux de - 1,29 m/an.

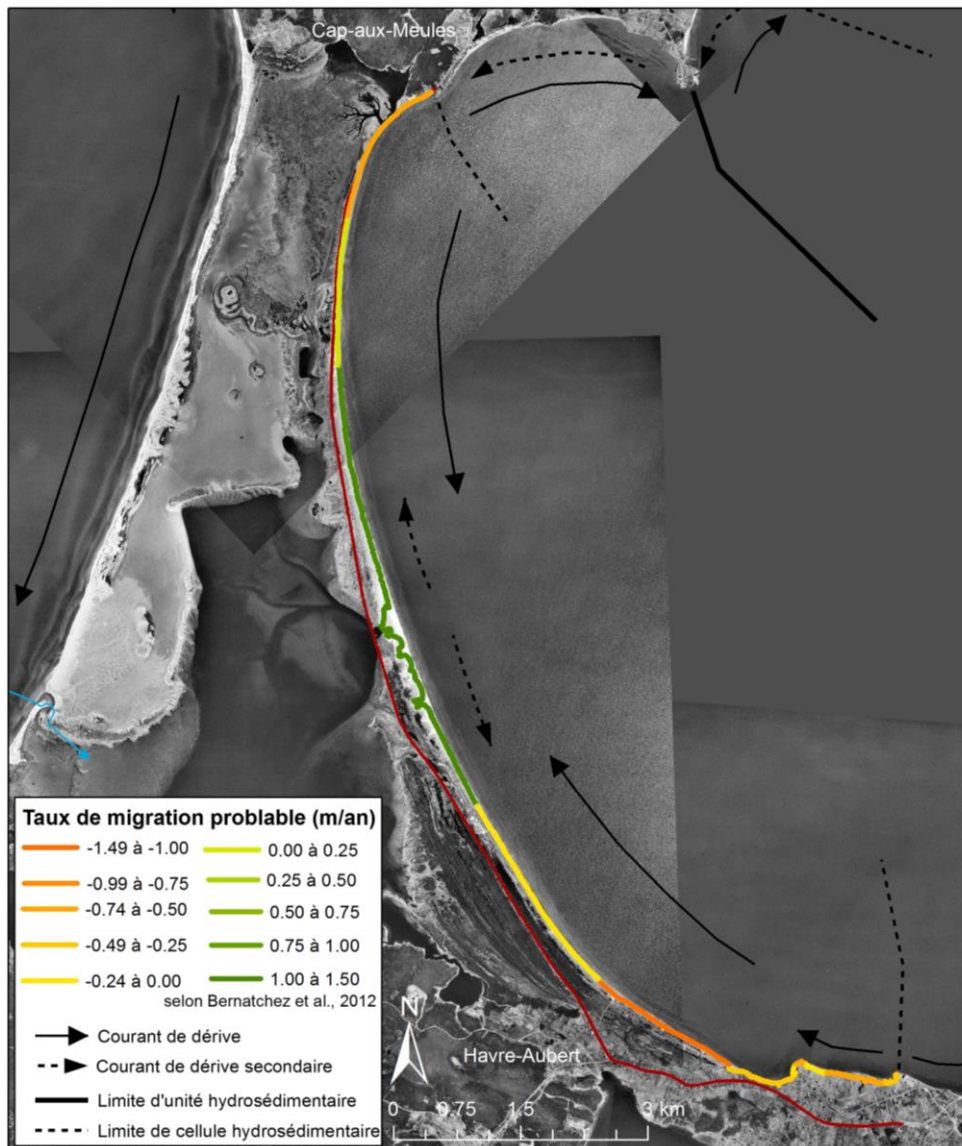


Figure 62. Taux de migration probables de la baie de Plaisance (d'après Bernatchez et al., 2012).

Concernant l'évolution récente de la côte à l'aide du réseau de suivi de l'érosion du LDGIZC, les stations de mesure ne sont pas implantées de manière homogène dans l'ensemble du tombolo, ainsi la moyenne des 42 stations de suivi de -0,31 m/an (2005-2013) ne reflète pas l'évolution de l'ensemble de la forme géomorphologique, mais seulement des secteurs actifs qui ont été mesurés. Les falaises de Havre-Aubert connaissent une migration moyenne de -0,45 m/an (2005-2012) ce qui correspond avec les taux probables.

5.6 Description du site de Pointe-aux-Loups

Ce site témoin se situe sur l'archipel des îles de la Madeleine dans la municipalité et la MRC des Îles-de-la-Madeleine. La côte est d'une longueur de 39,6 km et se situe au nord-ouest de l'archipel (figure 63). Dans ce secteur, 23,2 km de route 199 sont à l'étude.

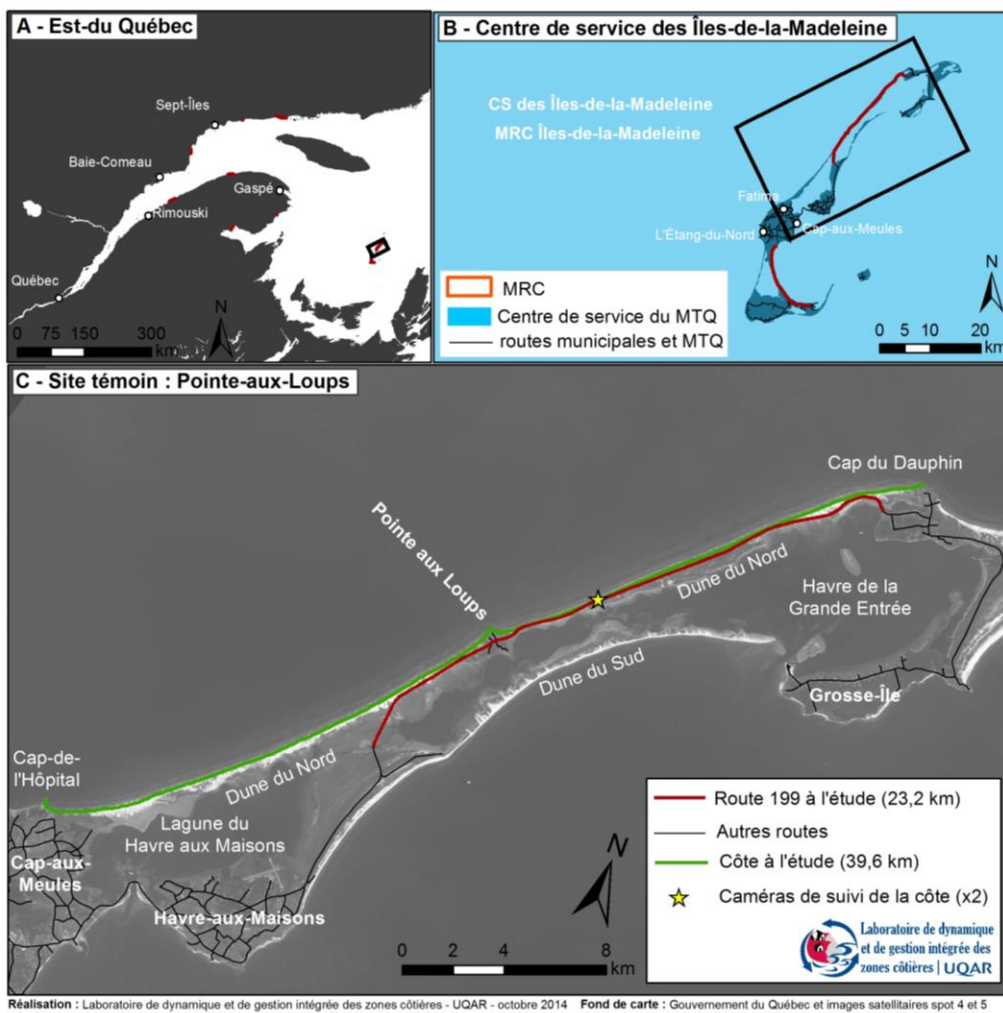


Figure 63. Site de Pointe-aux-Loups

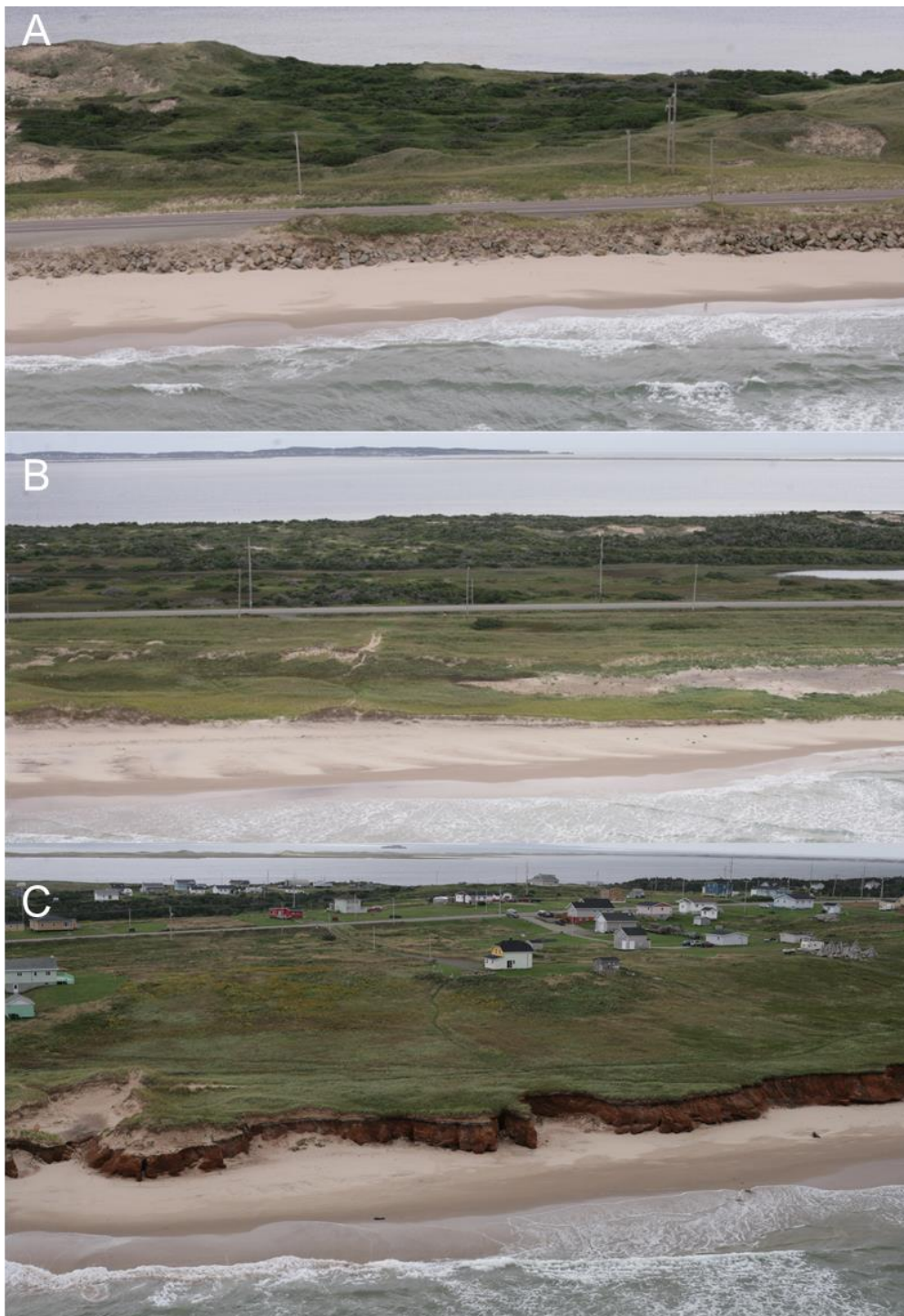


Figure 64. Photos du site de Pointe-aux-Loups A - secteur de tombolo enroché pour protéger la route 199 B – secteur de tombolo en érosion C – secteur de falaise rocheuse (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

5.6.1 Caractérisation physique

Le site témoin correspond à l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups et comprend deux cellules soit celle de Fatima au sud, du cap de l'hôpital à la pointe aux Loups (fiche n°100, annexe 4 de Drejza *et al.*, 2014) et celle de Pointe-aux-Loups au nord, jusqu'au cap du Dauphin (fiche n°101, annexe 4 de Drejza *et al.*, 2014) (figure 65). Les deux cellules sont de taille équivalente avec 20,4 km de côtes pour celle de Fatima et 19,2 km pour celle de Pointe-aux-Loups. La dérive littorale principale va du sud-ouest vers le nord-est. Au niveau des tombolos/cordons littoraux, on retrouve de courants de retour.

Le type de côte principal est les tombolos / cordons littoraux (92,9 %). En effet, on retrouve deux grands systèmes sableux qui relient l'île de Pointe-aux-Loups avec, au sud, l'île du Cap-aux-Meules et au nord avec la Grosse-Île (figure 64 et figure 65). Comme dans le reste de l'archipel, ce système de cordon sableux/tombolo est double et on retrouve au sud un autre cordon sableux relativement parallèle à celui du site d'étude (la dune du Sud, figure 63). Les deux cordons forment une lagune. Comme pour le site de la baie de Plaisance, les tombolos/cordons littoraux sont dunifiés. On retrouve également au niveau des trois noyaux rocheux des falaises rocheuses sédimentaires (1,5 km soit 3,8 %), des côtes dunaires à base rocheuse à la jonction entre les tombolos dunifiés et les falaises rocheuses (0,5 km 91,3 %), des falaises rocheuses à sommet meuble (0,5 km soit 0,5 %), des falaises meubles à base rocheuse (0,2 km soit 0,4 %) et des terrasses de plage (0,2 km soit 0,4 %). Près des deux tiers des côtes de cette unité présentent des signes visibles d'érosion (24,6 km soit 62,2 %). Le reste de la côte est en partie végétalisé (7 km, soit 17,7 %), semi-végétalisé (6,5 km, soit 16,5 %). Une faible longueur (1,4 km ou 3,7 %) est artificiellement stabilisée. La côte de l'unité hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups est presque totalement naturelle (38,0 km, soit 95,9 %). Seuls 1,6 km (4,1 %) sont artificialisés. Les structures de protection que l'on retrouve se situent dans les 4 km de tombolo à l'est de l'île de Pointe-aux-Loups, dans une section où la route 199 est très proche de la côte, ainsi que sur l'île au niveau du port de pêche. Ce sont principalement des enrochements (1,4 km), des recharges en sable (0,1 km), des structures portuaires (0,1 km) et des épis rocheux (0,03 km). Les enrochements présents sont principalement très endommagés (à 73,3 %), ce qui explique que certaines portions de côtes (0,2 km) peuvent être artificialisées, mais présenter tout de même des signes visibles d'érosion.

Pour plus d'information sur cette cellule et son évolution historique, consultez Bernatchez *et al.* (2010).

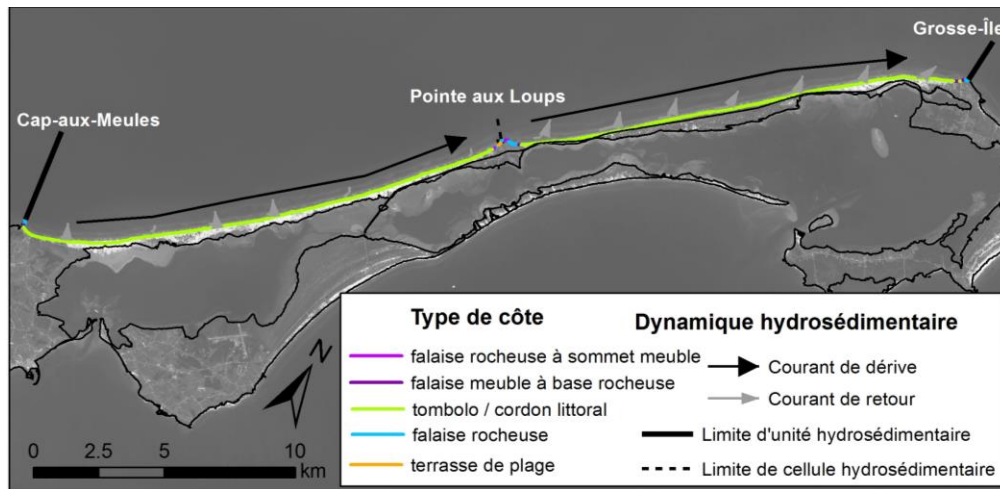


Figure 65. Types de côte du site de Pointe-aux-Loups

L'IBSP moyen pour le site de Pointe-aux-Loups est de 37,7 et il varie entre 0,5 et 285,9 selon les segments de côte. L'écart type est de 20. Le volume moyen de sédiments pour chaque tronçon de 100 m de côte pour ce site témoin est de 2032,9 m³ et varie entre 38,0 et 9436,2 m³ avec un écart type de 1047,7. La largeur moyenne des plages pour ce site est de 39,3 m et varie entre 4,7 et 129,9 avec un écart type de 15,8 m. Le site enroché F108 n'a pas pu être mesuré en 2012, bien que ce secteur a des plages très étroites, il ne représente que 1,2 km sur les 39,6 km de ce site. Les résultats moyens sont donc quand même représentatifs du site.

Ce site correspond aux cartes d'hydrodynamique n°66, d'exposition à l'érosion et à la submersion n°66 et d'exposition des sites suivis n°114 à 119 A et B du volume I du présent projet (Drejza et al., 2014).

5.6.2 Caractérisation humaine

Au niveau de ce site témoin, de multiples secteurs sont suivis par la direction territoriale du MTQ (figure 66), aussi bien à l'extérieur des tombolos exposés aux conditions du golfe du Saint-Laurent qu'à l'intérieur des lagunes. Sur les 23,2 km de routes du site témoin, un total de 3,7 km est surveillé en 7 sites :

- F0106 : Pointe-aux-Loups – Lagune Sud-Ouest (intérieur de la lagune)
- F0115 : Pointe-aux-Loups – Lagune Sud-Est (intérieur de la lagune)
- F0107 : Pointe-aux-Loups – Lagune Sud (intérieur de la lagune)
- F0109 : Pointe-aux-Loups – Lagune Est (intérieur de la lagune)
- F0116 : Mine Seleine Sud (intérieur de la lagune)

- F0108 : Pointe-aux-Loups – Golfe Sud
- F0110 : Pointe-aux-Loups – Golfe Nord

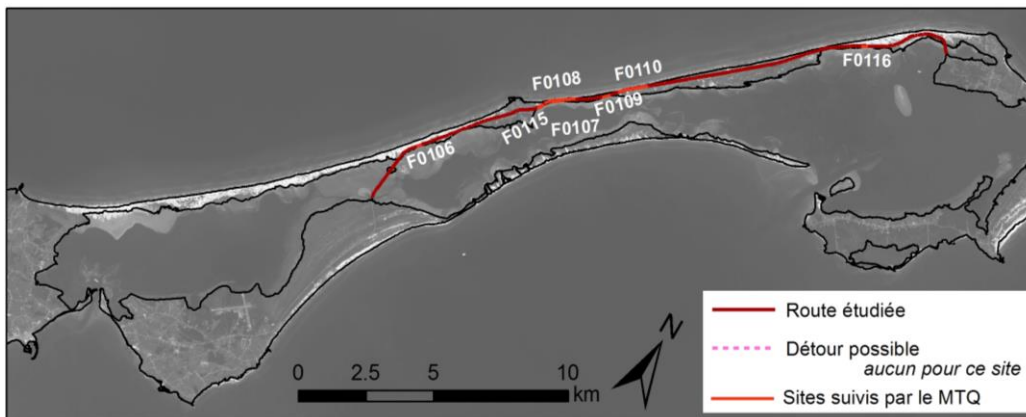


Figure 66. Sites suivis et détours du site de Pointe-aux-Loups

Ce site est principalement constitué de terres publiques non bâties. Seuls à 5 km au nord-est de l'île quelques chalets (14) sont bâtis dans la dune du nord. De plus, l'île de Pointe-aux-Loups comprend du bâti résidentiel non dense, quelques services et un port de pêche.

Dans ce secteur, la route 199 constitue le seul lien entre les îles centrales (Cap-aux-Meules et Haves-aux-Maisons) et les îles du nord de l'archipel (Pointe-aux-Loups, Grosse-Île et Grande-Entrée). Ainsi, aucune voie de contournement n'est possible en cas d'interruption du service (figure 66). La seule possibilité est un transport maritime. C'est ce qui est prévu dans le plan de secours advenant le cas d'une interruption qui se prolongerait (L. Vigneau, comm. pers. 2014). En effet, l'île centrale (Cap-aux-Meules) présente tous les services gouvernementaux, dont le seul service d'hôpital de l'archipel.

5.6.3 Évolution historique de la côte

Les côtes de cette unité hydrosédimentaire sont très dynamiques et sont prévues évoluer en moyenne à un rythme de -1,57 m/an à l'avenir (Bernatchez *et al.*, 2012b). Cette moyenne montre des différences selon les types de côtes, les unités géomorphologiques homogènes et elle est variable selon la position au sein de la cellule hydrosédimentaire (figure 67). Ainsi, les taux d'érosion sont plus élevés au sud-ouest de l'unité et plus faibles, voire positifs, au nord-est (Bernatchez *et al.*, 2010). Les terrasses de plage ont un taux de migration

probable de -0,52 m/an (une seule unité homogène, située au sein du havre de pêche). Les falaises rocheuses et les falaises rocheuses à sommet meuble ont des taux de migration probables respectifs de -0,79 m/an et -0,66 m/an, mais qui varient entre -1,26 et 0 m/an selon les unités homogènes. Les côtes dunaires à base rocheuses ont une migration moyenne de -0,69 m/an, mais qui peut varier entre 0,06 m/an (la portion dunaire peut connaître une progradation) et -1,36 m/an. Pour les falaises meubles à base rocheuse, le taux de migration probable est de -1,19 m/an (une seule unité homogène sur l'île de Pointe-aux-Loups). Finalement, les tombolos/cordons littoraux ont une migration moyenne de -1,71 m/an, mais qui varie entre une accumulation de 0,06 m/an (portion d'environ 2 km à la fin de la cellule de Pointe-aux-Loups) et -2,39 m/an (dans la cellule de Fatima).

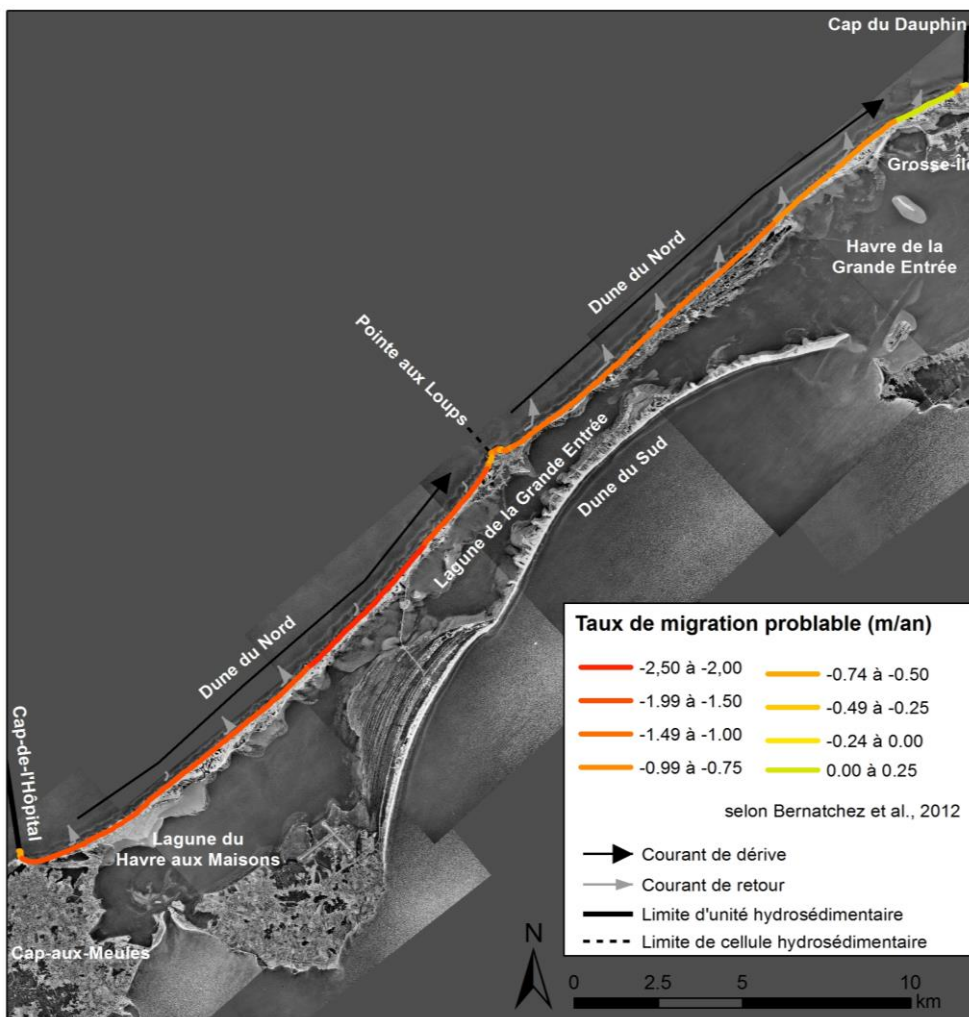


Figure 67. Évolution probable de la côte (selon Bernatchez et al., 2012)

La comparaison des données de largeur et de volume des plages entre 2008 et 2012, soit entre les données aéroportées obtenues en 2008 lors du relevé effectué par le laboratoire (voir méthodologie du relevé dans Bernatchez *et al.*, 2010) et celui réalisé avec le LiDAR terrestre pour ce projet, est présentée à la figure 68, à la figure 69, à la figure 70 et à la figure 71. Globalement, les plages sont similaires entre les deux relevés. Pour la cellule de Fatima, la largeur moyenne était de 40,5 m en 2008 et de 43,9 m en 2012. Cependant, les volumes ont augmenté, surtout au niveau de FAT 15 à 17. Le volume total des plages de cette unité est ainsi passé de 1,09 million de m³ en 2008 à 1,41 million de m³ en 2012. Pour la cellule de Pointe-aux-Loups, la largeur moyenne était de 33,5 m en 2008 et de 34,0 m en 2012. Pour cette dernière cellule, les volumes sont restés globalement identiques à savoir 0,85 million de m³ en 2008 et en 2012 (pour les secteurs pour lesquels les données existent pour les deux relevés).

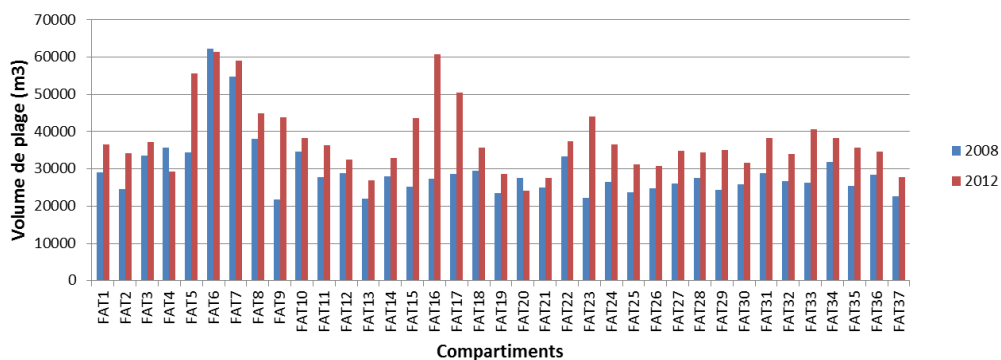


Figure 68. Évolution du volume des plages (m³) de la cellule Fatima entre 2008 et 2012

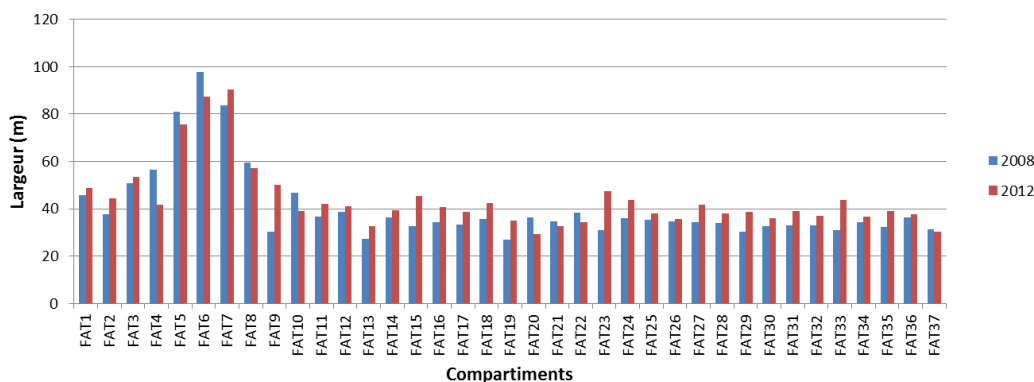


Figure 69. Évolution de la largeur des plages (m) de la cellule de Fatima entre 2008 et 2012

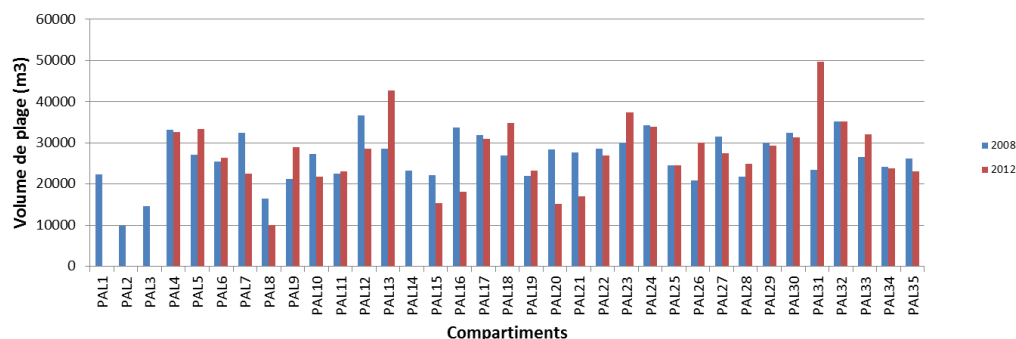


Figure 70. Évolution du volume des plages (m³) de la cellule de Pointe-aux-Loups entre 2008 et 2012

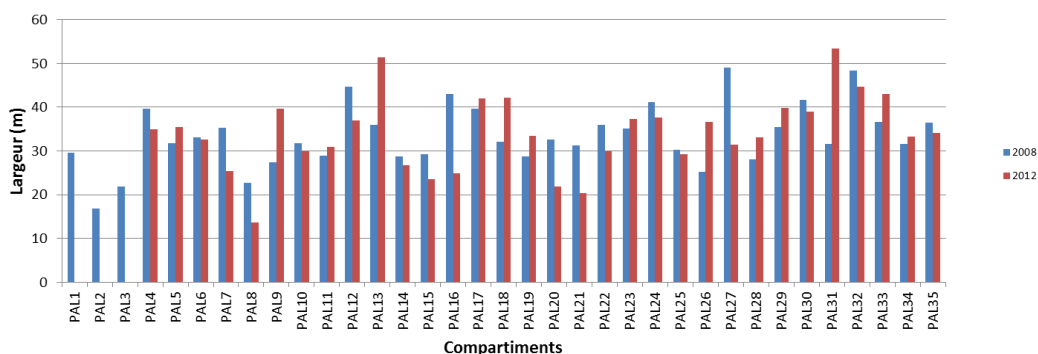


Figure 71. Évolution de la largeur des plages de la cellule de Pointe-aux-Loups entre 2008 et 2012

Dans la cellule de Pointe-aux-Loups, une portion de côte n'a pas pu être atteinte avec le système de laser terrestre en 2012. Ainsi sur la figure 70 et la figure 71, les secteurs sans données en 2012 ne signifient pas une disparition de la plage (PAL 1 à 3).

Concernant l'évolution récente de la côte à l'aide du réseau de suivi de l'érosion du LDGIZC, la moyenne des 136 stations de mesures situées dans les tombolos/cordons littoraux est de -1,20 m/an entre 2005 et 2013. Mais selon les endroits et les années, les mesures annuelles varient entre -17,40 et +16 m. Les stations situées dans les falaises ont enregistré une migration moyenne de -0,24 m/an entre 2005 et 2013, selon les stations et les années les taux varient entre 0 et -5,30 m.

5.7 Description du site de Pentecôte

Le site de la rivière Pentecôte est situé dans la municipalité de Port-Cartier, immédiatement au sud de la rivière Pentecôte jusqu'à la pointe aux Anglais (figure 72). Ce site se situe dans la MRC de Sept-Rivières. Il s'étend sur 14,1 km de côtes. Dans ce secteur, 10,0 km de route 138 sont à l'étude.

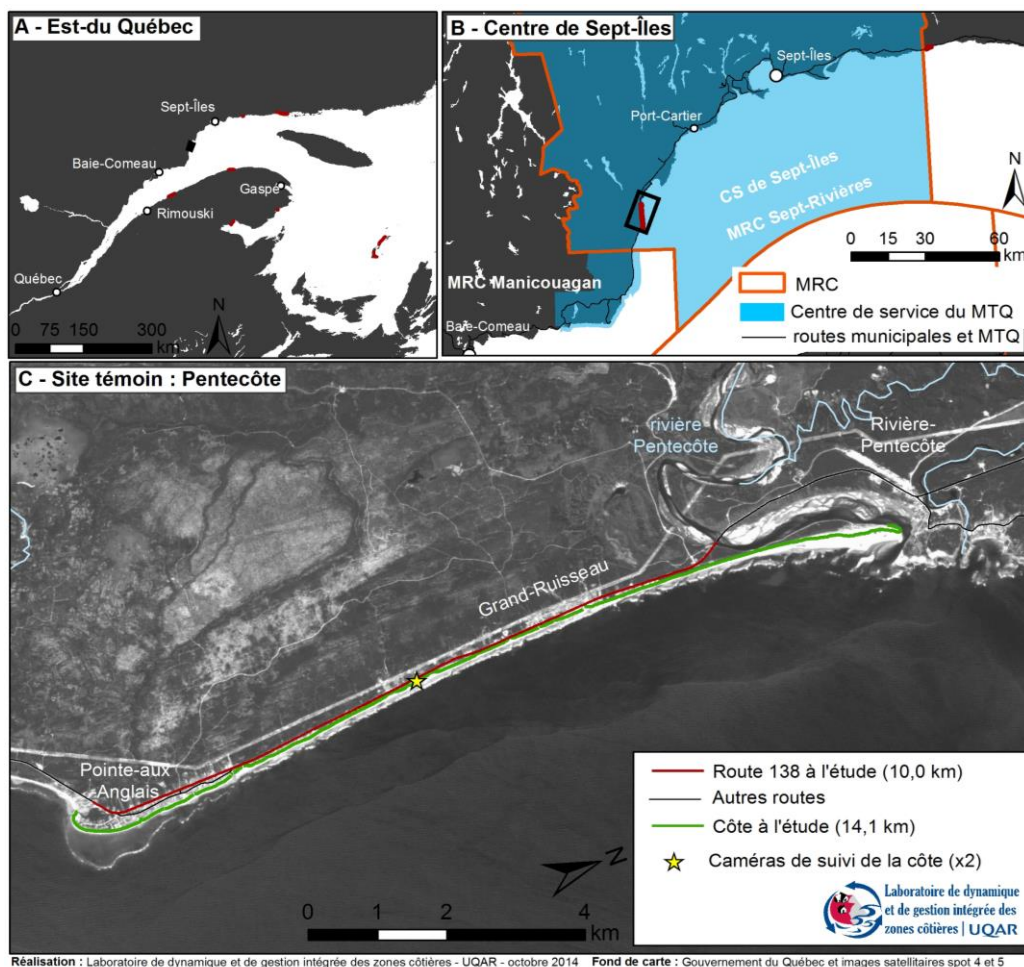


Figure 72. Site de Pentecôte

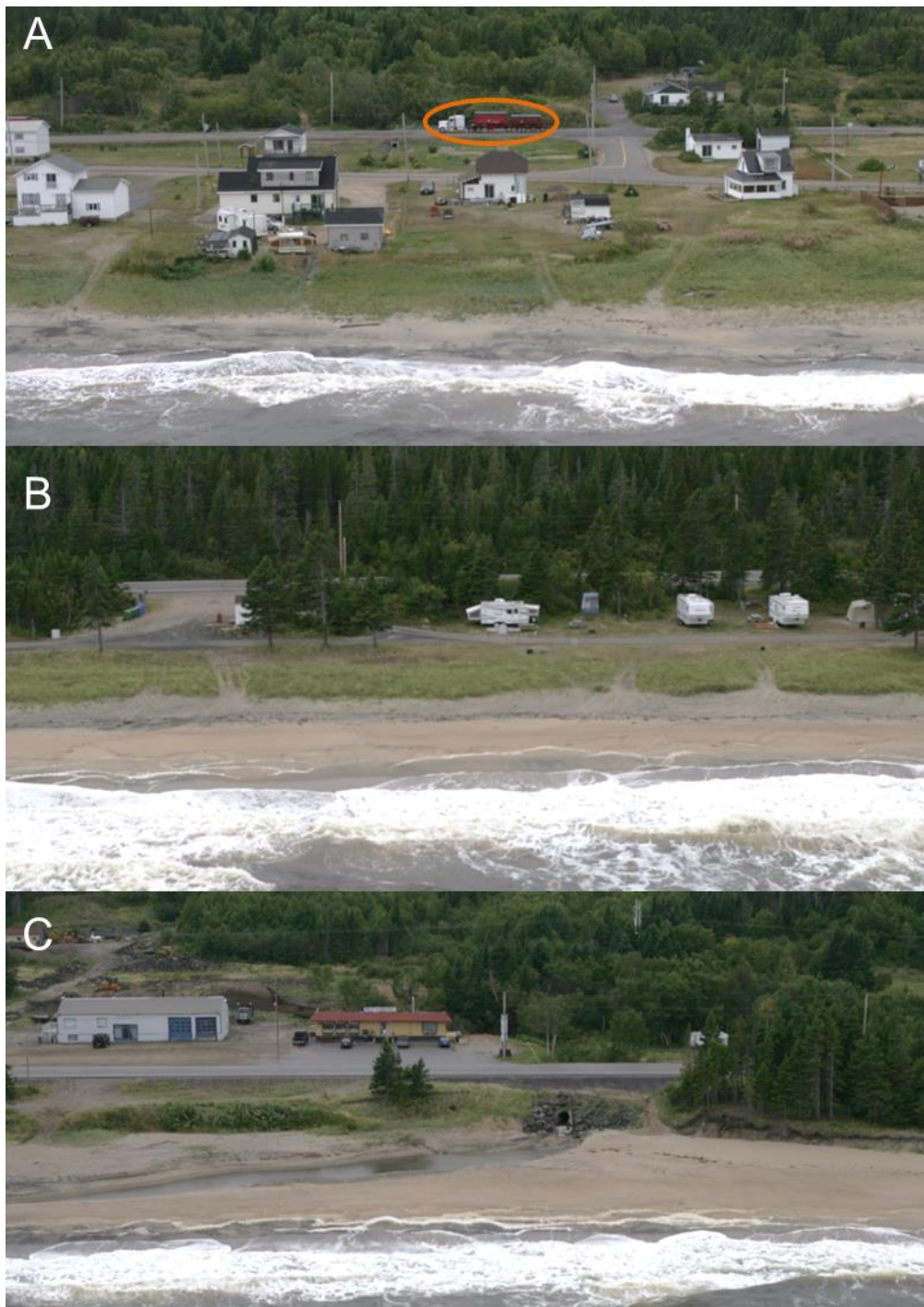


Figure 73. Photos du site de Pentecôte : A – secteur de terrasse de plage à la Pointe-aux-Anglais, B – secteur de terrasse de plage naturelle avec habitations de villégiature entre la route et la mer et C – embouchure d'un cours d'eau côtier (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

5.7.1 Caractérisation physique

La côte est principalement composée de terrasses de plage (10,6 km soit 75,2 %), de basses falaises meubles (2,5 km, soit 17,8 %) et de falaises meubles (0,5 km soit 3,7 %) (figure 73 et figure 74). À l'embouchure de la rivière Pentecôte, mais aussi à l'embouchure d'un petit cours d'eau côtier, deux petites flèches littorales se sont développées pour un total de 0,5 km (3,3 %). La forme élancée qui s'étire sur plus de 2,5 km au nord du pont de la rivière Pentecôte n'est pas une flèche littorale (excepté sur les 200 derniers mètres). Il s'agit plutôt de falaises et basses falaises meubles ainsi que de terrasses de plage. Le fait que le dernier méandre de la rivière soit situé à proximité de la côte peut induire en erreur, mais des relevés sur le terrain montrent bien l'origine de la forme.

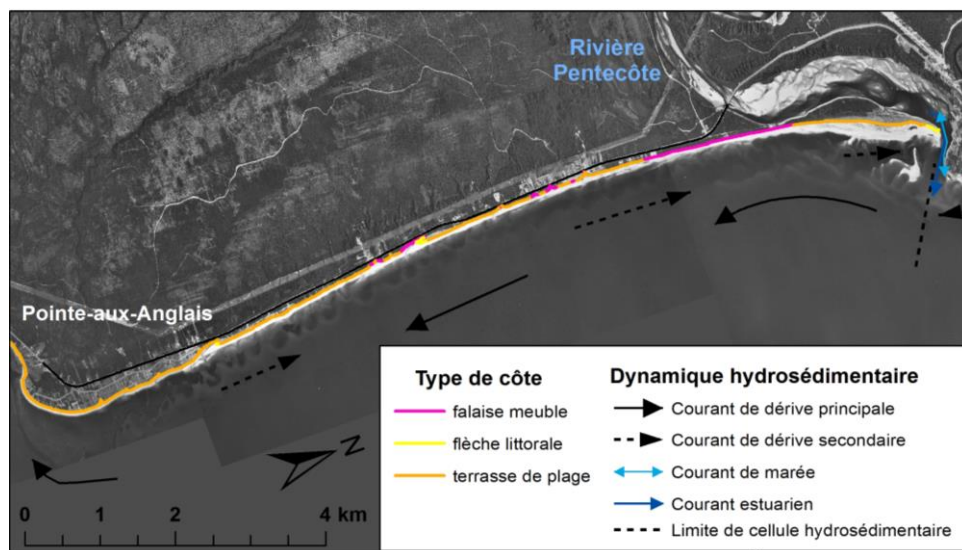


Figure 74. Type de côte du site de Pentecôte

L'estran est sableux et très large. La largeur moyenne des plages est de 57,9 m (std. 22,9) et 96,2 % sont dans la catégorie de plages très larges (plus de 30 m), le reste étant classé comme des plages larges. L'IBSP moyen est de 99,9, ce qui est, de loin, le plus élevé de tous les sites témoins (23,1 à 99,9 – 2^{ème} valeur la plus élevée 60,8).

De nombreux petits cours d'eau côtiers traversent la route 138 pour se jeter dans le golfe du Saint-Laurent. Au niveau de chacun des ponceaux de la route 138, l'indentation provoquée par le cours d'eau permet aux vagues de pénétrer avec plus de force vers la côte accentuant l'érosion et menaçant la route 138 en plusieurs endroits. C'est à ces endroits que l'on retrouve toutes les structures de protections présentes sur le site témoin à savoir 0,3 km (en 2010) se répartissant entre 0,2 km d'enrochements et 0,1 km de recharge en sable.

Les côtes de ce site témoins sont végétalisées sur près de la moitié de leur longueur (6,7 km soit 47,5 %), semi-végétalisées sur 1,9 km (13,6 %), en érosion sur 4,0 km (28,6 %) et en accumulation sur 1,5 km (10,3 %). Le secteur en accumulation est situé à l'extrémité nord du site, à l'embouchure de la rivière Pentecôte. Cette dernière est encore naturelle et présente donc des apports en sédiments importants, de plus, un courant de dérive secondaire vers le nord est présent (figure 74).

D'un point de vue de la dynamique hydrosédimentaire, le site d'étude se trouve dans la partie amont de la cellule hydrosédimentaire de la pointe aux Anglais (fiche n°135, annexe 4 de Drejza *et al.*, 2014). Alors que notre site s'arrête à la pointe aux Anglais, la cellule se continue vers le sud sur plus de 16 km jusqu'au ruisseau du Pin Gris. La dérive littorale principale va du nord vers le sud. Mais une dérive littorale secondaire est présente du sud vers le nord sur l'ensemble du secteur.

Ce site correspond aux cartes d'hydrodynamique n°88, d'exposition à l'érosion et à la submersion n°88 et d'exposition des sites suivis n°171 du *volume I* du présent projet (Drejza *et al.*, 2014).

5.7.2 Caractérisation humaine

Au niveau de ce site témoin, plusieurs secteurs sont suivis par la direction territoriale du MTQ (PEN27, PEN27, PEN26) pour un total d'environ 7,5 km (figure 75).

L'occupation humaine occupe seulement une mince frange côtière de moins de 500 m. L'arrière-côte ne présente donc pas de voies alternatives en cas de rupture de service de la route 138, sauf en de très rares et courtes exceptions (2 rues pour un total de moins de 300 m) (figure 75).

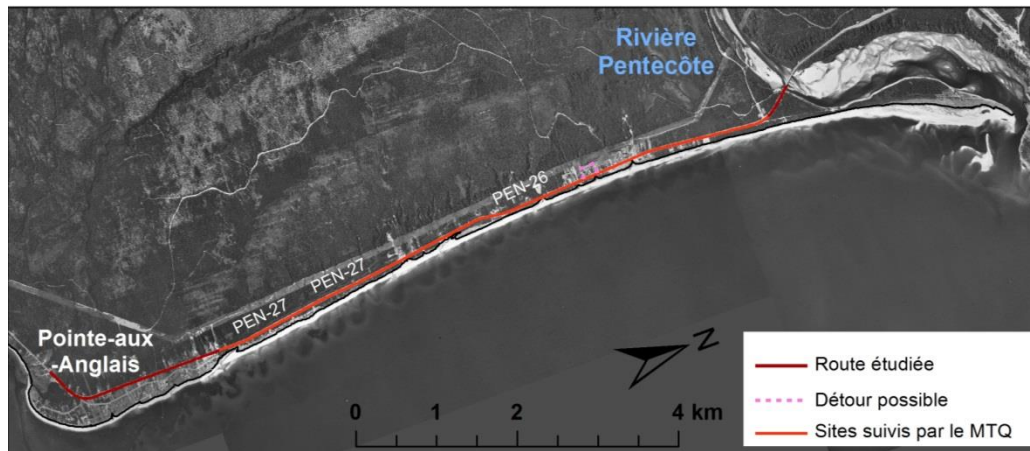


Figure 75. Sites suivis et détour du site de Pentecôte

5.7.3 Évolution historique de la côte

L'évolution par photo-interprétation de la côte indique une migration moyenne entre 1930 et 2008 de 0,10 m/an. Cette accrétion provient de la flèche littorale et des terrasses de plage qui ont des taux de migration moyens de 0,70 et 0,16 m/an respectivement. Les falaises et basses falaises meubles connaissent une migration moyenne négative (c'est-à-dire une érosion) de -0,11 (basse falaise) et de -0,15 (falaise). La période qui a connu l'érosion la plus importante est de 1982 à 1987 avec une migration moyenne de -1,33 m/an tous types de côtes confondus, mais variant entre -2,99 m/an dans les falaises meubles, -2,71 m/an dans les basses falaises meubles et -0,90 m/an dans les terrasses de plage. Cependant, la période que nous avons retenue comme étant la plus représentative de l'évolution future est la période la plus récente à savoir 2001 à 2008. Le taux de migration moyen y est de -0,24 m/an et variant entre -0,67 m/an pour les falaises meubles, -0,37 m/an pour les basses falaises meubles et -0,18 m/an pour les terrasses de plages. Ces moyennes sont évidemment variables selon les secteurs (figure 76).

Concernant l'évolution récente de la côte à l'aide du réseau de suivi de l'érosion du LDGIZC, la moyenne des 5 stations de mesures situées au niveau de falaises meubles indiquent une migration moyenne de -0,48 m/an entre 2000 et 2013. Selon les années et les stations, les mesures varient entre 0,00 et -2,80 m. Pour les secteurs de terrasse de plage, 26 stations sont implantées depuis 2000 et indiquent une migration moyenne de -0,16 m/an. Cela

correspond avec les données obtenues à l'aide des photographies aériennes entre 2001 et 2008. Selon les années et les stations de suivi, les mesures annuelles de migration varient entre 7,35 m et -8,49 m.

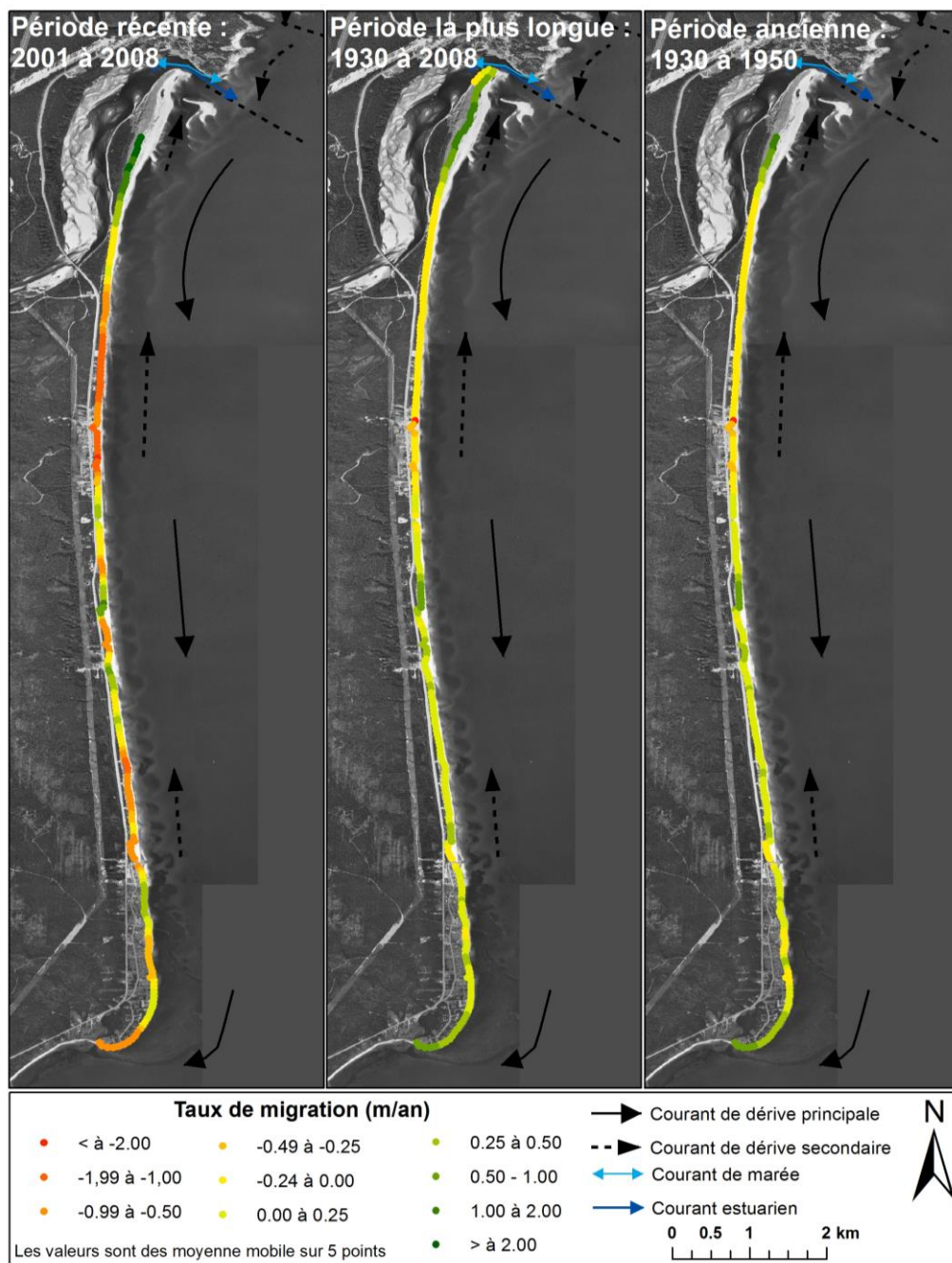


Figure 76. Évolution de la côte du site de Pentecôte

5.8 Description du site de rivière au Bouleau

Le site de la rivière au Bouleau est situé dans la municipalité de Rivière-au-Tonnerre, des deux côtés de l'embouchure de la rivière au Bouleau (figure 77). Il se situe dans la MRC de la Minganie. La longueur de côte étudiée est de 2,4 km. Dans ce secteur, 2,1 km de route 138 sont à l'étude.

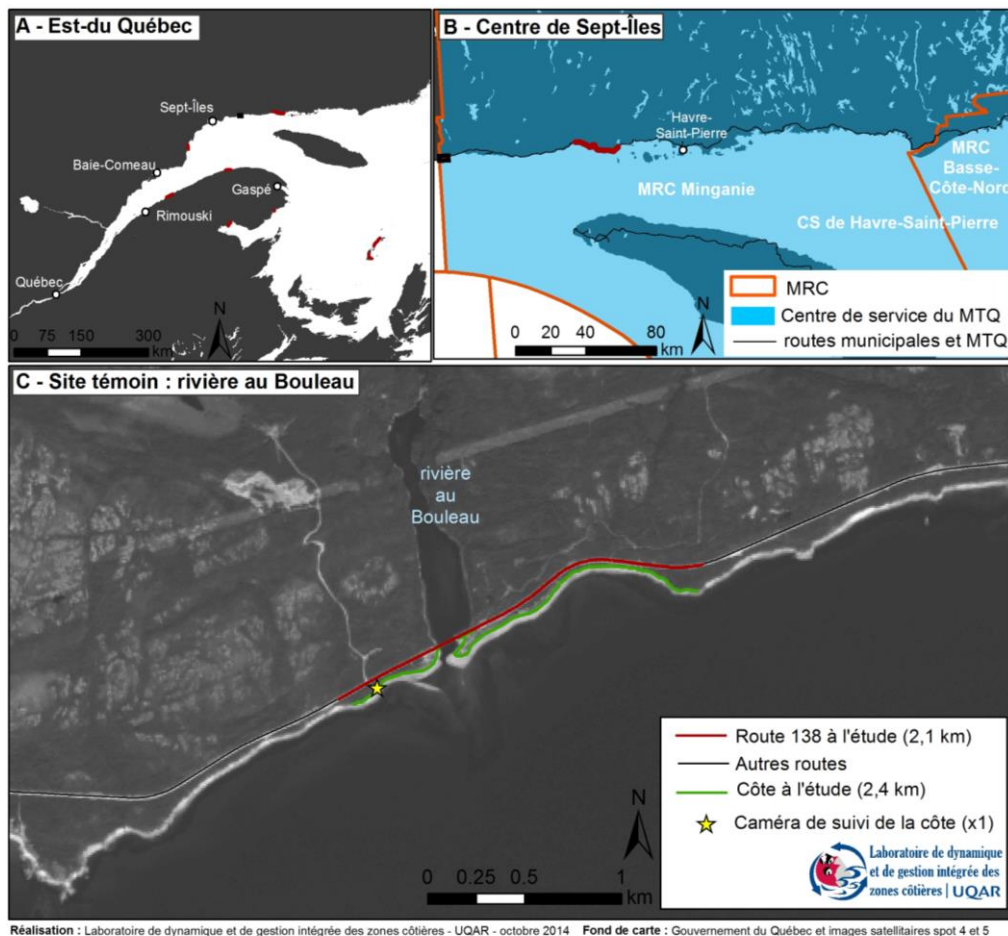


Figure 77. Site de rivière au Bouleau

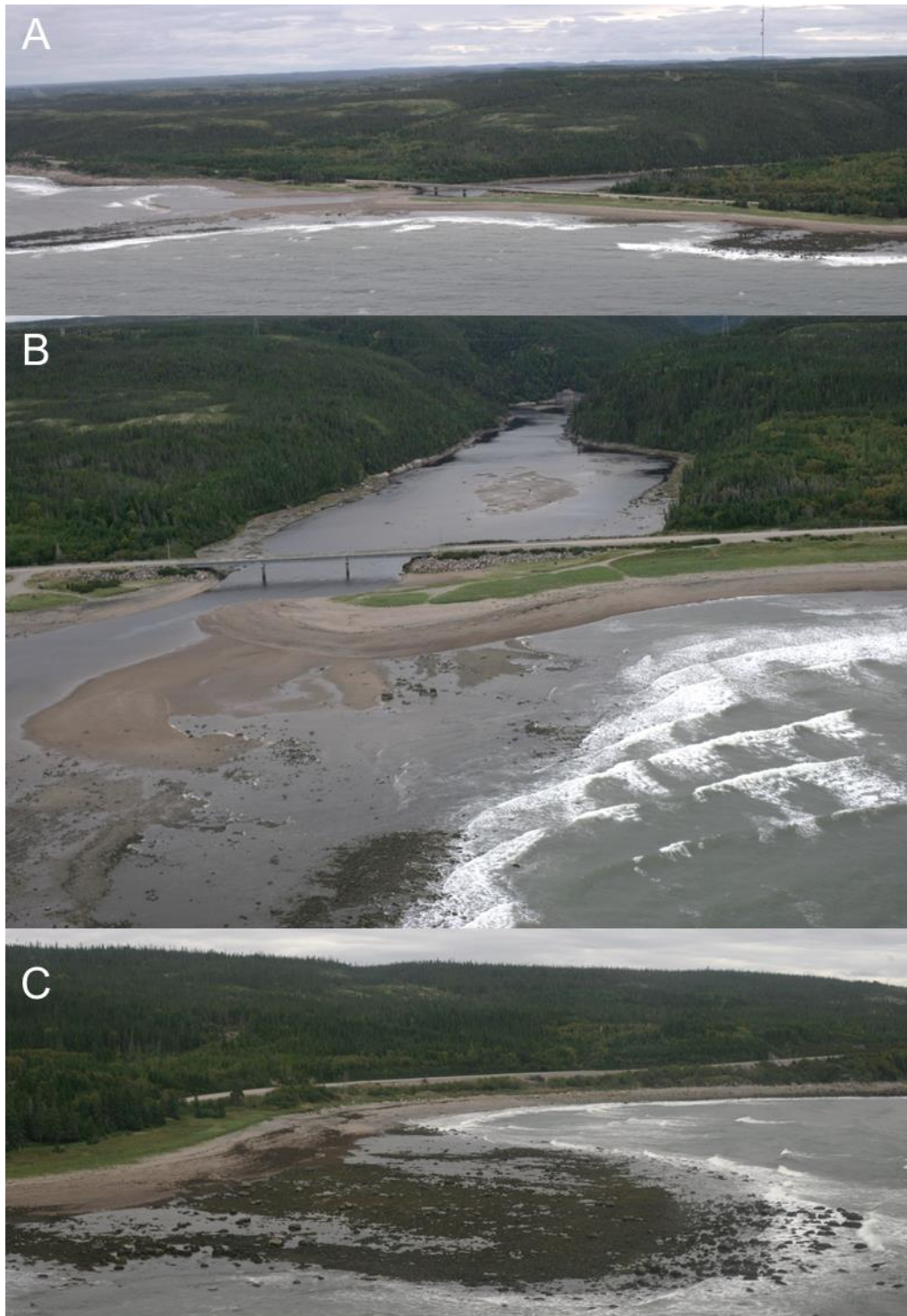


Figure 78. Photos du site de rivière au Bouleau : A - vue vers l'ouest, B – flèche littorale à l'embouchure de la rivière au Bouleau et C – vue vers l'est (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

5.8.1 Caractérisation physique

Le site d'étude est constitué principalement de terrasses de plage (1,1 km soit 45 %), de microfalaïses de till (0,6 km soit 24,2 %), d'une flèche littorale de 0,3 km (13,1 %) et de basses falaises de till (0,2 km soit 10,1 %) (figure 78 et figure 79). Mais on retrouve également deux petites sections de 0,1 km de côtes à remblai et de falaise de till. Comme la plupart des flèches littorales, celle de la rivière au Bouleau, située du côté est de l'embouchure, connaît une grande variabilité (figure 82), il est de plus intéressant de noter que les bancs sableux sous-marins présents à l'embouchure de la rivière sont très mobiles comme cela a pu être constaté entre nos visites sur le terrain. Plus des deux tiers de la côte est stable ou végétalisée (70,9 %) et un tiers est en érosion (29,1 %). La côte du site d'étude est presque totalement naturelle (95,4 %), excepté les deux segments de côtes de remblai au niveau des deux approches du pont de la route 138 qui sont enrochées (total de 0,1 km).

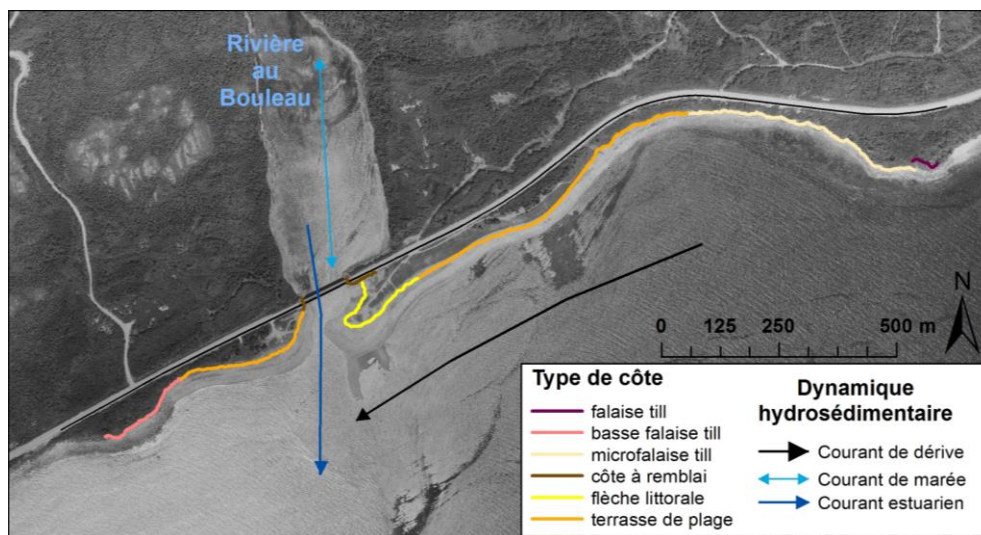


Figure 79. Types de côte du site de rivière au Bouleau

Il s'agit d'une partie de la cellule hydrosédimentaire de la rivière au Bouleau qui fait un total de 6,3 km et qui se trouve en partie dans la MRC de Sept-Rivières et en partie dans la MRC de la Minganie (fiche n°139, annexe 4 de Drejza *et al.*, 2014). La dérive littorale est orientée d'est vers l'ouest et l'on retrouve un courant estuarien et un courant de marée à l'embouchure de la rivière au Bouleau.

La largeur moyenne des plages est de 33,9 m. L'IBSP moyen des plages de ce site témoin est de 54,0 et varie entre 7,7 et 108,2 avec un écart type de 24,1. Les volumes de plages pour chaque section de côte de 100 m ont un volume moyen de 2880,4 m³ et varient entre 294,8 et 8314,7 m³. Les plages sont plus étroites dans l'embouchure de la rivière au Bouleau et vers l'est, elles deviennent des plages de blocs qui correspondent à un till délavé, soit des dépôts glaciaires incluant des blocs grossiers (figure 80).



Figure 80. Plage de blocs à l'est du site de rivière au Bouleau (© LDGIZC-UQAR)

Ce site correspond aux cartes d'hydrodynamique n°100, d'exposition à l'érosion et à la submersion n°100 et d'exposition des sites suivis n°178 du volume I du présent projet (Drejza et al., 2014).

5.8.2 Caractérisation humaine

La presque totalité du site d'étude est suivie par le MTQ en ce qui a trait à l'érosion (sites TON-4, TON-5 et TON-6) (figure 81).

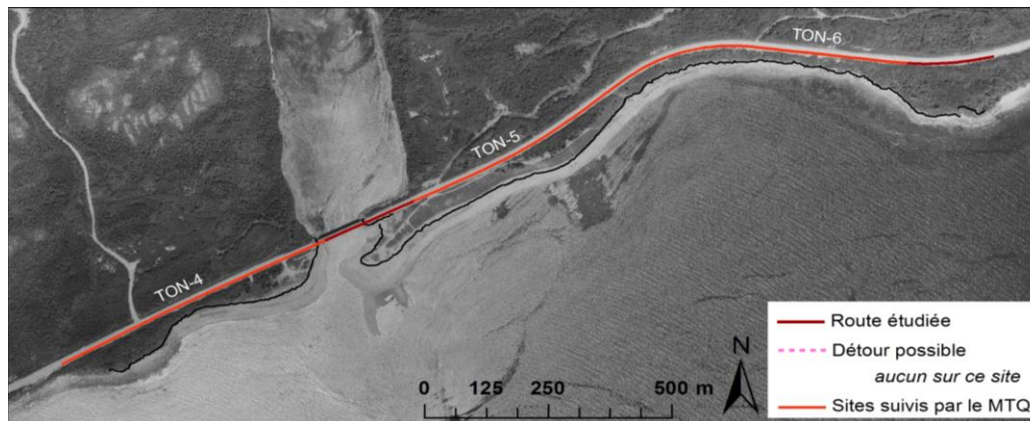


Figure 81. Sites suivis et détour du site de rivière au Bouleau

Le pont de la route 138 a été construit entre 1950 et 1976 et il constitue la seule marque d'occupation du territoire dans ce secteur. En effet, aucune construction n'est présente sur le site hormis un stationnement de terre du côté ouest de la rivière et un chemin de terre du côté est. Aucune voie de contournement n'existe en cas de rupture de service de la route 138.

5.8.3 Évolution historique de la côte

L'évolution historique de la côte du site d'étude (en excluant les données dans l'estuaire de la rivière, en amont du pont de la route 138) montre une stabilité de la côte avec une migration moyenne de 0,06 m/an. Cette moyenne varie entre -0,38 m/an et +0,36 m/an. Les côtes de till sont cependant en érosion avec une moyenne de -0,19 /an. Quelle que soit la période considérée, la migration moyenne est positive pour l'ensemble des côtes, mais il est important de noter que les côtes de till (basse falaise de till et falaise de till) sont en érosion alors que les microfalaises de till, les terrasses de plage et la flèche littorale sont globalement en accumulation (0,10 m/an entre 1950 et 2009 et 0,43 m/an entre 1997 et 2005). Ceci bien que certains secteurs puissent connaître de l'érosion annuellement. Ainsi, les taux d'érosion annuels, récents et historiques, les plus importants sont enregistrés dans les secteurs de terrasse de plage.

Comme on peut le voir sur la figure 82, la flèche littorale de l'embouchure de la rivière au Bouleau est mobile, mais les bancs sableux le sont encore plus. Ceci dénote une disponibilité sédimentaire importante et une dynamique de courants complexe. Les sédiments proviennent à la fois de l'érosion des côtes en amont de la cellule (principalement des côtes de dépôts glaciaires meubles), mais aussi de la rivière au Bouleau qui n'est pas harnachée.

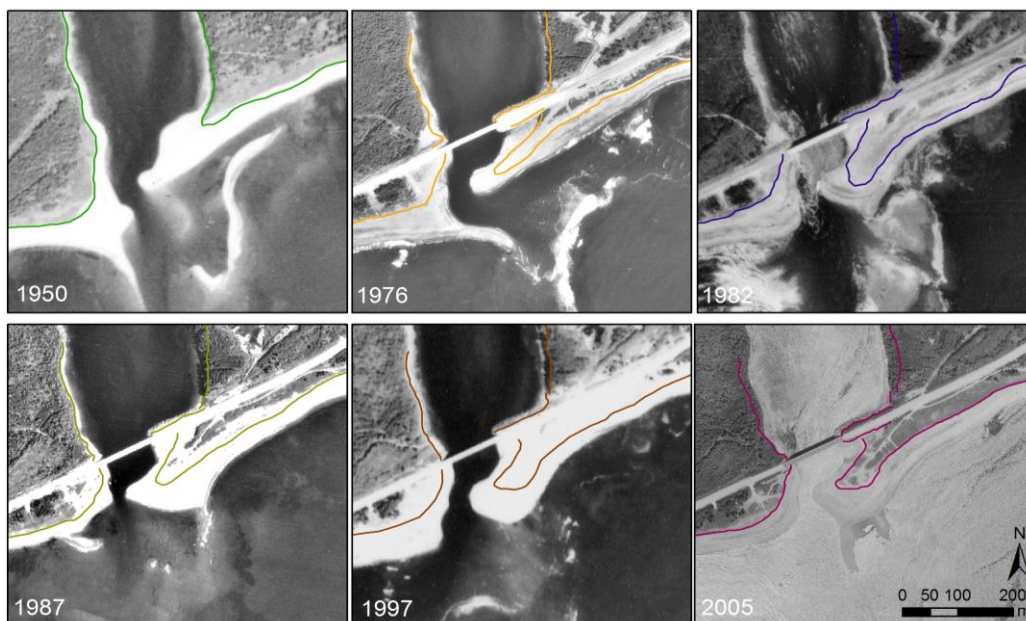


Figure 82. Évolution de la flèche littorale et des bancs sableux à l'embouchure de la rivière au Bouleau

Les stations de mesure du laboratoire implantées dans la terrasse de plage à l'est de la rivière depuis 2000 indiquent une migration moyenne de 0,19 m/an (8 stations). Cela correspond avec les données historiques d'accumulation. Cependant, les deux stations situées du côté ouest de la rivière (2008-2013) indiquent une migration moyenne de -0,99 m/an. Cela correspond également avec les mesures obtenues par photo-interprétation qui indiquent une érosion de -0,82 m/an entre 2005 et 2009 dans ce secteur.

5.9 Description du site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan

Ce site s'étend à la fois dans la municipalité de Rivière-Saint-Jean et dans celle de Longue-Pointe-de-Mingan, de part et d'autre de l'embouchure de la rivière Saint-Jean (figure 83). Il se situe dans la MRC de la Minganie. La longueur de côte est de 34,7 km. Dans ce secteur, 29,0 km de route 138 sont à l'étude.

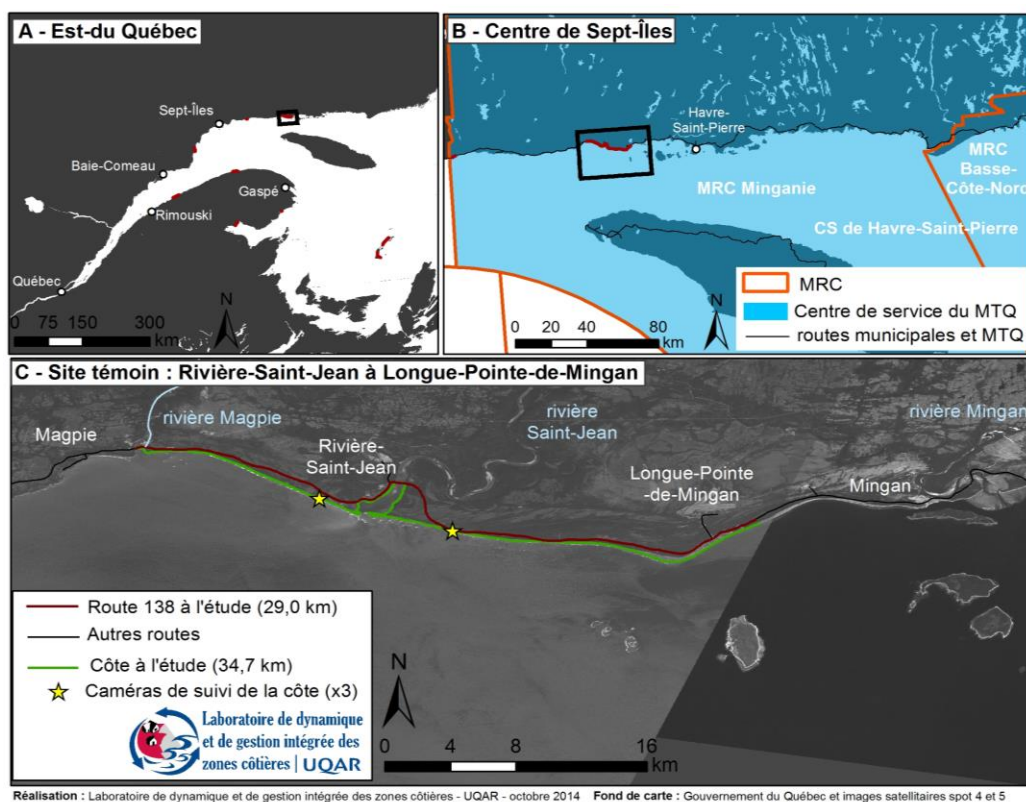


Figure 83. Site de Rivière-Saint-Jean et Longue-Pointe-de-Mingan

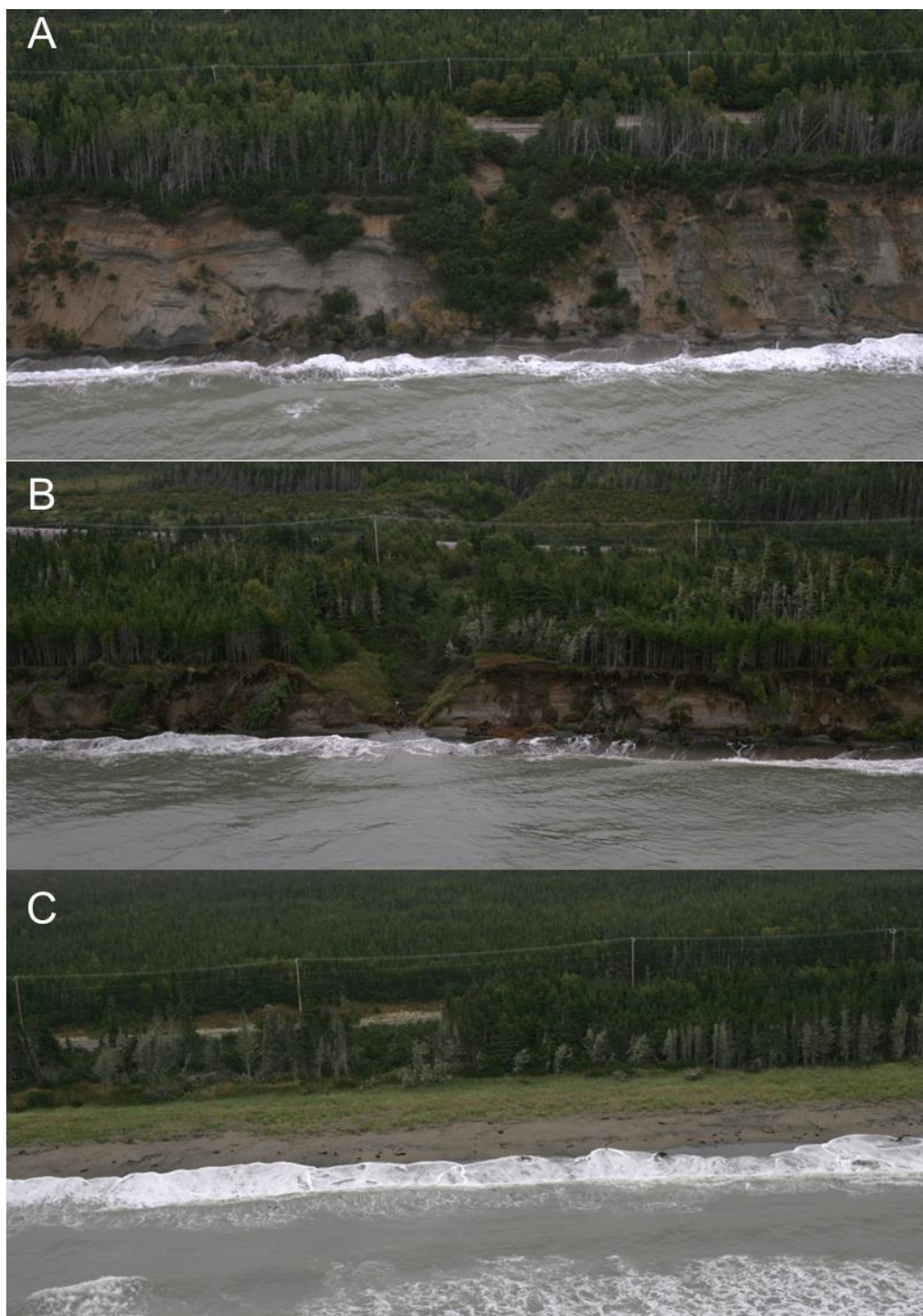


Figure 84. Photos du site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan : A – secteur des Cayes, falaises meubles, B – basse falaise meuble et C – terrasse de plage (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

5.9.1 Caractérisation physique

La côte du site à l'étude fait 34,7 km et près de la moitié est constitué de terrasses de plages (17,1 km soit 49,1 %). Celles-ci se situent presque exclusivement à l'est de la rivière Saint-Jean (figure 84 et figure 85). Les falaises meubles (11,1 km soit 31,9 %) et les basses falaises meubles (2,7 km soit 7,8 %) se situent quant à elles à l'ouest de la rivière et dans son embouchure (figure 84 et figure 85). Finalement, on retrouve également deux flèches littorales pour un total de 2,3 km (6,6 %) à l'embouchure et un marais maritime en arrière de la flèche est (0,3 km), ainsi que des côtes rocheuses ignées à l'embouchure de la rivière Magpie (1,3 km). Le site d'étude est très peu artificialisé. En effet, seul 0,8 km présente des structures de protection (2,2 % de la côte). Il s'agit d'une section d'enrochement partiellement endommagée de 0,3 km au centre du village de Rivière-Saint-Jean et d'une section de muret de bois en bon état de 0,4 km au centre du village de Longue-Pointe-de-Mingan. La côte est majoritairement en érosion (21,2 km soit 61,0 %). Le reste de la côte est soit stable ou végétalisé (10,0 km soit 28,8 %), semi-végétalisé (0,5 km soit 1,4 %) ou en accumulation (3,1 km soit 8,8 %).

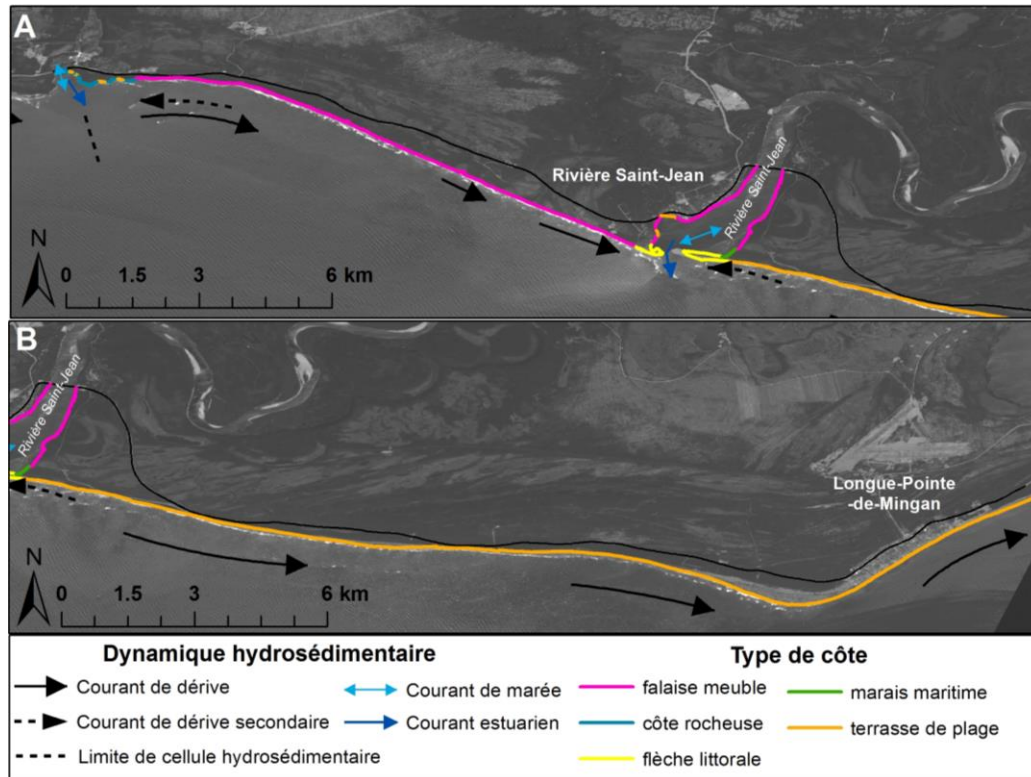


Figure 85. Types de côte du site de Rivière-Saint-Jean et Longue-Pointe-de-Mingan

Le site d'étude se situe dans l'ouest de la cellule hydrosédimentaire de Longue-Pointe-de-Mingan. Le site d'étude se termine à l'est du village de Longue-Pointe-de-Mingan, mais la cellule se continue jusqu'au quai de Mingan, ce qui fait une cellule de 42,2 km (figure 85). La dérive littorale principale va de l'ouest vers l'est, cependant, on retrouve des dérives littorales secondaires au niveau de l'embouchure de la rivière Saint-Jean et dans l'ouest de la cellule, à proximité de la rivière Maggie. Les embouchures des deux rivières présentent à la fois un courant estuarien et un courant de marée. La cellule est décrite à la fiche 151 (annexe 4 de Drejza *et al.*, 2014).

Les plages sont en moyenne plus de 2 fois moins importantes du côté ouest de la rivière Saint-Jean que du côté est. En effet, les plages situées au pied des falaises ont un volume moyen de 1345,1 m³ alors que les plages des terrasses de plages et basses falaises situées à l'est de la rivière ont des volumes moyens de 3571,3 m³. Le muret construit au centre du village de Longue-Pointe-de-Mingan étant la seule infrastructure son impact est limité sur les plages et le volume moyen y est quand même de 2890,0 m³. La différence entre l'ouest et l'est de la rivière Saint-Jean est aussi mesurable si l'on regarde l'IBSP qui est en moyenne de 30,0 à l'ouest et de 60,8 à l'est de la rivière. Pour les largeurs, la moyenne est de 26,6 m à l'ouest et de 38,8 m à l'est de la rivière. Les largeurs sont moins de 2 fois plus importantes à l'est qu'à l'ouest de la rivière alors que les volumes sont plus de 2 fois plus importants. Cela induit donc qu'il y a également une différence d'épaisseur des plages. La condition plus réfléchissante de l'environnement intertidal dû aux falaises peut expliquer cette différence. De plus dans la partie est du site, des barres sableuses d'avant côte sont présentes, ce qui n'est pas le cas dans l'ouest. Cependant, à l'ouest, une largeur de plage aussi importante au pied de falaises (plus de 25 m) montre qu'un apport important en sédiments est présent. Ici, l'apport semble être seulement l'érosion de la falaise en elle-même, car la rivière Maggie, située en amont de la dérive, est harnachée.

Ce site correspond aux cartes d'hydrodynamique n°105 à 107, d'exposition à l'érosion et à la submersion n°105 à 107 et d'exposition des sites suivis n°187 à 189 du *volume I* du présent projet (Drejza *et al.*, 2014).

5.9.2 Caractérisation humaine

Le site témoin comprend deux noyaux villageois à savoir Rivière-Saint-Jean (dans l'estuaire de la rivière éponyme) et Longue-Pointe-de-Mingan (figure 83). La route 138 est dans ce secteur le seul lien entre les communautés, ainsi, une rupture de service empêcherait tout déplacement (figure 86). L'occupation du territoire se limite à une mince frange côtière et dans plusieurs secteurs, la route est la seule infrastructure bâtie.

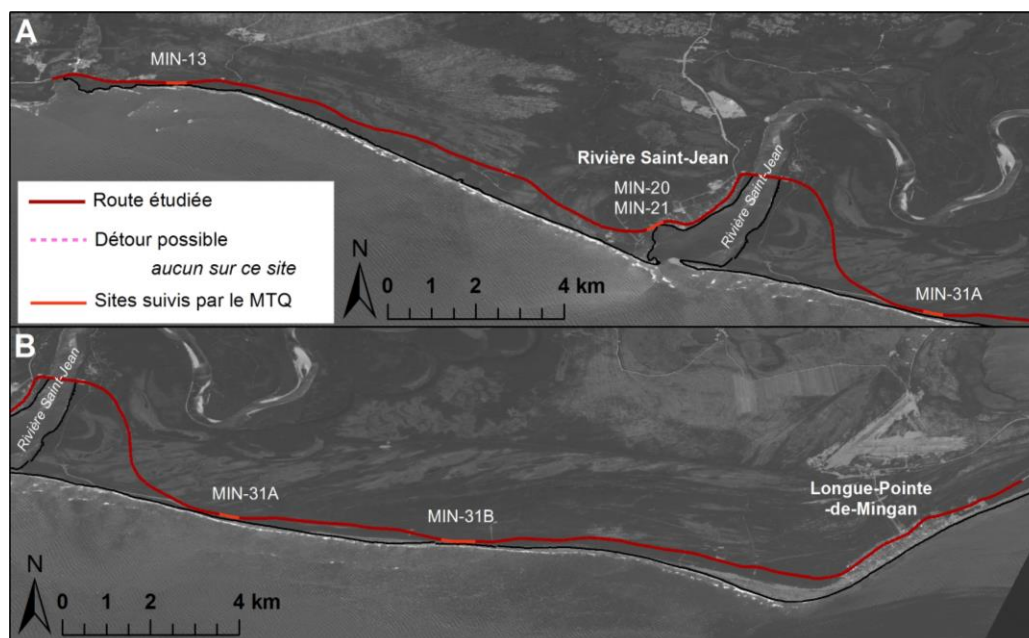


Figure 86. Sites suivis et détour du site de Rivière-Saint-Jean et Longue-Pointe-de-Mingan

Sur le site témoin le MTQ suit déjà plusieurs segments de routes en ce qui a trait à la problématique d'érosion (MIN-13, MIN-20, MIN-21, MIN-31A, MIN-31B) (figure 86).

5.9.3 Évolution historique de la côte

Les côtes de ce site témoin connaissent une érosion importante de -0,38 m/an en moyenne entre 1948-49 et 2005. Cela varie cependant beaucoup selon les types de côtes, car le marais maritime est stable (0,02 m/an en moyenne), les

flèches littorales sont en moyenne en accumulation de 0,44 m/an (mais varient énormément entre -0,96 m/an et +1,02 m/an) et les autres types de côtes reculent. Le rythme d'érosion est le plus prononcé pour les secteurs de basses falaises meubles (moyenne de -0,90 m/an), mais il est également important dans les falaises meubles (-0,70 m/an). Les terrasses de plages connaissent une érosion relativement plus faible de -0,19 m/an. Les côtes rocheuses montrent également un recul, mais comme ce sont des côtes composées de roches ignées, ce n'est pas elles qui ont connu des reculs, mais bien la couverture végétale présente sur la roche qui peut avoir été arrachée.

Il est intéressant de constater que la période récente (1997-2005) présente une migration moyenne positive de 0,61 m/an. Cependant, l'analyse des migrations selon les types de côtes montre que l'érosion des falaises est beaucoup plus marquée pour la période récente comparativement à la période la plus longue ce qui peut avoir apporté beaucoup de sédiments au système côtier et contribué à créer de l'accumulation sur les côtes basses à l'est du secteur (même si localement, ces types de côtes peuvent également connaître de l'érosion très marquée). Ainsi pour la période récente, les falaises meubles ont connu une migration moyenne de -0,77 m/an (allant localement jusqu'à -1,16 m/an) et les basses falaises meubles de -1,87 m/an (allant localement jusqu'à -5,08 m/an). Les terrasses de plages ont, elles, connu une migration moyenne de 1,77 m/an (variant entre -4,89 m/an et +13,31 m/an) et les flèches de 1,47 m/an (variant entre -2,77 m/an et +9,46 m/an).

Les données obtenues grâce au réseau de stations de suivi du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières indiquent une migration moyenne des falaises meubles de -1,49 m/an et variant entre 0,00 et -14,56 m selon les années et les stations (mesuré sur 92 stations entre 2000 et 2013). Les 52 stations qui sont implantées dans les secteurs de terrasses de plage indiquent une migration moyenne de -0,34 m/an entre 2000 et 2013, et selon les stations et les années cela varie entre -24,55 et +23,08 m. La différence avec les données obtenues par photo-interprétation peut s'expliquer par la répartition spatiale non homogène des stations de mesures.

6 RÉSULTATS : INDICE DE VULNÉRABILITÉ DES ROUTES AUX ALÉAS CÔTIERS (IVRAC)

L'indice de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers (IVRAC) développé pour ce projet a été appliqué sur 9 sites témoins situés dans l'Est du Québec (figure 1). Pour des informations sur l'environnement physique ou humain des sites témoins, veuillez vous référer à la section 5. La méthodologie utilisée pour le développement de l'indice de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers est expliquée à la section 4.

6.1 IVRAC pour l'ensemble des sites témoins

6.1.1 Description des résultats

D'après les résultats obtenus, 19,9 % des routes étudiées sont vulnérables à court terme (IVRAC 2020), 35,9 % à moyen terme (IVRAC 2060) et 54,0 % à long terme (IVRAC 2100) (tableau 31). Pour ce qui est des trois sites étudiés de la Côte-Nord, la proportion de routes vulnérables passe de 6,2 % à court terme, à 19,0 % à moyen terme et à 27,4 % à long terme. Pour ce qui est des deux sites des Îles-de-la-Madeleine, la proportion passe de 12,4 % des routes étudiées qui sont vulnérables à court terme, à 36,9 % à moyen terme et à 66,2 % à long terme. Enfin, pour les sites du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie, 40,3 % des routes étudiées sont vulnérables à court terme, 51,3 % à moyen terme et 67,9 % à long terme.

Tableau 31. Proportion de routes vulnérables

	IVRAC_2020	IVRAC_2060	IVRAC_2100
% vulnérable	19,9	35,9	54,0
% non vulnérable	80,1	64,1	46,0

Les indices de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers (IVRAC) ont été répartis en 5 classes soit nulle (indice de 0), faible ($0 \leq \text{indice} < 10$), moyenne ($10 \leq \text{indice} < 25$), élevée ($25 \leq \text{indice} < 50$) et critique (≤ 50). La proportion de routes avec un niveau de vulnérabilité critique a été multipliée par 5,2 et passe de 0,4 % des routes à 2,1 % des routes (entre 2020 et 2100). Cette proportion varie, en 2100, selon les régions entre 1,7 % pour les sites de la Côte-Nord ou ceux du Bas-Saint-Laurent et Gaspésie et 3,0 % pour les sites des Îles-de-la-Madeleine. Cela correspond, pour l'IVRAC 2100, à 7 segments de niveau de

vulnérabilité critique pour chacune des deux premières régions et à 12 segments pour les Îles-de-la-Madeleine pour un total de 26 segments pour l'ensemble des 9 sites étudiés (tableau 32).

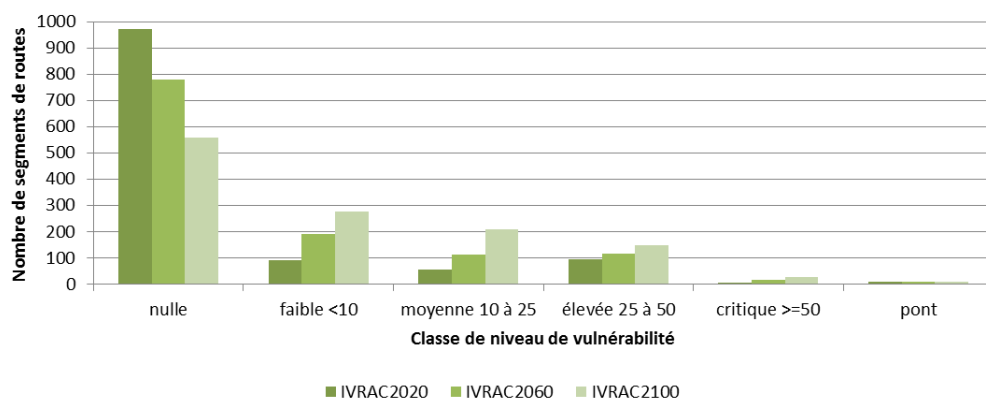


Figure 87. Niveau de vulnérabilité des routes par classe de l'IVRAC selon les trois horizons de temps

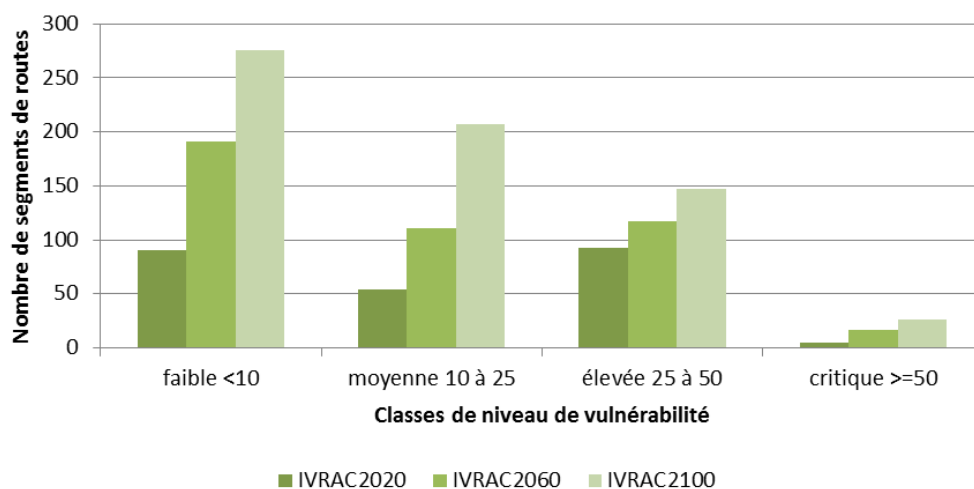


Figure 88. Niveau de vulnérabilité de routes vulnérables par classes de l'IVRAC selon les trois horizons de temps

Le tableau 32 ainsi que les figures 87 et 88 présentent le nombre de segments de 100 m de route sur les sites témoins selon leur classe de vulnérabilité. Ont été exclus les 10 segments de ponts qui se répartissent sur les sites de rivière au Bouleau et de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan. Entre l'IVRAC 2020 et l'IVRAC 2100, le nombre de segments vulnérables passe de 242 à 655 soit une multiplication par un facteur de 2,7. Pour les sites de la

Côte-Nord, le nombre de segments vulnérables passe de 25 à 110, soit une hausse par un facteur de 4,4. Pour les sites du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie, ce nombre passe de 168 à 283 soit une multiplication par 1,7. Enfin, pour les Îles-de-la-Madeleine, le nombre de segments vulnérables passe de 49 pour le court terme à 262 pour le long terme, soit une hausse par un facteur de 5,3. Cela fait ressortir des différences entre les régions. Ainsi, pour la Côte-Nord et les Îles-de-la-Madeleine, la vulnérabilité ne concerne pas encore beaucoup de segments, mais il va y avoir une hausse très importante d'ici la fin du siècle, alors pour le Bas-Saint-Laurent et la Gaspésie, comme de nombreux segments du réseau routier sont déjà vulnérables à court terme, le facteur de hausse sera moins important.

Tableau 32. Nombre de segments de routes selon leur niveau de vulnérabilité

Niveau de vulnérabilité	Actions	IVRAC_2020	IVRAC_2060	IVRAC_2100
Non vulnérable = 0	Aucune	972	778	559
Faible 0 ≤ et <10	intervention à planifier à long terme	90	191	275
Moyenne 10 ≤ indice < 25	Intervention à planifier à moyen terme ou au cas par cas	54	111	207
Élevée 25 ≤ indice < 50	intervention rapide nécessaire	93	117	147
Critique ≤ 50	intervention immédiate nécessaire	5	17	26

Si l'on compare les différents sites témoins entre eux, il est possible de dégager les éléments remarquables concernant la vulnérabilité des routes pour l'ensemble de l'Est du Québec. Ainsi à l'échelle régionale, cela permet de déterminer des sites les plus vulnérables parmi ceux étudiés (6.1.2), mais aussi de faire ressortir les éléments qui augmentent la vulnérabilité (6.1.3) ou qui la réduisent (6.1.4). Il est également possible de déterminer quel est, selon les configurations, l'aléa le plus important (6.1.5).

L'**IVRAC moyen** est de 3,9 pour 2020, de 6,4 pour 2060 et de 9,3 pour 2100. Cependant, si l'on ne s'attarde qu'à l'indice de vulnérabilité des secteurs qui

seront affectés, ils sont en moyenne de 19,8, 17,7 et 17,2, respectivement pour les IVRAC de 2020, 2060 et 2100 (tableau 33). Les moyennes masquent de grandes disparités. Par exemple, le site de Chandler n'est en moyenne que peu vulnérable d'ici 2020 (2,5), mais dans les secteurs vulnérables le niveau est élevé (moyenne est de 31,8).

Pour les 3 sites de la Côte-Nord, l'IVRAC moyen est de 0,7 pour 2020, de 3,0 pour 2060 et de 4,8 pour 2100. Cependant, l'indice de vulnérabilité moyen des secteurs qui seront affectés est de 11,5 (2020), 15,7 (2060) et 17,7 (2100). Pour les 4 sites du Bas-Saint-Laurent et Gaspésie, l'IVRAC moyen est de 9,5 pour 2020, de 11,5 pour 2060 et de 14,4 pour 2100. Cependant, l'indice de vulnérabilité moyen des secteurs qui seront affectés est de 23,7 (2020), 22,5 (2060) et 21,3 (2100). Pour les 2 sites des Îles-de-la-Madeleine, l'IVRAC moyen est de 1,3 pour 2020, de 4,4 pour 2060 et de 8,4 pour 2100. Cependant, l'indice de vulnérabilité moyen des secteurs qui seront affectés est de 10,6 (2020), 11,9 (2060) et 12,6 (2100).

En 2020, les sites avec les IVRAC moyens les plus élevés en considérant tous les segments sont Rivière-à-Claude et Carleton-Maria avec un niveau moyen de 15,7 (tableau 33), ce sont les deux seuls sites dont l'IVRAC moyen se situe à un niveau moyen. Les autres sont faibles ou nuls (à rivière au Bouleau).

En 2060, ce sont les deux mêmes sites qui présentent les IVRAC moyens les plus élevés, respectivement 18,2 et 19,3, soit un niveau moyen de vulnérabilité alors que les autres sont faibles. Il n'y a plus de site étant totalement non vulnérable.

Le même scénario se reproduit **en 2100**, avec un indice moyen atteignant respectivement 19,3 et 22,2 pour les deux sites moyennement vulnérables. Les autres indices sont de niveau faible.

Cependant, si en 2020 on retrouve l'IVRAC maximal dans un des deux sites le plus vulnérable (59,7 à Carleton-Maria), ce n'est plus le cas en 2060 et en 2100 où le segment le plus vulnérable se situe dans la baie de Plaisance (79,8 en 2060 et 159,1 en 2100), alors que la moyenne de ce site est faible. Cela vient du fait que ce site est très long (16,4 km donc 164 segments), et qu'il est globalement non vulnérable, mais présente un petit secteur avec une vulnérabilité critique.

La figure 89, la figure 90 et la figure 91 présentent l'IVRAC des différents sites témoins pour les trois horizons temporels étudiés.

Tableau 33. IVRAC selon les sites et les périodes

Horizon	Site témoin	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart type
IVRAC 2020, tous les segments	Site n°1 : Baie-des-Sables	1.3	0.0	8.2	2.3
	Site n°2 : Rivière-à-Claude	15.7	0.0	46.5	17.6
	Site n°3 : Chandler	2.5	0.0	42.4	9.3
	Site n°4 : Carleton et Maria	15.7	0.0	59.7	17.5
	Site n°5 : baie de Plaisance	1.9	0.0	33.5	5.4
	Site n°6 : Pointe-aux-Loups	0.9	0.0	19.4	3.2
	Site n°7 : Pentecôte	1.4	0.0	26.0	4.9
	Site n°8 : rivière au Bouleau	0.0	0.0	0.0	0.0
	Site n°9 : Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	0.5	0.0	17.3	2.2
	Ensemble des sites	3.9	0.0	59.7	10.2
IVRAC 2020, segments vulnérables seulement	Site n°1 : Baie-des-Sables	4.7	0.6	8.2	1.7
	Site n°2 : Rivière-à-Claude	31.9	4.5	46.5	10.5
	Site n°3 : Chandler	31.8	21.2	42.4	15.0
	Site n°4 : Carleton et Maria	28.6	6.9	59.7	13.8
	Site n°5 : baie de Plaisance	11.9	3.1	33.5	8.3
	Site n°6 : Pointe-aux-Loups	9.1	1.8	19.4	5.6
	Site n°7 : Pentecôte	17.2	12.2	26.0	4.9
	Site n°8 : rivière au Bouleau	na	na	na	na
	Site n°9 : Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	8.8	5.0	17.3	3.0
	Ensemble des sites	19.8	0.6	59.7	14.6
IVRAC 2060, tous les segments	Site n°1 : Baie-des-Sables	2.2	0.0	8.2	2.5
	Site n°2 : Rivière-à-Claude	18.2	0.0	46.5	17.6
	Site n°3 : Chandler	2.7	0.0	47.4	10.2
	Site n°4 : Carleton et Maria	19.3	0.0	59.7	18.4
	Site n°5 : baie de Plaisance	5.7	0.0	79.8	15.4
	Site n°6 : Pointe-aux-Loups	3.4	0.0	21.1	6.0
	Site n°7 : Pentecôte	5.6	0.0	26.0	7.4
	Site n°8 : rivière au Bouleau	0.6	0.0	11.0	2.6
	Site n°9 : Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	2.2	0.0	61.2	7.5
	Ensemble des sites	6.4	0.0	79.8	12.6

Horizon	Site témoin	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart type
IVRAC 2060, seulement segments vulnérables	Site n°1 : Baie-des-Sables	4.6	0.7	8.2	1.5
	Site n°2 : Rivière-à-Claude	31.2	4.0	46.5	11.0
	Site n°3 : Chandler	34.3	21.2	47.4	18.5
	Site n°4 : Carleton et Maria	32.3	6.9	59.7	12.0
	Site n°5 : baie de Plaisance	15.9	3.1	79.8	22.5
	Site n°6 : Pointe-aux-Loups	9.2	1.8	21.1	6.6
	Site n°7 : Pentecôte	14.3	3.1	26.0	4.0
	Site n°8 : rivière au Bouleau	11.0	11.0	11.0	na
	Site n°9 : Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	17.3	7.1	61.2	13.5
	Ensemble des sites	17.7	0.7	79.8	15.6
IVRAC 2100, tous les segments	Site n°1 : Baie-des-Sables	6.7	0.0	40.0	8.0
	Site n°2 : Rivière-à-Claude	19.3	0.0	46.5	16.9
	Site n°3 : Chandler	5.0	0.0	47.4	12.7
	Site n°4 : Carleton et Maria	22.2	0.0	67.0	17.7
	Site n°5 : baie de Plaisance	8.6	0.0	159.1	20.9
	Site n°6 : Pointe-aux-Loups	8.2	0.0	30.0	7.5
	Site n°7 : Pentecôte	6.7	0.0	26.0	7.2
	Site n°8 : rivière au Bouleau	1.0	0.0	11.0	3.1
	Site n°9 : Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	4.4	0.0	61.2	11.0
	Ensemble des sites	9.3	0.0	159.1	14.3
IVRAC 2100, seulement segments vulnérables	Site n°1 : Baie-des-Sables	9.5	0.8	40.0	8.0
	Site n°2 : Rivière-à-Claude	27.8	4.5	46.5	13.2
	Site n°3 : Chandler	31.4	19.0	47.4	13.6
	Site n°4 : Carleton et Maria	30.1	2.7	67.0	13.6
	Site n°5 : baie de Plaisance	16.4	3.1	159.1	26.6
	Site n°6 : Pointe-aux-Loups	10.8	2.5	30.0	6.7
	Site n°7 : Pentecôte	13.1	3.1	26.0	4.2
	Site n°8 : rivière au Bouleau	9.4	7.7	11.0	2.3
	Site n°9 : Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	22.1	7.1	61.2	14.7
	Ensemble des sites	17.2	0.8	159.1	15.6

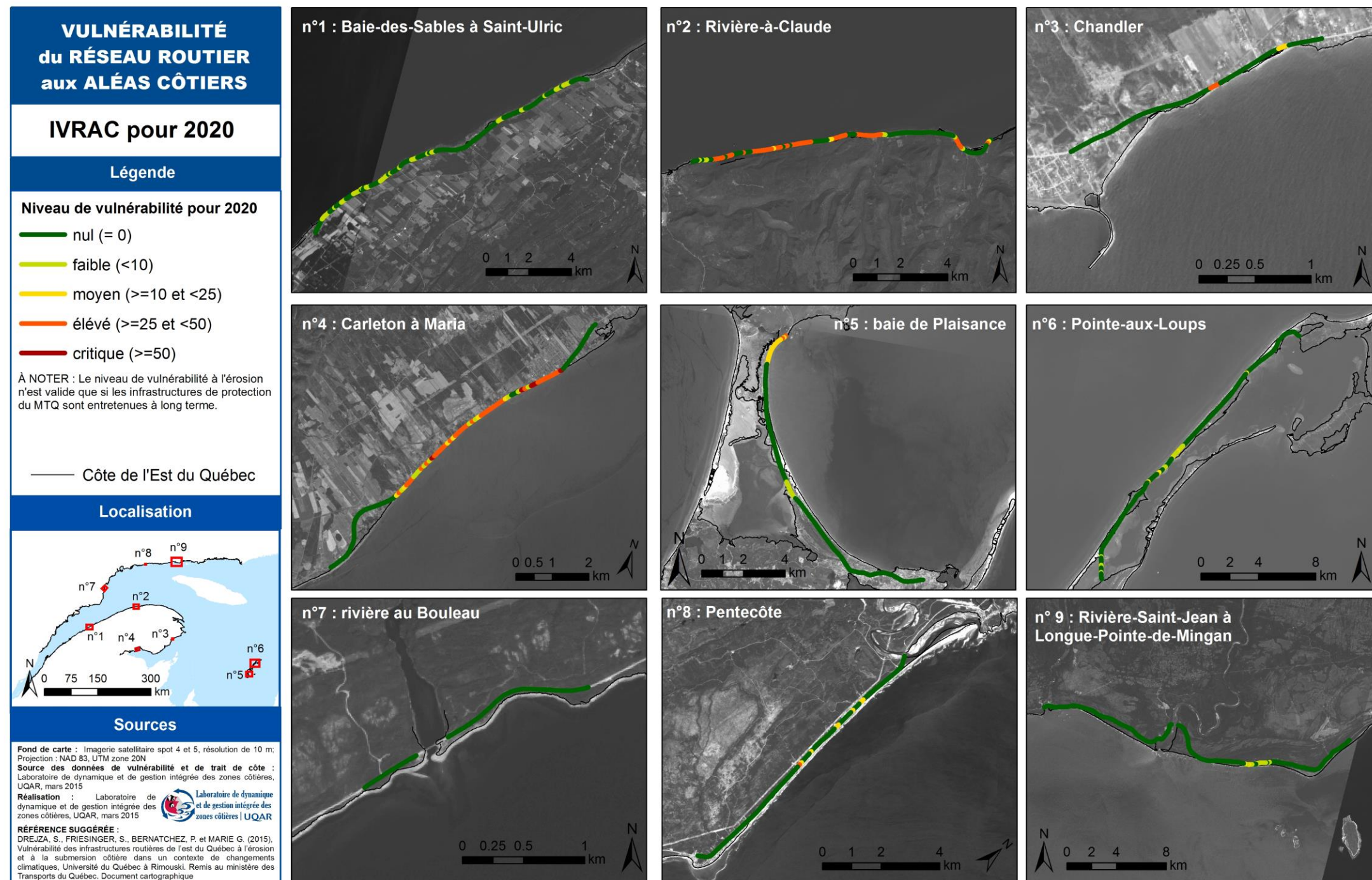


Figure 89. IVRAC 2020 des 9 sites témoins

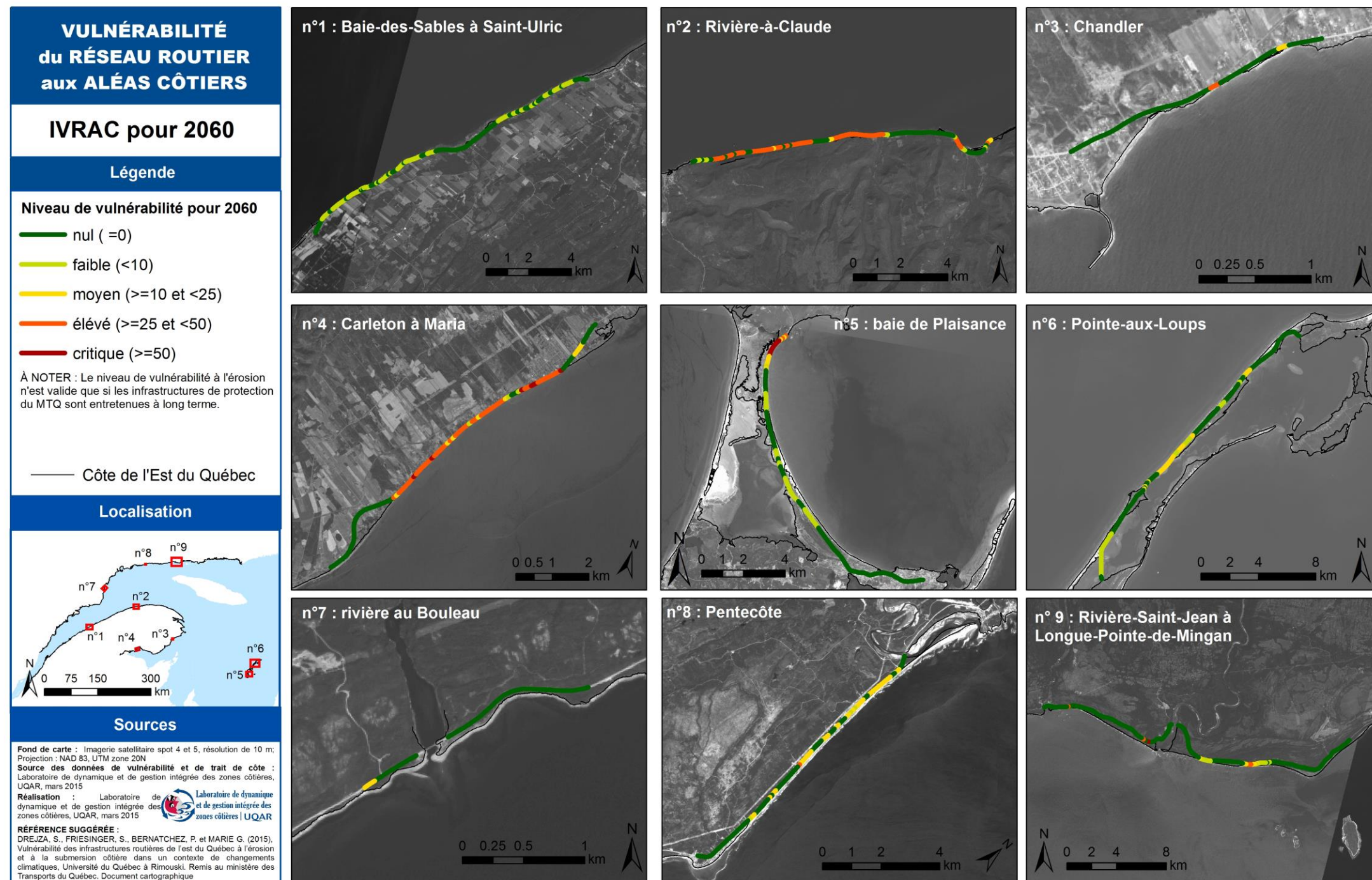


Figure 90. IVRAC 2060 des 9 sites témoins

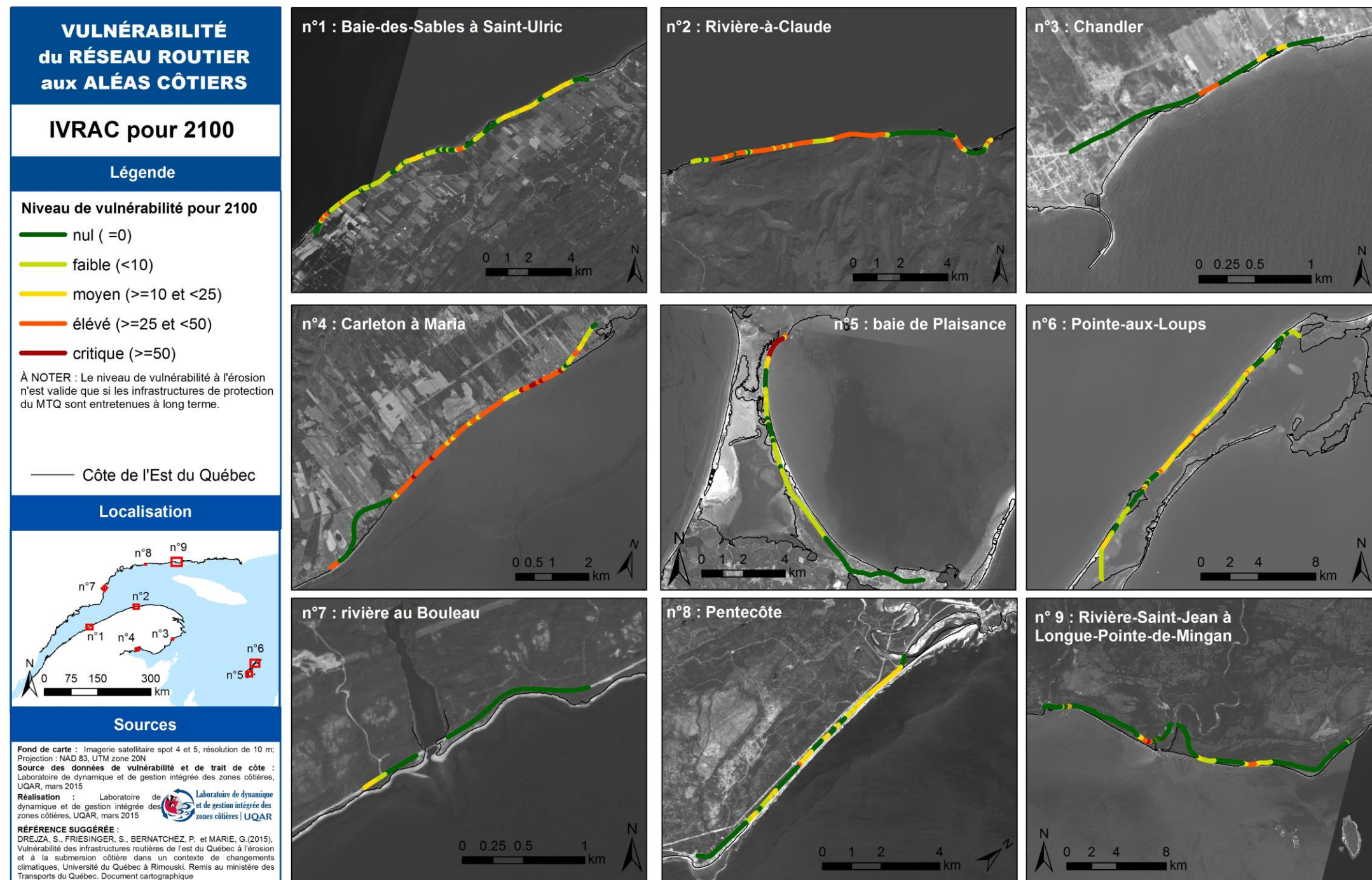


Figure 91. IVRAC 2100 des 9 sites témoins

6.1.2 Sites et segments les plus vulnérables

6.1.2.1 Indice de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers

Les segments de route où la vulnérabilité est critique (>50) vont connaître une augmentation à l'avenir, passant de 5 en 2020 à 17 en 2060 et à 26 d'ici 2100 (tableau 32, figure 87 et figure 88). Un plan de gestion ou des interventions doivent être planifiés dans ces secteurs afin de pouvoir réagir rapidement lorsque les aléas surviendront.

Actuellement, c'est-à-dire si l'on considère l'IVRAC 2020, les sites les plus vulnérables correspondent à 5 segments situés dans le site de Carleton et Maria (site n°4). Les segments MAR044, 075, 078, 079 et 087 ont un indice de vulnérabilité critique (moyenne de 56,2) (figure 92). Ces segments sont exposés de manière imminente à l'érosion (si une tempête fait céder l'infrastructure de protection, l'érosion pourrait affecter la route située en arrière), leur vulnérabilité à l'érosion est cependant moyenne surtout du fait qu'il existe des voies de contournement courtes en cas de fermeture de la route et que ce sont des côtes basses qui peuvent être remblayées relativement rapidement pour permettre une nouvelle circulation. Le danger pour la vie des usagers est également faible étant donné que les côtes sont basses. Mais les paramètres qui augmentent la vulnérabilité sont la position proximale avec la côte, le nombre de personnes desservies par ces segments ainsi que le débit journalier moyen. Concernant l'exposition à la submersion, il s'agit de submersion par franchissement de l'ouvrage de protection (en 2020, submersion par la nappe d'eau en 2060 ou 2100). Les éléments qui augmentent la vulnérabilité de ces segments de routes à la submersion sont la sécurité (danger lié au déferlement), l'étroitesse des plages en avant des structures, leur faible distance à la côte et leur situation en premier rang côtier. Les paramètres qui limitent la vulnérabilité à la submersion sont les mêmes que pour l'érosion (possible détour entre 1,1 et 7,2 km seulement, pas de perte d'accès pour les pompiers ou l'hôpital). Ces segments n'ont pas de taux d'érosion inclus, car il est considéré que le ministère entretiendra l'infrastructure et qu'après une rupture de l'ouvrage et un recul du trait de côte, le mur de protection sera remis en place à sa position initiale.



Figure 92. Segments avec une vulnérabilité critique actuellement - segments MAR078 et 079 (haut) et segment MAR087 (bas) (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

D'ici 2060, en plus des 5 segments du site de Carleton et Maria qui ont déjà actuellement un indice de niveau critique, 12 autres segments se sont ajoutés aux routes de vulnérabilité critique. Ils se répartissent entre le site de Maria-Carleton (MAR037, IVRAC2060 moyen de 55,5 pour les 6 segments), de la baie de Plaisance (BDP005 à BDP013, IVRAC2060 variant entre 57,8 et 79,8) et le site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan (RSJ091 et RSJ092, indice de 61,2). Le segment sur le site de Maria-Carleton est situé dans un contexte similaire aux segments avec une vulnérabilité critique en 2020. Les segments de route de Rivière-Saint-Jean ne sont vulnérables qu'à l'érosion. L'érosion devrait affecter la route entre 2050 et 2060. Le taux de migration est de -5,3 m/an pour ce secteur ce qui explique une vulnérabilité à l'érosion malgré la distance importante entre la route et la côte. Comme on

peut le voir à la figure 93 la côte est constituée de falaises meubles vives en érosion rapide et ayant déjà perdu plus de 100 m en moins de 60 ans (figure 94). La vulnérabilité de ces segments est augmentée par l'absence de voie de contournement utilisable en cas d'interruption de service sur la 138, par le danger pour les automobilistes que représente un glissement de la route, la difficulté de réparation qui en résulterait et par l'accès aux services de pompiers et d'hôpital qui s'en trouverait fortement rallongé. Ceci malgré le faible débit journalier moyen qui aurait plutôt tendance à limiter la vulnérabilité.



Figure 93. Segments avec une vulnérabilité critique d'ici 2060 - segments RSJ091 et 092 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

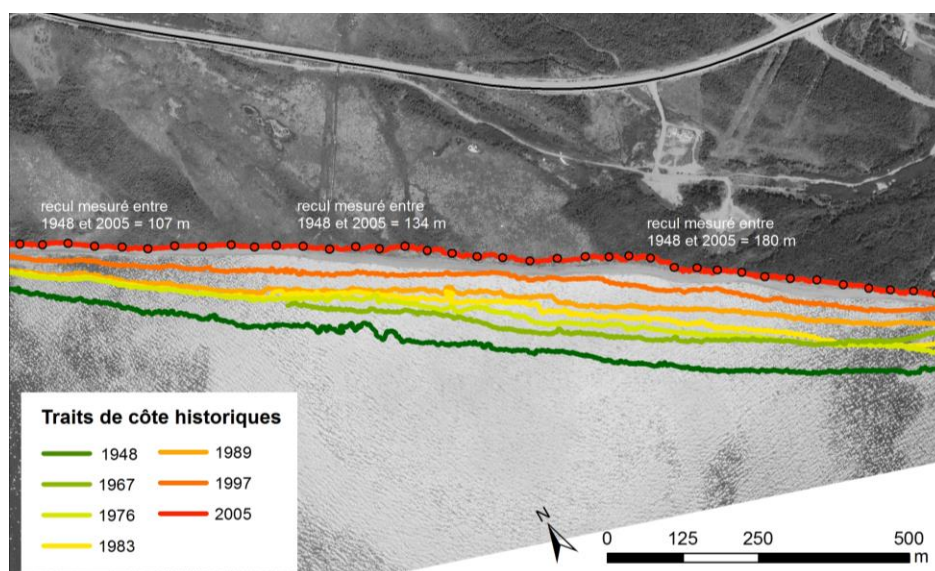


Figure 94. Évolution historique de la côte entre 1948 et 2005 à Rivière-Saint-Jean

Le site de la baie de Plaisance présente également une vulnérabilité critique aux aléas côtiers en 2060. On se situe dans un secteur de tombolo enroché sur lequel est construite la route 199 (figure 95). Alors qu'actuellement la submersion n'affecte pas ce secteur, la hausse du niveau de la mer conjuguée à l'enfoncement des terres aux Îles-de-la-Madeleine, rend le secteur sensible à la submersion à compter de 2060 par le déferlement de vagues sur les ouvrages de protection. La vulnérabilité à l'érosion découle de la grande proximité entre la route et la côte rendant ainsi l'atteinte de la route lors d'un seul événement d'érosion possible malgré la présence d'une infrastructure. La vulnérabilité est importante du fait de l'absence d'autre route pour assurer la liaison entre Havre-Aubert et Cap-aux-Meules, ceci empêche également l'accès à l'hôpital situé à Cap-aux-Meules.



Figure 95. Segments avec une vulnérabilité critique d'ici 2060 - segments BDP005 à 013 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

D'ici 2100, ce sont les trois mêmes sites témoins qui vont connaître la plus grande vulnérabilité aux aléas côtiers. Pour le site de Maria-Carleton, un segment de plus est vulnérable au niveau critique (MAR081). Il est à noter que le score du site MAR079 a augmenté du fait d'une épaisseur d'eau potentielle sur la route plus importante (lié à la hausse du niveau marin et à la variation isostatique de la croûte terrestre). Pour le site de la baie de Plaisance, 3 segments de plus ont une vulnérabilité critique par rapport à l'IVRAC de 2060.

Pour le site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan, 5 segments de plus connaîtront une vulnérabilité critique en 2100, soit 4 au même endroit que les segments qui étaient déjà critiques en 2060 et 1 à l'intérieur de l'estuaire de la rivière Saint-Jean (figure 96). Ce segment (RSJ105) ne sera exposé que si l'infrastructure de protection actuellement en place n'est pas entretenue. Étant donné qu'il ne nous a pas été possible de connaître la planification ou non de l'entretien de cet ouvrage, un taux de migration de la côte a été utilisé. Ce taux probable d'érosion serait ainsi de -0,58 m/an et pourrait affecter la route d'ici 2088. Il est important pour ce secteur de suivre l'évolution de la côte et des protections qui sont installées pour réajuster les informations à long terme.



Figure 96. Segments avec une vulnérabilité critique d'ici 2100 – segment RSJ105
(© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

Il est important de considérer qu'étant donné que les routes fonctionnent en réseau, la problématique découlant d'une vulnérabilité critique de quelques segments, rend le réseau routier de l'ensemble des sites témoins voir des MRC dans lesquelles ces segments sont situés critiques, surtout pour les sites n'ayant pas d'autres voies qui puissent être utilisées. L'efficacité et la robustesse du réseau de transport découlent de la possibilité d'utiliser d'autres voies, ce qui n'est pas le cas sur tous les sites témoins.

6.1.2.2 Vulnérabilité à la submersion

La vulnérabilité à la submersion affecte les sites sur de grandes longueurs, car les routes sont construites de manière homogène à la même distance de la côte, à la même hauteur environ, sans obstacle entre l'eau et la route. De plus, aucune structure d'adaptation n'a encore été mise en place pour limiter la submersion comme c'est le cas avec les murs ou les enrochements pour limiter l'érosion.

Le tableau 34 ainsi que la figure 97 présentent le nombre de segments de 100 m de route sur les sites témoins selon leur classe de vulnérabilité à la submersion. Entre 2020 et 2100, le nombre de segments vulnérables à la submersion passe de 135 à 445 soit une multiplication par un facteur de 3,3. La hausse est particulièrement marquée pour les segments de vulnérabilité moyenne à la submersion qui passent de 17 en 2020 à 185 en 2100 (tableau 34). En 2020, 11,0 % des segments de routes étudiés sont vulnérables à la submersion. Cette proportion monte à 19,6 % d'ici 2060 et à 36,4 % d'ici 2100.

Tableau 34. Nombre de segments de routes selon leur niveau de vulnérabilité à la submersion

Niveau de vulnérabilité à la submersion	2020	2060	2100
Non vulnérable = 0	1079	974	769
Faible $0 \leq \text{indice} < 10$	17	63	93
Moyen $10 \leq \text{indice} < 25$	17	41	185
Élevé $25 \leq \text{indice} < 50$	33	44	61
Critique ≤ 50	68	92	106

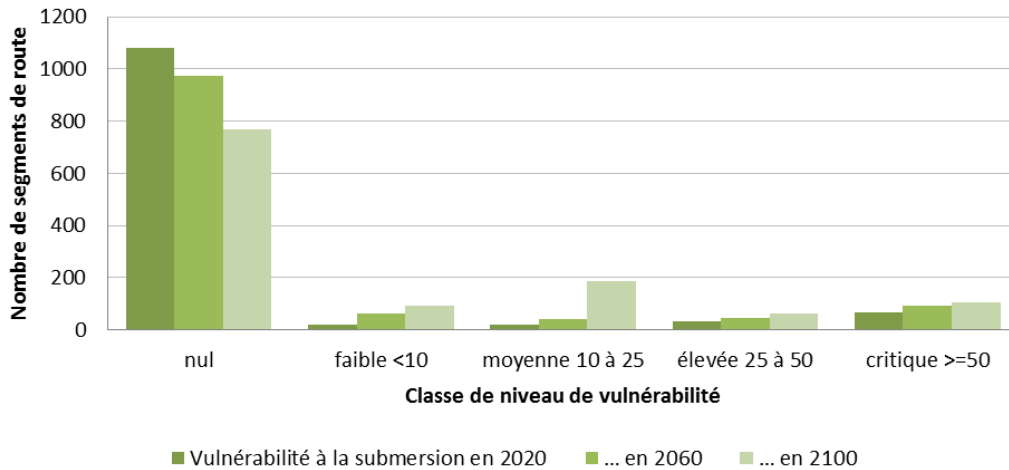


Figure 97. Niveau de vulnérabilité à la submersion des routes par classe selon les trois horizons de temps

Ainsi en 2020, 68 segments présentent une vulnérabilité critique à la submersion soit 14 à Maria-Carleton (MAR040, MAR042, MAR044, MAR045, MAR063, MAR075, MAR076, MAR078, MAR079, MAR080, MAR081, MAR083, MAR086 et MAR087) (figure 92) et 54 à Rivière-à-Claude (RAC009 à 013, 015 à 017, 022, 026 à 034, 036 à 038, 040, 041, 043 à 051, 061 à 066, 071 à 081 et 114 à 118) (figure 98).

En 2060 un total de 92 segments présentent une vulnérabilité critique à la submersion. Aux deux sites témoins présentant déjà des segments critiques s'ajoute le secteur de la Martinique aux Îles-de-la-Madeleine (site de la baie de Plaisance). Ce site présente des protections du MTQ contre l'érosion, une très faible distance route/côte et aucun obstacle entre l'eau et la route (figure 95). Il s'agit de 9 segments, soit BDP005 à 013. À Maria-Carleton s'ajoutent 7 segments de plus et à Rivière-à-Claude 8. En 2100, s'ajoutent 14 segments critiques d'un point de vue de l'aléa de submersion, soit 7 segments à Baie-des-Sables (BDS008, BDS009, BDS011, BDS020, BDS087, BDS088 et BDS089), 1 à Rivière-à-Claude (RAC008), 3 à Maria-Carleton (MAR034, 093 et 094) et 3 à la baie de Plaisance (BDP003, 004 et 014) pour un total de 106 segments critiques.



Figure 98. Segments avec une vulnérabilité à la submersion critique actuellement – segments RAC040 et 041 (haut) et RAC114 à 118 (bas) (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

6.1.2.3 Vulnérabilité à l'érosion

La vulnérabilité à l'érosion est plus variable spatialement que celle à la submersion. En effet, l'érosion n'affecte pas forcément de grandes longueurs d'un coup, elle est plutôt progressive. Ainsi, quelques segments seulement sont affectés par un niveau de vulnérabilité critique alors que les segments voisins ne le sont pas forcément. Il est important de noter que la présence de seulement quelques segments affectés coupe tout de même le service du réseau routier. De plus, cette vulnérabilité à l'érosion tient compte de la présence des infrastructures de protection (murs et enrochements) mises en place sur de nombreux segments par le MTQ. Ces structures ont été

considérées comme limitant l'érosion autre qu'événementielle. Si ces structures s'avèrent non efficaces ou non entretenues, alors de très grandes portions de routes étudiées seraient vulnérables à l'érosion de manière critique.

Le tableau 35 ainsi que la figure 99 présentent le nombre de segments de 100 m de route sur les sites témoins selon leur classe de vulnérabilité à l'érosion. Entre 2020 et 2100, le nombre de segments vulnérables à la submersion passe de 162 à 415 soit une multiplication par un facteur de 2,6. La hausse est plus marquée pour les segments de vulnérabilité critique à l'érosion qui passent de 5 en 2020 à 27 en 2100 (tableau 35). En 2020, 13,3 % des segments de routes étudiés sont vulnérables à l'érosion. Cette proportion monte à 23,4 % d'ici 2060 et à 34,2 % d'ici 2100.

Tableau 35. Nombre de segments de routes selon leur niveau de vulnérabilité à l'érosion

Niveau de vulnérabilité à l'érosion	2020	2060	2100
Non vulnérable = 0	1052	930	799
Faible 0 ≤ indice < 10	39	57	78
Moyen 10 ≤ indice < 25	97	152	240
Élevé 25 ≤ indice < 50	21	64	70
Critique ≥ 50	5	11	27

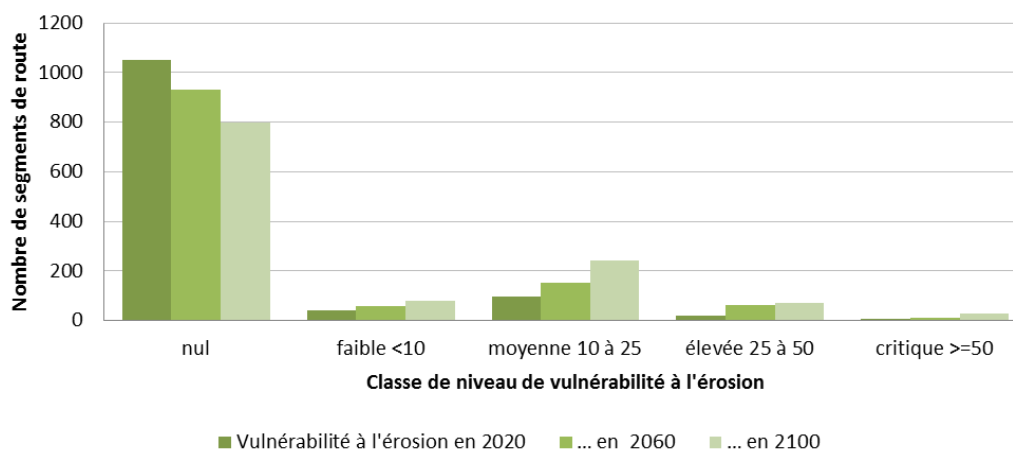


Figure 99. Niveau de vulnérabilité à l'érosion des routes par classe selon les trois horizons de temps

En 2020, 5 segments de route, situés dans 4 sites témoins différents (soit Chandler, Maria-Carleton, la baie de Plaisance et Rivière-Pentecôte) présentent des niveaux de vulnérabilité à l'érosion critique. Cela est dû soit à une érosion possible par un seul événement d'érosion (MAR031, BDP001, BDP003 et PEN048), soit par une érosion possible d'ici 2020 (CHA015). En 2060, 6 segments de plus présentent une vulnérabilité critique à l'érosion. Ces segments supplémentaires se situent sur le site de Maria (MAR-29) et à Rivière-Saint-Jean (RSJ020, 087, 088, 091 et 092) (figure 100).



Figure 100. Segment avec une vulnérabilité à l'érosion critique d'ici 2060 – segment RSJ020 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

En 2100, 27 segments présentent une vulnérabilité critique à l'érosion côtière, soit 16 de plus qu'en 2060. Tous sont situés dans les mêmes sites témoins dans lesquels on retrouvait déjà des sites critiques en 2060. Se sont ainsi ajoutés CHA014 (Chandler), MAR001 à 003 (Maria-Carleton) (figure 101), RSJ015, 019 et 021, RSJ083 à 086, RSJ089, 090, 093 et 094 ainsi que RSJ105 (Rivière-Saint-Jean et Longue-Pointe-de-Mingan).



Figure 101. Segment avec une vulnérabilité à l'érosion critique à d'ici 2100 – segments MAR001 à 003 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

6.1.3 Facteurs augmentant la vulnérabilité

En comparant les indices de vulnérabilité des différents sites témoins, il ressort que certains éléments contribuent plus souvent, sur nos sites témoins, à des indices de vulnérabilité plus importants. À savoir :

- Une route construite dans un environnement **de falaises soumises à des mouvements de terrain**, car cela engendre deux problématiques de vulnérabilité pour ces segments de routes. D'abord, cela engendre un danger important pour les usagers tel que la possibilité de tomber dans le trou engendré par une cicatrice de mouvement de terrain de n'importe quel type. Ensuite, cela est également associé à une difficulté plus importante à réparer la route et de rétablir le service dû à l'instabilité du talus et au volume de remblai nécessaire. Ceci sans compter sur le besoin probable d'une expertise géotechnique. Cette situation se retrouve notamment dans l'ouest du site n°9 à Rivière-Saint-Jean où les côtes sont constituées de falaises sableuses avec une base argileuse ou silteuse, présentant donc un potentiel de mouvements de terrain.
- Une route avec un **fort débit journalier moyen**. Par exemple, le site de Chandler qui présente un débit important. Une perte d'usage affecte alors beaucoup de personnes.

- Une route pour laquelle il y a une **absence de voie de contournement**. C'est le cas sur la plupart des sites témoins, excepté les sites de Baie-des-Sables et Maria et quelques petits endroits sur les autres sites (petites rues dans certains centres villes), les sites de l'Est du Québec s'inscrivant dans un réseau routier linéaire. Ainsi, il présente une faible robustesse (une faible résilience) à toute interruption de service que ce soit du fait d'aléas côtiers ou d'autres problématiques.
- **L'accès aux services d'urgence** : Lorsque l'absence de voie de contournement isole également une communauté de l'accès aux services d'urgence tels que les pompiers ou l'hôpital, cela augmente la vulnérabilité aux aléas côtiers. Par exemple pour le site de la baie de Plaisance, l'accès à l'unique hôpital est dépendant de la route 199 pour tous les habitants de Havre Aubert, alors qu'une caserne locale de pompiers permet à l'île de rester desservie même en cas de rupture de service de la route.

Ce ne sont pas les seuls paramètres qui peuvent augmenter la vulnérabilité; il y a également le nombre de personnes desservies, la position proximale avec la côte, le fait que la route soit de rang côtier 1, une plage étroite ou la possibilité d'insécurité liée au déferlement.

6.1.4 Facteurs réduisant la vulnérabilité

En comparant les indices de vulnérabilité des différents sites témoins, il ressort que certains éléments contribuent plus souvent, sur nos sites témoins, à des indices de vulnérabilité plus faibles. À savoir :

- Une route pour laquelle il y a une **présence de voie de contournement**, c'est-à-dire un réseau robuste. Ceci conforte les résultats obtenus par Snelder (2010). Cela a par exemple été le cas suite à la tempête du 6 décembre 2010 lorsque le trafic de la route 132 a été détourné sur un rang à Sainte-Luce le temps d'effectuer les travaux, ce qui n'a pas limité les déplacements de la population ou des véhicules lourds. Ceci n'aurait pas pu être possible sur la plupart de nos sites témoins et cela aurait donc engendré des effets négatifs importants. L'ouverture d'un rang à une circulation annuelle et non plus saisonnière permettrait d'augmenter la robustesse du réseau et de parer à une éventuelle problématique d'isolement.
- La mise en place de **mesures d'adaptations** aux aléas peut réduire la vulnérabilité. Ce n'est pas inclus dans les calculs des IVRAC présentés, mais cela sera discuté pour chaque site témoin dans la

section 6.2. Par exemple, en l'absence de voie de contournement, un moyen alternatif de transport peut être étudié pour répondre aux situations d'urgence (accès des pompiers ou évacuation vers un hôpital), comme une motoneige en hiver (via l'arrière côte par exemple) ou d'un bateau en été. Une planification des travaux pour combler le trou dans la route peut également permettre de minimiser le temps de réponse et donc de limiter la durée d'interruption et ainsi de diminuer le niveau de vulnérabilité.

Ce ne sont pas les seuls paramètres qui peuvent augmenter la vulnérabilité; il y a également les côtes basses qui limitent la vulnérabilité (sécurité liée aux processus d'érosion qui ne provoquent pas un dénivelé majeur, facilité de réparation,...)

Il est important de garder en tête que la vulnérabilité à l'érosion considérée pour l'IVRAC tient compte de la présence et de l'entretien futur des structures de protection de la côte contre l'érosion. Ainsi, si ces structures n'étaient pas présentes ou pas entretenues adéquatement et qu'elles ne limitaient plus l'érosion, ces secteurs auraient une vulnérabilité à l'érosion beaucoup plus importante. De plus, la distance moyenne des routes à la côte dans ces secteurs protégés par des infrastructures du ministère n'est que de 7,7 m alors qu'elle est de 182,3 m dans les autres secteurs. Une reprise de l'érosion affecterait ainsi ces routes de manière plus rapide qu'une reprise de l'érosion dans d'autres secteurs.

6.1.5 Importance relative des différents aléas

Actuellement, il n'existe aucune mesure d'adaptation pour l'aléa de submersion côtière que ce soit pour la nappe d'eau ou pour le déferlement des vagues pour nos sites témoins. Il est à noter que dans l'ouest du Bas-Saint-Laurent des aboiteaux protègent les terrains bas gagnés sur la mer, et donc également les routes qui y sont construites. Dans ces secteurs, l'exposition à la submersion est ainsi limitée. En l'absence de mesures d'adaptation pour nos sites témoins, tous les segments de route qui sont exposés à la submersion deviennent donc ainsi vulnérables. Au contraire, pour l'érosion côtière, des mesures d'adaptation via des structures rigides de protection (murs, enrochements) ou non structurelles (recharge en sable) ont été mises en place sur certains de nos sites témoins. Ainsi, l'érosion est limitée en de très nombreux endroits et n'affecte pas la route. La vulnérabilité à l'érosion est ainsi moins importante.

Pour les sites étudiés, l'aléa côtier qui a le plus d'importance dépend du type d'environnement côtier dans lequel l'on se situe. Pour les côtes hautes, l'aléa de submersion n'est pas présent, ainsi seule l'érosion induit une vulnérabilité pour la route. Pour les sites de côtes basses, l'érosion et la submersion peuvent potentiellement les affecter même si selon les sites ce n'est pas toujours le cas. Par exemple, le site de Baie-des-Sables et Saint-Ulric n'est presque pas affecté par la submersion avant 2100. Pour les sites avec une route nationale située immédiatement en arrière de la côte, derrière une structure de protection côtière, cela peut limiter l'érosion dans certains cas (comme à Rivière-à-Claude), mais aggraver la submersion. Dans d'autres cas, le potentiel de rupture de la structure et l'érosion du matériel en arrière qui s'en suivrait ne limite pas l'aléa d'érosion et aggrave également la submersion.

Toute action pour réduire la vulnérabilité à un aléa côtier doit tenir compte des impacts potentiels sur l'autre aléa afin de ne pas augmenter la vulnérabilité globale. Par exemple, en installant une structure de protection verticale les plages peuvent être réduites de 40 à 84 % (Bernatchez *et al.*, 2008, Bernatchez *et al.*, 2011, Bernatchez et Fraser 2012) ce qui peut amplifier la submersion et induire également un déferlement qui peut être violent.

L'érosion est plus variable le long de la côte et peut affecter de moins grands segments de route. Cependant, l'effet sur le réseau routier est le même que ce soit un ou plusieurs segments qui empêchent la circulation. La vulnérabilité à la submersion, lorsque présente, est plus élevée que celle à l'érosion. De plus, la submersion affecte souvent de grandes portions de route situées à une distance avec la côte et une altitude semblables où les protections sont aussi homogènes, ce qui engendre donc une submersion uniforme sur de grandes distances (par exemple, actuellement et d'ici 2020, 54 segments sont critiques pour Rivière-à-Claude et 14 pour Maria). Cela provient également du choix des différents sites témoins. Il n'y a que peu de sites avec submersion par la nappe en 2020, plutôt beaucoup de déferlement et de franchissement des ouvrages de protection contre l'érosion.

Il est important de considérer que si l'érosion affecte la route de manière permanente, pour la submersion, la rupture de service peut être permanente (due aux dommages provoqués par l'eau) ou temporaire (seulement pour la durée de l'épisode de submersion).

6.2 IVRAC pour chacun des sites témoins

Les indices de vulnérabilité du réseau routier aux aléas côtiers sont présentés dans cette section pour chacun des sites témoins. En complément de l'IVRAC sont également présentés la vulnérabilité à l'érosion et celle à la submersion afin de permettre d'identifier quel est l'aléa qui a le plus d'impact sur les routes au niveau de ce site témoin selon les différents horizons.

6.2.1 Baie-des-Sables à Saint-Ulric

Globalement, le site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric est faiblement sensible aux aléas côtiers jusqu'en 2100 où certains segments vont présenter une vulnérabilité moyenne ou élevée (tableau 36). Sur les 156 segments étudiés (dont 151 sur la route 132 et 5 au niveau de la halte routière du MTQ), 71,8 % sont non vulnérables en 2020. Cette proportion diminue à 53,2 % en 2060 et atteint seulement 28,8 % en 2100. Le site est faiblement à moyennement vulnérable à l'érosion et presque pas sensible à la submersion avant 2100 (tableau 36 et figure 105).

Tableau 36. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric

Niveau de vulnérabilité	2020			2060			2100		
	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub
nul	112	112	155	83	85	153	45	64	97
faible <10	44	26	1	73	43	2	71	63	4
moyen 10 à 25	0	18	0	0	28	1	33	29	38
élevé 25 à 50	0	0	0	0	0	0	7	0	10
critique	0	0	0	0	0	0	0	0	7
Nombre total	156	156	156	156	156	156	156	156	156

La distance moyenne entre la route et la côte est de 33,6 m variant entre 4,7 et 285,9 m (tableau 37). Dans les sites protégés par une infrastructure du MTQ, la distance moyenne n'est que de 6,4 m. Au niveau des sites suivis par le MTQ, la distance moyenne est de 15,2 m.

Tableau 37. Distance entre la route et la côte – site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric

	Distance entre la route et la côte site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric		
	Moyenne	Minimum	Maximum
non protégé	35.4	6.5	285.9
protégé par le MTQ	6.4	4.7	10.4
suivi MTQ	15.2	4.7	59.1
non suivi	48.6	7.9	285.9
Total général	33.6	4.7	285.9

La vulnérabilité de la route aux aléas côtiers varie entre 0 et 8,2 d'ici 2020 et d'ici 2060, mais peut atteindre 40,0 d'ici 2100 (tableau 38). Pour l'IVRAC 2020, la vulnérabilité moyenne est de 1,3 (niveau faible) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables de 4,7 (faible) (tableau 38). Pour l'IVRAC 2060, la vulnérabilité moyenne est de 2,2 (niveau faible) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 4,6 (faible) (tableau 38). Finalement, pour l'IVRAC 2100, la vulnérabilité moyenne est de 6,7 (niveau faible) et, si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 9,5 (faible) (tableau 38).

En plus de la vulnérabilité, il est important pour les gestionnaires de bien connaître également l'exposition de leurs chaussées pour se préparer adéquatement aux conséquences physiques possibles des aléas sur la route. Pour ce site témoin, la vulnérabilité est faible (voies de contournement, réseau dense pour l'accès aux services d'urgence...), mais un temps de réponse plus rapide et des plans d'interventions planifiés ne peuvent qu'être bénéfiques. Par exemple, d'ici 2020, parmi les 44 segments de routes avec un indice de vulnérabilité faible (tableau 36), 37 présentent tout de même une exposition à l'érosion qui est imminente, les autres pourraient être affectés d'ici 2020. Le fait que leur vulnérabilité ne soit pas élevée, bien qu'ils soient soumis potentiellement à l'action érosive avec une seule tempête est lié aux autres indicateurs qui sont utilisés pour calculer la vulnérabilité. Il est important de savoir que, même si les indices de vulnérabilité pour l'érosion seulement et global sont faibles, l'exposition des routes à l'érosion est, elle, élevée. La plupart d'entre elles étant même exposées de manière imminente. Cependant en raison de la configuration du site, la vulnérabilité est faible. Par exemple, la longueur moyenne des voies de contournement pour ce site est seulement de 14,3 km (min = 5,8 et max = 18,2 km), il n'y a aucun endroit où il n'est pas possible d'emprunter une voie de contournement. Ceci a pour effet de limiter la vulnérabilité tout comme le fait que la configuration de la côte rend la route

aisément réparable (terrasses de plage ou basses falaises, remblaiement possible) et le fait qu'elle soit basse et donc présente moins de danger pour les usagers.

Tableau 38. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric

Horizon	Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart type
2020 ensemble du site	érosion	2.6	0.0	16.4	4.6
	submersion	0.04	0.0	5.5	0.4
	IVRAC	1.3	0.0	8.2	2.3
2020 secteurs vulnérables	érosion	9.3	1.3	16.4	3.5
	submersion	5.5	5.5	5.5	na
	IVRAC	4.7	0.6	8.2	1.7
2060 ensemble du site	érosion	4.1	0.0	16.4	4.9
	submersion	0.2	0.0	15.6	1.6
	IVRAC	2.2	0.0	8.2	2.5
2060 secteurs vulnérables	érosion	9.0	1.4	16.4	3.0
	submersion	10.8	7.7	15.6	4.2
	IVRAC	4.6	0.7	8.2	1.5
2100 ensemble du site	érosion	5.0	0.0	16.4	4.8
	submersion	8.5	0.0	63.6	14.4
	IVRAC	6.7	0.0	40.0	8.0
2100 secteurs vulnérables	érosion	8.4	1.4	16.4	3.1
	submersion	22.5	2.5	63.6	15.2
	IVRAC	9.5	0.8	40.0	8.0

Pour ce site, l'aléa qui a le plus d'importance à court et moyen terme est l'érosion (tableau 36 et figure 105). En effet, pour l'IVRAC 2020, parmi les 44 segments vulnérables, 43 le sont en raison de l'érosion et 1 de par combinaison des 2 aléas. Pour l'IVRAC 2060, parmi les 73 segments vulnérables, 70 sont dus uniquement à l'érosion, 2 à la submersion et 1 aux deux aléas. Cependant, pour l'IVRAC 2100, parmi les 111 segments vulnérables, 52 le sont à cause de l'érosion, 19 à cause de la submersion et 40 à cause des deux aléas. Ceci dénote une importance croissante de la submersion pour ce site en raison de l'élévation du niveau marin relatif.

Les secteurs avec la vulnérabilité la plus importante pour ce site (soit de niveau élevé en 2100) sont les segments BDS011 et BDS087 à 089 (figure 103 et figure 102). Sur le premier segment (figure 102), la vulnérabilité découle de l'érosion seulement en 2020 et en 2060, l'IVRAC à ces périodes est alors

faible. Cependant, en 2100, ce segment est également soumis à l'aléa de submersion et son IVRAC devient élevé. Sur la portion de côte présentée à la figure 103, la côte est artificialisée par un enrochement du MTQ. Aucun aléa n'est prévu affecter la côte en 2020 ou 2060, mais en 2100, une submersion par franchissement de l'ouvrage ainsi qu'un possible danger lié au déferlement seront présents. Ce site connaîtra alors un IVRAC élevé et une vulnérabilité à la submersion critique. L'érosion est considérée comme limitée par les ouvrages de protection, donc la route ne devrait pas être exposée à cet aléa. Ce degré d'exposition et donc ce niveau de vulnérabilité ne resteront valides que si l'entretien et la mise à jour des enrochements sont correctement effectués sur le long terme.



Figure 102. Segment BDS011, vulnérabilité élevée en 2100 (mais faible en 2020 et 2060) (© LDGIZC – UQAR)



Figure 103. Segments BDS087 à 089, vulnérabilité élevée en 2100 (mais nulle en 2020 et 2060) (© LDGIZC – UQAR)

Les secteurs les moins affectés par les aléas côtiers pour le site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric sont ceux pour lesquels le taux d'érosion est moins important car la distance entre la route et la côte est relativement faible partout. Sur la figure 104, la vulnérabilité de la route est nulle jusqu'en 2100. On voit bien un cran/récif rocheux sur l'estran. Les taux de migrations prévus sont soit une très faible érosion, soit de l'accumulation ce qui explique pourquoi ils ne seront pas exposés à l'érosion. Cependant, il est important de noter que ces segments sont situés entre des segments qui sont eux vulnérables (faiblement ou moyennement), ainsi ils pourraient se retrouver isolés du reste du réseau. On retrouve d'autres secteurs non vulnérables notamment en arrière des écueils rocheux (faible érosion ou érosion nulle) ou lorsque d'autres éléments (des habitations par exemple) se situent entre la route et la côte. Ceci protège la route, car elle n'est plus le premier élément exposé; dans ces secteurs la route est également plus loin de la côte.



Figure 104. Segments BDS132 à 134, vulnérabilité nulle (2020, 2060 et 2100) (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

Les taux de migration sont relativement modestes (moyenne de -0,16 m/an, voir section 5.1.3) dans le secteur de Baie-des-Sables à Saint-Ulric, ce qui limite la vulnérabilité de la route 132 tout comme la présence de voies de contournement courtes sur l'ensemble du territoire ainsi que le type d'environnement côtier (terrasses et basses falaises meubles) minimisant les risques et favorisant la possibilité de réparations. Les types de côte et l'occupation de l'arrière côte (agricole, plusieurs routes au sud de la 132) sont semblables à ce que l'on peut retrouver dans l'est du Bas-Saint-Laurent. À la

suite de la tempête du 6 décembre 2010, l'érosion a arraché la route 132 à plusieurs endroits dans la municipalité de Sainte-Flavie et la circulation a alors été déviée sur un rang en attendant de réparer la route, ce qui démontre, malgré une exposition aux aléas, la faible vulnérabilité du réseau routier dans ce secteur.

Ce qui augmente le niveau de vulnérabilité pour ce site témoin est la faible distance entre la route et la côte et le fait que la route se retrouve souvent dans l'espace de liberté de la côte. En effet, certains secteurs peuvent être stables sur le long terme, mais être tout de même sensibles à des événements de tempête qui peuvent éroder beaucoup de terrain en une seule fois avant que la côte n'engraisse et ne revienne à sa position initiale (Marie *et al.*, 2014). Si la route est située dans cette zone tampon soumise à la migration naturelle de la côte, ou espace de liberté, elle est exposée à l'érosion et peut empêcher un retour à l'équilibre si des structures de protections sont installées.

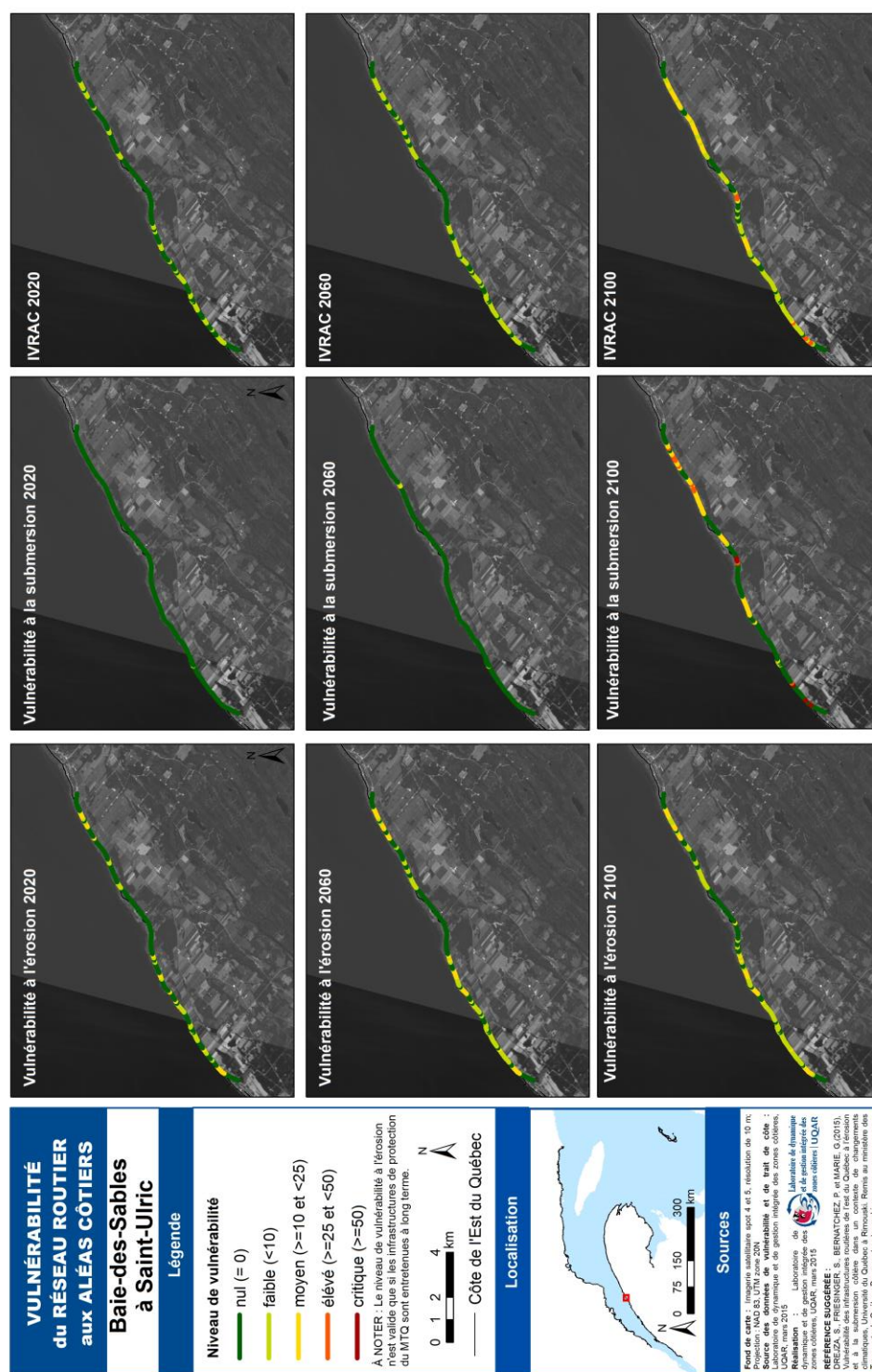


Figure 105. IVRAC totaux et partiels du site de Baie-des-Sables à Saint-Ulric

6.2.2 Rivière-à-Claude

Pour le site de Rivière-à-Claude, plus de 40 % des segments présentent une vulnérabilité élevée dès à présent (55 segments sur les 134, tableau 39 et figure 108). La proportion de routes vulnérables est de 49,3 % pour l'IVRAC 2020, de 58,2 % pour l'IVRAC 2060 et de 69,4 % pour l'IVRAC 2100.

Tableau 39. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Rivière-à-Claude

Niveau de vulnérabilité	2020			2060			2100		
	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub
nul	68	115	75	56	112	65	41	111	50
faible <10	6	13	0	9	13	1	21	14	2
moyen 10 à 25	5	6	0	6	9	0	8	9	13
élevé 25 à 50	55	0	5	63	0	6	64	0	6
critique	0	0	54	0	0	62	0	0	63
Nombre total	134	134	134	134	134	134	134	134	134

Près des deux tiers de la route 132 de ce site témoin sont construits sur un remblai au pied d'une falaise rocheuse (64,2 %). Cette situation particulière conduit à une grande proximité entre la route et la côte dans ces secteurs, soit 6,7 m en moyenne, alors que c'est plus de 50 m dans les autres secteurs (tableau 40).

Tableau 40. Distance entre la route et la côte – site de Rivière-à-Claude

	Distance entre la route et la côte – site Rivière-à-Claude		
	Moyenne	Minimum	Maximum
non protégé	53.5	2.1	215.2
protégé par le MTQ	6.7	2.4	13.2
suivi par le MTQ	8.7	2.1	38.5
non suivi	57.8	4.1	215.2
Total général	26.3	2.1	215.2

Le site de Rivière-à-Claude est un des deux sites témoins les plus vulnérables analysés dans cette étude. Pour l'IVRAC 2020, la vulnérabilité moyenne est de 15,7 (niveau moyen) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables de 31,9 (élevé) (tableau 41). Pour l'IVRAC 2060, la vulnérabilité moyenne est de 18,2 (niveau moyen) et si l'on ne considère que les segments

qui sont vulnérables, de 31,2 (élevé) (tableau 41). Finalement, pour l'IVRAC 2100, la vulnérabilité moyenne est de 19,3 (niveau moyen) et, si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 27,8 (élevé) (tableau 41). Ainsi, les segments vulnérables le sont principalement déjà dès 2020 et leur indice moyen n'augmente pas. L'indice moyen pour l'ensemble du site augmente légèrement.

Pour l'IVRAC 2020, il apparaît que, tandis que les segments de faible vulnérabilité sont liés à l'érosion, ceux de vulnérabilité plus importante sont principalement dus à la submersion (à 78 %) (tableau 39 et figure 108). La submersion s'explique par le franchissement de l'ouvrage de protection et s'accompagne d'un danger lié aux vagues et aux projections de débris (voir photo à la figure 106). La situation reste très similaire pour les horizons 2060 et 2100.

Tableau 41. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de Rivière-à-Claude

Horizon	Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart type
2020 ensemble du site	érosion	1.6	0.0	20.0	4.1
	submersion	29.91	0.0	77.5	34.4
	IVRAC	15.7	0.0	46.5	17.6
2020 secteurs vulnérables	érosion	11.0	6.3	20.0	3.6
	submersion	67.9	34.6	77.5	9.3
	IVRAC	31.9	4.5	46.5	10.5
2060 ensemble du site	érosion	1.9	0.0	20.0	4.5
	submersion	34.5	0.0	77.5	34.7
	IVRAC	18.2	0.0	46.5	17.6
2060 secteurs vulnérables	érosion	11.5	6.3	20.0	3.9
	submersion	67.0	8.0	77.5	12.1
	IVRAC	31.2	4.0	46.5	11.0
2100 ensemble du site	érosion	2.0	0.0	20.0	4.6
	submersion	36.6	0.0	77.5	33.4
	IVRAC	19.3	0.0	46.5	16.9
2100 secteurs vulnérables	érosion	11.4	6.3	20.0	3.8
	submersion	58.4	9.8	77.5	22.4
	IVRAC	27.8	4.5	46.5	13.2



Figure 106. Vagues déferlant par-dessus le mur de protection de la route 132 sur la rive nord de la Gaspésie durant la tempête du 6 décembre 2010 (© LDGIZC-UQAR)

Dix-neuf segments sont en situation d'exposition imminente à l'érosion, même si leur vulnérabilité varie seulement de faible à élevée (IVRAC entre 4,5 et 46,5 en 2020). Il est important pour les gestionnaires de bien connaître également l'exposition de leurs chaussées pour se préparer adéquatement aux conséquences physiques possibles des aléas sur la route ainsi qu'à l'entretien.

Les secteurs avec la vulnérabilité la plus importante pour ce site sont ceux où la route 132 est construite au pied de falaises rocheuses, sur des remblais (figure 98). Leur IVRAC est élevé et leur vulnérabilité à la submersion est critique. Ces segments font partie des sites les plus vulnérables à la submersion à l'échelle de tous les sites témoins et ont été présentés à la section 6.1.2.2. Ceci est dû à leur faible altitude, à leur proximité avec la côte et au fait que la côte est artificialisée par une structure rigide de protection.

Les secteurs les moins affectés du site de Rivière-à-Claude sont les secteurs dans lesquels la route est plus éloignée de la côte soit dans le village de Rivière-à-Claude et de Ruisseau à Rebours (figure 107). La vulnérabilité à l'érosion est seulement faible à moyenne pour ce site témoin (figure 108) malgré la grande proximité des routes à la côte et de nombreux segments ne

sont pas vulnérables. En effet, des structures de protection contre l'érosion mises en place par le MTQ sont présentes sur de grandes portions du territoire. L'érosion qui a été considérée n'inclut donc aucun taux de migration annuel, mais seulement un recul lié à un événement. Le fait que ces secteurs aient une faible vulnérabilité à l'érosion d'ici 2100 tient compte de l'entretien actuel et futur de structures. Dans les cas contraires, la vulnérabilité de beaucoup de segments de routes pourrait augmenter drastiquement.



Figure 107. Secteur non vulnérable RAC095 à 097

Pour ce site, l'aléa qui a le plus d'importance est l'aléa de submersion. Pour l'IVRAC de 2100, plus de 75 % des segments vulnérables le sont uniquement à cause de la submersion, plus de 15 % à cause des deux aléas et moins de 10 % seulement à cause de l'érosion uniquement. Ces proportions sont relativement similaires pour les IVRAC de 2020 et de 2060, même s'il est intéressant de constater que ceux de niveaux faibles sont plutôt dus à l'érosion et ceux de niveau moyen ou élevé sont, eux, dus à la submersion.

Ce qui limite la vulnérabilité de la route 132 est la présence d'infrastructures de protection contre l'érosion. Cependant, ces mêmes structures aggravent l'aléa de submersion et augmentent la potentialité de déferlement.

Ce qui augmente le niveau de vulnérabilité pour ce site témoin est l'absence de voie de contournement. L'arrière-pays n'est pas urbanisé, et hormis des voies de communication perpendiculaires au fleuve, le long des vallées au niveau de villages, il n'existe pas d'autres voies de circulation que la route 132. L'accès aux services d'urgence étant possible soit à l'est, soit à l'ouest du site,

une seule rupture de la route n'affecte que peu l'accès aux services. Cependant, si plus d'un secteur devient affecté par le même événement par exemple la route 132 au niveau de la halte routière ainsi qu'à l'est du ruisseau à Rebours, ce hameau se retrouverait isolé. Cela peut se produire également pour l'ensemble du village de Rivière-à-Claude si la route 132 qui le relie à ses deux villages voisins est affectée, tant la route à l'ouest que nous avons étudié que celle à l'est que nous n'avons pas étudiée, mais dont la situation est très similaire. Un plan d'urgence qui tient compte non seulement de la vulnérabilité de la route pour la municipalité, mais aussi de l'« effet domino » possible advenant un événement qui affecte plusieurs segments simultanément devrait être élaboré.

D'autres aléas sont présents sur ce territoire et affectent également la route. On parle ici d'avalanches, de chutes de blocs rocheux, de chute de blocs de glace et de coulées de débris. Ils n'ont pas été intégrés dans l'IVRAC, mais ont une influence sur la vulnérabilité des routes dans leur ensemble. Il est donc important de gérer l'ensemble des aléas du site.



6.2.3 Chandler

La vulnérabilité moyenne aux aléas côtiers pour la route 132 au site témoin de Chandler est faible à tous les horizons étudiés. Cependant, pour les quelques segments qui sont effectivement vulnérables, leur niveau est moyen à élevé (tableau 42 et figure 113). Plus de 80 % des segments de routes de ce site témoin ne sont pas vulnérables aux aléas côtiers, quel que soit l'horizon envisagé. En effet, seulement 2 segments sont vulnérables d'ici 2020, autant d'ici 2060 et 4 segments d'ici 2100 (tableau 42).

Pour ce site, l'aléa qui a le plus d'importance est l'érosion. En effet, à Chandler, l'aléa de submersion n'affecte pas la route étant donné son altitude élevée, celle-ci se trouvant en sommet de falaises (partie est du site) ou sur l'arrière côte, éloignée des terrasses de plage côtières (partie ouest du site).

Tableau 42. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Chandler

Niveau de vulnérabilité	2020			2060			2100		
	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub
nul	23	23	25	23	23	25	21	21	25
faible <10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
moyen 10 à 25	1	0	0	1	0	0	2	0	0
élevé 25 à 50	1	1	0	1	1	0	2	2	0
critique	0	1	0	0	1	0	0	2	0
Nombre total	25	25	25	25	25	25	25	25	25

La distance entre la route et la côte est variable le long du site témoin, mais elle est en moyenne de 73,5 m (tableau 43). Cette distance varie selon si l'on se situe dans l'est du site, au niveau des falaises où la distance moyenne est de 16,1 m, alors que dans l'ouest du site la route est en moyenne à 195,6 m de la côte. Le MTQ effectue un suivi au niveau des segments les plus proches de la côte, mais ce ne sont pas tous des segments protégés par des enrochements du MTQ.

Tableau 43. Distance entre la route et la côte – site de Chandler

	Distance entre la route et la côte – site de Chandler		
	Moyenne	Minimum	Maximum
non protégé	82.6	3.3	356.5
protégé par le MTQ	6.8	6.6	6.9
suivi par le MTQ	7.6	3.3	14.4
non suivi	99.2	10.4	356.5
Total général	73.5	3.3	356.5

Pour l'IVRAC 2020, la vulnérabilité moyenne est de 2,5 (niveau faible) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables de 31,8 (élevé) (tableau 44). Pour l'IVRAC 2060, la vulnérabilité moyenne est de 2,7 (niveau faible) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 34,3 (élevé) (tableau 44). Finalement, pour l'IVRAC 2100, la vulnérabilité moyenne est de 5,0 (niveau moyen) et, si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 31,4 (élevé) (tableau 44).

Pour les segments vulnérables, leur niveau de vulnérabilité à l'érosion est critique (63,6 en moyenne en 2020) pour le site de Chandler (tableau 44 et figure 113). Les 4 segments qui seront vulnérables à l'érosion n'ont actuellement aucune structure de protection. L'évolution de la côte au niveau de ces segments est soit nulle (accumulation de terrasse de plage au pied du talus) ou faible, mais un segment pourrait connaître -0,3 m/an d'érosion. Ainsi, un suivi régulier est nécessaire pour intervenir avant que la route ne soit affectée. Les dates potentielles d'exposition de la chaussée à l'érosion sont importantes à considérer afin de se préparer à effectuer une intervention (voir la base de données de ce volume et/ou le volume I du présent projet). Celle-ci varie entre un seul événement (érosion imminente) et 2090. Un suivi régulier de l'évolution de la côte est donc nécessaire.

Tableau 44. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de Chandler

Horizon	Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart type
2020 ensemble du site	érosion	5.1	0.0	84.9	18.7
	submersion	0.00	0.0	0.0	0.0
	IVRAC	2.5	0.0	42.4	9.3
2020 secteurs vulnérables	érosion	63.6	42.4	84.9	30.0
	submersion	na	na	na	na
	IVRAC	31.8	21.2	42.4	15.0
2060 ensemble du site	érosion	5.5	0.0	94.9	20.5
	submersion	0.0	0.0	0.0	0.0
	IVRAC	2.7	0.0	47.4	10.2
2060 secteurs vulnérables	érosion	68.6	42.4	94.9	37.1
	submersion	na	na	na	na
	IVRAC	34.3	21.2	47.4	18.5
2100 ensemble du site	érosion	10.0	0.0	94.9	25.4
	submersion	0.0	0.0	0.0	0.0
	IVRAC	5.0	0.0	47.4	12.7
2100 secteurs vulnérables	érosion	62.8	37.9	94.9	27.3
	submersion	na	na	na	na
	IVRAC	31.4	19.0	47.4	13.6

Les secteurs avec la vulnérabilité la plus importante pour ce site sont situés au sommet de falaises (falaises rocheuses, meubles à base rocheuse ou rocheuses à sommet meuble). La partie rocheuse est constituée de grès qui peuvent être sujets à la météorisation, s'altérer et devenir friables. Pour le segment CHA022, dont la distance minimale avec le sommet du talus n'est que de 3,3 m (figure 109), la vulnérabilité à l'érosion est élevée et l'indice global est moyen. Ce segment présente un enrochement partiel à la base du talus dans sa moitié est, mais la falaise est tout de même active. De plus, un ponceau est également présent au niveau d'une indentation de la côte due à un petit cours d'eau et met la route à grande proximité du talus si celui-ci venait à être affecté par un recul. Une petite terrasse de plage est présente dans la partie ouest, mais elle n'est pas assez large pour présenter une protection contre la réactivation du talus en cas d'événement important.



Figure 109. Segment CHA022 (© LDGIZC – UQAR)

Le segment CHA020 est également exposé à l'érosion et présente une vulnérabilité élevée à l'érosion d'ici 2100 (exposition probable en 2090) et un indice global moyen. Une étroite terrasse de plage est présente au pied du talus, mais sa largeur varie.



Figure 110. Segment CHA020 (© LDGIZC – UQAR)

Les segments CHA014 et 015 sont également très vulnérables, la falaise y est en érosion et, même si les taux de migration annuels sont relativement faibles (-0,13 et -0,29 m/an), la distance entre la route et la côte est limitée (6,1 à 10,4 m).



Figure 111. Segments CHA-14 et 015 (© LDGIZC – UQAR)

Les secteurs les moins affectés sont ceux déjà protégés par les infrastructures du MTQ (enrochements). Sont également peu affectés les segments où une terrasse de plage s'est constituée au pied du talus soit dans l'ouest du site (en amont du grand quai de Chandler) et en amont d'un petit épi qui a été construit au niveau de la poissonnerie. Même si les terrasses de plages ne stabilisent pas totalement la paroi rocheuse située en arrière (elle est quand même vive à plusieurs endroits), cela limite l'action des vagues à ces endroits et peut absorber l'effet d'une tempête.

Ce qui limite la vulnérabilité de la route 132 dans ce site témoin découle du fait qu'un seul aléa est présent dans ce secteur. La route n'est pas affectée par la submersion.

Ce qui augmente le niveau de vulnérabilité est l'absence de voie de contournement dans le secteur le plus exposé, même si seulement une courte distance est manquante. Le chemin Saint-François se termine et devient le « chemin de la Débouche », mais celui-ci est un chemin non asphalté non considéré pour les voies de contournement (figure 112), tout comme la route de Pellegrin à laquelle il se connecte pour rejoindre la ville de Chandler. L'autre élément qui augmente la vulnérabilité est le DJMA élevé dans ce secteur, la route 132 est très fréquentée avec un débit moyen annuel de 9100 véhicules/jour (le plus élevé de tous nos sites témoins).



Figure 112. Chemin de la Débouche – photo de Google Street View

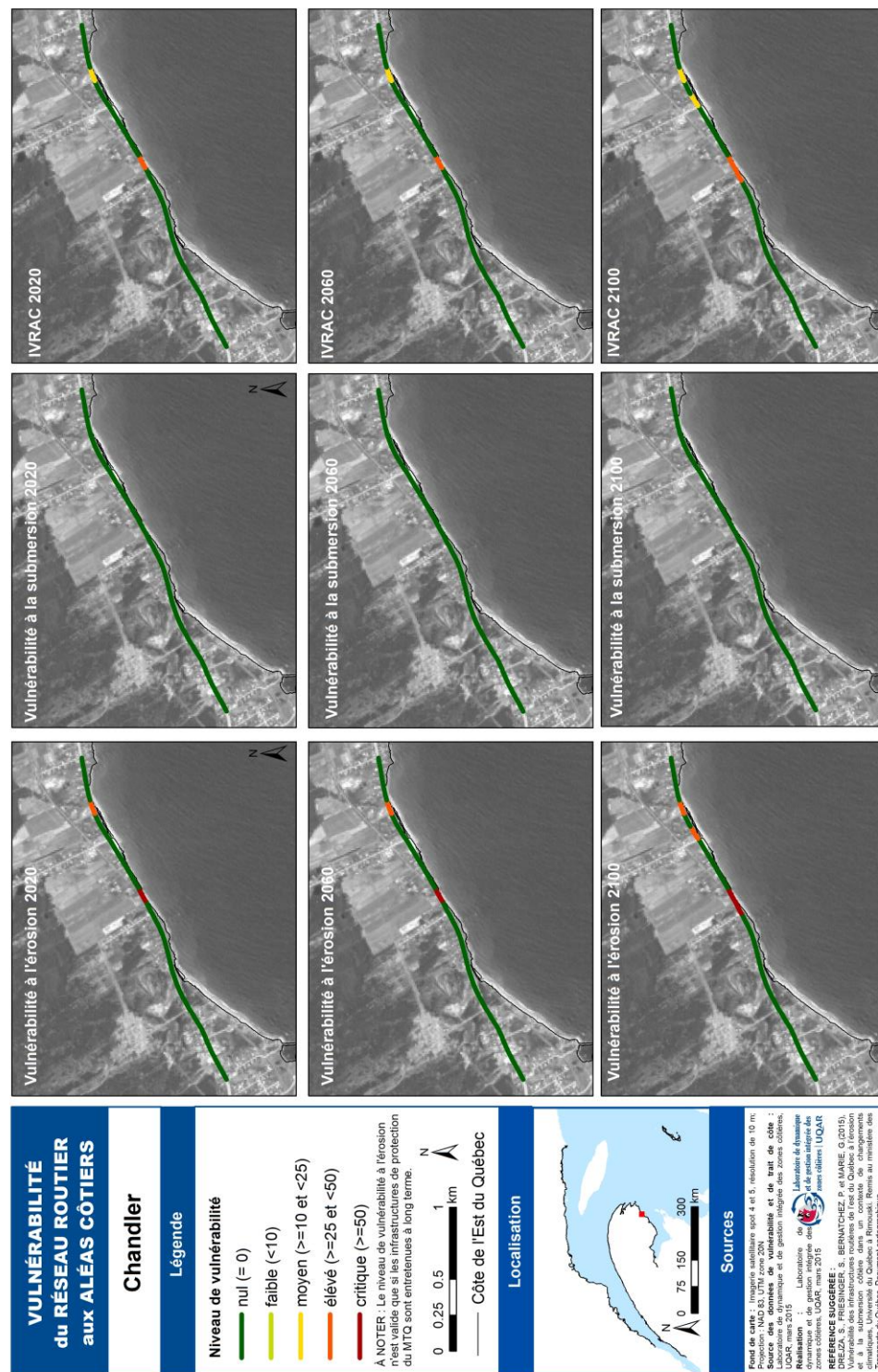


Figure 113. IVRAC du site de Chandler

6.2.4 Carleton à Maria

Le site de Carleton à Maria est un des sites les plus vulnérables parmi les neuf sites étudiés. En effet, la moyenne de l'indice de vulnérabilité y est la plus élevée quelle que soit la période et atteint 22,2 en 2100 pour l'ensemble du site (tableau 47). De plus, la majorité des segments est vulnérable dès maintenant (54,9 % d'ici 2020) et cette proportion augmente jusqu'à près des $\frac{3}{4}$ des segments d'ici 2100 (73,5 % pour l'IVRAC 2100), avec 7 segments critiques, 47 élevés, 13 moyens et 8 faibles (tableau 45 et figure 116).

Tableau 45. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Carleton à Maria

Niveau de vulnérabilité	2020			2060			2100		
	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub
nul	46	46	60	41	45	47	27	42	33
faible <10	11	0	0	3	0	0	8	0	4
moyen 10 à 25	6	52	1	9	52	2	13	52	10
élevé 25 à 50	34	3	27	43	3	32	47	3	31
critique	5	1	14	6	2	21	7	5	24
Nombre total	102	102	102	102	102	102	102	102	102

La distance moyenne entre la route et la côte sur ce site est de 87,7 m (tableau 46) et varie grandement selon les secteurs. Au niveau du site suivi par le MTQ, soit le secteur de terrasse de plage au centre du site témoin, la distance moyenne n'est que de 6,1 m. Dans les secteurs protégés par des infrastructures du MTQ (ici des murs de bois et/ou de béton), la distance varie entre 3,2 et 11,6 m, avec 5,7 m en moyenne (tableau 46), ce qui est problématique lorsqu'on sait que pour les secteurs de terrasses de plage, un recul événementiel peut atteindre 12,2 m. Ainsi, tous ces segments de la route 132 peuvent être possiblement affectés par l'érosion.

Tableau 46. Distance entre la route et la côte – site de Carleton et Maria

	Distance entre la route et la côte – site de Carleton et Maria		
	Moyenne	Minimum	Maximum
non protégé	173.0	3.0	487.7
protégé par le MTQ	5.7	3.2	11.6
suivi par le MTQ	6.1	3.0	20.8
non suivi	191.1	4.3	487.7
Total général	87.7	3.0	487.7

Pour l'IVRAC 2020, la vulnérabilité moyenne est de 15,7 (niveau moyen) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables de 28,6 (élevé) (tableau 47). Pour l'IVRAC 2060, la vulnérabilité moyenne est de 10,9 (niveau moyen) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 32,3 (élevé) (tableau 47). Finalement, pour l'IVRAC 2100, la vulnérabilité moyenne est de 22,2 (niveau moyen) et, si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 30,1 (élevé) (tableau 47).

Tableau 47. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de Carleton à Maria

Horizon	Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart type
2020 ensemble du site	érosion	10.4	0.0	77.5	12.0
	submersion	21.0	0.0	94.9	27.5
	IVRAC	15.7	0.0	59.7	17.5
2020 secteurs vulnérables	érosion	18.9	11.0	77.5	9.9
	submersion	50.9	24.5	94.9	17.4
	IVRAC	28.6	6.9	59.7	13.8
2060 ensemble du site	érosion	10.9	0.0	77.5	12.7
	submersion	27.7	0.0	94.9	28.8
	IVRAC	19.3	0.0	59.7	18.4
2060 secteurs vulnérables	érosion	19.5	11.0	77.5	10.9
	submersion	51.3	24.0	94.9	17.8
	IVRAC	32.3	6.9	59.7	12.0
2100 ensemble du site	érosion	13.0	0.0	89.4	16.4
	submersion	31.3	0.0	109.5	28.3
	IVRAC	22.2	0.0	67.0	17.7
2100 secteurs vulnérables	érosion	22.2	11.0	89.4	15.9
	submersion	46.2	5.4	109.5	22.1
	IVRAC	30.1	2.7	67.0	13.6

Pour ce site, aucun aléa n'est plus important que l'autre. Tant la vulnérabilité à l'érosion que celle à la submersion atteignent des niveaux importants (tableau 45 et figure 116). D'ailleurs, cela se reflète dans la proportion de segments pour lesquels les deux aléas sont à l'origine de leur vulnérabilité : il est de 75 % pour l'IVRAC 2020, de 83,6 % pour l'IVRAC 2060 et de 72,0 % pour l'IVRAC 2100. La vulnérabilité à l'érosion est légèrement moins importante, mais il est important de considérer le fait que la majorité des secteurs vulnérables sont protégés par des structures de protection du MTQ, leur

niveau de vulnérabilité tient compte qu'un entretien à long terme de ces structures serait effectué. Si cela n'était pas le cas, la vulnérabilité à l'érosion serait affectée.

L'exposition des chaussées à des degrés d'exposition importants aux aléas côtiers doit engendrer une planification en conséquence (voir volume I et base de donnée du présent volume). En effet, d'un point de vue de l'érosion, 56 segments peuvent être affectés par un seul événement et d'un point de vue de la submersion, 42 segments sont concernés par un franchissement de l'ouvrage de protection par la submersion.

Les secteurs avec la vulnérabilité la plus importante pour ce site sont déjà présentés à la section 6.1.2.1. Leur vulnérabilité est liée à l'occurrence de deux aléas, leur proximité de la côte et le danger potentiel lié aux débris associés au franchissement d'un muret par les vagues.

Certains segments sont non vulnérables de par leur distance avec la côte (comme les segments MAR004 à MAR028 au sommet de falaises meubles qui malgré des taux de migration de -0,18 m/an à -0,20 m/an ne seront pas affectés de par leur distance à la côte plus grande que 28 m). Mais parmi ceux qui sont vulnérables, les secteurs les moins affectés sont ceux pour lesquels une terrasse de plage s'est formée en avant du mur de protection de la route 132 (figure 114). Cette terrasse limite en effet le déferlement des vagues sur la route et assure une zone tampon qui pourrait être érodée en cas de tempête et ainsi empêcher l'érosion d'affecter la route située en arrière. Ces secteurs devraient être préservés (en limitant le piétinement ou le passage des véhicules hors route) afin de maintenir leur rôle protecteur. Le fait de favoriser ce type de terrasses de plage ailleurs devrait être étudié afin d'apporter ce type de protection à des secteurs adjacents. Les terrasses de plage constitueraient alors l'espace de liberté de la côte dans lequel elle pourra maintenir son équilibre à long terme sans affecter les infrastructures routières.



Figure 114. Segments moins vulnérables dus à la présence d'une terrasse de plage en avant du mur (© LDGIZC –UQAR)

Ce qui limite la vulnérabilité de la route 132 pour ce site témoin est la présence de voies de contournement sur la presque totalité du site témoin. En effet, excepté pour 8 segments qui seront affectés seulement par la submersion (pas actuellement, mais d'ici 2060 et d'ici 2100), les 94 autres segments ont des voies de contournement disponibles entre 0,9 et 11,6 km. Pour les segments qui n'en ont pas, il s'agira seulement d'une submersion par la nappe d'eau étant donné la distance avec la côte qui est importante. La route du 2^{ème} rang (figure 115) pourrait être aménagée pour être utilisable par tous et en tout temps, ou bien la rue municipale des Étourneaux pourrait être reliée avec celles des Becs Scies puis des Hérons afin d'offrir une autre alternative au passage par la route 132. Cela augmenterait la robustesse du réseau routier comme cela est le cas pour le reste du site témoin.



Figure 115. Route du 2^{ème} rang à Maria – photo de Google Street View

Ce qui augmente le niveau de vulnérabilité est la grande proximité de la route avec la côte au niveau du secteur de terrasse de plage qui est emmuré par le MTQ. De plus, cette grande proximité fait que tant l'érosion que la submersion affectent la route 132. Le débit journalier moyen annuel est également important.

Dans la perspective de la hausse du niveau marin appréhendé, une analyse du rehaussement de la route devrait être envisagée.

6.2.5 La baie de Plaisance

La route 199 du site de la baie de Plaisance est vulnérable aux aléas côtiers sur 15,6 % de sa longueur d'ici 2020, 36 % d'ici 2060 et 52,4 % d'ici 2100. Plusieurs segments présentent une vulnérabilité critique aux aléas côtiers (tableau 48). Ces segments sont tous localisés au nord du site témoin, dans un secteur appelé « la Martinique » (figure 119 et figure 120).

Tableau 48. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site la baie de Plaisance

Niveau de vulnérabilité	2020			2060			2100		
	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub
nul	138	147	155	105	144	116	78	144	86
faible <10	9	0	9	40	0	22	64	0	17
moyen 10 à 25	15	9	0	8	12	17	9	12	49
élevé 25 à 50	2	6	0	2	6	0	1	6	0
critique	0	2	0	9	2	9	12	2	12
Nombre total	164	164	164	164	164	164	164	164	164

Globalement, la route 199 est située en moyenne à 217 m de la côte, mais dans les sites protégés de l'érosion par le MTQ via des enrochements, la distance moyenne est seulement de 6,0 m et varie entre 4,0 et 8,1 m (tableau 49).

Tableau 49. Distance entre la route et la côte – site de la baie de Plaisance

	Distance entre la route et la côte – site de la baie de Plaisance		
	Moyenne	Minimum	Maximum
non protégé	236.6	9.9	645.2
protégé par le MTQ	6.0	4.0	8.1
suivi par le MTQ	97.4	4.0	294.7
non suivi	248.2	4.5	645.2
Total général	216.9	4.0	645.2

Pour l'IVRAC 2020, la vulnérabilité moyenne est de 1,9 (niveau faible) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables de 11,9 (moyen) (tableau 50). Pour l'IVRAC 2060, la vulnérabilité moyenne est de 5,7 (niveau faible) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 15,9 (moyen) (tableau 50). Finalement, pour l'IVRAC 2100, la vulnérabilité moyenne est de

8,6 (niveau faible) et, si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 16,4 (élevé) (tableau 50). La vulnérabilité de la route aux aléas côtiers varie entre 0 et 33,5 d'ici 2020, entre 0 et 79,8 d'ici 2060, mais peut atteindre 159,1 d'ici 2100 (tableau 50), ce qui est la valeur maximale pour l'ensemble des routes étudiées. Ces résultats montrent que la moyenne masque de grandes disparités entre les segments non vulnérables et ceux qui le sont, mais aussi parmi ceux qui sont vulnérables (indices variant entre 3,1 et 159,1 en 2100 avec un écart type de 26,6).

Tableau 50. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de la baie de Plaisance

Horizon	Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart type
2020 ensemble du site	érosion	3.4	0.0	67.1	10.9
	submersion	0.3	0.0	6.1	1.4
	IVRAC	1.9	0.0	33.5	5.4
2020 secteurs vulnérables	érosion	33.1	21.2	67.1	12.9
	submersion	6.1	6.1	6.1	0.0
	IVRAC	11.9	3.1	33.5	8.3
2060 ensemble du site	érosion	3.8	0.0	67.1	11.1
	submersion	7.6	0.0	118.6	23.0
	IVRAC	5.7	0.0	79.8	15.4
2060 secteurs vulnérables	érosion	31.3	18.4	67.1	12.6
	submersion	26.0	6.1	118.6	36.8
	IVRAC	15.9	3.1	79.8	22.5
2100 ensemble du site	érosion	3.8	0.0	67.1	11.1
	submersion	13.4	0.0	265.2	33.2
	IVRAC	8.6	0.0	159.1	20.9
2100 secteurs vulnérables	érosion	31.3	18.4	67.1	12.6
	submersion	28.2	6.1	265.2	43.8
	IVRAC	16.4	3.1	159.1	26.6

Pour ce site, l'aléa le plus important est la submersion. Pour le futur, plus de segments seront affectés, mais de moindre niveau de vulnérabilité. En effet, beaucoup de côtes sont en accrétion et, dans les secteurs exposés à l'érosion, soit la route est loin, soit les segments routiers sont majoritairement protégés par le MTQ. Mais pour les secteurs avec un niveau de vulnérabilité important, c'est plutôt l'érosion ou les deux aléas qui sont la cause du niveau de vulnérabilité (tableau 48, figure 119 et figure 120). Pour l'IVRAC 2100, deux

tendances se distinguent. Pour les segments critiques, les deux aléas sont responsables de la vulnérabilité (tant pour l'IVRAC 2060 que 2100). Cependant, pour les segments à vulnérabilité faible, il s'agit très majoritairement de l'aléa de submersion qui est en cause (63 segments sur les 64 de niveau faible pour l'IVRAC 2100 et 39 segments sur 40 pour l'IVRAC 2060). La vulnérabilité à la submersion augmente au cours du temps. En effet, les îles de la madeleine sont le secteur qui connaîtra la plus importante variation isostatique de nos sites témoins (subsidence de -0,18 et -0,32 m en 2060 et 2100), la hausse prévue du niveau marin relatif sera donc plus importante.

Sans égard au niveau de vulnérabilité, il est important de noter que l'exposition à l'érosion est imminente dans 16 segments (voir la base de données). Ceci requiert un plan d'intervention pour le rétablissement du service afin de savoir où les interventions sont à prévoir et ce qui pourrait être effectué (réserve de matériel de remblai disponible par exemple). Ce plan d'intervention pour le rétablissement ne remplace pas le plan d'action qui devrait être mis en place pendant l'épisode d'érosion et/ou de submersion afin de gérer la rupture de service.

Les segments avec la vulnérabilité la plus importante pour ce site sont ceux présentés à la section 6.1.2.1., soit le secteur de la Martinique. Il est très vulnérable, car il est très exposé à la fois à l'érosion (taux de -0,71 m/an) et à la submersion. Il faut noter que le taux d'érosion a été ramené à 0 dans les secteurs artificialisés par le MTQ considérant un entretien de l'ouvrage à long terme. Quelques segments sont tout de même à risque imminent d'érosion, car la distance moyenne entre la route et la côte y est seulement de 6 m (min 4,0 max 8,1 m) alors que le recul événementiel possible est de 16,9 m. La plupart des segments imminents sont artificialisés (14 sur 16) et seuls deux ne le sont pas, mais leur proximité les expose de manière imminente également.

Pour la plupart des segments, l'érosion de la côte est faible et dans beaucoup de cas, la côte présente même de l'accumulation. Ceci explique la faiblesse de la moyenne de la vulnérabilité à l'érosion pour 2100 qui est de 3,8 (même si dans les secteurs vulnérables elle est en moyenne de 31,3 et varie entre 18,4 et 67,1) (tableau 50). De plus, la route est à une plus grande distance de la côte pour la majorité de la baie et ne s'approche de la côte qu'au nord, dans le secteur fortement en érosion.

En l'absence de brèches dans le cordon dunaire des tombolos, la submersion ne viendrait affecter la route que par la lagune (figure 117 et figure 118). Ainsi,

la submersion se fait par la nappe d'eau et non par un déferlement des vagues sur la route. Cependant, il est important de noter que des brèches peuvent être créées rapidement advenant le passage répété de VTT par exemple.



Figure 117. Submersion par la lagune et par une brèche dans les dunes – distance importante, pas de déferlement



Figure 118. Submersion par la lagune – dunes du côté de la baie empêchant la submersion

Ce qui limite la vulnérabilité de la route 199 sur ce site témoin c'est que la côte est en accumulation sur la majorité de sa longueur. Ce qui augmente le niveau de vulnérabilité est l'absence de voie de contournement pour relier les deux îles de Havre Aubert et de Cap-aux-Meules. De plus, la vulnérabilité au niveau de la Martinique est amplifiée par le déferlement et le franchissement de l'ouvrage de protection contre l'érosion présent.

Il est important de noter que la municipalité des Îles-de-la-Madeleine ainsi que le centre de service du MTQ des Îles-de-la-Madeleine ont réalisé un plan de mesure d'urgence qui inclut les actions à poser en cas de rupture de service de la route, quelle qu'en soit la cause (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 2014). La continuité de service a été envisagée. Le MTQ a prévu par exemple un service par bateau avec le nom des bateaux et des capitaines qui pourraient assurer une liaison entre les îles si la route venait à être coupée (comm. personnelle L. Vigneau, 2014).

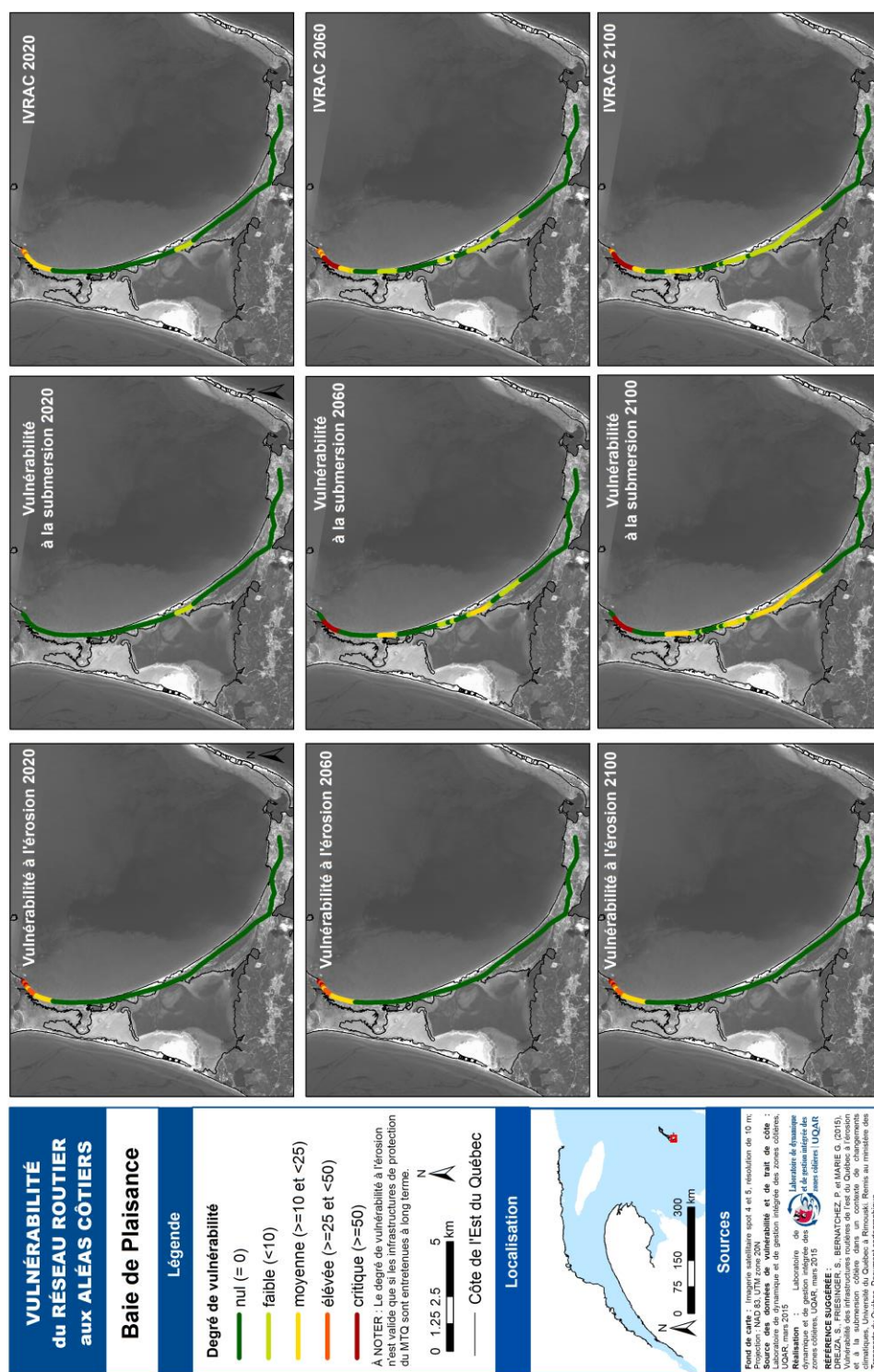


Figure 119. IVRAC du site de la baie de Plaisance

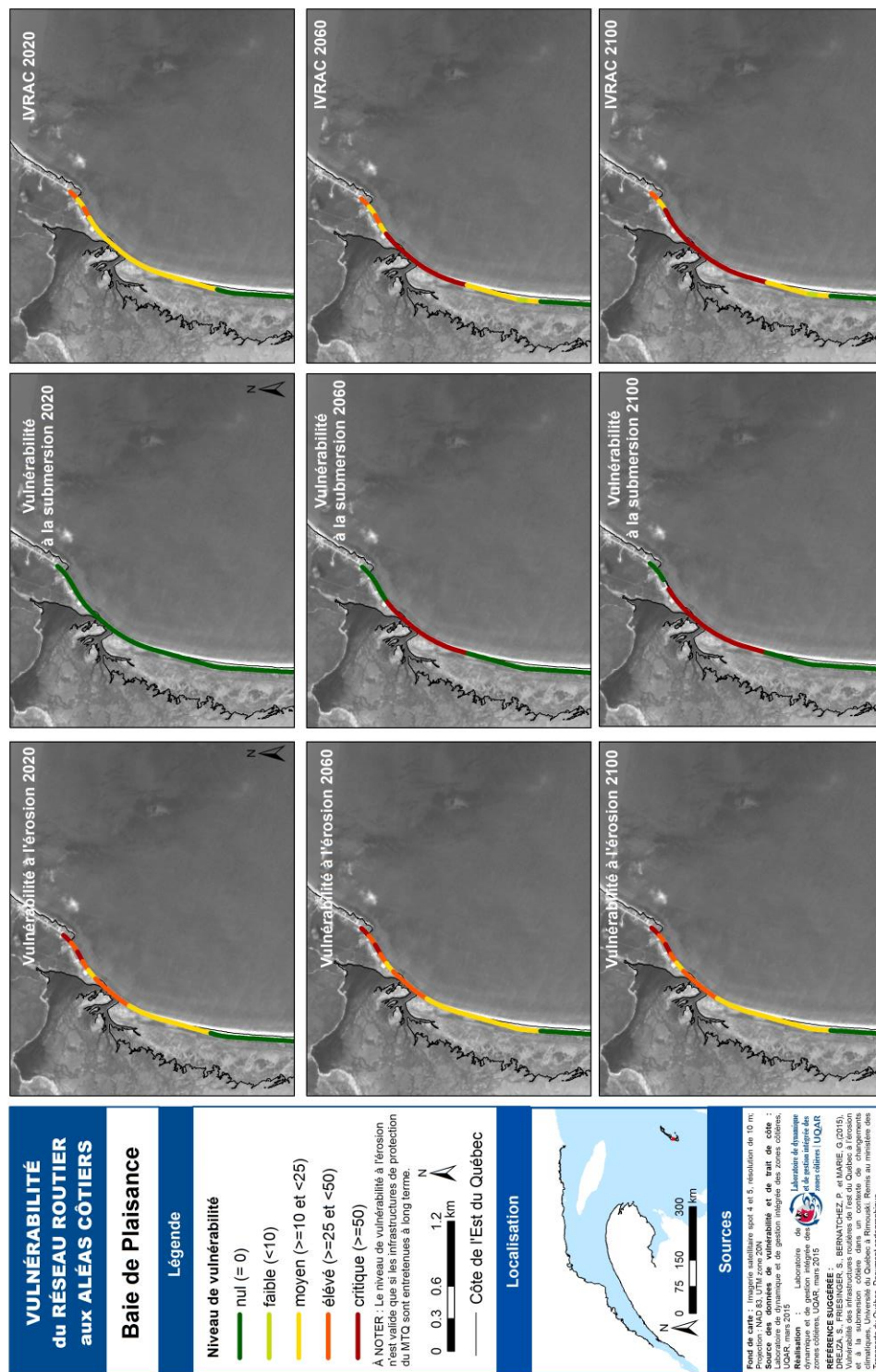


Figure 120. IVRAC du site suivi par MTQ, plage de la Martinique

6.2.6 Pointe-aux-Loups

Le site témoin de Pointe-aux-Loups présente une évolution très importante de la vulnérabilité de ses routes aux aléas côtiers. En effet, si pour l'IVRAC 2020 moins de 10 % des routes sont identifiées comme vulnérables, cette proportion monte à 37,5 % des routes pour l'IVRAC 2060 et atteint plus des $\frac{3}{4}$ des routes d'ici 2100 (tableau 51 et figure 126). Aucun segment ne présente une vulnérabilité critique aux aléas côtiers et la plus grande proportion présente des niveaux faibles ou moyens (tableau 51).

Tableau 51. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Pointe-aux-Loups

Niveau de vulnérabilité	2020			2060			2100		
	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub
nul	209	216	225	145	183	188	56	115	102
faible <10	11	0	7	48	0	38	86	0	55
moyen 10 à 25	12	11	0	39	22	6	83	88	62
élevé 25 à 50	0	5	0	0	27	0	7	29	2
critique	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nombre total	232	232	232	232	232	232	232	232	232

La distance moyenne entre la route et la côte est de 201,1 m (tableau 52), mais cela varie grandement selon les secteurs entre 12,6 et 1341,8 m. Il est intéressant de constater que les sites protégés par le MTQ sont à une grande proximité de la côte tant extérieure du tombolo qu'intérieure (côté lagune). La distance moyenne de ces segments protégés est de 24,6 m à l'extérieur et de 34,7 m à l'intérieur.

Tableau 52. Distance entre la route et la côte – site de Pointe-aux-Loups

	Distance entre la route et la côte – site de Pointe-aux-Loups		
	Moyenne	Minimum	Maximum
non protégé	210.6	12.6	1341.8
protégé par le MTQ	26.4	16.2	55.0
suivi par le MTQ	325.1	12.6	1341.8
non suivi	165.3	27.4	677.9
Total général	201.1	12.6	1341.8

Pour l'IVRAC 2020, la vulnérabilité moyenne est de 0,9 (niveau faible) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables de 9,1 (faible) (tableau 53). Pour l'IVRAC 2060, la vulnérabilité moyenne est de 3,4 (niveau faible) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 9,2 (moyen) (tableau 53). Finalement, pour l'IVRAC 2100, la vulnérabilité moyenne est de 8,2 (niveau faible) et, si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 10,8 (moyen) (tableau 48). La vulnérabilité de la route aux aléas côtiers varie entre 0 et 19,4 d'ici 2020, entre 0 et 21,1 d'ici 2060, mais peut atteindre 30,0 d'ici 2100 (tableau 53).

Tableau 53. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de Pointe-aux-Loups

Horizon	Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart type
2020 ensemble du site	érosion	1.6	0.0	38.7	6.4
	submersion	0.2	0.0	7.1	0.9
	IVRAC	0.9	0.0	19.4	3.2
2020 secteurs vulnérables	érosion	23.8	14.1	38.7	8.4
	submersion	5.1	3.5	7.1	1.9
	IVRAC	9.1	1.8	19.4	5.6
2060 ensemble du site	érosion	5.7	0.0	38.7	11.5
	submersion	1.2	0.0	12.2	2.7
	IVRAC	3.4	0.0	21.1	6.0
2060 secteurs vulnérables	érosion	26.9	15.8	38.7	7.5
	submersion	6.3	3.5	12.2	2.2
	IVRAC	9.2	1.8	21.1	6.6
2100 ensemble du site	érosion	10.6	0.0	43.8	12.0
	submersion	5.8	0.0	30.0	6.1
	IVRAC	8.2	0.0	30.0	7.5
2100 secteurs vulnérables	érosion	21.0	10.0	43.8	8.1
	submersion	10.3	5.0	30.0	4.5
	IVRAC	10.8	2.5	30.0	6.7

En 2020, l'aléa le plus important pour ce site est l'érosion, surtout pour les segments ayant les IVRAC les plus importants, soit ceux de niveau moyen (seulement vulnérables à l'érosion) (tableau 51 et figure 126). En 2060, l'aléa le plus important pour ce site est généralement l'érosion pour les niveaux de vulnérabilité moyens. Mais, c'est l'aléa de submersion qui est à l'origine de l'IVRAC pour les niveaux de vulnérabilité les plus faibles. En 2100, l'IVRAC s'explique par une combinaison des deux aléas.

L'exposition des chaussées à l'érosion montre que 5 segments sont exposés de manière imminente à l'érosion, c'est-à-dire qu'un seul événement majeur pourrait les affecter (voir base de données). Tous sont déjà suivis par le MTQ et l'un d'eux est protégé, mais une rupture de l'artificialité pourrait affecter la route qui est située très proche de la côte.

La combinaison de deux aléas et de deux bordures côtières qui peuvent évoluer et affecter la route engendre plusieurs situations différentes sur ce site témoin. Ainsi, les secteurs avec la vulnérabilité la plus importante pour ce site sont PTL073, 089, 090, 091, 123, 124 et 182 (niveau élevé IVRAC 2100). Pour les segments PTL123 et 124, c'est l'érosion de la côte extérieure qui va affecter la route et la présence de chalets induit une vulnérabilité plus importante (figure 121). Pour PTL082 (figure 122), l'érosion se produit par l'intérieur de la lagune, mais ce sont les difficultés à réparer en raison de l'étroitesse du cordon qui forcerait probablement une réparation dans la lagune. Pour PTL073, l'érosion se produit par l'intérieur de la lagune (figure 124) et le segment dessert des habitants. Quant aux segments PTL089 à 091, ils ressemblent à PTL082.



Figure 121. Vulnérabilité élevée PTL123 et-124 (IVRAC 2100) (© LDGIZC- UQAR, septembre 2010)



Figure 122. Vulnérabilité élevée PTL182 (IVRAC 2100) (© LDGIZC- UQAR, septembre 2010)

Les segments PTL021 à 030 (figure 123) sont affectés par la combinaison d'une submersion qui pourrait se produire d'ici 2060 via l'intérieur de la lagune et d'érosion via l'extérieur du cordon littoral, d'ici 2100 (probablement entre 2075 et 2083 si la tendance se maintient). En effet, l'érosion de ce secteur homogène de côte est de -2,4 m/an ce qui a pour effet que même à une distance moyenne de 197 m cette route pourra être affectée par l'érosion. L'érosion de la bordure intérieure est suivie par le MTQ dans la section où la route est la plus proche et un ouvrage de protection a été installé.



Figure 123. Exposition à la submersion à moyen terme et érosion à long terme (© LDGIZC- UQAR, septembre 2010)

Ce qui fait varier la vulnérabilité aux aléas côtiers est la facilité/difficulté à réparer la route en cas de rupture (présence de la lagune en arrière ou non), les réseaux qui passent sous la route, côté mer ou côté terre de la route, ainsi que les segments bordés par des habitations ou non. Ce qui limite la vulnérabilité de la route 199 c'est le faible DJMA, le fait qu'il n'y ait pas de population habitant directement sur les segments vulnérables (excepté un petit secteur de chalets), la facilité de réparation (excepté au niveau des cordons très étroits où une réparation devrait se faire dans la lagune) et le relativement faible niveau de danger associé au fait que ce soit des côtes basses. Finalement, l'exposition à l'érosion est limitée en plusieurs endroits par la présence de protections (enrochements), cela limite la vulnérabilité tant que les structures remplissent leur fonction. Ce qui augmente le niveau de vulnérabilité est l'absence de voies de contournement isolant les populations du nord des Îles-de-la-Madeleine en cas de rupture de service. Le fait que l'érosion soit possible par les deux côtés du cordon littoral/tombolo accentue cette vulnérabilité. Sur la figure 124, on peut voir les segments PTL072 et 073 qui ne seront pas exposés à l'érosion ni à la submersion au niveau de la côte extérieure du tombolo avant plus de 100 ans, mais pour lesquels l'érosion de -0,18 m/an à l'intérieur de la lagune va exposer la route à l'érosion à moyen voire long terme.



Figure 124. Érosion via l'intérieur de la lagune (PTL072 et 073) (© LDGIZC-UQAR, septembre 2010)

Les secteurs les moins vulnérables sont ceux dont la distance est importante avec la côte. En effet, les côtes sont très dynamiques et elles sont prévues d'évoluer en moyenne à un rythme de -1,57 m/an à l'avenir (Bernatchez *et al.*, 2012). Un autre facteur explicatif d'une absence de vulnérabilité concerne les segments situés où les côtes sont protégées par des enrochements

constamment entretenus. En effet, l'érosion est limitée en plusieurs endroits par la présence de structures de protection mises en place par le MTQ contre l'érosion (enrochements), le niveau de vulnérabilité de la route à l'érosion ainsi que l'IVRAC tient compte que ces ouvrages vont être maintenus et ainsi empêcher toute érosion autre qu'événementielle. S'il advenait que le ministère décide de modifier l'entretien des enrochements alors l'érosion reprendrait à ces endroits et la route présenterait une vulnérabilité très importante dans ces endroits.



Figure 125. Sites protégés – si non entretenus deviendraient des sites très vulnérables - haut : vue vers l'intérieur – bas : vue vers l'extérieur (© LDGIZC-UQAR, septembre 2010)

Il est important de noter que la municipalité des Îles-de-la-Madeleine ainsi que le centre de services du MTQ des Îles-de-la-Madeleine ont réalisé un plan de mesure d'urgence qui inclut les actions à poser en cas de rupture de service de la route, quelle qu'en soit la cause (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 2014). La continuité de service a été envisagée. Le MTQ a prévu par exemple un service par bateau avec le nom des bateaux et des capitaines à contacter pour assurer une liaison entre les îles si la route venait à être coupée (comm. personnelle, L. Vigneau, 2014). Ceci n'est pas inclus dans l'indice de vulnérabilité, cette adaptation réduirait la vulnérabilité.

6.2.7 Pentecôte

La vulnérabilité à l'érosion est critique pour un segment et élevée pour 26 (tableau 54 et figure 131). En effet, comme la route n'est soumise qu'à un seul aléa (la submersion ne devrait pas affecter la route sur ce site), la vulnérabilité globale aux aléas côtiers (IVRAC) est inférieure.

Tableau 54. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Pentecôte

Niveau de vulnérabilité	2020			2060			2100		
	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub
nul	92	92	100	61	61	100	49	49	100
faible <10	0	0	0	3	1	0	12	1	0
moyen 10 à 25	7	1	0	35	11	0	38	23	0
élevé 25 à 50	1	6	0	1	26	0	1	26	0
critique	0	1	0	0	1	0	0	1	0
Nombre total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

La majorité des segments vulnérables sont de niveau moyen, si rien n'est fait, une intervention de réparation d'urgence est aisément possible. La durée d'interruption pour effectuer les réparations serait possiblement de courte durée (faible altitude donc remblai possible). Cependant, laisser faire et effectuer les réparations seulement en urgence n'est pas à privilégier, car elle entraînerait probablement de l'insécurité pour la population locale ainsi que des pertes économiques en raison de l'isolement de Sept-Îles et Port-Cartier du reste de la province en l'absence de voie de détour possible dans ce secteur.

La distance moyenne entre la route et la côte est de 76,9 m, mais cela varie entre 6,9 et 313,2 m (tableau 55). Les sites protégés par le MTQ sont en moyenne à 6,9 m de la côte et ceux qui sont suivis à 44,5 m par rapport à 168,9 m pour ceux qui ne le sont pas.

Tableau 55. Distance entre la route et la côte – site de Pentecôte

	Distance entre la route et la côte – site de Pentecôte		
	Moyenne	Minimum	Maximum
non protégé	77.6	7.8	313.2
protégé par le MTQ	6.9	6.9	6.9
suivi par le MTQ	44.5	6.9	74.7
non suivi	168.9	53.6	313.2
Total général	76.9	6.9	313.2

Pour l'IVRAC 2020, la vulnérabilité moyenne est de 1,4 (niveau faible) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables de 17,2 (moyen) (tableau 56). Pour l'IVRAC 2060, la vulnérabilité moyenne est de 5,6 (niveau faible) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 14,3 (moyen) (tableau 56). Finalement, pour l'IVRAC 2100, la vulnérabilité moyenne est de 6,7 (niveau faible) et, si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 13,1 (élevé) (tableau 56). La vulnérabilité de la route aux aléas côtiers varie entre 0 et 26,0 quel que soit l'horizon considéré (tableau 56).

Tableau 56. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de Pentecôte

Horizon	Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart type
2020 ensemble du site	érosion	2.8	0.0	52.0	9.8
	submersion	0.0	0.0	0.0	0.0
	IVRAC	1.4	0.0	26.0	4.9
2020 secteurs vulnérables	érosion	34.5	24.5	52.0	9.8
	submersion	na	na	na	na
	IVRAC	17.2	12.2	26.0	4.9
2060 ensemble du site	érosion	5.7	0.0	38.7	11.5
	submersion	1.2	0.0	12.2	2.7
	IVRAC	5.6	0.0	26.0	7.4
2060 secteurs vulnérables	érosion	28.6	6.2	52.0	8.0
	submersion	na	na	na	na
	IVRAC	14.3	3.1	26.0	4.0
2100 ensemble du site	érosion	13.3	0.0	52.0	14.4
	submersion	0.0	0.0	0.00	0.00
	IVRAC	6.7	0.0	26.0	7.2
2100 secteurs vulnérables	érosion	26.1	6.2	52.0	8.4
	submersion	na	na	na	na
	IVRAC	13.1	3.1	26.0	4.2

Pour ce site, l'aléa le plus important est l'érosion. En effet, même avec la hausse du niveau marin appréhendée, la submersion n'est pas prévue affecter la route 138 au niveau du site témoin de Pentecôte.

L'exposition des chaussées à l'érosion montre que 6 segments sont exposés de manière imminente à l'érosion (voir la base de données). Ces segments se situent dans des secteurs de terrasse de plage ou de basses falaises meubles,

au niveau d'embouchures de cours d'eau. Un plan d'intervention dans ces secteurs serait nécessaire. Des aléas liés à la dynamique fluviale et à la présence de ponceaux pourraient également affecter ces segments, même si cela n'a pas été considéré ici, cela pourrait avoir une influence sur les interventions à apporter ou les solutions à adopter.

Les secteurs avec la vulnérabilité la plus importante pour ce site sont situés à l'embouchure de cours d'eau côtiers (figure 127) et/ou au niveau des côtes avec une érosion importante. À l'embouchure des cours d'eau, la distance entre la route et la côte est faible et l'érosion est marquée. Ainsi, ce qu'il y a de commun entre les 8 segments les plus vulnérables à Pentecôte d'ici 2020, c'est leur proximité avec une embouchure de cours d'eau (figure 127). En 2060, d'autres segments de routes situés à des embouchures de cours d'eau s'ajoutent aux segments vulnérables, mais ce n'est plus uniquement dans ce type de configuration que l'on trouve les segments vulnérables. Il y a également des segments exposés à l'érosion en raison de leur proximité à la côte et des forts taux d'érosion de celle-ci. Les secteurs proches de cours d'eau sont connus par le MTQ comme étant problématiques et une étude portant spécifiquement sur leur dynamique est actuellement en cours à Pentecôte.

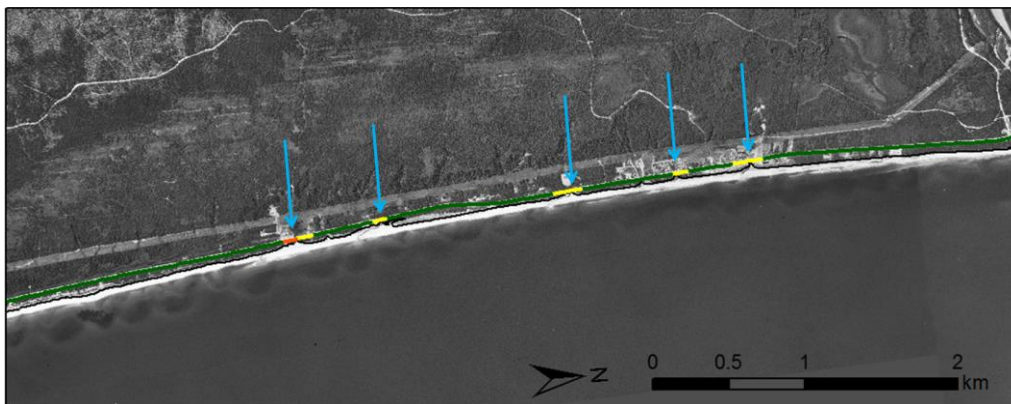


Figure 127. IVRAC 2020 aux embouchures des cours d'eau du site de Pentecôte

Sur la figure 128, le segment PEN048 est illustré, il s'agit du segment le plus vulnérable pour ce site (niveau élevé). La raison de la vulnérabilité est l'érosion seulement. La vulnérabilité est élevée dès 2020 et sera constante jusqu'en 2100 (IVRAC de 25,98). D'autres segments ont des IVRAC de niveau moyen soit 38 segments d'ici 2100 (tableau 54). Il s'agit pour la plupart d'entre eux d'environnements de même type que PEN048 soit des embouchures de cours d'eau (figure 129), sinon ce sont des secteurs avec une érosion importante et

des distances avec la côte modérées (figure 130). Ces segments ne sont pas contigus et plusieurs segments non vulnérables peuvent être situés entre un ou des segments qui le sont. Ainsi, toute action devrait prendre en compte le réseau complet et non segment par segment selon la vulnérabilité très locale. Tout le site témoin n°7 entre les segments PEN022 et PEN096 devrait être adapté d'ici 2100, même si sur les 75 segments concernés, 24 segments sont non vulnérables (mais situés entre des segments qui le sont). Cela correspond presque parfaitement au secteur déjà suivi par le MTQ avec ses sites PEN-27 et PEN-26 (équivalent à 74 de nos segments soit 7,4 km de PEN023 à PEN096).



Figure 128. Segment PEN048, vulnérabilité élevée dès 2020 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

Sur le site de Pentecôte, 6 segments (PEN048, 049, 066, 067, 074 et 079) sont exposés à l'érosion de manière imminente (voir base de données). Hormis PEN048 qui est de vulnérabilité élevée, les autres segments sont légèrement moins vulnérables (avec un niveau de vulnérabilité moyen) du fait des autres paramètres considérés dans le calcul de la vulnérabilité. Par exemple, pour PEN048 d'autres réseaux essentiels sont présents au même endroit que la route (téléphone, électricité), et la population locale desservie est plus importante (un resto/motel) alors qu'ailleurs il y en a moins.



Figure 129. PEN024 et 025 – exemple d’embouchure de cours d’eau – route vulnérable à moyen terme (IVRAC 2060) (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)



Figure 130. PEN061 et 062, vulnérabilité moyenne (IVRAC 2060 et 2100) – pas de cours d’eau (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

Les secteurs les moins affectés sont ceux qui ne se situent pas à l’embouchure de cours d’eau ou dont la distance avec la côte est plus importante avec un taux d’érosion moins élevé.

Ce qui limite la vulnérabilité de la route 138 au niveau de ce site témoin c’est le fait qu’un seul aléa affecte la route, que ce soient des côtes basses (donc plus facilement réparables et avec une sécurité pour les usagers plus importante) et que les débits journaliers moyens annuels soient relativement faibles.

Ce qui augmente le niveau de vulnérabilité de la route 138 pour le site de Pentecôte est l’absence de voie de contournement qui rend le réseau routier peu robuste en cas de rupture de service.

6.2.8 Rivière au Bouleau

Le site de rivière au Bouleau comprend 21 segments, mais seulement 18 ont été étudiés, car les autres sont l'approche du pont et le pont sur la rivière au Bouleau. Pour ce site, l'aléa le plus important est l'érosion, car la submersion n'affectera pas la route étudiée (tableau 57 et figure 134). La submersion pourrait affecter la route au niveau du pont et des approches enrochées de celui-ci, mais l'absence de données LiDAR pour ce site ainsi que la nature du pont n'ont pas permis d'effectuer une analyse.

Tableau 57. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de rivière au Bouleau

Niveau de vulnérabilité	2020			2060			2100		
	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub
nul	18	18	18	17	17	18	16	16	18
faible <10	0	0	0	0	0	0	1	0	0
moyen 10 à 25	0	0	0	1	1	0	1	2	0
élevé 25 à 50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
critique	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nombre total	18	18	18	18	18	18	18	18	18

Les secteurs avec la vulnérabilité la plus importante pour ce site sont deux segments (BOU001 et 002) situés au niveau d'une basse falaise de till (figure 132). Ils ne seront vulnérables qu'à moyen terme (IVRAC 2060 et 2100). Leur vulnérabilité à l'érosion est moyenne (15,5 à 21,9 pour l'IVRAC 2100) et leur IVRAC est de niveau faible à moyen (tableau 57 et tableau 59).



**Figure 132. BOU001 et 002, vulnérables respectivement d'ici 2060 et 2100
(© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)**

La distance moyenne entre la route et la côte dans ce site témoin est de 41,3 m (tableau 58).

Tableau 58. Distance entre la route et la côte – site de rivière au Bouleau

	Distance entre la route et la côte – site de rivière au Bouleau		
	Moyenne	Minimum	Maximum
non protégé	41.3	22.9	86.9
protégé par le MTQ	na	na	na
suivi par le MTQ	na	na	na
non suivi	41.3	22.9	86.9
Total général	41.3	22.9	86.9

Tableau 59. Valeur des IVRAC et des sous-indices érosion et submersion pour le site de rivière au Bouleau

Horizon	Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart type
2020 ensemble du site	érosion	0.0	0.0	0.0	0.0
	submersion	0.0	0.0	0.0	0.0
	IVRAC	0.0	0.0	0.0	0.0
2020 secteurs vulnérables	érosion	na	na	na	na
	submersion	na	na	na	na
	IVRAC	na	na	na	na
2060 ensemble du site	érosion	1.2	0.0	21.9	5.2
	submersion	0.0	0.0	0.0	0.0
	IVRAC	0.6	0.0	11.0	2.6
2060 secteurs vulnérables	érosion	21.9	21.9	21.9	na
	submersion	na	na	na	na
	IVRAC	11.0	11.0	11.0	na
2100 ensemble du site	érosion	2.1	0.0	21.9	6.1
	submersion	0.0	0.0	0.0	0.0
	IVRAC	1.0	0.0	11.0	3.1
2100 secteurs vulnérables	érosion	18.7	15.5	21.9	4.5
	submersion	na	na	na	na
	IVRAC	9.4	7.7	11.0	2.3

Les secteurs les moins affectés sont l'ensemble des côtes à terrasse de plage qui sont en accumulation sur la période récente. En effet, même si un événement d'érosion majeur peut survenir et éroder la côte ponctuellement, cela ne devrait pas affecter la route qui est à plus de 12,05 m de la côte (recul maximum événementiel possible dans ce type d'environnements). La route 138 est hors de l'espace de liberté de la côte. De plus, on peut noter la présence de nombreux blocs sur l'estran (till, glaciels, erratiques) qui semblent offrir une protection à la côte. Enfin, la dérive littorale s'effectue vers l'ouest et maintient donc l'accumulation sur la flèche littorale et au niveau de la terrasse de plage.

Ce qui augmente le niveau de vulnérabilité est l'importance des taux d'érosion au niveau des segments BOU001 et 002 (-0,42 m/an et -0,70 m/an). C'est cette érosion importante qui viendra exposer les routes à l'érosion entre 2020 et 2030 et entre 2060 et 2100. De plus, aucune voie de détour n'est présente dans ce secteur. Ces segments ne desservent aucune population localement (secteur non bâti) et n'abritent pas de réseau connexe ce qui limite la vulnérabilité de la route 138. De plus, le fait que la côte ne soit en érosion que sur une petite portion de côte seulement sur la période la plus récente 1997-2005 limite aussi le niveau de vulnérabilité.

Il est à noter que les segments BOU003 et 004 (figure 133) qui sont à 23 m de la côte sont situés au niveau d'une côte en accumulation sur la période de référence récente (1997-2005), mais que depuis lors, une forte érosion surtout lors de la tempête de décembre 2010 a été mesurée (jusqu'à -7,3 m). Une étude sur le plus long terme serait nécessaire pour vérifier si une modification de la tendance à la stabilité est en cours ou s'il s'agit d'un événement isolé et que le système va se rééquilibrer par la suite. Si un taux de -0,19 m/an se maintenait dans ce secteur, la route serait exposée d'ici 2060 à 2070.



Figure 133. BOU003 et 004 (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

6.2.9 Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan

Pour le site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan, les secteurs les plus vulnérables sont situés à l'ouest de la rivière Saint-Jean, dans les secteurs de falaises meubles. Sur ce site, 290 segments sont présents, mais 7 segments correspondent à des ponts ou à des approches de ponts et ont donc été exclus (RSJ099 à 100 et RSJ120 à 124). L'analyse a donc été effectuée sur 283 segments seulement. Actuellement et d'ici 2020, 6 % des segments routiers sont vulnérables (tableau 60 et figure 136). D'ici 2060, 12,7 % seront vulnérables et à l'horizon 2100 cela montera à 20,1 % des routes vulnérables.

Tableau 60. Niveau d'IVRAC et de vulnérabilité à l'érosion et à la submersion pour le site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan

Niveau de vulnérabilité	2020			2060			2100		
	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub	IVRAC	VulnÉro	VulnSub
nul	266	283	266	247	260	262	226	237	258
faible <10	9	0	0	15	0	0	12	0	0
moyen 10 à 25	8	0	16	12	17	15	20	25	13
élevé 25 à 50	0	0	1	7	1	6	18	4	12
critique	0	0	0	2	5	0	7	17	0
Nombre total	283	283	283	283	283	283	283	283	283

La distance moyenne entre la route et la côte est de 283,6 m et varie entre 2,3 et 1049,5 m (tableau 61).

Tableau 61. Distance entre la route et la côte – site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan

	Distance entre la route et la côte – site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan		
	Moyenne	Minimum	Maximum
non protégé	283.6	2.3	1049.5
protégé par le MTQ	na	na	na
suivi par le MTQ	59.5	36.3	82.6
non suivi	293.6	2.3	1049.5
Total général	283.6	2.3	1049.5

Pour l'IVRAC 2020, la vulnérabilité moyenne est de 0,5 (niveau faible) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables de 8,8 (faible) (tableau 62). Pour l'IVRAC 2060, la vulnérabilité moyenne est de 2,2 (niveau faible) et si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 17,3 (moyen) (tableau 62). Finalement, pour l'IVRAC 2100, la vulnérabilité moyenne est de 4,4 (niveau faible) et, si l'on ne considère que les segments qui sont vulnérables, de 22,1 (moyen) (tableau 62). La vulnérabilité de la route aux aléas côtiers varie entre 0 et 17,3 d'ici 2020 mais entre 0 et 61,2 d'ici 2060 et 2100 (tableau 62).

Tableau 62. Valeur des IVRAC et des sous indices érosion et submersion pour le site de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan

Horizon	Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart type
2020 ensemble du site	érosion	0.0	0.0	0.0	0.0
	submersion	1.1	0.0	34.6	4.4
	IVRAC	0.5	0.0	17.3	2.2
2020 secteurs vulnérables	érosion	na	na	na	na
	submersion	17.7	10.0	34.6	6.1
	IVRAC	8.8	5.0	17.3	3.0
2060 ensemble du site	érosion	2.7	0.0	122.5	12.8
	submersion	1.7	0.0	40.0	6.3
	IVRAC	2.2	0.0	61.2	7.5
2060 secteurs vulnérables	érosion	33.4	17.3	122.5	31.8
	submersion	22.8	14.1	40.0	7.7
	IVRAC	17.3	7.1	61.2	13.5
2100 ensemble du site	érosion	6.5	0.0	122.5	19.8
	submersion	2.4	0.0	40.0	8.1
	IVRAC	4.4	0.0	61.2	11.0
2100 secteurs vulnérables	érosion	40.0	14.1	122.5	32.9
	submersion	27.1	14.1	40.0	8.7
	IVRAC	22.1	7.1	61.2	14.7

Pour ce site, l'aléa le plus important est la submersion d'ici 2020. Pour 2060, ce sont les deux aléas qui causent la vulnérabilité dépendamment des secteurs (tableau 60 et tableau 62 et figure 136). En 2100, c'est majoritairement l'érosion seule (56 %) et de façon moindre les deux aléas (25 %) qui causent la vulnérabilité de la route.

Les secteurs avec la vulnérabilité la plus importante pour ce site sont décrits à la section 6.1.2.1. Ce sont des segments qui sont affectés seulement par l'érosion, car ils sont situés dans des falaises. Sinon des secteurs de terrasse de plage sont plus vulnérables aux deux aléas.

Les secteurs les moins affectés sont ceux dans les basses falaises meubles et les terrasses de plage situées à Longue-Pointe-de-Mingan. Les dynamiques sont relativement constantes le long de la côte, ce qui fait la différence est la distance à laquelle la route est construite par rapport à la côte. Dans la municipalité de Rivière-Saint-Jean (figure 138, partie ouest du site), ce qui limite l'intensité de l'IVRAC est le fait qu'un seul aléa soit présent (seulement l'érosion). À Longue-Pointe-de-Mingan (figure 137, partie est du site), plusieurs secteurs sont soit affectés par l'un ou par l'autre des aléas. Seule une petite partie, située dans la partie est du site, est vulnérable aux deux aléas (figure 136), cela correspond également à des niveaux de vulnérabilité plus importants (niveau élevé).



Figure 135. RSJ197 à 203, IVRAC élevé (© LDGIZC – UQAR, septembre 2010)

Ce qui limite la vulnérabilité de la route 138, c'est le faible achalandage de la route avec un DJMA de 750 à 1270 selon les endroits et l'absence de population vivant directement sur les segments de route dans la majorité du site.

Ce qui augmente le niveau de vulnérabilité de la route 138 sur ce site témoin est le danger lié aux mouvements de terrain et la difficulté à réparer la route en bordure des falaises. De plus, l'absence de voie de contournement rend le réseau peu robuste et donc très sensible à une rupture de service.

266

Il est important de prendre en considération que des changements sont toujours possibles dans la dynamique côtière. Par exemple, à Longue-Pointe-de-Mingan, un secteur de côte constituée de falaises meubles (en avant desquelles s'étendait une terrasse de plage maintenant complètement érodée) s'est réactivé et l'érosion y est très importante (segments RSJ160 et 161). Bien que le taux de migration probable prévu était déjà important avec $-1,51$ m/an, le secteur semble être dans un cycle d'érosion majeur avec une perte de 20 m entre décembre 2012 et juin 2014 (soit en seulement 1 an et demi environ), comme on peut le voir sur la figure 139. En octobre 2014, la distance entre le talus et l'accotement de la route était de 21,5 m. Bien que ce type de cycle érosion/accumulation ait déjà été observé à Longue-Pointe-de-Mingan par le passé et dans d'autres secteurs de terrasse de plage de la Côte-Nord (Bernatchez et al., 2008), la dynamique et la cause de ces foyers d'érosion n'ont pas encore été étudiées au Québec, de sorte qu'il est actuellement difficile de les prévoir et d'en déterminer la durée. Si la tendance des 2 dernières années perdurait, l'érosion pourrait affecter la route d'ici 1 à 2 ans, soit bien avant les 29 à 30 années que cela aurait nécessité avec un taux de $-1,5$ m/an. La plage est actuellement en accumulation, il est possible que ce bilan positif puisse réduire la vitesse de recul pour les prochaines années.



Figure 139. Reprise rapide de l'érosion (RSJ160 et 161)

Il est également important de considérer d'autres aléas tels que les **glissements de terrain**. La partie ouest du site témoin n°9, soit la partie située dans la municipalité de Rivière-Saint-Jean est constituée de falaises composées généralement de sable qui repose sur des dépôts silto-argileux. Ce type de stratigraphie est propice aux mouvements de masse et ce, d'autant

plus que l'érosion au pied de la falaise affecte la pente de celle-ci et ne permet pas au profil de la falaise d'atteindre une pente à l'équilibre. Comme on peut le voir sur la figure 140, de nombreux segments de la route 138 sont situés à moins de 430 m de la côte (rétrogression la plus grande mesurée dans les cicatrices d'anciens glissements) et beaucoup d'autres à moins de 200 m de la côte (rétrogression de deux autres glissements rotationnels et coulées argileuses). Ces segments pourraient ainsi être affectés par un nouvel événement aussi important que ceux survenus dans le passé (Bachand, 2010). Les mêmes recommandations que celles émises par Boucher-Brossard et Bernatchez (2013) sont suggérées soit : « Considérant la présence d'amphithéâtres de glissements rotationnels et de coulées argileuses pouvant atteindre une profondeur de 430 mètres en bordure de la falaise à l'est du secteur d'étude, il est recommandé d'obtenir un avis géotechnique pour évaluer le risque de mouvements de terrain de grande ampleur pour le secteur » (Boucher-Brossard et Bernatchez, 2013). Ceci a déjà été suivi par le MTQ et un avis géotechnique a ainsi été produit.

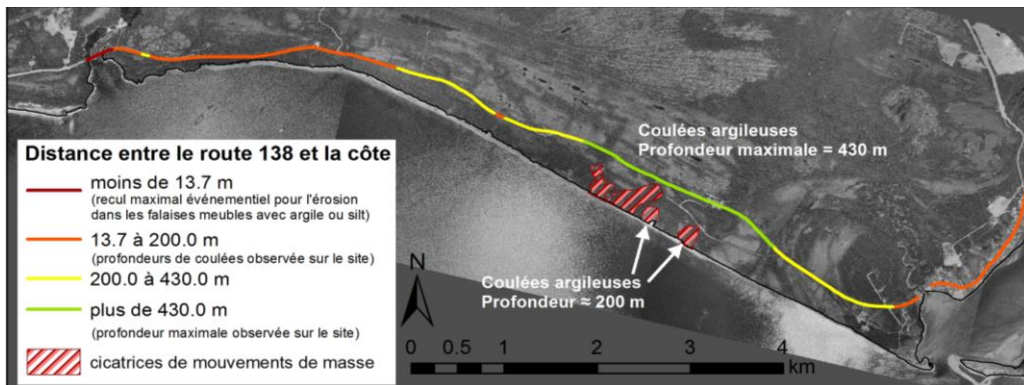


Figure 140. Distance entre la route et la côte selon les événements d'érosion et de mouvements de masse (coulée argileuse).

7 DISCUSSION

7.1 Limite de la méthode et améliorations possibles

La méthode développée dans le cadre de cette étude pour déterminer un indice de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers (IVRAC) a été élaborée pour inclure tous les éléments pertinents et utiles selon les discussions que nous avons eues avec le Ministère et selon la littérature sur le sujet. Malgré le travail important qui a été effectué, certaines limites à la méthode et donc aux résultats présentés dans ce rapport existent. Certaines omissions ont été effectuées sciemment afin de conserver un indice relativement simple qui pourrait donc être plus opérationnel. D'autres ont été omises parce qu'il y a une lacune dans les connaissances sur le sujet qui doit être comblée par d'autres études.

Tout d'abord, il est important de considérer que « l'effet domino » n'a pas été pris en compte dans la matrice d'analyse de la vulnérabilité ni dans l'indice de vulnérabilité élaboré dans cette étude. Cet effet découlerait d'un événement qui affecterait plusieurs segments de route en même temps. Cela a été par exemple le cas le 6 décembre 2010 dans plusieurs secteurs du Bas-Saint-Laurent. L'effet domino fait référence aux problèmes qui pourraient découler en cascade tels que l'augmentation du temps de réponse pour réparer la route due à trop de demandes en même temps ou l'isolement des populations entre deux segments endommagés les rendant très vulnérables et inaccessibles pour les services de secours. Cet « effet domino » a été documenté par Robert et Morabito (2011) pour ce qui a trait aux infrastructures critiques. Les routes en font partie, mais leur analyse inclut d'autres services tels que les réseaux de communications ou de distribution d'énergie.

Bien que les réseaux de transport et de distribution de l'électricité et des communications soient un des paramètres de la vulnérabilité, nous n'avons pas analysé les effets en cascades possibles. L'impact de l'effet domino est ainsi potentiellement plus important dans les secteurs qui connaissent plusieurs secteurs vulnérables de manière discontinue, et avec une présence d'enjeux entre les segments. Ce n'est ainsi pas le cas entre Marsoui et Ruisseau-à-Rebours, car, bien que plusieurs secteurs soient vulnérables, aucun enjeu n'est présent entre eux et cela ne modifie pas le détour qui devrait être fait. Par contre, c'est le cas pour Ruisseau-à-Rebours qui pourrait se retrouver isolé si l'érosion ou la submersion affectaient à la fois la route 132 vers Marsoui (plusieurs segments avec des IVRAC élevés) et vers le village de Rivière-à-Claude (IVRAC élevé). Cela peut aussi être le cas pour Baie-des-

Sables qui paradoxalement a un indice plus faible, mais plus de personnes sont présentes et pourraient se retrouver isolées en cas de défaillances multiples du réseau routier. Une manière de limiter ou de réduire ce type de situation est d'augmenter la robustesse (la redondance) du réseau de transport, de communication et d'énergie. Cette problématique peut, en outre, être discutée dans le plan de mesure d'urgence des communautés.

Ensuite, il est important de noter que pour notre analyse, l'**accès aux services essentiels** ne tient pas compte des limites municipales ni des MRC ou des territoires d'action des centres de santé. Il a été considéré que le service le plus proche serait affecté à intervenir lors de la situation d'urgence, quelle que soit son unité administrative de rattachement. Cela nécessite peut-être des procédures qui devraient être incluses dans les plans de mesures d'urgence et de sécurité incendie pour qu'en cas de rupture de service de la route, les services les plus proches géographiquement, ou ceux situés de l'autre côté de la route endommagée prennent le relais des services essentiels habituellement utilisés.

La plus grande limite de notre indice de vulnérabilité provient de la **méthode utilisée pour évaluer la submersion côtière**, soit une méthode dite « **statique** » pour déterminer les hauteurs d'eau, c'est-à-dire une superposition d'un niveau de référence statique et uniforme avec la topographie. « Cette méthode a l'avantage d'être simple dans sa mise en œuvre. Néanmoins, elle a tendance à surestimer les hauteurs d'eau [...] ne tenant pas compte de la cinétique de l'inondation » (Breilh *et al.* 2013). C'est pourquoi plusieurs études l'utilisent (Creach *et al.* 2014, Johnston *et al.*, 2014). Ainsi, la quantification de la sensibilité de la côte à la submersion et l'exposition de la route à la submersion nécessiteraient des études précises de vagues à la côte et de la modélisation, mais qui sont inexistantes actuellement au Québec. L'intégration des largeurs de plages, de la distance entre la côte et la route ainsi que la présence ou non de structure rigide de protection ont été intégrées dans le but de préciser l'information statique obtenue, mais ce ne sont que des variables de substitutions qu'il convient d'utiliser en attendant d'autres études sur la submersion.

Au niveau de l'**évaluation de l'érosion**, on constate que les projections d'évolution côtière intègrent mal les secteurs avec des **foyers d'érosion** (*erosion hotspot*), c'est-à-dire des secteurs qui présentent soudainement des valeurs de recul nettement supérieures aux zones adjacentes. Ce phénomène est tout de même fréquent sur la Côte-Nord ainsi qu'aux Îles-de-la-Madeleine.

L'IVRAC peut donc sous-estimer le niveau de vulnérabilité calculé pour ces secteurs.

La méthodologie développée pour l'IVRAC ne tient pas compte des **coûts de constructions et de réparation** qui peuvent être variables selon les différents contextes. La vulnérabilité a été entendue pour la route et le service qu'elle assure et non d'un point de vue économique.

La méthodologie développée pour l'IVRAC n'inclut pas non plus les **coûts engendrés par la rupture de service**. Ces **pertes économiques** qui pourraient être occasionnées aux entreprises et citoyens affectés par la rupture de service peuvent être importantes, mais obtenir ce type de données économiques nécessiterait une étude distincte pour chaque site témoin. C'est pourquoi la variable de substitution du débit journalier a été utilisée à la place.

La dernière limite à considérer concernant la méthodologie de l'IVRAC découle de l'objectif de cette étude qui était d'étudier la submersion et l'érosion côtière. Ainsi, l'IVRAC ne comprend **que ces deux aléas côtiers**. L'IVRAC doit être considéré pour ce qu'il est; il ne s'agit pas d'une cartographie multirisque. En effet, il est connu qu'au niveau de nos sites témoins, mais également des routes côtières de l'Est du Québec en général, d'autres aléas naturels sont présents et peuvent faire augmenter le niveau global de vulnérabilité de cette route aux aléas naturels dans leur ensemble même si l'IVRAC ne le reflète pas. Même si ce ne sont pas spécifiquement des aléas côtiers, ils affectent les mêmes secteurs. Par exemple, on peut penser à des mouvements de terrain comme au site n° 9 de Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan ou pour le à des processus géomorphologiques au niveau de la falaise rocheuse surplombant la route comme au site n° 2 de Rivière-à-Claude. Comme on peut le voir à la figure 141, il peut survenir des glissements de terrain (entraînant des chutes de pierre, des écroulements, des coulées de débris), des chutes de blocs de glace (écroulement des carapaces de glace) et des avalanches de neige (Gauthier, 2008; Gauthier et *al.*, 2012 et Gauthier, 2013). Tous ces processus surviennent à une très grande proximité de la route et parfois même sur la route ce qui peut affecter la sécurité des usagers.

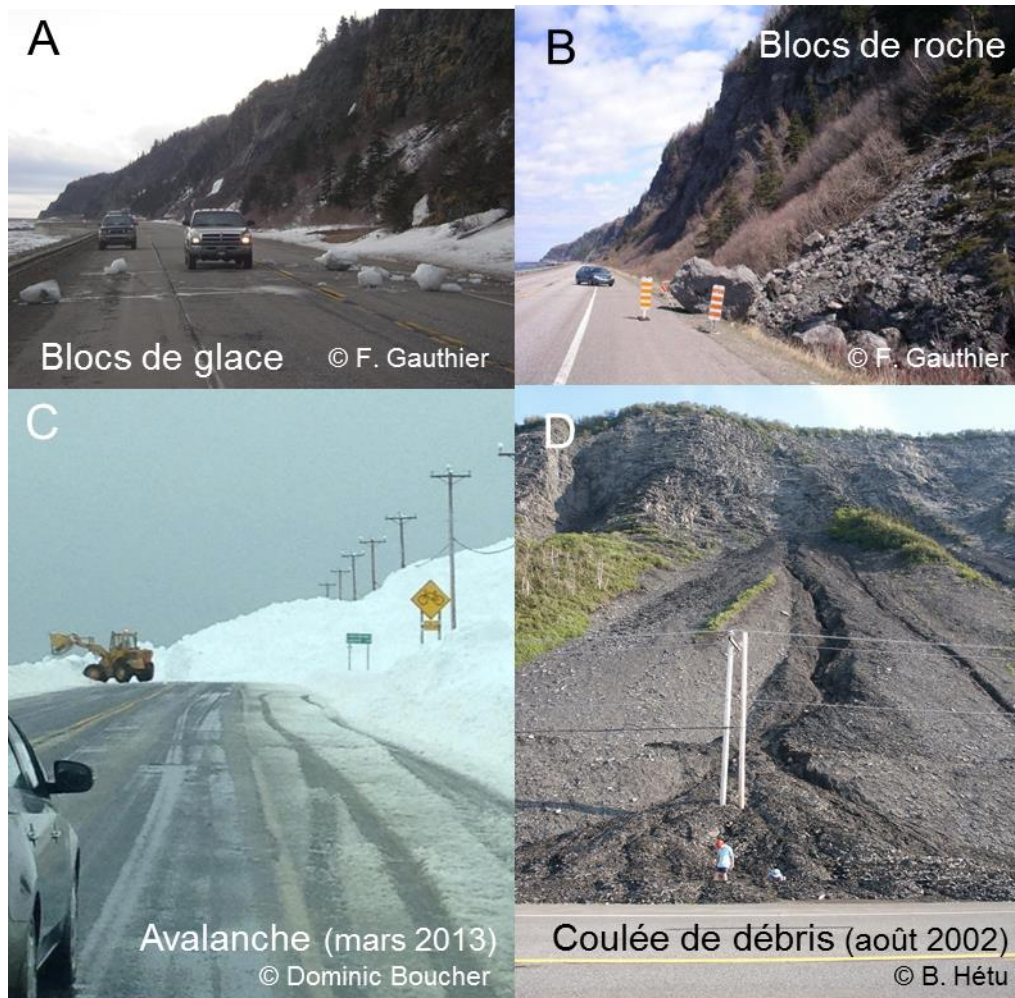


Figure 141. Mouvements de versant à proximité de la route 132 dans le nord de la Gaspésie (blocs de glace – blocs de roche – avalanche – coulée de débris)

7.2 Recommandations sur la vulnérabilité aux aléas côtiers

L'indice de vulnérabilité aux aléas côtiers (IVRAC) répond à un besoin de synthétiser différents paramètres en un indice. En ce sens, **l'indice de vulnérabilité doit servir comme outil d'aide à la décision et de priorisation d'interventions**. Cependant, il est également important de connaître les deux sous-indices, soit la vulnérabilité à l'érosion et celle à la submersion afin de mieux comprendre la situation du segment de route et pouvoir en tenir compte dans la gestion et les types de solutions à envisager. Finalement, une fois les segments les plus vulnérables identifiés et l'aléa auquel ils sont soumis

déterminés, il convient de s'attarder aux scores des différents paramètres qui ont conduit à l'IVRAC afin de pouvoir bien comprendre ce qui a conduit à un tel niveau de vulnérabilité et ainsi de savoir sur quels paramètres les interventions pourraient être faites pour réduire la vulnérabilité. En effet, **pour un même niveau de vulnérabilité plusieurs raisons peuvent en être à l'origine. Ainsi, les actions à entreprendre ne seront pas forcément les mêmes.** Il convient donc de se référer aux analyses des résultats pour chacun des sites témoins (section 6.2) et d'aller dans la base de données du fichier de forme (*shapefile*) pour aller consulter les différents scores et les niveaux de vulnérabilité des aléas séparément afin de comprendre quel est l'élément sur lequel il pourrait être possible de travailler pour minimiser la vulnérabilité. Cependant, il est important de **gérer les deux aléas ensemble** car cela permet de ne pas exacerber l'un en appliquant une intervention qui visait à limiter l'autre. Par exemple, la mise en place de structures rigides limitant l'érosion, entraîne généralement une diminution de la largeur des plages et augmente ainsi la possibilité de submersion de la route (Bernatchez et Fraser, 2012).

D'autres aléas naturels (mouvements de terrain, avalanches, chutes de blocs) sont présents sur les sites étudiés comme souligné auparavant. Ils devraient être pris en compte dans toute étude globale sur la vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec. Ainsi, il serait fort pertinent de réaliser une étude qui intègre l'ensemble des aléas naturels. Le nord de la Gaspésie et la Côte-Nord constituent des secteurs potentiels pour réaliser ce type d'étude en raison de la grande diversité d'aléas. De plus, il serait possible d'utiliser les ressources ou les équipes mises en place dans les unités administratives déjà existantes (directions territoriales et centres de services par exemple) pour le suivi d'un aléa (par exemple pour l'érosion) pour effectuer d'autres suivis en même temps.

Les différents niveaux de vulnérabilité peuvent être mis en lien avec l'**horizon auquel des actions pourraient être faites**. Si le niveau est **critique** soit un chiffre **supérieur à 50**, alors des actions d'atténuations et/ou des mesures d'adaptation devraient être prises **immédiatement**. Si le niveau de vulnérabilité est **élevé** (un indice variant de **25 à 50**), alors une évaluation **rapide** des solutions pour ce segment est nécessaire. Plus le **niveau baisse** moins l'application de solutions est urgente. Cependant, la **recherche de solutions** peut s'effectuer immédiatement dans un esprit d'anticipation afin de l'intégrer plus aisément et à moindre coût lors des prochaines mises à niveau du réseau routier (Johnston *et al.*, 2014). Il est important de garder à l'esprit que, quel que soit le niveau de vulnérabilité, même s'il est faible (soit inférieur

à 10), l'exposition aux aléas peut tout de même être importante. Finalement, si le niveau de vulnérabilité est nul, soit un score de 0, aucune planification n'est nécessaire en ce qui a trait à ces deux aléas. Cependant, l'**effet réseau** doit être considéré. Par exemple, un segment non vulnérable situé entre deux segments qui le sont doit être inclus dans la planification globale effectuée pour un tronçon de route, un site témoin ou une municipalité.

Lors de la revue de littérature ainsi que de la mise en place de l'indice de vulnérabilité et de l'analyse IVRAC pour les 9 sites témoins, **plusieurs actions ou éléments pouvant contribuer à réduire la vulnérabilité** sont apparus. Pour réduire la vulnérabilité, il est ainsi possible d'intervenir sur les différents paramètres la composent soit 1) l'exposition aux aléas, 2) l'adaptation aux aléas, 3) les caractéristiques du segment de route ou 4) les caractéristiques du segment au sein du réseau routier.

1) L'exposition aux aléas :

- Afin de réduire la vulnérabilité en agissant sur l'exposition de la route aux aléas, la **relocalisation de la route** à une plus grande distance de la côte pourrait être envisagée pour certains secteurs. Sur la Côte-Nord, cette approche a été retenue à différents endroits depuis la fin des années 90. La route 132 a également été déplacée à cause de l'érosion à quelques endroits en Gaspésie. Cette stratégie doit s'inscrire dans un aménagement et une planification globale.
- Il est également possible de laisser un « espace de liberté » à la côte afin d'éviter que les reculs événementiels lors de tempêtes n'affectent la route. En effet, ce type de reculs peut survenir même dans les secteurs stables à long terme ou situés en arrière d'ouvrages de protection. C'est pourquoi il serait intéressant de mettre en place des **actions avant que la distance entre la route et la côte ne soit inférieure au recul événementiel** ce qui éviterait que ces segments de route puissent, par la suite, être affectés par l'érosion événementielle.

2) L'adaptation aux aléas :

- L'adaptation actuelle consiste beaucoup en la construction de **mesures de protection structurelles** (murs, enrochements, etc.). Cependant, il convient de faire attention à ne pas implanter une mesure d'adaptation à un aléa qui aggraverait l'autre aléa (comme un mur qui limite l'érosion, mais augmente la submersion) et de bien considérer tous les effets indirects de ces structures (effet de bout par exemple)
- Mais il est également possible de se demander si des adaptations différentes aux aléas, par exemple avec des **mesures non structurelles**, pourraient

également convenir. Cela pourrait passer par la création ou la reconstitution d'une terrasse de plage en avant de la route comme zone tampon à la fois pour réduire la vulnérabilité à l'érosion, mais aussi pour limiter la submersion (plage plus large, déferlement moins violent, moins d'eau dans les secteurs naturels...). Ou encore en implantant des mesures de recharge en plage, de végétalisation de la côte ou de création/reconstruction de dunes (par exemple aux Îles-de-la-Madeleine). La création d'une dune pourrait ainsi protéger la route de la submersion ou tout au moins des débris et du déferlement dû à la proximité immédiate de la route en créant un obstacle pour l'eau ou les débris.

- Finalement, l'établissement de **plans de mesures d'urgence (ou plan de sécurité civile)** qui intègrent les aléas côtiers et leurs impacts sur les routes pour l'ensemble des territoires est une mesure d'adaptation qui devrait être réalisée pour l'ensemble des sites. Ces plans devraient inclure les problèmes potentiels liés aux voies de communication et les ruptures de services qui pourraient survenir (quelles qu'en soient les causes) l'accès aux services essentiels, le temps de rupture (temps où l'aléa affecte, puis temps de rétablissement). Par exemple aux Îles-de-la-Madeleine, la municipalité ainsi que le centre de service du MTQ ont réalisé un « Plan de sécurité civile, volet préparation à l'intervention » aussi appelé « Plan de mesure d'urgence » sur leur site web qui inclut les actions à poser en cas de rupture de service de la route, quelle qu'en soit la cause (« route 199 endommagée gravement ») (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 2002, 2009 et 2014). La continuité de service a été envisagée et il est prévu par exemple un service par bateau avec le nom des bateaux et des capitaines à contacter pour assurer une liaison entre les îles si la route venait à être coupée au-delà d'une certaine durée (comm. personnelle, L. Vigneau, 2014). Cette adaptation réduit la vulnérabilité même si ceci n'est pas inclus dans l'indice de vulnérabilité présenté ici. Les plans d'urgences qui intègrent le risque sont ainsi primordiaux. Cependant, il convient également de les publiciser afin que la population soit informée des aléas et des actions à faire ou non lorsque la situation se présente. Par exemple pour les Îles-de-la-Madeleine, l'information se retrouve aisément accessible sur leur site internet (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 2014).

3) Les caractéristiques du segment de route :

- Des actions peuvent également être entreprises au niveau du segment de route afin d'en diminuer la vulnérabilité. Par exemple, dans la perspective de la hausse du niveau marin appréhendé, une analyse du **rehaussement de certains segments de route** pourrait être envisagée. Ainsi, l'altitude du segment de route pourrait être modifiée ce qui limiterait la submersion et/ou le déferlement.

- Il pourrait également être possible de **limiter l'installation de services essentiels** (électricité, égout...) sous la route, surtout du côté de la mer dans les secteurs exposés à l'érosion afin de limiter les impacts potentiellement multiples pour les communautés.
- Enfin, une préparation des équipes en vue d'une rupture pourrait être mise en place et un **plan de rétablissement de service** (réserve de matériaux de remblai, plans de réalisation, etc.) pour un rétablissement rapide de la fonction de la route pourrait être prévu.

4) Les caractéristiques du segment au sein du réseau routier :

- Finalement, des actions sur le réseau routier peuvent également être mises en place pour limiter la vulnérabilité. Par exemple, la construction d'une **voie de contournement** pourrait être envisagée afin d'augmenter la robustesse du réseau routier et d'offrir une alternative à l'utilisation de la route nationale en cas d'interruption de service. Surtout dans les secteurs où les interruptions peuvent être dues aux deux aléas étudiés (érosion et submersion), voire à d'autres aléas. Dans certains secteurs, des chemins forestiers ou des routes non asphaltées sont présents et pourraient peut-être offrir une alternative. Si cela n'est pas possible, l'étude de la mise en place d'un **plan alternatif de transport** (motoneige, bateau, véhicule hors route...) devrait être envisagée comme une adaptation aux aléas côtiers afin de parer à l'isolement des populations. Ce plan devrait tenir compte du ou des aléas concernés. En effet, une route affectée par l'érosion peut être endommagée ou détruite, mais une route affectée par la submersion n'est pas forcément détruite. Elle peut être endommagée (besoin de refaire l'asphalte par exemple), mais pas dans toutes les situations. Lors de certains événements, la route peut être fermée puis nettoyée (avec un véhicule conçu pour le déneigement pour enlever les gros débris par exemple) et ainsi ouverte à la circulation plus rapidement.
- D'un point de vue de réseau, il est également important de déterminer si l'on peut **se permettre ou non une coupure de service dans le réseau routier** pour le temps que va durer un événement de submersion. Si la perte de service est acceptable, une signalisation adéquate devra être mise en place sur le réseau routier. Cela est utilisé sur certaines routes en Europe et aux États-Unis (volume II du présent projet, Boyer-Villemaire *et al.*, 2014).

En conclusion, il serait important de réaliser un **suivi régulier et événementiel** sur l'ensemble du réseau routier. Comme cela a été fait le 6 décembre 2010 lorsque les équipes du MTQ surveillaient 130 km de routes (St-Amour, 2011), il serait important de continuer à effectuer un **suivi de l'évolution de la situation lors des événements de tempête** afin de permettre, si nécessaire, l'installation rapide de la signalisation adéquate pour dévier la circulation sur

un chemin de détour. En plus du suivi événementiel, le suivi régulier permet d'ajuster les plans d'intervention selon les modifications possibles de l'environnement humain et les changements naturels. La mise à jour régulière des connaissances devrait être intégrée aux bases de données du MTQ.

8 CONCLUSION

Cette étude a conduit à l'élaboration d'un indice de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers, nommé IVRAC, tant à court, moyen et long terme. Cet indice prend en compte l'érosion et la submersion côtière. Les indices de vulnérabilité calculés pour des segments de 100 mètres répartis sur 9 sites témoins (soit 1224 segments au total) peuvent être classés en 5 niveaux soit nul, faible, moyen, élevé et critique. Les auteurs sont conscients que des limites méthodologiques sont présentes. Néanmoins, l'outil d'aide à la décision que représente un tel indice est important pour permettre une meilleure gestion, planifier les priorités d'actions qui devront être prises à l'avenir et déterminer sur quel paramètre intervenir.

Les résultats pourront ainsi être intégrés dans toute planification d'intervention que ce soit à court, moyen ou long terme. Cependant, pour les segments de routes identifiés comme ayant un niveau de vulnérabilité critique ou élevé, une planification est requise rapidement. Cet indice pourra être mis à jour lorsque de nouvelles données seront disponibles tant pour les aléas que pour le réseau routier.

Étant donné que les routes assurent un service à la population en tant que réseau et qu'un réseau est aussi faible que son plus faible maillon, il convient de tenir compte de ces secteurs vulnérables dans la gestion et la continuité du service offert aux populations. Par exemple, augmenter la robustesse du réseau dans les secteurs où celle-ci est faible limiterait la vulnérabilité aux aléas côtiers en permettant de ne pas couper le service durant les événements et d'effectuer les réparations sans urgence.

Il est important de garder à l'esprit que les deux aléas côtiers d'érosion et de submersion sont liés et que les interventions réalisées devraient toujours tenir compte des deux aléas et des interactions qui peuvent exister, notamment les interventions rigides pour limiter l'érosion qui peuvent amplifier la submersion.

À la lumière des résultats et du développement de cette approche, il serait fort intéressant d'appliquer l'IVRAC pour l'ensemble des côtes de l'Est du Québec. Ceci permettrait d'encore mieux faire ressortir les secteurs les plus vulnérables et permettrait de mieux intégrer la notion de réseau dans l'analyse. Par ailleurs, il serait pertinent d'appliquer un indice global qui n'intègre pas seulement les infrastructures routières comme enjeu, mais l'ensemble des enjeux affectés par les aléas côtiers. Ceci permettrait de développer une

approche qui intègre davantage l'aménagement et la planification du territoire dans son ensemble.

Il pourra découler d'une telle étude sur la vulnérabilité des routes une évaluation des actions possibles et une estimation des coûts selon les périodes d'interventions projetées. Selon l'U.S. Federal Highway Administration (2008), ceci constitue la dernière étape d'une étude de vulnérabilité. Ceci n'a pas été fait par notre équipe dans le cadre de ce mandat et est laissé à la réalisation et aux décisions du Ministère.

9 RÉFÉRENCES

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials
2007 Highway Drainage Guidelines

ABUODHA, P.A.O. ET WOODROFFE, C.D. (2010) *Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from southeast Australia*, Journal of Coastal Conservation, vol. 14, pp. 189-205.

ALLISON, I. (dir.), (2009) *The Copenhagen Diagnosis, 2009: Updating the world on the Latest Climate Science*. The University of New South Wales Climate Change Research Centre, Sydney, Australie, 60 p.

ADGER W. N. (2006) *Vulnerability*, Global Environmental Change, vol. 16 pp. 268-281

ARKEMA K.K., GUANNEL G., VERUTES G., WOOD S.A., GUERRY A., RUCKELSHAUS M, KAREIVA P., LACAYO M. ET SILVER J.M. (2013) *Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms*, Nature Climate Change, vol. 3, pp. 913-918.

BACHAND E. (2010) Datation dendrochronologique des mouvements de masse de grande ampleur en milieu côtier, mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 49 p.

BARROCA B., BERNARDARA P., MOUCHEL J. M. et G. HUBERT (2006) *Indicators for identification of urban flooding vulnerability*, Natural Hazards Earth System Science, vol. 6, pp. 553–561

BERNATCHEZ, P., FRASER, C., FRIESINGER, S., JOLIVET, Y., DUGAS, S., DREJZA, S. et MORISSETTE, A., (2008), *Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 256 p.

BERNATCHEZ, P., TOUBAL, T., VAN-WIERTS, S., DREJZA, S. et FRIESINGER, S. (2010) *Caractérisation géomorphologique et sédimentologique des unités hydrosédimentaires de la baie de Plaisance et de Pointe-aux-Loups, route 199, Îles-de-la-Madeleine*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport final remis au ministère des Transports du Québec, avril 2010, 177 p.

BERNATCHEZ, P., FRASER, C., LEFAIVRE, D. et DUGAS, S. (2011), *Integrating anthropogenic factor, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards*. Ocean and Coastal Management, vol. 54, pp. 621-632.

BERNATCHEZ, P., FRASER, C., DUGAS, S. et S. DREJZA (2012 a). *Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC d'Avignon*. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, août 2012, 49 p. et annexes.

BERNATCHEZ, P., DREJZA, S. et S. DUGAS (2012 b). *Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des îles de la Madeleine*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, juillet 2012, 71 p. et annexes

BERNATCHEZ, P., FRIESINGER, S., DENIS, C. et Y. JOLIVET (2012 c) *Géorisques côtiers, vulnérabilité et adaptation de la communauté d'Ekuanitshit dans un contexte de changements climatiques*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Conseil tribal Mamuitun et au Ministère des Affaires autochtones et Développement du Nord Canada, 219 p.

BERNATCHEZ, P., DREJZA, S., VAN-WIERTS, S. et DIDIER, D. (2012 d), *Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Rapport méthodologique*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport méthodologique remis au ministère des Transports du Québec, février 2012, 60 p. + annexes

BERNATCHEZ, P. et FRASER, C. (2012), *Evolution of Coastal Defence Structures and Consequences for Beach Width Trends, Québec, Canada*. Journal of Coastal Research, vol. 28, n° 6, pp. 1550 – 1566.

BOUCHER-BROSSARD, G. et BERNATCHEZ, P. 2013. *Analyse historique et récente de l'érosion du talus côtier, secteur des Cayes, municipalité de Rivière-Saint-Jean, Côte-Nord*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au ministère des Transports du Québec, Direction de la Côte-Nord, 37 p.

BORUFF, B.J., EMRICH, C. et Cuttler S.L. (2005) *Erosion hazard vulnerability of US coastal counties*. Journal of Coastal Research, vol. 21, n° 5 pp. 932-942.

BOURQUE, A. et SIMONET, G. (2008), *Québec*, chapitre 5, p 171-226, dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Lacroix et E. Bush (éditeurs), Gouvernement du Canada, Ottawa

BOYER-VILLEMAIRE, U., MARIE, G., BERNATCHEZ, P. (2014) Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : *Analyse des stratégies internationales et recommandations en matière de réduction de la vulnérabilité des infrastructures de transport face aux risques naturels côtiers, Volume II*, Projet X008.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au ministère des Transports du Québec, novembre 2014. 165 p. + annexes.

BREILH J-F., CHAUMILLON E., BERTIN X. et GRAVELLE M. (2013). *Assessment of Static Flood Modeling Techniques: Application to Contrasting Marshes Flooded during Xynthia (western France)*, Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 13, n° 6, pp. 1595–1612

CAZENAVE A., LOMBARD, A. et LLOVEL W. (2008) *Present-day sea level rise: a synthesis*. C. R. Geoscience, 340, 761–770.

CHURCH, J.A. et al. (2013) *Sea Level Change Supplementary Material*. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)].

CHURCH J.A. et WHITE N.J. (2011) *Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century*, Surv. Geophys., DOI 10.1007/s10712-011-9119-1.

COLLE B.A., BUONAIUTO, F, BOWMAN M.J., WILSON R.E., FLOOD R., HUNTER R., MINTZ A. et HILL D. (2008) *New York city's vulnerability to coastal flooding: storm surge modeling of past cyclones*, American meteorological society, pp. 829-841.

CREACH A, MERCIER D et S PARDO (2014) *Identification et cartographie des zones à risque potentiellement mortel face à la submersion marine : l'indice de V.I.E. appliqué à La Faute-sur-Mer (Vendée, France)* pp 214-223 in Actes du colloque international « Connaissance et compréhension des risques côtiers : aléas, enjeux, représentations, gestion » 3 au 4 juillet 2014, Brest, France.

DAIGLE, R., dir. (2006), *Les impacts du changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick*, Environnement Canada, 646 p.

DAWSON, R.J., DICKSON, M.E., NICHOLLS, R.J., HALL, J.W., WALKDEN, M.J.A., STANSBY, P.K., MOKRECH, M., RICHARDS, J., ZHOU, J., MILLIGAN, J., JORDAN, A., PEARSON, S., REES, J., BATES, P.D., KOUKOULAS, S. et WATKINSON, A.R. (2009) *Integrated analysis of risks of coastal flooding and cliff erosion under scenarios of long term change*. Climatic Change, 95 : 249-288.

DE LA VEGA-LEINERT, A.C. et NICHOLLS, R.J., 2008. *Potential implications of sea-level rise for Great Britain*. Journal of Coastal Research, 24, 2: 342–357.

D'ERCOLE, R. et PIGEON, P. (1999) *L'expertise internationale des risques dits naturels : intérêt géographique*. Annales de géographie, n°608, pp. 339-357.

DESJARLAIS, C. et BLONDLOT, A. (2010) *Savoir s'adapter aux changements climatiques*, Ouranos, rédaction : C. DesJarlais, M. Allard, D. Bélanger, A. Blondlot, A. Bouffard, A. Bourque, D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larrivée, N. Lease, A.T. Pham, R. Roy, J.-P. Savard, R. Turcotte et C. Villeneuve, Montréal, 2010, 128 p. disponible sur : http://www.ouranos.ca/fr/pdf/53_sssc_21_06_lr.pdf (lien valide le 20 octobre 2014)

DEVOY, R.J.N. (2008) *Coastal vulnerability and the implications of sea-level rise for Ireland*. Journal of Coastal Research, vol. 24, n°2, pp. 325-341.

DIDIER, D. (2014) *Évaluation de la submersion côtière par l'estimation in situ du wave runup sur les côtes basses du Bas-Saint-Laurent, Québec*, mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 178 p.

DIEZ, P.G., PERILLO, G.M.E., et PICCOLO, M.C. (2007) *Vulnerability to sea-level rise on the coast of the Buenos Aires Province*. Journal of Coastal Research, 23, 1: 119–126.

DOLAN A.H. et WALKER, I.J. (2004) *Understanding vulnerability of coastal communities to climate change related risks*, Journal of Coastal Research, special issue 39.

DREJZA, S., FRIESINGER, S. et BERNATCHEZ, P. (2014). *Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec, Volume I*, Projet X008.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Remis au ministère des Transports du Québec, septembre 2014, 226 p. + annexes.

FONTAINE. M. M. et A. C. STEINMAN 2009, *Assessing Vulnerability to Natural Hazards: Impact-Based Method and Application to Drought in Washington State*, doi : 10.1061/(ASCE)1527-6988(2009)10:1(11), *Natural Hazards Review*, février 2009, pp.11-18

FÜSSEL, H-M. (2007) Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, 17: 155-167.

GALLOPIN, G.C. (2006) *Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity*. *Global Environmental Change*, vol 16, 293-303.

GAUTHIER, F. (2008) *Les glaces de paroi : formation, écoulement et impacts géomorphologiques*, Mémoire de maîtrise, INRS Eau-Terre-Environnement, 154 p.

GAUTHIER F., HÉTU, B. et BERGERON N. (2012) *Analyses statistiques des conditions climatiques propices aux chutes de blocs de glace dans les corridors routiers du nord de la Gaspésie, Québec, Canada*, *Revue canadienne de géotechnique/Canadian Geotechnical Journal*, vol 49, n° 12, pp. 1408–1426, doi:10.1139/CGJ-2011-0394

GAUTHIER, F. (2013) *Les glaces de paroi - glaciologie, thermodynamique et prévision des chutes de blocs de glace sur les routes du nord de la Gaspésie (Québec, Canada)*, Thèse déposée à l'Université Laval pour l'obtention du titre de doctorat en sciences géographiques, 175 p.

GIEC - Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2001) *Climate Change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, 1032 p.

GIEC - Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2007) *Climate change 2007 : The physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 996p.

GIEC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

GOUVERNEMENT FRANÇAIS (2012) *Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux – France métropolitaine*, 170 p.

GORNITZ, V. (1990) *Vulnerability of the East Coast, U.S.A to future sea level rise*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 9: 201–37

GRINSTED, A., MOORE, J.C. et JEVREJEVA, S. (2009) *Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100AD*, Climate dyn., doi : 10.1007/s00382-008-0507-2.

HARVEY, N. et NICHOLLS, R. (2008) *Global sea-level rise and coastal vulnerability*, Sustainability Science, vol. 3, pp. 5-7.

HÉNAFF A., et PHILIPPE M. (2014) *Gestion des risques d'érosion et de submersion marines – Guide méthodologique*.147p. disponible en ligne sur www.risques-cotiers.fr

HINKEL, J. (2011) Indicators of vulnerability and adaptive capacity: *Towards a clarification of the science–policy interface*, Global Environmental Change, vol. 21, pp. 198-208.

HORTON, B.P., RAHMSTORF, S., ENGELHART S.E. et KEMP, A.C. (2014) *Expert assessment of sea-level rise by AD 2100 and AD 2300*, Quaternary Science Reviews, vol. 84, pp.1-6.

IONESCU, C., KLEIN, R. J.T., HINKEL J. et K.S. K. KUMAR (2005) *Towards a Formal Framework of Vulnerability to Climate Change*. FAVAIA Working Paper 1, August 2005.

JALLOW, B.P., TOURE, S., BARROW, M.M.K. ET MATHIEU, A.A. (1999) *Coastal zone of The Gambia and the Abidjan region in Côte d'Ivoire: sea level rise vulnerability, response strategies, and adaptation options*, Climate research, vol. 12, pp. 129-136.

JOHNSTON A., SLOVINSKY P. et K.L. YATES (2014) *Assessing the vulnerability of coastal infrastructure to sea level rise using multi-criteria analysis in Scarborough, Maine (USA)*, Ocean and Coastal Management, vol. 95, pp.176-188.

JUNEAU, M.-N. (2012) *Hausse récente du niveau marin relatif aux Îles-de-la-Madeleine*, mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 174 p.

KARACA, M. et NICHOLLS, R.J. (2008) *Potentiel implication of accelerated sea-level rise for Turkey*. Journal of Coastal Research, 24 no2 288-298.

KARIM et MIMURA (2008) *Impacts of climate change and sea-level rise on cyclonic storm surge floods in Bangladesh*, Global Environmental Change, vol. 18, pp. 490-500, doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.05.002

KLEIN R.J.T. et NICHOLLS, R.J. (1999) *Assessment of coastal vulnerability to climate change*, Ambio, vol. 28, n° 2, pp. 182-187.

KOOHZARE, A., VANÍČEK, P. et SANTOS, M. (2008) *Pattern of recent vertical crustal movements in Canada*, Journal of Geodynamics, 45 : 133-145.

LECLERC, M. et P. DUPUIS (2008). *Recherche d'une solution économique et durable à la problématique d'érosion littorale à Pointe-aux-Outardes*. Pour le compte de la Ville de Pointe-aux-Outardes et du Ministère de la Sécurité publique, en collaboration avec OURANOS et divers partenaires. Rapport de recherche INRS-ETE R990 et Aquapraxis Inc. 10136-100. 220 pages + 9 annexes. Octobre.

LEUXE, A. (2011) *Concertation nationale et Adoption d'un premier plan national d'adaptation au changement climatique – Infrastructures et service de transport, présentation*, cite le CETMEF (2009) *Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux*.

LONG, B. et XHARDÉ R (2007) *Applications géomatiques adaptées pour l'exploration des ressources et des risques naturels*, Rapport final, Projet Géoïde #27, remis au Ministère des Transports du Québec, 188 p.

LOZANO, DEVOY, MAY et ANDERSON (2004) *Storminess and vulnerability along the Atlantic coastlines of Europe : analysis of storm records and of a greenhouse gases induced climate scenario*. Marine Geology, 210 : 205-225

MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT DE FRANCE (1997) *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) : guide général*, la documentation française éditeurs, 76 p.

MARIE, G., BERNATCHEZ, P., DUGAS, S., FRASER, C. et DREJZA, S. (2014). *Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des MRC de La Mitis et de La Matanie et des municipalités de Cap-Chat et Sainte-Anne-des-Monts*. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, juillet 2014, 74 p. et annexes.

McLAUGHLIN S., MCKENNA, J. et J.A.G. COOPER (2002) *Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities*, Journal of Coastal Research, Spécial Issue 36, pp. 487-497, ICS 2002 Proceedings, Northern Ireland, ISSN 0749-0208

McLAUGHLIN S. et COOPER J.A.G (2010) *A multi-scale coastal vulnerability index: a tool for coastal managers?* Environ Hazards J 9:1–16. Earthscan ISSN: 1878-0059

MCLEOD, E., HINKEL, J., VAFEIDIS, A.T., NICHOLLS, R.J., HARVEY, N. et SALM, R. (2010) *Sea-level rise vulnerability in the countries of the Coral Triangle*, Sustainability Science, vol. 5, pp. 207-222.

MERRIFIELD M.A., MERRIFIELD, S.T. et MITCHUM G.T. (2009) *An Anomalous Recent Acceleration of Global Sea Level Rise*, Journal of climate, vol. 22, pp. 5772-5781.

METZGER P. et R. D'ERCOLE (2011) *Les risques en milieu urbain : éléments de réflexion* – EchoGéo, numéro 18

MEUR-FÉREC C., DEBOUDT Ph. et MOREL V. (2008) *Coastal Risks in France: An Integrated Method For Evaluating Vulnerability*. Journal of Coastal Research, 24: 178-189.

MUEHE, D. (2010) *Brazilian coastal vulnerability to climate change*, Pan-American Journal of aquatic sciences, vol. 5, n° 2, pp. 173-183.

MUNICIPALITÉ DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE (2002) *Plan de sécurité civile, volet préparation à l'intervention*, 109 pages.

MUNICIPALITÉ DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE (2009) *Agglomération des Îles-de-la-Madeleine, schéma de couverture de risque en sécurité incendie*, 109 pages.

MUNICIPALITÉ DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE (2014) page du site internet de la municipalité sur les risques et la sécurité civile : http://www.muniles.ca/services_securite_mesures_urgence.html, site internet consulté le 10 octobre 2014.

NICHOLLS, R.J. et CAZENAVE, A. (2010) *Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones*, Science, vol. 328, pp.1517-1520.

OVERTON M. et J. FISHER (2005) *NC Coastal Highway Vulnerability*. Final report. North Carolina. 88 p.

ÖZYURT, G. et ERGIN, A. (2010) *Improving Coastal Vulnerability Assessments to Sea-Level Rise: A New Indicator-Based Methodology for Decision Makers*, Journal of Coastal Research, vol. 262, pp. 265-273.

PALMER, B.J., VAN DER ELST, R., MACKAY, F., MATHER, A.A., SMITH, A.M., BUNDY, S.C., THACKERAY, Z., LEUCI, R. et PARAK, O. (2011) *Preliminary coastal vulnerability assessment for KwaZulu-Natal, South Africa*, Journal of Coastal Research, special issue 64, pp. 1390-1395.

PAPATHOMA-KÖHLE M., NEUHÄUSER B., RATZINGER K., WENZEL H., et D. DOMINEY-HOWES (2007) *Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides*, Natural Hazards and Earth System Science, vol. 7, n° 6, pp.765-779

PARIS, A., BROMIRSKI, P., BURKETT, V., CAYAN, D., CULVER, M., HALL, J., HORTON, R., KNUUTI, K., MOSS, R., OBEYSEKERA, J., SALLENGER, A. et WEISS, J. (2012). *Global sea level rise scenarios for the US National Climate Assessment*. NOAA Tech Memo OAR CPO, 37 pp.

PASKOFF, R.P. (2004) *Potential implications of sea-level rise for France*. Journal of Coastal Research, 20(2), 424–434.

PEDUZZI, P., DAO, H., HEROLD, C. et MOUTON, F. (2009) *Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9: 1149-1159.

Pfeffer W. T., Harper J. T. et S. O'Neel (2008) *Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise*, Science, vol. 321, pp. 1340-1343

PRUSZAK, Z. et ZAWADZKA, E. (2008) *Potential implications of sea-level rise for Poland*. Journal of Coastal Research, 24, 2 : 410–422.

PELLETIER (2012) site internet sur l'histoire : <http://www.journallepelletier.com/pages/histoires/le-chemin-maritime.html>

QUINTIN, C., BERNATCHEZ, P., JOLIVET, Y. (2013). *Impacts de la tempête du 6 décembre 2010 sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de la baie des Chaleurs*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et Chaire de recherche en géoscience côtière, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, février 2013, Volume I : 48 p. + Volume II : 170 p.

RAHMSTORF S., FOSTER G. et CAZENAVE A. (2012) *Comparing climate projections to observations up to 2011*, Environmental Research Letters, vol. 7, 5 pp.

ROBERT B. et MORABITO L. (2011) *Reducing Vulnerability of Critical Infrastructure – Methodological Manual*, 67 p., Presses internationales Polytechnique

SALDANA-ZORRILLA, S. O. (2006), *Reducing Economic Vulnerability in Mexico: Natural Disasters, Foreign Trade and Agriculture*. PhD dissertation. Faculty of Economics. Vienna University of Economics (Wirtschaftsuniversität Wien). Vienna, Austria.

SANO, M., GOLSHANI, A., SPLINTER, K.D., STRAUSS, D., THURSTON, W. ET TOMLINSON, R. (2011) *A detailed assessment of vulnerability to climate change in the Gold Coast, Australia*, Journal of Coastal Research, Special issue 64, pp. 245-249.

SAVARD, J.-P., BERNATCHEZ P., MORNEAU, F. et SAUCIER, F. (2009) *Vulnérabilité des communautés côtières de l'Est du Québec aux impacts des changements climatiques*, La Houille blanche, n° 2, p. 59-66.

SCHROTER D. et METZGER (2004) *Global change impacts on ecosystem services and the vulnerability of the human-environment system – The European assessment ATEAM*, presentation, 13 diapositives

SMIT B. et J. WANDEL (2006) *Adaptation, adaptive capacity and vulnerability*, Global Environmental Change, vol. 16, pp. 282–292

SHAW, J., TAYLOR, R.B., FORBES, D.L., RUZ, M.-H. et SOLOMON, S. (1998) *Sensitivity of the coast of Canada to sea-level rise*; Bulletin 505 de la Commission géologique du Canada, 79 p.

SNELDER, M. (2010) *Designing Robust Road Networks : A general design method applied to the Netherlands*. Université technique de Delft, T2010/10, the Netherlands TRAIL Research School, 280 p.

ST-AMOUR, J. (2011) « Bas-Saint-Laurent et Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine, Le réseau routier du MTQ endommagé » dans le Bulletin d'information - Volume 2, numéro 1, hiver-printemps 2011, Dossier spécial : Est du Québec : les événements marquants de décembre 2010, sur : <http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/securite-civile/publications-statistiques-civile/inter-action/inter-action-vol-2-no-1/dossier-special/reseau-routier-endommage.html>

STATISTIQUE CANADA (2011) recensement de la population disponible en ligne (<http://www.statcan.gc.ca/start-debut-fra.html>)

STERR, H. (2008) *Assessment of Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise for the Coastal Zone of Germany*. Journal of Coastal Research, 24, 2: 380-393.

THORNES, J., RENNIE, M., MARSDEN, H. et CHAPMAN, L. (2012) *Climate Change Risk Assessment for the Transport Sector*. DEFRA, Welsh Government, DOENI, The Scottish Government, Wallingford, Project number GA0204, 140p.
<http://randd.defra.gov.uk/Default.aspx?Module=More&Location=None&ProjectID=15747>

THIELER, E.R., HIMMELSTOSS, E.A., ZICHICHI, J.L., et MILLER, T.L. (2005) *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1304.

UNDRO – Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator (1979) *Natural Disaster and Vulnerability Analysis*, Report of the Expert Group Meeting (9-12 July 1979), 53p.

U.S. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (2008) *Highways in the Coastal Environment*: 250 p. Accessible en ligne. Site internet (à jour du 22 octobre 2014) : <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/07096/index.cfm>

VERMEER, M. et RAHMSTORF F. (2009) *Global sea level linked to global temperature*. PNAS, 106 : 21527-21532.

VAN-WIERTS, S. et BERNATCHEZ, P. (2011) Système mobile de laser terrestre appliqué à l'étude de la géomorphologie côtière. Bulletin de l'association québécoise de télédétection, 27 : p.3.

VAN-WIERTS, S. (2012), *Développement et application d'un système mobile de laser terrestre pour quantifier le bilan sédimentaire des plages*, Mémoire de maîtrise en géographie, janvier 2012, Université du Québec à Rimouski, 93 p.

VIGNEAU, L. (2014) communication personnelle, responsable du Centre de services des Îles-de-la-Madeleine, MTQ

VOICE, M., HARVEY, N. et WALSH, K. (2006) *Vulnerability to Climate Change of Australia's Coastal Zone: Analysis of gaps in methods, data and system thresholds*, Report to the Australian Greenhouse Office, Canberra, Australia, 115 p.

WINTER, M. G., MACGREGOR F. et L. SHACKMAN (2005). *Scottish Road Network Landslides Study*, Implementation. Transport Scotland, Edinburgh 270 p., disponible sur internet : <http://www.scotland.gov.uk/Publications/2005/07/08131738/17395>

YAMANO, H., KAYANNE, H., YAMAGUCHI, T., KUWAHARA, Y., YOKOKI, H., SHIMAZAKI, H. et CHIKAMORI, M. (2007) *Atoll island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstruction: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu*, Global and Planetary Change, vol. 57, pp. 407-416.

10 ANNEXES

Annexe 1

Description des données numériques

Les données numériques générées dans le cadre de cette étude sont présentées sur le DVD ci-joint.



DVD avec les fichiers numériques

La description de la table d'attribut du fichier de forme (*shapefile*) des segments de routes de l'IVRAC est présentée au tableau A. Les routes sont présentées sous forme de lignes.

Tableau A. Description des champs du fichier de forme « Routes_IVRAC_100m »

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Shape		Geometry	Polyligne	
AUTRE_RES	champ de la base de données du MTQ	Texte (60)	Voir documents du MTQ pour description	
NUM_RTSS	champ de la base de données du MTQ	Texte (14)	Voir documents du MTQ pour description	
FONCT	champ de la base de données du MTQ	Texte (60)	Voir documents du MTQ pour description	
RESPN	champ de la base de données du MTQ	Texte (150)	Voir documents du MTQ pour description	
STAT_TONM_1	champ de la base de données du MTQ	Texte (20)	Voir documents du MTQ pour description	
TOPNM	champ de la base de données du MTQ	Texte (200)	Voir documents du MTQ pour description	
TOPNM_1	champ de la base de données du MTQ	Texte (200)	Voir documents du MTQ pour description	
RES_CAMNG	champ de la base de données du MTQ	Texte (33)	Voir documents du MTQ pour description	
DEBUT	champ de la base de données du MTQ	Double	Voir documents du MTQ pour description	
CHANG_FIN	champ de la base de données du MTQ	Double	Voir documents du MTQ pour description	
Longueur	longueur du segment de route étudié	Double	Longueur en mètres	Théoriquement les segments mesurent 100 m, mais des exceptions peuvent exister (limites de sites, halte routière...)
DistCote	Distance minimale entre le segment de route et la côte	Double	Distance en mètres	
DistCote_I	Distance minimale entre le segment de route et la côte intérieure des lagunes	Double	Distance en mètres	Seulement aux îles-de-la-Madeleine
Commentair	Commentaire	Texte (200)		

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Type_Cote	Type de côte en avant du segment de route	Texte (200)	• Marais maritime • Flèche littorale • Terrasse de plage • Tombolo et cordon littoral • Côte rocheuse/rocheuse sans falaise • Falaise meuble • Falaise meuble à base rocheuse • Falaise rocheuse • Falaise rocheuse à sommet meuble • Falaise nd • Côte dunaire • Côte morainique • Artificielle • Remblai	Voir tableau 5 pour les définitions
Type_inter	Type de côte du côté de la lagune	Texte (100)	• Voir champ « Type_Cote »	Seulement aux Îles-de-la-Madeleine
Etat_cote	État de la côte en avant du segment de la route	Texte (50)	• Accumulation • Stable ou végétalisé • Semi-végétalisé • Actif/vif	Voir le tableau 6 pour les définitions L'état est à jour en date de 2010
Type_artif	Type de la structure de protection si présente sur la côte	Texte (25)	• Type d'artificialité présent	Le type est à jour en date de 2010
Etat_artif	État de la structure de protection si présente	Texte (25)	• Bon • Partiellement endommagé • Très endommagé • Complètement endommagé	Voir le tableau 7 pour les définitions L'état de l'artificialité est à jour en date de 2010
artif	Présence ou absence de structure de protection	Texte (10)	• oui • non	
Unité	Unité hydrosédimentaire* dans laquelle on se situe	Texte (50)	•	
Cellule	Cellule hydrosédimentaire* dans laquelle on se situe	Texte (50)	•	
Taux_evo	Taux de migration de la côte en avant du segment de route	Double	• En m/an	

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Tx_evo_2	Taux de migration de la côte de la lagune en avant du segment de route	Double	En m/an	Seulement aux Îles-de-la-Madeleine
source_tx	Source du taux de migration du champ « Taux_evo »	Texte (75)		
Recul_even	Recul possible lors d'un événement d'érosion majeur	Double	En mètre	Tableau 14
Recul_ev_1	Recul possible lors d'un événement d'érosion majeur du côté de la lagune	Double	En mètre	Tableau 14 Seulement aux Îles-de-la-Madeleine
Imminent	Distance résiduelle entre la route et la côte après un recul événementiel	Double	En mètres	
ExpoEro	Nombre d'années potentiel avant exposition à l'érosion	Double		Résultat de l'équation 9
ExpoEro_I	Nombre d'années potentiel avant exposition à l'érosion par l'intérieur de la lagune	Double		Résultat de l'équation 9 Seulement aux Îles-de-la-Madeleine
DateEro	Date potentielle d'exposition à l'érosion	Texte (50)	- imminent - d'ici 2015 2015 à 2020 2020 à 2030 2030 à 2040 2040 à 2050 2050 à 2060 2060 à 2100	
ScoreEro20	Score d'exposition à l'érosion d'ici 2020	Double	0 à 5	voir tableau 15
ScoreEro60	Score d'exposition à l'érosion d'ici 2060	Double	0 à 5	voir tableau 15
ScoreEro00	Score d'exposition à l'érosion d'ici 2100	Double	0 à 5	voir tableau 15
Z_Min	Altitude minimale du segment de route	Double	- En mètre - Niveau géodésique	

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Z_Max	Altitude maximale du segment de route	Double	- En mètre - Niveau géodésique	
Z_Mean	Altitude moyenne du segment de route	Double	- En mètre - Niveau géodésique	
HauteurSub	Hauteur potentielle de la submersion (actuelle)	Double	- En mètre - Niveau géodésique	Selon l'équation 10
Iso_2060	Variation isostatique prévue pour 2060	Double	Variation en mètre vis-à-vis l'actuel	Tableau 17
Iso_2100	Variation isostatique prévue pour 2100	Double	Variation en mètre vis-à-vis l'actuel	Tableau 17
GIEC_2060	Variation du niveau marin prévue pour 2060	Double	Variation en mètre vis-à-vis l'actuel	selon le scénario RCP 8.5
GIEC_2100	Variation du niveau marin prévue pour 2100	Double	Variation en mètre vis-à-vis l'actuel	selon le scénario RCP 8.5
Sub2020	Épaisseur d'eau potentielle sur la route actuellement	Double		Voir l'équation 10
Sub2060	Épaisseur d'eau potentielle sur la route en 2060	Double		Voir l'équation 10
Sub2100	Épaisseur d'eau potentielle sur la route en 2100	Double		Voir l'équation 10
ScoreSub20	Score de submersion pour 2020	Double	0 à 5	Voir le tableau 16
ScoreSub60	Score de submersion pour 2060	Double	0 à 5	Voir le tableau 16
ScoreSub00	Score de submersion pour 2100	Double	0 à 5	Voir le tableau 16
DJMA	Débit journalier moyen annuel	Double		fourni par le MTQ

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
DJME	Débit journalier moyen estival	Double		fourni par le MTQ
DJMH	Débit journalier moyen hivernal	Double		fourni par le MTQ
Score DJMA	Score du débit journalier moyen annuel	Double	• 1 à 5	Voir le tableau 20
ScoreDJME	Score du débit journalier moyen estival	Double	• 1 à 5	
ScoreDJMH	Score du débit journalier moyen hivernal	Double	• 1 à 5	
VoieContou	Présence et longueur éventuelle d'une voie de contournement	Texte (50)		
Km_Contour	Longueur de la voie de contournement	Double	• En kilomètre • 5555 : aucune voie existante	
ScoreConto	Score relatif à la voie de contournement	Double	• 1 à 5	Voir le tableau 28
RupturServ	Réparation de la rupture de service	Texte (50)	• Relativement facile à réparer – côte basse • Quelques difficultés (cours d'eau) • Quelques difficultés (lagune) • Quelques difficultés (relief) • Quelques difficultés (étang) • Difficultés cumulées • Falaise rocheuse, sommet plat • Très difficile, falaise soumise à glissement	facilité ou difficulté à rétablir le service advenant une rupture due à l'érosion de la route
ScoreRuptu	Score relatif à la réparation de la rupture de service	Double	• 1 à 5	Voir le tableau 25

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Rang_cote	Rang côtier	Texte (50)	• Rang 1 • Rang 2 • Rang 3 • Rang 4 • Rang 5 • Rang 6 • Rang 7 • Rang 8	Nombre de rangs d'éléments situés entre la côte et la route
ScoreRang	Score relatif au rang côtier	Double	• 1 à 5	Voir le tableau 23
Nb_residen	Nombre de résidences desservies par le segment de route	Double		
Nb_seconda	Nombre de résidences secondaires desservies par le segment de route	Double		
Nb_terrain	Nombre de terrains non bâtis desservis par le segment de route	Double		
Nb_commerc	Nombre de commerces desservis par le segment de route	Double		
Nb_ferme	Nombre de fermes desservies par le segment de route	Double		
Nb_InfraEs	Nombre d'infrastructures essentielles desservies par le segment de route	Double		
Nb_patrimo	Nombre d'infrastructures patrimoniales desservies par le segment de route	Double		
Nb_heberge	Nombre d'établissements d'hébergement présents sur le segment de route	Double		
Nb_service	Nombre de bâtiments de service présents sur le segment de route	Double		

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
NbBatiment	Nombre de bâtiments desservis par le segment de route	Double		
NbHabitant	Nombre d'habitants desservis par le segment de route	Double		selon le nombre de bâtiments et le nombre moyen de personnes par ménage (tableau 22)
ScoreHabit	Score relatif au nombre d'habitants desservis directement par le segment de route	Double	1 à 5	Voir le tableau 21
SecuEro	Sécurité des usagers liée à l'aléa d'érosion	Texte (50)	- Côtes basses - Côtes hautes - Côtes à glissement	
SecuSub	Sécurité des usagers liée à l'aléa de submersion	Texte (20)	- oui proximité et artificiel - oui proximité seulement - non	
ScoreSecEr	score de sécurité lié à l'érosion	Double	1 à 5	voir le tableau 26
ScoreSec20	score de sécurité lié à la submersion actuelle	Double	1 à 5	voir le tableau 27
ScoreSec60	score de sécurité lié à la submersion en 2060	Double	1 à 5	voir le tableau 27
ScoreSec00	score de sécurité lié à la submersion en 2100	Double	1 à 5	voir le tableau 27
NbDetHopit	Nombre de personnes affectées par un détour pour l'accès à l'hôpital	Double		estimé selon le nombre moyen de personnes par ménage et le nombre de bâtiments hébergeant des personnes
HopitDet	Longueur du détour à réaliser pour l'accès à un hôpital	Double	- En kilomètre 5555 : aucun détour possible, accès coupé	

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
ScoreHopit	Score relatif à la population affectée et à la longueur du détour pour un accès à l'hôpital	Double	1 à 5	voir le tableau 29
NbDetPompi	Nombre de personnes affectées par un détour pour l'accès des pompiers	Double		estimé selon le nombre moyen de personnes par ménage et le nombre de bâtiments hébergeant des personnes
PompierDet	Longueur du détour à réaliser par les pompiers	Double	- En kilomètre 5555 : aucun détour possible, accès coupé	
ScorePompi	Score relatif à la population affectée et à la longueur du détour pour un accès des pompiers	Double	1 à 5	voir le tableau 29
LargPlage	Largeur de la plage	Double	En mètres	
ScorePlage	Score relatif à la largeur de plage	Double	1 à 5	voir le tableau 18
EgoutS	Présence et localisation d'un réseau d'égout sanitaire	Texte (30)	- Non - Sous la route – terre - Sous la route – mer - Sous la route - indéterminé	
EgoutP	Présence et localisation d'un réseau d'égout pluvial	Texte (30)	- Non - Sous la route – terre - Sous la route – mer - Sous la route - indéterminé	
Aqueduc	Présence et localisation d'un réseau d'aqueduc	Texte (30)	- Non - Sous la route – terre - Sous la route – mer - Sous la route - indéterminé	

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Electricit	Présence et localisation d'un réseau d'électricité	Texte (30)	• Non • Sous la route – terre • Sous la route – mer • Sous la route - indéterminé • Aérien – terre • Aérien - mer	
Telephone	Présence et localisation d'un réseau de téléphone	Texte (30)	• Non • Sous la route – terre • Sous la route – mer • Sous la route - indéterminé • Aérien – terre • Aérien - mer	
Cablo	Présence et localisation d'un réseau de câblodistribution	Texte (30)	• Non • Sous la route – terre • Sous la route – mer • Sous la route - indéterminé • Aérien – terre • Aérien - mer	
ScoreResEs	Score relatif à la présence de réseaux essentiels au niveau de la route	Double	• 1 à 5	voir le tableau 24
ScoreDist	Score relatif à la distance entre la route et la côte	Double	• 1 à 5	voir le tableau 19
Comm	Commentaire	Texte (200)		
DateCote	Année de la côte à partir de laquelle l'analyse a été effectuée	Texte (50)	• 2001 • 2005 • 2007 • 2008 • 2009 • 2012	
ArtifMTQ	Est-ce qu'une artificialité du MTQ est en place sur la côte au niveau de ce segment ?	Texte (25)	• oui • non	

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
SiteSuivi	Le segment fait-il partie d'un site suivi par le MTQ	Texte (15)	• oui • non	selon les données qui nous ont été transmises par le MTQ
SiteTemoin	Nom du site témoin	Texte (200)	• Site n°1 : Baie-des-Sables • Site n°2 : Rivière-à-Claude • Site n°3 : Chandler • Site n°4 : Carleton et Maria • Site n°5 : baie de Plaisance • Site n°6 : Pointe-aux-Loups • Site n°7 : Pentecôte • Site n°8 : rivière au Bouleau • Site n°9 : Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	
Code	Code unique du segment	Texte (10)	• BDS : Baie-des-Sables et Saint-Ulric • RAC : Rivière-à-Claude • CHA : Chandler • MAR : Carleton et Maria • BDP : baie de Plaisance • PTL : Pointe-aux-Loups • PEN : Pentecôte • BOU : rivière au Bouleau • RSJ : Rivière-Saint-Jean à Longue-Pointe-de-Mingan	• Comprends 3 lettres spécifiques au site témoin • Puis 3 chiffres
Mun	Nom de la municipalité	Texte (70)		
MRC	Nom de la MRC	Texte (50)		

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
VulnEro20	Indice de vulnérabilité à l'érosion d'ici 2020	Double	• 0 à 84,8	voir l'équation 11
VulnEro60	Indice de vulnérabilité à l'érosion d'ici 2060	Double	• 0 à 122,5	voir l'équation 12
VulnEro00	Indice de vulnérabilité à l'érosion d'ici 2100	Double	• 0 à 122,5	voir l'équation 13
VulnSub20	Indice de vulnérabilité à la submersion d'ici 2020	Double	• 0 à 94,9	voir l'équation 14
VulnSub60	Indice de vulnérabilité à la submersion d'ici 2060	Double	• 0 à 118,6	voir l'équation 15
VulnSub00	Indice de vulnérabilité à la submersion d'ici 2100	Double	• 0 à 265,2	voir l'équation 16
IVRAC_2020	Indice de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers d'ici 2020	Double	• 0 à 59,7	voir l'équation 17
IVRAC_2060	Indice de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers d'ici 2060	Double	• 0 à 79,9	voir l'équation 17
IVRAC_2100	Indice de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers d'ici 2100	Double	• 0 à 159,1	voir l'équation 17
MethoIVRAC	Quelle est la méthodologie employée	Texte (200)	• Formule de l'indice de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers (IVRAC) déterminée pour projet MTQ X008.1 - Drejza et al., 2014	
Origine	Pour quel projet a été générée cette donnée ?	Texte (75)	• Déterminé pour : projet MTQ n° X008.1	

Champ	Description du champ	Type de champ (longueur)	Contenu / Domaines de valeur utilisés	Précision
Donnée	Qui a produit la donnée ?	Texte (200)	Produit par : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières - UQAR	