Atlantic Climate Adaptation Solutions Association

Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique

ÉROSION ET INFRASTRUCTURES À RISQUE À SAINTE-MARIE-SAINT-RAPHAËL, PÉNINSULE ACADIENNE, NOUVEAU-BRUNSWICK

Par

André Robichaud[1,2], Inuk Simard[4], et Meher Chelbi[2,3]

Université de Moncton, Campus de Shippagan : Géographie[1], Gestion intégrée des zones côtières[2];
Université de Moncton, Campus de Moncton : Études de l'environnement[3]
Geomediatix Innovations Inc.[4]

Novembre, 2012

Rapport préparé par André Robichaud et commandité par l'association interprovinciale Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique (SACCA). La SACCA est un organisme sans but lucratif, créé pour coordonner la gestion et la planification de projets et d'initiatives en matière d'adaptation aux changements climatiques en Nouvelle-Écosse, au Nouveau-Brunswick, à l'Île-du-Prince-Édouard et à Terre-Neuve-et-Labrador, et financé par le programme d'Initiatives de collaboration pour l'adaptation régionale (ICAR) pour l'Atlantique, un projet commun des provinces de l'Atlantique, de Ressources naturelles Canada, des municipalités et d'autres partenaires.

Deux cartes accompagnent et font partie intégrante de ce rapport. Elles ne sont pas incluses dans le présent document, mais sont essentielles à sa lecture. Une copie papier des cartes a été remise à la municipalité de Sainte-Marie-Saint-Raphaël. Ces cartes et le rapport peuvent être téléchargés à partir du site Web de la SACCA à l'adresse www.atlanticadaptation.ca.

Direction du projet : Secrétariat des changements climatiques du ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick. C.P. 6000, Fredericton, N.-B., E3B 5H1. Courriel : env-info@gnb.ca.

Remerciements : Nous tenons à remercier tous les partenaires du projet et les organismes subventionnaires pour leur apport et d'avoir permis ce travail.

Avertissement : Cette publication ne peut être utilisée sans autorisation préalable, et toute utilisation non autorisée est strictement interdite. La SACCA, les auteurs du rapport, les provinces de Nouvelle-Écosse, du Nouveau-Brunswick, de l'Île-du-Prince-Édouard et de Terre-Neuve-et-Labrador, ainsi que le programme ICAR – Atlantique déclinent toute responsabilité en cas d'utilisation non autorisée, de quelque nature qu'elle soit, de l'information contenue dans ce document. Les opinions exprimées dans cette publication ne reflètent pas forcément celles de la SACCA, des provinces qui lui sont associées ou des autres partenaires qui participent au programme d'Initiatives de collaboration régionale. Cet avertissement comprend les deux cartes accompagnant ce rapport.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 1

DESCRIPTION DU SITE ÉTUDIÉ 2
-PRÉSENTATION DE LA LOCALITÉ 2
-DESCRIPTION GÉOMORPHOLOGIQUE DU LITTORAL 3
-Falaise sud-ouest 3
-Plage centrale 6
-Falaise nord-est 9

MÉTHODES 11
-DÉTERMINATION DE LA MOBILITÉ DU TRAIT DE CÔTE 11
-Correction des photos de 1974 12
-Détermination du trait de côte 12
-Mesure du changement de trait de côte 14
-DÉTERMINATION DES INFRASTRUCTURES À RISQUE D'ÉROSION 15
-Établissement de la base de données des infrastructures 16
-Évolution du trait de côte 16
-Détermination et représentation du risque 19

RÉSULTATS 22
-FALAISE SUD-OUEST (Secteurs S1 à S4) 24
-PLAGE CENTRALE (Secteurs S5 à S12) 26
-FALAISE NORD-EST (Secteurs S13 à S15) 29

CONCLUSION 30

RÉFÉRENCES 33

ANNEXES 34

INTRODUCTION

Cette étude porte sur une évaluation de l'érosion et des risques aux infrastructures à Sainte-Marie Saint-Raphaël[1] (SMSR), petite localité du nord-est du Nouveau-Brunswick. Elle a été effectuée dans le cadre des programmes de l'association interprovinciale *Solutions d'adaptation aux changements climatiques de l'Atlantique* (SACCA) et des *Initiatives de collaboration pour l'adaptation régionale* (ICAR) de l'Atlantique de Ressources naturelles Canada (http://atlanticadaptation.ca).

La localité de SMSR est aux prises avec de sérieux problèmes d'érosion. Cette dernière semble s'accélérer depuis quelque temps et de nombreuses inquiétudes ont été soulevées par la population, notamment sur les risques aux infrastructures importantes. Cette municipalité a ainsi été sélectionnée dans le cadre d'un projet de recherche longitudinal ARUC-DCC (Alliance de recherche entre les universités et les communautés- défis des communautés côtières) qui vise à étudier la résilience de plusieurs communautés côtières confrontées aux changements environnementaux (y compris climatiques) et à accompagner ces collectivités dans leurs efforts pour développer une capacité d'adaptation. Cet accompagnement se fait à travers le développement de partenariats entre des chercheurs et des acteurs et des organismes locaux[2]. L'absence ou le peu d'information scientifique sur les taux d'érosion a été soulevé par les résidents de la région qui participaient à une réunion d'information à SMSR. Or cette information est cruciale pour la poursuite des efforts d'adaptation de la communauté. Nous proposons donc de fournir à la municipalité des données précises d'érosion et la localisation des infrastructures à risque.

Le but du projet est donc de développer un outil d'aide à la décision adapté au contexte de l'érosion du littoral à SMSR. L'outil appuiera la communauté dans ses démarches d'adaptation et de planification des aménagements le long de la côte et prendra la forme d'une carte représentant des scénarios d'érosion à différentes dates (2025, 2055, 2085 et 2100) et les infrastructures qui seront affectées. Il sera aussi d'une aide précieuse à la municipalité de SMSR puisqu'elle revoit son plan d'aménagement en 2012-2013. Il l'assistera dans l'adoption de réglementations adéquates concernant le littoral.

---

[1] Pour la suite du document, on utilisera l'abréviation SMSR pour désigner Sainte-Marie-Saint-Raphaël.

[2] Ce projet est dirigé par Julie Guillemot, professeure de GIZC à l'UMCS (Julie.Guillemot@umoncton.ca) et Élise Mayrand, professeure de biologie à l'UMCS (elise.mayrand@umoncton.ca). UMCS : Université de Moncton, Campus de Shippagan.

DESCRIPTION DU SITE ÉTUDIÉ

PRÉSENTATION DE LA LOCALITÉ

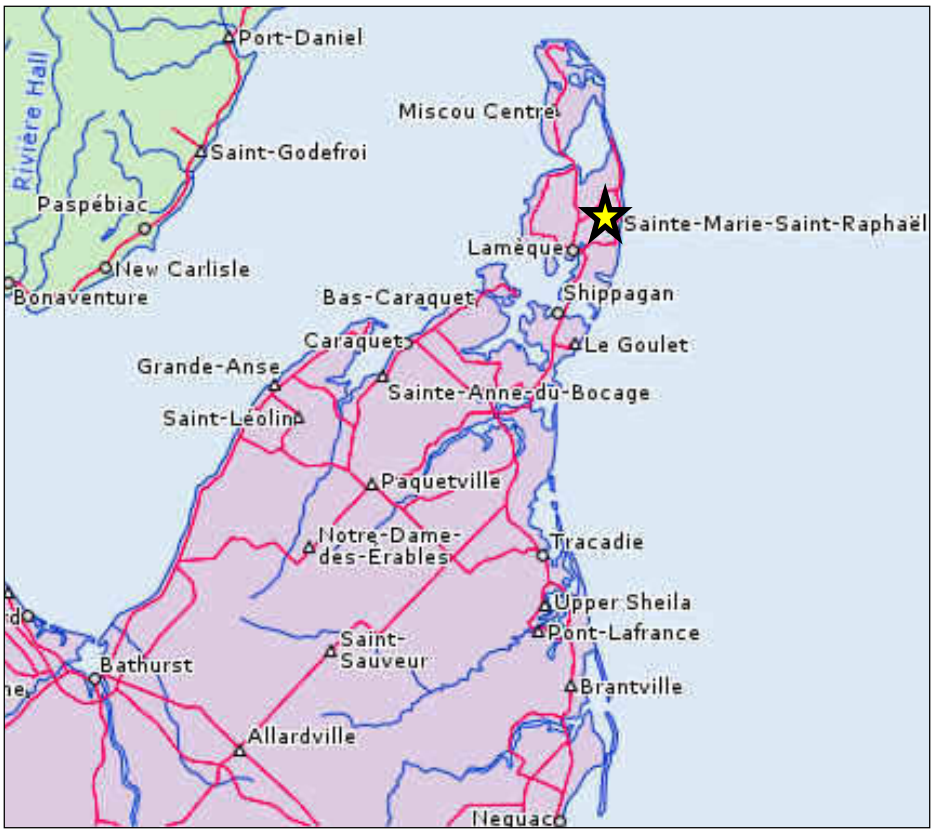

Figure 1 *: Localisation de la municipalité de Sainte-Marie Saint-Raphaël.* *(Source : http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/maps/topo/)*

La municipalité de Sainte-Marie-Saint-Raphaël, incorporée en 1986 par la fusion des deux villages voisins de Sainte-Marie et de Saint-Raphaël, est située dans la Péninsule acadienne, plus précisément sur la côte est de l'île Lamèque (figure 1). Ce village d'une superficie de 15,61 km^2 comptait 955 habitants en 2011 selon le dernier recensement de Statistique Canada.

SMSR possède un littoral long d'un peu plus de 5 km. Composée de plages sableuses dans la partie centrale et de falaises dans les parties sud-ouest et nord-est (figure 2), la côte est encore à l'état naturel à l'exception de deux endroits : 1) le quai au centre du village qui joue un rôle important dans les processus sédimentaires et 2) un enrochement à 500 m au sud-ouest du quai construit en 2011 pour la protection de la propriété d'un commerce. Plusieurs infrastructures du village (routes et bâtiments) sont très près de la côte, en

particulier le long du secteur sud-ouest, zone qui inquiète plus spécialement la population face aux risques d'érosion.

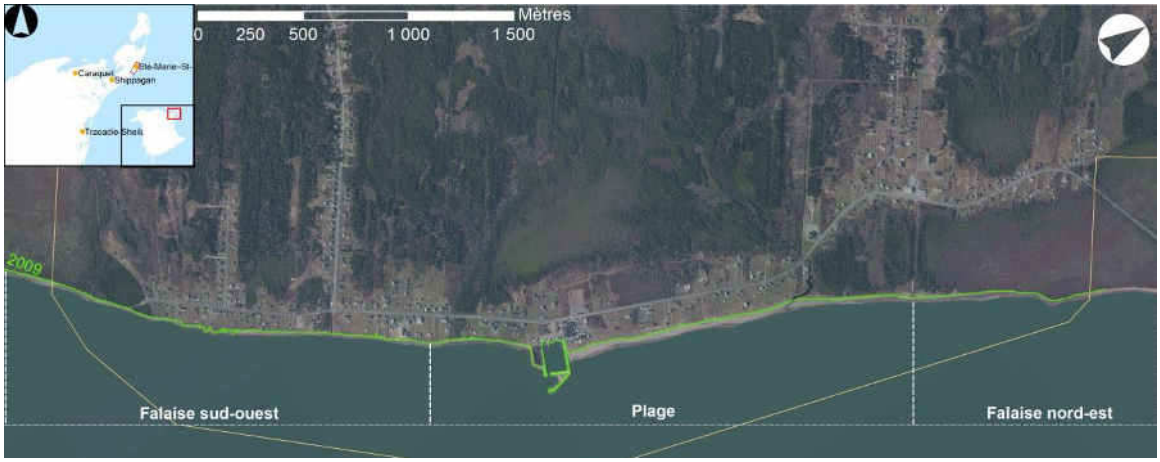

***Figure 2** : Les trois parties du littoral de Sainte-Marie-Saint-Raphaël.*

DESCRIPTION GÉOMORPHOLOGIQUE DU LITTORAL

Le littoral de SMSR est suffisamment varié pour qu'une description des caractéristiques géomorphologiques principales (entre autres sa forme et sa composition) soit nécessaire. De plus, la mobilité de son trait de côte est au moins en partie reliée à sa géomorphologie. Le contenu qui suit sera utile dans la compréhension de l'évolution de ce littoral et des scénarios qui en découleront. Notons aussi que la carte 1 qui accompagne ce rapport reprend plusieurs des éléments exposés dans cette section et présente 28 photos de la côte prises à l'été 2012.

<u>Falaise sud-ouest</u>

Cette partie du littoral de SMSR fait près de 2 km de long (figure 2) et est caractérisée par une falaise d'une hauteur variant de 2,5 à 4,5 m environ. C'est la zone la plus préoccupante pour les résidents, car, selon eux, le recul y est rapide et les bâtiments sont près de la côte.

La section la plus au sud-ouest est en dépôts meubles et de composition hétérogène. Le plus souvent, la base est en till (un dépôt d'origine glaciaire fait d'argile compacte parsemée de cailloux et de galets) surmonté d'une couche sableuse et graveleuse, puis par de la tourbe (figure 3A); une tourbière se trouve à proximité ce qui explique la présence de la tourbe dans cette section. En allant vers le nord-est, la tourbe disparaît, la couche sablo-graveleuse s'épaissit, le till s'amincit jusqu'à disparaître lui aussi et un grès plus ou moins fracturé apparaît à

la base dont l'épaisseur s'accroît graduellement jusqu'à une zone où il est particulièrement épais (figure 3B). La falaise conserve cette allure sur une bonne distance avec une hauteur totale et une épaisseur de la base gréseuse variable (2,5 à 4,2 m et 1 à 2,5 m respectivement). Au sein de cette portion de falaise, il existe une zone constituée de huit ou neuf pointes qui alternent avec des creux que l'on voit bien sur la photo aérienne (carte 1, secteur S3). Le grès à la base des pointes est le plus épais (figure 4). Plus loin, on observe un enrochement assez volumineux d'environ 120 m de long et 5 m de haut (figure 5A; carte 1, secteur S4c). La falaise finit par s'amincir jusqu'à la partie suivante où commence une plage (figure 5B).

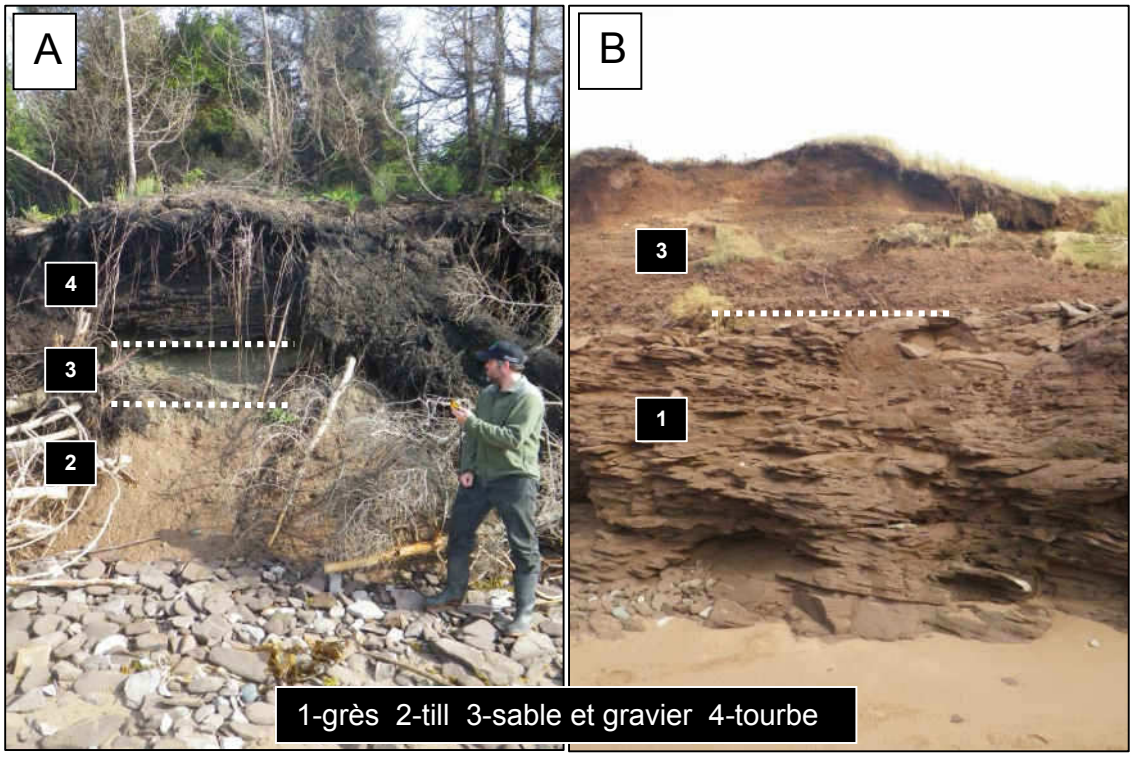

Figure 3 *: **A**-Falaise aux environs de l'extrémité sud-ouest de la rue Paulin. À cet endroit, elle fait 3,4 m de hauteur. Correspond à la photo 3 de la carte 1. **B**-Falaise vis-à-vis du centre de la rue Paulin. Elle à une hauteur de 3,5 m et la couche de grès fait 2,5 m d'épaisseur. Correspond à la photo 7 de la carte 1.* *(Photos prises le 29 juin 2012)*

Figure 4 *: Le début des pointes en regardant vers le nord-est. Remarquer l'épaisseur du grès. Dans les creux, le grès est moins épais.* *(Photo prise le 29 juin 2012)*

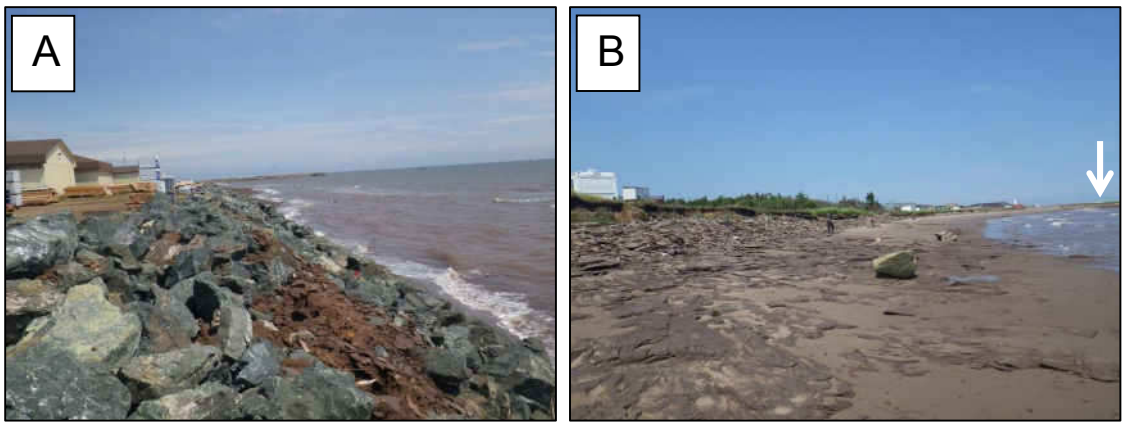

Figure 5 *: **A**-L'enrochement installé en 2011 protégeant une propriété sur le bord de la falaise. À cet endroit, la falaise a de 3 à 4 m et l'enrochement près de 5 m de hauteur. **B**-La fin de la falaise sud-ouest et le début de la plage. Le quai est visible au loin (flèche).* *(Photos prises le 29 juin 2012)*

Plage centrale

Toute la partie centrale de SMSR est composée d'une plage sableuse longue de près de 2,5 km (figure 2). Ici, le quai affecte visiblement le déplacement des sédiments, le comportement du trait de côte et l'allure de la plage.

Dans cette région de l'île Lamèque, la dérive littorale (courant qui déplace les sédiments le long de la côte dans une direction préférentielle) se fait du nord-est vers le sud-ouest. De ce fait, le sable a tendance à s'accumuler sur le côté nord-est du quai (figure 6A) aux dépens du côté sud-ouest (figure 7) où il y a un déficit sédimentaire. Sur la carte 1, ce phénomène est évident : on voit du côté nord-est une plage plus large (voir aussi la figure 6B) qui s'avance sur le flan du quai, alors que du côté sud-ouest, elle est plus étroite (figure 7) et se trouve en retrait par rapport au quai. Toutefois, lors du dragage du chenal de sortie (figure 8A) qui s'obstrue régulièrement, le sable est transporté par camion du côté sud-ouest (figure 7) ce qui contribue à la recharge graduelle de la plage (figure 8B) et à la réduction de l'effet d'obstacle provoqué par le quai.

L'allure et le comportement de la plage sont affectés par cette dynamique. Du côté sud-ouest, la plage est non seulement plus étroite, mais elle présente un talus d'érosion bien visible (figure 9A) et indique un recul du trait de côte. Par contre, du côté nord-est, la plage est large et se compose d'une dune de faible hauteur mais étendue (figure 9B) qui montre des signes d'avancée vers la mer. Cet effet est visible sur une distance de plus de 1000 m et est progressivement moins prononcé en allant vers le nord-est. Les inondations ne sont pas préoccupantes dans la localité de SMSR, mais la mer peut monter relativement haut à certains endroits de la plage lors des tempêtes (figure 10).

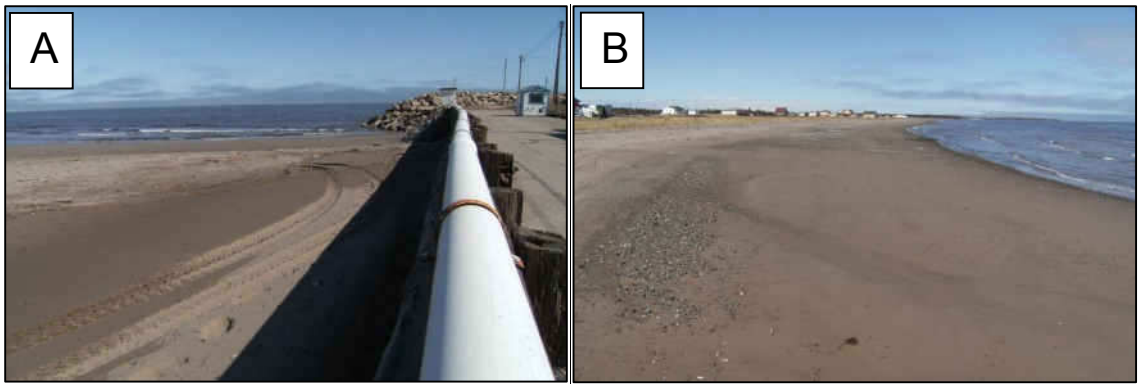

***Figure 6** : **A**-Côté nord-est du quai où le sable s'accumule. **B**-Vue de la plage à marée basse du côté nord-est du quai. La plage est très large à cet endroit.* *(Photos prises le 11 avril 2012)*

Figure 7 *: Vue du côté sud-ouest du quai à marée basse. La plage se trouve plus loin vers l'intérieur que du côté nord-est et est plus étroite. À droite, peu visible sur cette photo prise à contre-jour, des camions déchargent du sable de dragage poussé ensuite par bulldozer (flèche).* *(Photo prise le 11 avril 2012)*

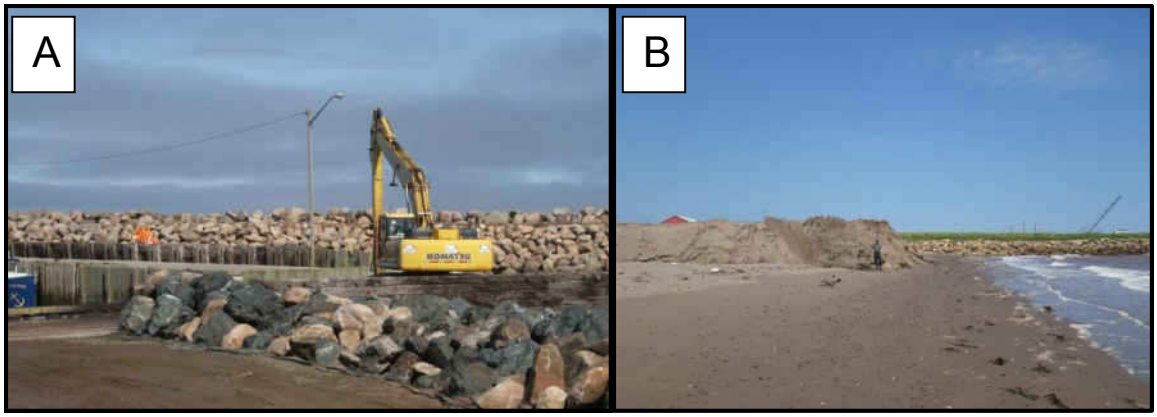

Figure 8 *: **A**-Dragage du chenal de sortie du quai de Sainte-Marie-Saint-Raphaël. **B**-Le sable de dragage était encore présent quelques mois plus tard et se fait graduellement transporter le long de la côte par la dérive littorale.* *(Photo A prise le 11 avril 2012 et photo B prise le 29 juin 2012)*

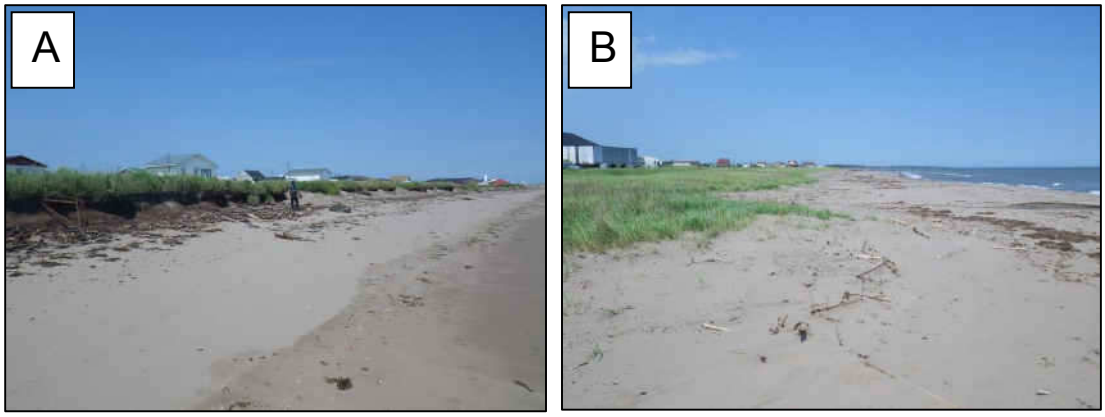

Figure 9 *: **A**-Talus d'érosion au sud-ouest du quai. Correspond à la photo 13 de la carte 1. **B**-Dune basse et large en progradation du côté nord-est du quai. Correspond à la photo 14 de la carte 1.* *(Photos prises le 29 juin 2012)*

Figure 10 *: L'eau a débordé la plage au sud-ouest du quai lors des tempêtes de décembre 2010. Les dépôts de galets et de débris sont encore présents en 2012 et se retrouvent à plusieurs mètres vers l'intérieur. Correspond à la photo 12 de la carte. 1* *(Photo prise le 29 juin 2012)*

Falaise nord-est

Cette dernière partie du littoral de SMSR est longue d'environ 1 km (figure 2) et est composée d'une falaise de composition hétérogène ayant des ressemblances avec celle décrite précédemment. Il n'y a pas d'habitation près de l'escarpement, car l'arrière côte est en grande partie occupée par une tourbière. Les infrastructures ne sont donc pas à risque dans cette partie du littoral, même si la côte semble reculer assez rapidement. En effet, un chemin de terre longeant la côte a presque complètement disparu lors des tempêtes de décembre 2010.

En allant du sud-ouest vers le nord-est, la falaise est d'abord composée de sable et de graviers surmontés un peu plus loin de tourbe; cette section a une hauteur de 2 à 4 m (figure 11A). Plus loin, un till apparaît à la base (figure 11B) et plus loin encore du grès (figure 12). Dans cette section, la hauteur de la falaise passe de 4 m a plus de 5,5 m, puis s'abaisse à nouveau à 4,2 m et se poursuit au-delà des limites du village jusqu'à Cap-Bateau à quelques kilomètres de là.

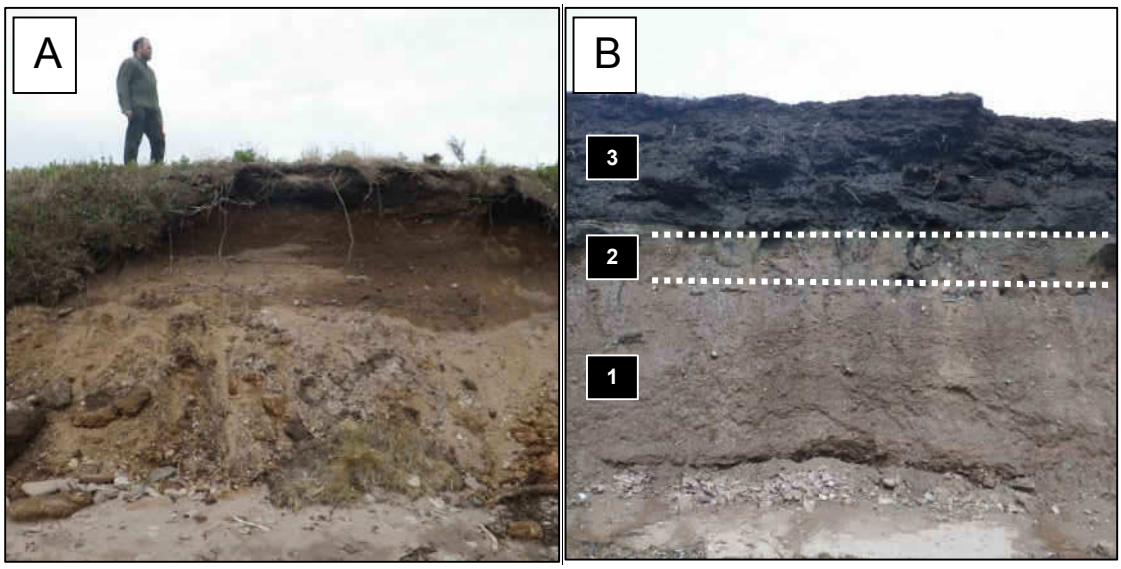

***Figure 11** : **A**-Falaise de sable et de gravier. Correspond à la photo 20 de la carte 1. **B**-Falaise de till (1), de sable/gravier (2) et de tourbe (3). Sa hauteur est d'un peu plus de 4 m. (Photos prises le 26 juin 2012)*

Figure 12 *: Falaise dont la hauteur est d'un peu plus de 4 m composée de grès (1),de sable (2) et de tourbe (3). Correspond à la photo 26 de la carte 1.* *(Photo prise le 17 juillet 2012)*

MÉTHODES

Les objectifs principaux du projet sont 1) d'établir le comportement récent du trait de côte (recul, avancée, stabilité) selon des données aussi précises que possible et 2) de projeter ces données dans l'avenir et déterminer quelles infrastructures sont potentiellement à risque d'érosion dans le village de Sainte-Marie-Saint-Raphaël. Voici comment nous avons procédé pour réaliser ces objectifs.

DÉTERMINATION DE LA MOBILITÉ DU TRAIT DE CÔTE

Une des meilleures méthodes qui existe dans l'établissement du comportement du trait de côte est par l'analyse de photographies aériennes. En résumé, on procède de la façon suivante :

1) on choisit des photos aériennes prises à des dates différentes;
2) ces photos doivent être rectifiées (correction des distorsions) et géoréférencées (reliées à des coordonnées géographiques précises de sorte qu'on puisse localiser des objets au sol);
3) on détermine la position du trait de côte selon des critères aussi précis que possible;
4) on trace le trait de côte et on mesure la différence de position entre les deux.

Les photos aériennes que nous avons choisies sont celles de 1974 que nous nous sommes procurées au centre de géomatique de la Nouvelle-Écosse[3] et les orthophotos de 2009 produites par *Leading Edge Geomatics* dans le cadre des projets SACCA-ICAR (http://atlanticadaptation.ca/). Ce choix s'est fait à partir de l'expérience acquise lors du *Projet sur l'érosion et l'élévation du niveau de la mer de la Péninsule acadienne*[4]. D'abord, elles sont distantes de 35 ans, un temps suffisant pour déterminer des tendances à long terme. Ensuite, cette période de temps semble très représentative des tendances récentes (Jolicoeur et O'Carroll, 2012 [5]; Robichaud *et al.*, 2012 [6]). De plus, les photos de 1974 sont de bonne qualité et n'incluent pas les effets des tempêtes du début des années 1970 qui auraient pu exagérer l'évaluation du changement du trait de côte. Enfin, les

[3] Service Nova Scotia and Municipal Relations, Geomatic Centre, 160 Willow Street, Amherst, NS, B4H 3W5, (902) 667-6402; photos noires et blanc 74-507-82 et 74-507-83.
[4] http://atlanticadaptation.ca/node/192 .
[5] Une copie peut être téléchargée à : http://atlanticadaptation.ca/node/290 .
[6] Une copie peut être téléchargée à : http://atlanticadaptation.ca/node/266 .

orthophotos de 2009 quant à elles sont très précises en termes de la position des objets au sol (résolution de 0,3 m) étant déjà rectifiées et géoréférencées; nous nous en sommes servi pour corriger celles de 1974. En effet, les photographies aériennes de 1974 sont « brutes » et sous format papier; un prétraitement a donc été nécessaire afin qu'elles soient utilisables dans le cadre de cette étude.

Correction des photos de 1974

La rectification des photographies aériennes de 1974 a été une étape cruciale dans ce projet. Elle a permis de les superposer à celles de 2009 pour déterminer le changement de la position du trait de côte.

Les photos de 1974 ont d'abord été numérisées selon l'échelle calculée[7] de sorte qu'un pixel (le grain numérisé de la photo) représente 30 cm au sol, la même résolution que les photos de 2009. Afin d'optimiser la rectification de la zone côtière, nous n'avons utilisé que la partie littorale. Sur ces fragments de photo, nous avons identifié une quinzaine de points de contrôle (Annexe 1), c'est-à-dire des objets communs entre les photos de 2009 et de 1974, bien répartis sur la zone d'intérêt. Une fois les points de contrôle choisis, nous avons procédé à la rectification proprement dite des photos en utilisant le logiciel ArcGIS dans lequel nous avons importé les photos de 1974 et de 2009. Le logiciel utilise les points de contrôle lors de cette rectification et procède à une transformation qui modifie les photos de 1974 de telle sorte à optimiser la superposition des points de contrôles. La transformation choisie est celle dite du « spline ». Le choix de cette méthode a été fait après plusieurs essais et s'est avérée la meilleure parce qu'elle permettait une superposition quasi parfaite des photos de 1974 avec celles de 2009 et une continuation parfaite du trait de côte entre les deux photos de 1974. Quoique le logiciel ne génère pas d'erreur résiduelle pour ce type de transformation, l'erreur induite par cette méthode n'est pas nulle, même si elle est probablement très faible. Nous en tiendrons compte plus loin lors du calcul de la marge d'erreur des mesures d'érosion.

Détermination du trait de côte

Le trait de côte désigne souvent la limite de la pleine mer moyenne des grandes marées. Cependant, cette ligne peut être très difficile à détecter sur les photos aériennes. Pour cela, on utilise des repères plus faciles à identifier et dont la position témoigne de l'évolution de la côte. Lors d'un exercice durant un cours

[7] Échelle calculée des photos de 1974 : 74-507-82 : 1 :20 384; 74-507-83 : 1 :20 346.

donné à l'UMCS[8], nous avons déterminé que la crête (ou sommet) des falaises et la ligne de végétation des plages étaient les repères les plus fiables et les plus utiles dans cette région. Ils sont d'autant plus commodes que leur position sur le haut rivage augmente la chance de détecter plus tôt les infrastructures à risque d'érosion. Ces repères sont d'ailleurs fréquemment employés dans des études similaires (Jolicoeur et O'Carroll, 2012).

Nous avons donc tracé et numérisé le trait de côte selon ces repères sur les photos aériennes rectifiées/géoréférencées de 1974 et 2009. Toutefois, lors de la numérisation, nous avons rencontré des discontinuités avec lesquelles il a fallu composer. Ces discontinuités surgissent par exemple à la rencontre d'un chemin ou d'un ruisseau, ou encore là où la végétation ne peut se développer à cause de perturbations anthropiques. Pour remédier à cela, on a procédé à un lissage du trait de côte qui consiste à le faire passer à travers l'obstacle rencontré selon une trajectoire générale qui relie les parties non perturbées (figure 13). La carte 1 montre la position des traits de côte de 2009 et 1974 telle que dessinée par nos soins.

Figure 13 *: Exemple de lissage du trait de côte.*

[8] Le cours, intitulé « Caractéristiques physiques des zones côtières », comprenait à l'hiver 2012 un exercice où il fallait déterminer les meilleurs repères représentant le trait de côte de Cap-Bateau/SMSR qui permettent d'étudier le comportement du littoral sur les photos aériennes couleur ou noir et blanc. François Savoie-Ferron, étudiant au Baccalauréat en gestion intégrée des zones côtières, a grandement contribué à déterminer ces repères.

Mesure de changement du trait de côte

L'idée de base dans la détermination du déplacement de la ligne de côte de SMSR est de superposer les traits de côte numérisés de 1974 et de 2009, et de mesurer la distance entre les deux à différents points le long du littoral. Cela permet de calculer des taux de changement annuels (en mètre par an) sur lesquels nous pouvons nous baser pour modéliser le mouvement futur du trait de côte. Les mesures entre les traits de côte de 1974 et 2009 ont été faites à l'aide du logiciel Digital Shoreline Analysis System (DSAS) (Himmelstoss, 2009) spécialement conçu pour ce genre de travail et compatible avec le logiciel ArcGIS. Les taux de déplacement annuels ont été calculés sur près de 200 transects (lignes perpendiculaires au trait de côte) distants de 25 mètres tout le long du littoral de SMSR. Ces taux sont présentés dans la section « Résultats » et sont indiqués sur la carte 1.

Les différents outils et méthodes utilisés plus haut induisent une erreur significative qui affecte la précision des données générées. Il est donc très important de calculer leur marge d'erreur et d'en tenir compte lors de l'appréciation des taux de changement du trait de côte et de leur utilisation subséquente. Les sources d'erreur dont on a tenu compte sont les suivantes et s'inspirent de Jolicoeur et O'Carroll (2012) :

1) ***La précision des photos***. Elle correspond à la résolution de la photo, c'est-à-dire dans ce cas-ci à la taille des pixels au sol des photos aériennes qui est de 0,3 m. Un objet choisi sur une photo sera positionné avec d'autant plus de précision que la résolution de la photo est meilleure.

2) ***L'erreur due à la rectification***. Le plus souvent, on utilise l'erreur résiduelle générée par le logiciel de rectification qui est calculée à partir de la qualité de la superposition des points de contrôle selon la méthode de transformation utilisée (Jolicoeur et O'Carroll, 2012). Dans notre cas, le logiciel ArcGIS ne générait aucune erreur résiduelle selon la méthode de transformation choisie (spline). Néanmoins, il existe quand même une erreur que nous avons voulu évaluer. L'usage veut que l'on assume que les photos déjà rectifiées (celles de 2009 dans ce cas-ci) ne comportent plus d'erreur. Nous avons superposé les photos de 1974 et de 2009 et mesuré la différence de position d'objets précis et bien identifiés, communs aux deux séries de photos (un coin de bâtiment, un arbre, etc.). Dans tous les cas, il y avait moins d'un mètre de différence entre les objets, et souvent il n'y en avait pas. Nous avons toutefois décidé d'attribuer une erreur d'un mètre à la rectification des photos de 1974.

3) ***L'erreur de l'utilisateur***. C'est l'erreur due au positionnement du trait de côte selon les repères choisis. Difficile à établir précisément, on utilise souvent une valeur arbitraire, mais raisonnable; dans ce projet, elle est jugée égale à 1 m pour les photos de 1974 et 0,5 m pour les photos de 2009.

Le schéma de la figure 14 illustre ce que cette marge d'erreur peut représenter. D'abord, on remarque que le trait de côte au sol peut être théoriquement positionné avec une précision de 0,8 m pour celui de 2009 et de 2,3 m pour celui de 1974. Comme il y a une mesure faite entre les deux traits de côtes, les erreurs s'additionnent lors de cette opération; par exemple, des traits de côte distants de 20 m selon nos mesures peuvent être théoriquement distants de 16,9 à 23,1 m, donc une marge d'erreur totale de ± 3,1 m. Comme les taux de déplacement du trait de côte sont exprimés en mètre par an et que le temps entre les deux traits de côte est de 35 ans, on doit diviser le tout par 35 y compris l'erreur. Dans notre exemple, ceci donne donc un taux de déplacement annuel de 0,57 m/an (20 m ÷ 35 ans) et une marge d'erreur égale à 0,1 m/an (3,1 m ÷ 35 ans, arrondi au dixième près). Toutes nos mesures de déplacement du trait de côte sont exprimées en m/an et ont une marge d'erreur de 0,1 m/an. La carte 1 montre les taux de changement du trait de côte de chaque transect.

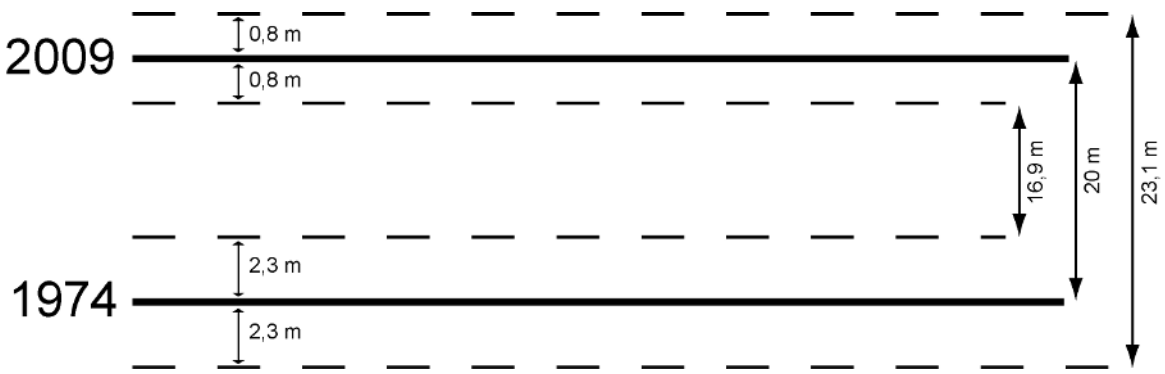

Figure 14 *: Illustration de la marge d'erreur par rapport aux traits de côte numérisés sur des photos aériennes de 1974 et 2009.*

DÉTERMINATION DES INFRASTRUCTURES À RISQUE D'ÉROSION

La détermination des infrastructures à risque d'érosion s'est aussi faite en plusieurs étapes. La première a été de numériser les infrastructures de la municipalité de SMSR dans une base de données spatiale. La seconde a été de faire évoluer le trait de côte à des pas de temps établis à l'avance. La troisième a été de trouver une façon de déterminer le risque aux infrastructures selon les

scénarios d'érosion et de le représenter sur une carte de manière utile et compréhensible.

Établissement de la base de données des infrastructures:

La cartographie des infrastructures à risque implique nécessairement l'établissement préalable d'une base de données géospatiale, c'est-à-dire comportant des objets bien positionnés géographiquement. Dans cette étude, la base de données comporte les routes, les bâtiments et les structures de protection de SMSR. Chacun de ces objets a été numérisé à partir des photos aériennes de 2009. On leur a alloué des valeurs dans une table d'attributs selon plusieurs paramètres (Exemple : fonction du bâtiment – résidentiel, commercial, institutionnel; bâtiment principal ou secondaire; route principale ou secondaire; etc.). Certains de ces attributs proviennent d'une base de données déjà existante de Service Nouveau-Brunswick, disponible publiquement. Ces attributs sont importants dans le traitement des données, par exemple dans la correspondance entre les scénarios d'érosion, la position et le type d'infrastructures ou dans les analyses statistiques (calculer automatiquement le nombre de résidences à haut risque d'érosion). Une liste détaillée de ces attributs et de leur signification se trouve à l'Annexe 2.

Les routes ont été numérisées à une échelle de 1:300 à partir de la ligne médiane (centre de la route); elles totalisent plus de 17 000 m de route publique et 700 m de route privée. Les bâtiments l'ont été à une échelle de 1:250 à partir de leur empreinte au sol et non pas à partir du toit qui induit une erreur de positionnement due à leur hauteur et l'inclinaison qu'elle produit. Plus un bâtiment est haut, plus l'erreur est grande. La numérisation à partir de la base du bâtiment permet donc d'éviter ce problème. Au courant de l'été et l'automne 2012, nous sommes allé sur le terrain valider l'attribution de certaines valeurs (par exemple, pour certaines propriétés, il était difficile de distinguer quel bâtiment était principal ou secondaire sur les photos aériennes) et détecter les nouvelles constructions depuis 2009 sur le bord de la côte pour les ajouter à la base de données. Près de 1070 bâtiments ont été numérisés.

Le produit final est une base de données géospatiale comportant tous les bâtiments, routes et structures de protection de SMSR. La position géographique exacte des infrastructures est essentielle si on veut détecter celles qui seront dans les zones d'érosion future.

Évolution du trait de côte

Le trait de côte de SMSR n'évolue pas de la même façon partout. Certaines parties reculent et d'autres avancent. Il est bien connu des habitants du village

que la falaise s'érode, mais tout le monde ne s'entend pas sur la vitesse de cette érosion, en partie parce qu'elle recule à des taux différents selon le lieu et aussi parce que la perception de ce recul n'est pas la même selon qu'on se trouve près ou loin de l'eau, selon l'expérience qu'on a de la côte, que l'on soit un résident récent ou de longue date, etc. Il est donc devenu important d'avoir des données précises du comportement côtier pour se mettre d'accord sur le phénomène de l'érosion à SMSR et mieux situer les zones les plus à risque.

Parce que la côte n'évolue pas de la même façon partout, les mesures de changement du trait de côte des 200 transects ont dû être analysées en détail pour déterminer les secteurs à évolution uniforme, c'est-à-dire des secteurs côtiers dont les taux de changement des transects étaient similaires. On a ainsi déterminé 15 secteurs (carte 1). Pour chaque secteur, on a calculé la moyenne des taux de changement et c'est ce taux que l'on a utilisé pour projeter la position du trait de côte du secteur dans le futur. Les années utilisées pour les projections sont 2025, 2055, 2085 et 2100, les mêmes que pour les projets SACCA-ICAR effectués en 2011 (Robichaud *et al.*, 2011). Ainsi, on aura un scénario de position du trait de côte pour chacune de ces années.

Une petite innovation par rapport au projet de 2011 a été de raccorder les secteurs à évolution uniforme par des zones de transition dans le but d'éviter les lignes de raccordement perpendiculaires (figure 15). La plupart du temps, ce que nous avons fait est de prendre un ou deux transects de chaque secteur adjacent, donc deux à quatre transects en tout, en leur allouant une valeur de taux de changement intermédiaire; le plus souvent, ces transects montraient déjà une valeur mesurée intermédiaire aux secteurs adjacents que l'on utilisait telle quelle. Certains secteurs entiers se comportaient comme de longues zones de transitions et nous les avons fait évoluer en tant que tel dans nos scénarios (figure 16). La carte 2, qui sera présentée en détail dans la section des résultats, montre un trait de côte « lissé » selon cette méthode.

NOTE IMPORTANTE : Les scénarios d'érosion utilisés dans le projet sont plutôt modérés. En effet, ils ne prennent pas en compte le fait que les conditions environnementales (par exemple, les effets du réchauffement climatique) pourraient changer en faveur de taux d'érosion plus rapides qu'entre 1974 et 2009. D'ailleurs, plusieurs résidents ont remarqué la disparition du pied de glace en 1998; or, ce pied de glace protège la côte pendant l'hiver quand la mer est plus agitée et qu'il y a plus de possibilités de tempêtes et donc d'érosion[9]. Selon

[9] La période de tempête va normalement d'octobre jusqu'à mars; auparavant, le pied de glace à SMSR s'installait en décembre et perdurait jusque mars, donc pendant une bonne partie de la période de tempête.

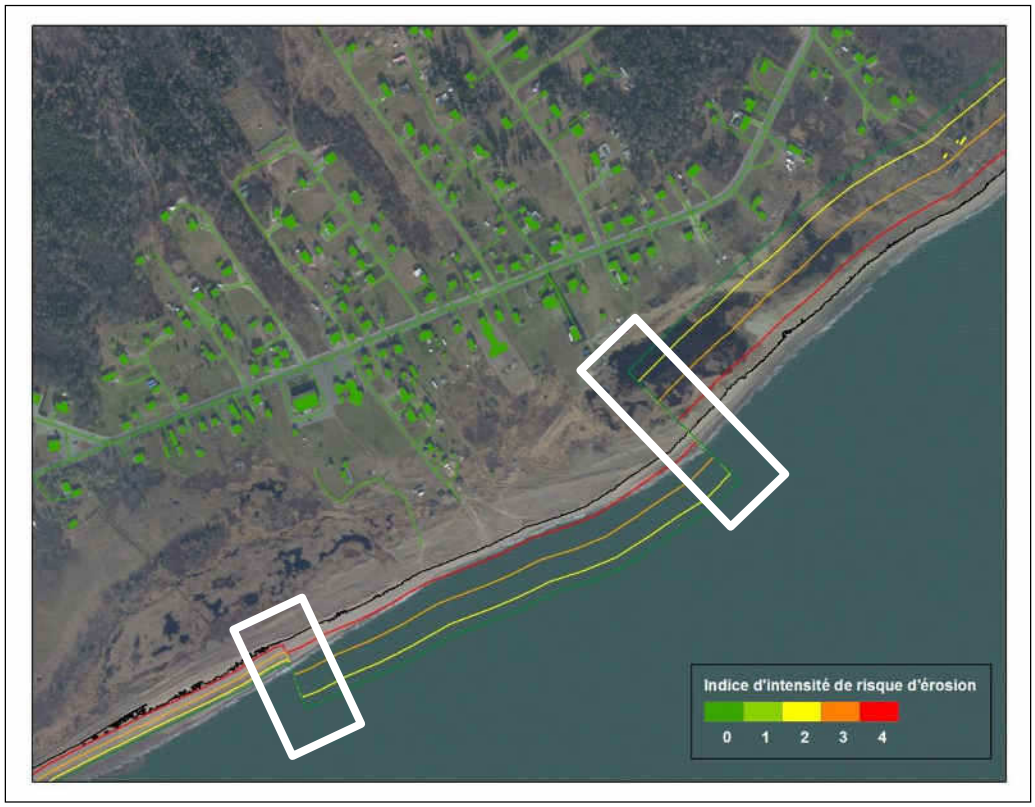

***Figure 15** : Exemple de lignes de raccordement perpendiculaires (encadrés blancs).* (Source : Tiré de la figure 29, p. 43, dans Robichaud *et al.*, 2011)

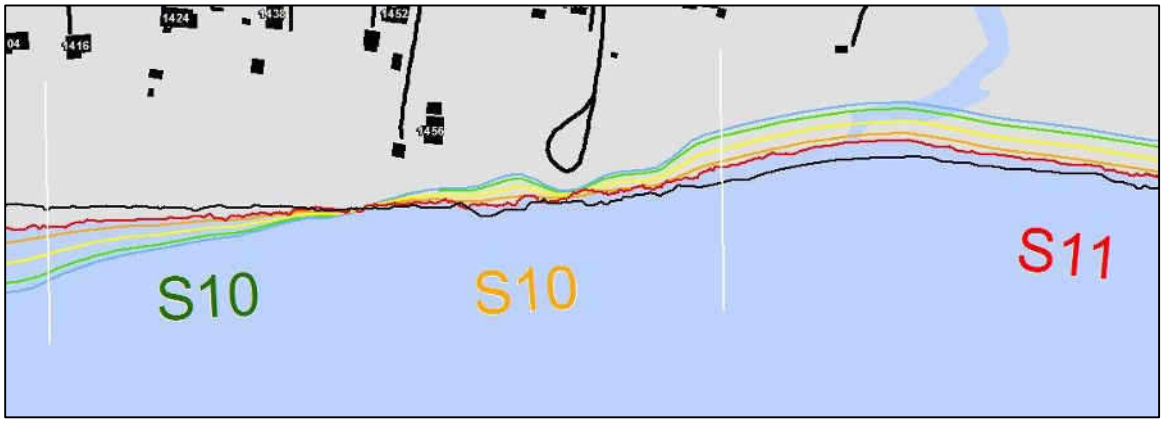

***Figure 16** : Exemple de zone de transition (secteur S10, carte 2) où on a évité les lignes de raccordement perpendiculaires.*

certains résidents, le recul est plus rapide depuis 1998. Pour ces raisons, nous pensons qu'il est possible que nos scénarios sous-estiment la vitesse d'érosion

future en ne tenant compte que partiellement des effets des changements climatiques et plus particulièrement la disparition du couvert de glace. En effet, nos scénarios seraient basés sur une période qui comprendrait une phase d'érosion un peu plus rapide avec peu ou pas de glace hivernale (de 1998 à 2009) et une phase d'érosion un peu moins rapide avec présence de glace hivernale (1974-1997). À ce moment-ci, nous n'avons pas de données pour vérifier cette hypothèse.

Détermination et représentation du risque

Lors du projet SACCA-ICAR-Péninsule acadienne de 2011, nous avions développé un indice de risque d'érosion pour les infrastructures de trois municipalités (Robichaud *et al.*, 2011, p. 37). Cet indice s'est avéré très utile dans la représentation cartographique du risque. Aussi, l'avons-nous réutilisé et légèrement modifié pour qu'il soit mieux adapté aux besoins de SMSR.

Le principe de base sous-jacent à l'indice de risque d'érosion est de prévenir suffisamment longtemps la possibilité qu'une infrastructure se trouve dans une zone d'érosion. L'indice a été établi en fonction (1) de marges de sécurité arbitraires, mais pertinentes et utiles, et (2) de la projection de la position du trait de côte à différentes années (figure 17).

Le risque est considéré comme étant maximal (cote 5, risque d'érosion actuel) pour toute infrastructure se trouvant à 10 m ou moins du trait de côte de 2009 (figure 17). Ainsi, un bâtiment ou une route touchant la ligne ou se trouvant à l'intérieur de la zone de 10 m du trait de côte de 2009 peut être considéré comme en danger d'érosion immédiat ou très prochainement (moins de 10 ans).

Cette marge de sécurité de 10 m est l'élément nouveau par rapport au projet de 2011 et est basée en partie sur le fait que la falaise à SMSR peut reculer brusquement sur plusieurs mètres lors d'une tempête. Certains résidents estiment avoir perdu jusqu'à 5 m de terrain en 2010 avec les deux tempêtes de décembre et celle d'octobre (plus modeste, mais notée par certains résidents). Comme le trait de côte de référence est celui de 2009, il faut considérer qu'il y a déjà eu un recul substantiel à certains endroits depuis ce temps[10]. De plus, il faut considérer la possibilité d'un recul soudain lors de tempêtes possibles dans les prochaines années. Enfin, la position des traits de côte projetés peut avoir une

[10] D'après certains résidents de SMSR, il n'y a pas eu de recul important de 2010 à 2012, ni de tempête provoquant une grosse érosion. Néanmoins, certains notent un recul observable à certains endroits. Même durant les années « calmes », la côte reste instable le long de certaines falaises. Il semble que le gel-dégel affecte la face des escarpements; il y a donc une érosion subaérienne active des falaises le long de cette côte.

erreur d'environ 3 m en raison des limites de la méthode[11]. C'est pourquoi nous avons utilisé une marge de sécurité aussi large. Elle n'a pas été contestée lors d'une réunion regroupant plusieurs résidents intéressés ou affectés par les problèmes d'érosion à SMSR et le directeur général du village, mais peut-être n'est-elle pas suffisante. Les décideurs de SMSR voudront peut-être établir des marges de sécurité plus larges.

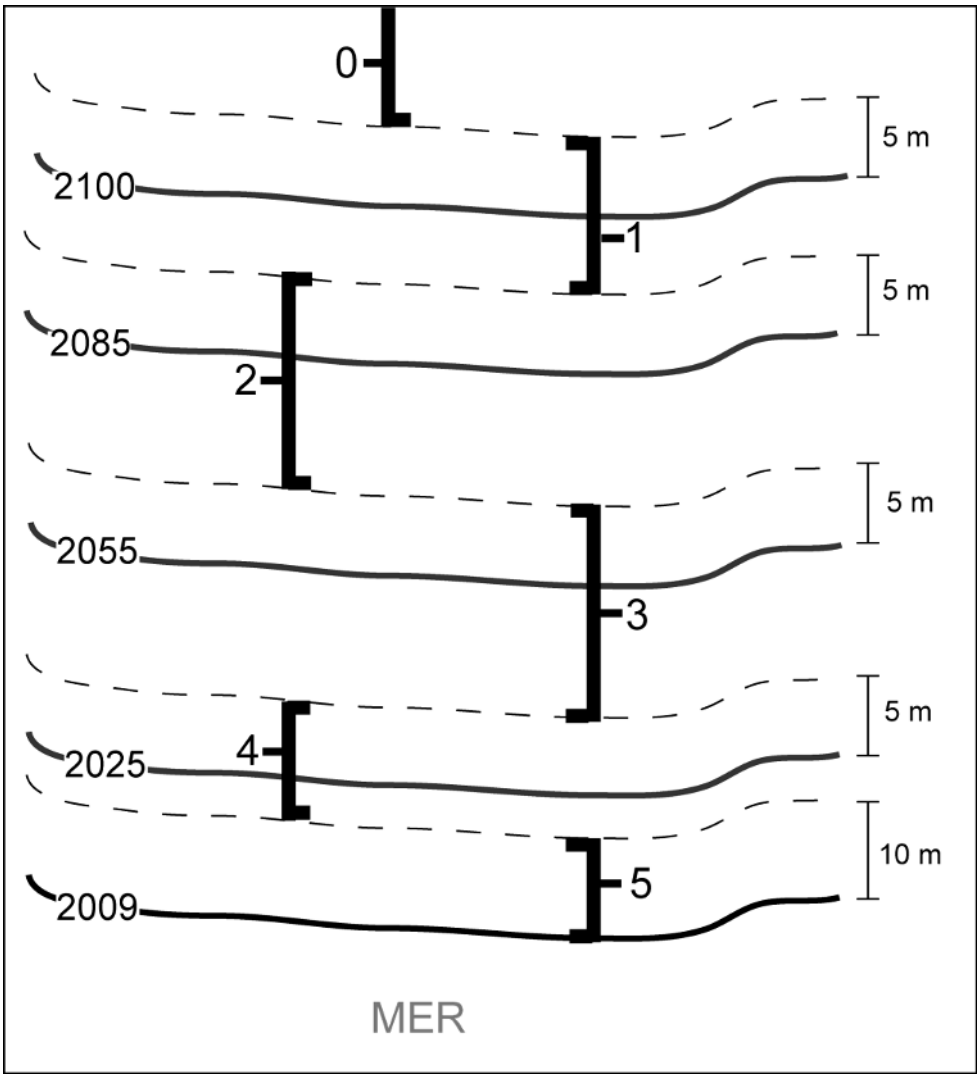

***Figure 17** : Schéma représentant la distribution des indices de risque aux infrastructures en fonction du déplacement du trait de côte. Le schéma suppose une côte en recul assez rapide.*

[11] Voir pages 14 et 15.

Les autres indices sont évalués selon la position du trait de côte tel que projeté pour les années 2025, 2055, 2085 et 2100, plus une marge de sécurité arbitraire de 5 m (figure 17). Les projections ont été faites à partir du changement mesuré entre 1974 et 2009 et selon les secteurs à évolution uniforme. Ainsi, une infrastructure à risque de cote 4 se trouve dans une zone comprise entre le 10 m du trait de côte de 2009 jusqu'à 5 m derrière le trait de côte projeté de 2025 (figure 17). Ces infrastructures pourraient être en danger d'érosion d'ici 2025 et sont à surveiller prioritairement avec celle d'un indice de 5. De la même façon, une infrastructure à risque de cote 3 se trouve dans une zone comprise entre le 5 m du trait de côte de 2025 jusqu'à 5 m derrière le trait de côte de 2055 et serait à risque entre 2025 et 2055, et ainsi de suite jusqu'à une zone sans risque (figure 17). L'indice de risque des routes est attribué à des segments de 5 m, ce qui explique pourquoi la plupart transgressent la limite de la cote obtenue, mais toujours en faveur d'un risque plus élevé.

La carte 2 montre la distribution des infrastructures à risque selon cet indice à SMSR. Elle est présentée en détail dans la section qui suit.

RÉSULTATS

Cette section présente les résultats de notre étude sur l'érosion et les infrastructures à risque à Sainte-Marie-Saint-Raphaël. Nous avons choisi de les exposer selon les trois parties du littoral (falaise sud-ouest, plage centrale, falaise nord-est) et les 15 secteurs de traits de côte tels que définis dans la section précédente; nous les décrirons selon le type de côte, le taux de changement et les infrastructures à risque. Les cartes 1 et 2, ainsi que les quelques tableaux ci-dessous, illustrent l'ensemble de ces résultats qu'il est essentiel de consulter pour la compréhension du texte qui suit. Notons que la description de la côte est exposée plus haut[12] et que nous ne reprenons que les éléments essentiels à l'explication de certains résultats.

Tableau 1 *: Taux de changement du trait de côte par secteur à Sainte-Marie-Saint-Raphaël (- = recul; + = avancée).*

SECTEUR	NOMBRE DE TRANSECTS [1]	TAUX DE CHANGEMENT (m/an) [2]			
		MIN	MOY	MAX	ÉCART TYPE
S1	8	-1,12	**-1,28**	-1,38	0,10
S2	13	-0,71	**-0,99**	-1,19	0,11
S3	9	-0,19	**-0,61**	-1,03	0,37
S4a	19	-0,67	**-0,77**	-0,88	0,06
S4b	7	-0,85	**-0,87**	-0,90	0,02
S4c	5	-0,77	**-0,85**	-0,91	0,05
S5	12	-0,52	**-0,61**	-0,69	0,05
S6 [3]	8	-0,20	**-0,34**	-0,50	0,10
S7	8	0	**0**	0	---
S8	18	+0,37	**+0,57**	+0,77	0,14
S9	8	+0,29	**+0,37**	+0,43	0,05
S10 [3]	15	-0,22	**+0,01**	+0,28	0,15
S11	18	-0,15	**-0,23**	-0,30	0,05
S12	13	-0,21	**-0,33**	-0,43	0,07
S13 [3]	12	-0,45	**-0,69**	-0,98	0,19
S14	8	-0,97	**-1,01**	-1,06	0,03
S15	10	-0,48	**-0,55**	-0,64	0,05

[1] Un transect représente environ 25 m de trait de côte.

[2] La marge d'erreur est d'environ 0,1 m/an.

[3] Secteurs de transition (voir texte).

[12] Pages 3 à 10.

***Tableau 2** : Nombre de bâtiments à risque d'érosion par type à Sainte-Marie-Saint-Raphaël.*

TYPE DE BÂTIMENT		INDICE DE RISQUE					
		0	1	2	3	4	5
RÉSIDENTIEL	Principal	417	8	12	5	-	-
	Secondaire	524	5	12	23	6	2
COMMERCIAL	Principal	16	-	1	-	1	3
	Secondaire	-	-	-	-	-	-
INDUSTRIEL	Principal	11	-	1	-	-	-
	Secondaire	-	-	-	-	-	-
INSTITUTIONNEL	Principal	5	-	-	-	-	2 [1]
	Secondaire	7	-	-	-	-	-
LOISIRS	Principal	4	-	2	1	-	-
	Secondaire	6	-	-	-	-	-
TOTAL	Principal	453	8	16	6	1	5
	Secondaire	537	5	12	23	6	2
	Tous les bâtiments	990	13	28	29	7	7

[1] Correspond aux deux jetées du quai.

***Tableau 3** : Nombre de bâtiments à risque d'érosion par secteur à Sainte-Marie-Saint-Raphaël.*

SECTEUR [1] / BÂTIMENT		INDICE DE RISQUE				
		1	2	3	4	5
S2	Principal	2	8	-	-	-
	Secondaire	-	4	11	1	-
S3	Principal	1	-	-	-	-
	Secondaire	3	-	2	-	-
S4a	Principal	3	4	4	-	-
	Secondaire	-	4	7	3	1
S4b	Principal	2	-	-	-	-
	Secondaire	1	2	-	1	1
S5	Principal	-	2	2	-	-
	Secondaire	1	2	3	1	-
S6	Principal	-	1	-	-	-
	Secondaire	-	-	-	-	-
S7	Principal	-	-	-	-	2 (quai)
	Secondaire	-	-	-	-	-
S11	Principal	-	-	-	-	-
	Secondaire	-	1	-	-	-

[1] Les secteurs S1, S8 à S10 et S12 à S15 n'ont pas de bâtiments à risque. Le secteur S4c est un cas à part.

***Tableau 4** : Longueur (en mètre) de tronçons de route à risque d'érosion à Sainte-Marie-Saint-Raphaël.*

TYPE DE ROUTE	INDICE DE RISQUE					
	0	1	2	3	4	5
PUBLIQUE	17 058	155	55	26	-	10
PRIVÉE	686	35	15	-	-	-

FALAISE SUD-OUEST (Secteurs S1 à S4)

Cette falaise de composition hétérogène et de hauteur variable (2,7-4,2 m) comprend quatre secteurs.

La falaise du **secteur S1** a une hauteur moyenne de 3,5 m et est en dépôt meuble (till, sable/gravier, tourbe; carte 1, photo 2). Vers le sud-ouest, au-delà des limites du village et du secteur S1, la falaise se prolonge jusqu'à n'être presque composée que de tourbe. La tourbière de l'arrière côte à cet endroit n'est pas habitée. Le secteur S1 non plus dont la limite adjacente au secteur S2 est vis-à-vis le chemin de terre qui mène à la côte au bout de la rue Paulin. Le trait de côte de ce secteur recule rapidement à des taux variant de -1,12 à -1,38 m/an [13] (moyenne de -1,28 m/an) (tableau 1 et carte 1).

La falaise du **secteur S2** a une hauteur variant de 3,6 à 4,2 m. C'est là que la base rocheuse en grès fait son apparition et s'épaissit graduellement jusqu'au secteur S3 et que la tourbe au sommet disparaît (carte 1, photos 3 à 7). Le recul est moins rapide que pour le secteur S1, mais reste élevé à environ -1 m/an (tableau 1 et carte 1). Le grès est très fracturé et reste relativement fragile, mais est plus résistant que les couches meubles. Le bout de la rue Paulin (environ un tiers de sa longueur) se trouve derrière ce secteur et certains bâtiments sont assez près du bord de la falaise (carte 1). Selon les scénarios de recul (carte 2), un bâtiment secondaire seulement est à risque immédiat ou prochain. Par contre, à partir de 2025, la situation deviendra plus critique pour de nombreux bâtiments (tableau 3). Après 2055, la plupart des maisons de la rue Paulin du côté de la mer dans ce secteur seront en danger d'érosion. La route principale ne sera menacée qu'après 2085.

Le grès est à son maximum d'épaisseur dans la falaise du **secteur S3.** La hauteur totale de la falaise est de 3,5 m et le grès peut dépasser 2 m d'épaisseur (carte 1, photos 8 et 9). Ce secteur est en recul et les taux de changements y

[13] Rappelons que la marge d'erreur des taux de changement est de 0,1 m/an.

sont les plus variables qu'ailleurs (-0,19 à -1,03 m/an) (tableau 1). Cela s'explique par le fait qu'en 1974, le trait de côte était linéaire alors que maintenant il est en dent de scie avec une alternance de pointes et de creux (carte 1). Les taux de recul sont plus élevés dans les creux et plus faibles aux pointes. On a remarqué sur place que la base de grès est moins épaisse dans le fond de ces creux par rapport aux pointes. ***Comme il est difficile de prédire le comportement de ce secteur***, on a décidé de faire reculer l'ensemble à la même vitesse, soit à -0,7 m/an, un peu plus rapidement que la moyenne du secteur qui est -0,61 m/an (tableau 1). Sinon, le scénario aurait fait évoluer les pointes de sorte qu'elles auraient continué à s'accentuer indéfiniment sans que cela ne soit réaliste. Souvent, il arrive effectivement que les pointes s'allongent, mais alors elles s'amincissent, développent parfois une arche, puis finissent par disparaître. La rue Paulin se trouve aussi derrière ce secteur. Parce que les taux de recul sont moins élevés et que les bâtiments sont plus éloignés de la falaise, les scénarios montrent que le secteur est hors de la zone de risque jusque 2085 environ, sauf à un endroit près du secteur S4a où deux bâtiments sont à risque à partir de 2025 (carte 2). La rue n'est pas menacée dans ce secteur.

Figure 18 *: **A**-Plate-forme rocheuse du sous-secteur S4c. **B**-Plage du secteur S2.* *(Photos prises le 29 juin 2012)*

Le **secteur S4** est composé d'une falaise dont la base est en grès de 1 m ou moins d'épaisseur surmontée le plus souvent d'une couche sablo-graveleuse. On l'a subdivisé en trois sous-secteurs en partie en raison de la hauteur de la falaise : dans le sous-secteur S4a, la hauteur augmente graduellement de 2,7 m à 4 m (carte 1, photo 10) jusqu'au sous-secteur S4b où la hauteur plafonne à ce niveau (photo 11), puis redescend à partir du sous-secteur S4c sous les 3 m.

Une plate-forme rocheuse se trouve devant la falaise du sous-secteur S4c (figure 18A), situation qui se prolonge dans le secteur S5 (figure 5B), alors que dans les secteurs S1 à S4b, une plage sableuse à galets et à blocs domine (figure 18B). Le sous-secteur S4a recule un peu moins rapidement (-0,77 m/an) que S4b et S4c (-0,85 m/an environ) (tableau 1).

Une autre raison pour laquelle on a subdivisé ce secteur est parce que la situation des bâtiments diffère dans chacun d'eux. Le **sous-secteur S4a** se trouve derrière le dernier segment de la rue Paulin. Selon les scénarios, quelques bâtiments secondaires sont à risque d'érosion immédiat ou prochain et plusieurs maisons le sont à partir de 2025 (tableau 3 et carte 2). D'autres le seront par après. Tous les bâtiments à risque sont du côté de la mer par rapport à la rue Paulin. Le **sous-secteur S4b** est derrière le boulevard de la Mer. Là, deux bâtiments sont dans la zone à risque d'érosion immédiat ou prochain et quelques autres sont dans des zones à risque plus tardif (tableau 3 et carte 2). Enfin, il y a le **sous-secteur S4c** où un enrochement a été placé en 2011 (carte 1 et 2; figure 5A). Le comportement de ce sous-secteur est difficile à prédire puisqu'il a été modifié après la période de mesure (1974-2009). ***La difficulté avec les structures de protection est d'anticiper leur efficacité, leur entretien et leurs effets secondaires sur les zones adjacente*s**. C'est pourquoi nous avons mis ce sous-secteur dans une catégorie à part. Dans nos scénarios, nous avons choisi d'y mettre un trait de côte fixe, mais on a attribué aux bâtiments derrière l'enrochement une cote « risque indéterminé » (carte 2). Nous recommandons aussi de surveiller de près les bâtiments immédiatement de part et d'autre de la structure de protection en raison des « effets de bouts » qui font en sorte que les zones près des extrémités de l'enrochement risquent de s'éroder plus rapidement. Ces bâtiments pourraient être plus à risque que supposés par nos scénarios. Le boulevard n'est pas menacé dans l'ensemble du secteur.

PLAGE CENTRALE (Secteurs S5 à S12)

Cette partie de la côte est constituée d'une longue plage sableuse interrompue par un quai. Elle a été divisée en huit secteurs, dont deux du côté sud-ouest du quai et cinq du côté nord-est; le quai est considéré comme un secteur.

Le **secteur S5** fait la transition entre la falaise sud-ouest et la plage proprement dite. De l'ouest vers l'est, un talus d'érosion terreux, dont la hauteur diminue de 2 m à environ 1 m, borde la plage qui est d'abord constituée d'une plate-forme rocheuse, puis de sable (carte 1, photos 12 et 13). Les taux de changement

varient peu et indiquent un recul moyen de -0,61 m/an (tableau 1). Un bâtiment est à risque prochain et plusieurs le seront à partir de 2025 ou 2055 (tableau 3 et carte 2).

Le **secteur S6** montre des taux de recul graduellement plus faible en allant vers le quai, de -0,5 à -0,2 m/an (carte 1). Dans les scénarios, nous l'avons fait évoluer selon ces taux, avec un recul de moins en moins prononcé du secteur S5 au quai. Un seul bâtiment devrait être à risque d'érosion à partir de 2085 si ces scénarios se réalisent (tableau 3 et carte 2). Il est possible que la recharge en sable dont nous avons parlé plus haut[14] contribue à cette situation et il est à se demander si une recharge plus fréquente n'aiderait pas à diminuer le recul dans le secteur S5 aussi. Il s'agit peut-être d'une possibilité à explorer.

Le quai constitue le **secteur S7** et n'est pas considéré à risque (même si sur la carte 2 elle a une cote 5) puisqu'il s'agit d'une structure adaptée à la mer et entretenue. Rappelons que le quai joue un rôle fondamental dans la redistribution des sédiments des secteurs adjacents comme mentionné plus tôt[15].

Les **secteurs S8 et S9** sont des plages en progradation (carte 1, photos 14 et 15) et avancent à des taux de +0,57 et +0,37 m/an (tableau 1). Ici, aucune infrastructure n'est à risque d'érosion selon les scénarios de cette étude (carte 2), quoique le boulevard de la Mer ne soit pas loin et plusieurs bâtiments soient près de la dune. Tant que le sable s'accumulera en raison de la présence du quai, la situation devrait rester inchangée. Le danger viendrait plutôt d'un développement non contrôlé près de la côte ou sur les dunes ou d'une destruction de ces dunes par un mauvais usage (VTT, piétinement, etc.). Il est fortement suggéré de conserver le milieu et ne pas le développer, car il agit en tant que zone de protection des habitations à proximité. Dans ce type de milieu, il ne faut pas négliger les effets des tempêtes qui peuvent provoquer des reculs importants (figure 19 et carte 1, photo 15) et des inondations. Les plages ont tendance à se reformer après une tempête, mais il y a des exemples qui témoignent que certaines plages qui subissent des assauts répétés sur un an ou même plusieurs années consécutives peuvent se dégrader durablement.

Le **secteur S10** fait la transition entre les secteurs d'accumulation (S8 et S9) et ceux d'érosion (de S11 et S12). C'est une autre zone que l'on a fait évoluer selon un gradient de changement dans les scénarios (carte 2). En effet, on passe graduellement de transects qui avancent sur la mer à des taux proches de +0,3 m/an à des transects qui reculent à plus de -0,2 m/an (tableau 1 et carte 1).

---

[14] Voir page 6.
[15] Voir page 6.

Aucune infrastructure n'est à risque dans ces secteurs, mais les avertissements du paragraphe précédent sont de mises.

Figure 19 *: Traces d'érosion des tempêtes de décembre 2010 dans les dunes de la plage au nord-ouest du quai.* *(Photo prise le 29 juin 2012)*

Le **secteur S11** commence un peu avant la sortie du ruisseau et est constitué d'une plage moins large que les secteurs précédents, sans véritable dune et bordée par la forêt (la photo 17 de la carte 1 la montre en arrière-plan). Ce secteur recule à un taux de -0,23 m/an (tableau 1). Un seul bâtiment serait à risque d'érosion, plus probablement après 2055 (tableau 3 et carte 2).

Le **secteur S12** fait la transition entre la plage et la falaise nord-est et recule à des taux un peu plus élevés (-0,33 m/an, tableau 1). À partir d'un certain point, la plage contient plus de galets (carte 1, photo 17) et présente un talus d'érosion près de la limite du secteur S13 (carte 1, photo 18) pour devenir une falaise un peu plus loin. La zone n'est pas construite; seul un chemin de terre se rend à la plage où on a placé de grosses dalles de ciments en guise de protection (figure 20A). C'est dans ce secteur que le chemin de terre longeant la côte a été

complètement érodé lors des tempêtes de décembre 2010 (figure 20B). L'arrière côte n'est pas construite et n'a donc aucun bâtiment à risque (carte 2).

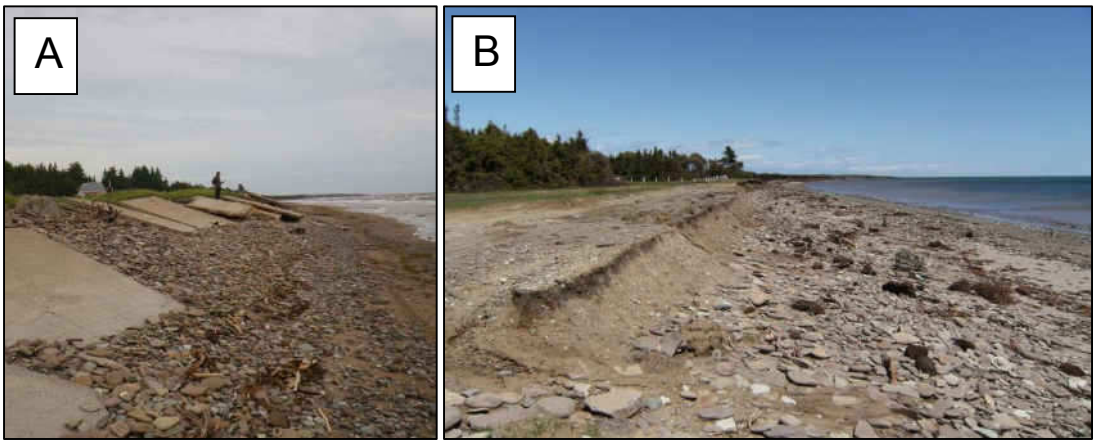

***Figure 20** : **A**-Dalles de ciment devant l'arrivée du chemin à la côte dans le secteur S12. **B**-Chemin longeant la côte du secteur S12, érodé par les tempêtes de décembre 2010. (Photo A prise le 26 juin 2012 et photo B prise le 23 mai 2011)*

FALAISE NORD-EST (Secteurs S13 à S15)

À partir d'ici, une tourbière se trouve à l'arrière côte et ne comporte pas d'infrastructure (cartes 1 et 2). Nous nous contenterons donc de décrire cette section plus sommairement.

Cette côte divisée en trois secteurs est composée de falaises hétérogènes de hauteur croissante du sud-ouest vers le nord-est (carte 1, photos 19 à 28). Les secteurs reculent selon les taux suivants (tableau 1) : moyenne de -0,69 m/an (**secteur S13**, falaise en sable et tourbe, qui fait la transition entre les secteurs adjacents et dont les taux progressent graduellement de -0,45 m/an à -0,98 m/an), de -1,01 m/an (**secteur S14**, falaise avec base en till surmonté de sable et de tourbe) et de -0,55 m/an (**secteur S15**, falaise à base rocheuse). La falaise se prolonge jusque Cap-Bateau. ***Son érosion alimenterait la plage centrale en sédiments***.

CONCLUSION

L'étude de l'érosion côtière à Sainte-Marie-Saint-Raphaël montre que le trait de côte a évolué différemment selon l'endroit, malgré le fait qu'il n'est que 5 km de long. La plus grande partie de ce littoral recule (presque 4 km), mais à des taux variables : de -0,05 à -1.38 m/an selon l'endroit, avec une moyenne de -0,63 m/an (comprend tous les secteurs qui reculent). Ce sont surtout les zones à falaises qui perdent du terrain (3 km de côte), mais aussi certains secteurs de la plage (presque 1 km de côte : ceux du côté immédiatement au sud-ouest du quai et un segment adjacent aux secteurs de la falaise nord-est). Près de 1 km de plage s'avance sur la mer à des taux atteignant +0,77 m/an (moyenne de +0,43 m/an). L'effet d'obstacle du quai à la dérive littorale expliqué plus haut[16] favorise l'accumulation du sable dans cette zone, mais provoque un déficit du côté opposé.

NOTE IMPORTANTE : ***Rappelons que ces scénarios sont modérés***, car ils sont basés sur les taux de changement des 35 dernières années. Ils ne prennent pas en compte la possibilité que les conditions environnementales (par exemple, le réchauffement climatique et la disparition du couvert de glace protecteur en hiver) puissent changer en faveur de taux d'érosion plus rapides qu'entre 1974 et 2009.

Les secteurs où les infrastructures sont le plus à risque d'érosion dans le futur, selon les scénarios exposés dans cette étude, sont ceux où la côte recule rapidement et où il y a des constructions près de la mer. Il s'agit des secteurs S2 à S5 (tableau 3 et carte 2), donc environ 1500 m de littoral. Dans les autres secteurs, il y a peu ou pas de risque aux infrastructures pour différentes raisons : il n'y a pas d'infrastructures à l'arrière côte (secteurs S1 et S11 à S15), la côte avance (secteurs S8 et S9) ou le recul est lent (secteurs S6 et S10) (***ne pas oublier les deux exceptions***; voir carte 2, secteurs S6 et S11). Le quai (secteur S7) est une infrastructure particulière qui a déjà nécessité des travaux d'aménagement (l'enrochement sur sa façade exposée) et est aux prises avec d'autres problèmes, dont l'ensablement du bassin et du chenal de sortie.

Selon le tableau 2, un total de 84 bâtiments (36 principaux et 48 secondaires) seront à risque d'érosion d'ici 2100 et sont surtout résidentiels (73). Une quinzaine sont à risque immédiat ou prochain dont quatre bâtiments principaux à vocation commerciale, les deux jetés du quai (qui sont un cas particulier) et huit bâtiments secondaires résidentiels. À partir de 2025, 29 bâtiments seront à

[16] Voir pages 6 et 27.

risque d'érosion, dont cinq résidences principales, 23 bâtiments secondaires attachés aux résidences principales et une infrastructure de loisir. Un peu plus de 40 bâtiments seront à risque d'érosion après 2055. Quoi qu'il en soit, ***les infrastructures ayant une cote de 4 ou 5 (carte 2) devraient susciter une attention rapide. Celles ayant une cote 3 devraient aussi être préoccupantes puisqu'elles seront déjà à risque à partir de 2025***.

Le tableau 4 et la carte 2 montrent que la situation des routes est peu préoccupante. Certes, quelques tronçons de chemins secondaires menant à la côte seront en danger d'érosion et peut-être voudra-t-on malgré tout y porter attention. Néanmoins, on ne signale aucun accès principal qui pourrait être coupé par l'érosion d'ici 2100, hormis l'extrémité sud-ouest de la rue Paulin qui sera à risque après 2085.

Pour terminer, voici quelques idées que la collectivité voudra peut-être considérer dans sa planification. Ce ne sont pas des recommandations formelles, mais des éléments de base qui pourraient aider.

-Un zonage adéquat qui protège à la fois les gens (ne pas permettre de construction dans les zones à risque) et les milieux (surtout ceux qui protègent déjà la côte comme les dunes : secteurs S8, S9 et S10). Ce zonage pourrait viser un meilleur contrôle du développement proche des côtes en recul (par exemple, émettre des recommandations sur le déplacement des infrastructures incluant les fosses septiques et les puits), voire le limiter ou l'interdire et favoriser le développement de l'intérieur du territoire.

-La recharge en sable à partir des matériaux dragués dans le secteur S6 pourrait ralentir le recul à cet endroit; faire attention à ce que les matériaux ne soient pas pollués et, autant que possible, que les grains soient de taille adéquate. Il y a déjà des actions prises à cet effet (dragage du quai et transfert de sable du côté sud-ouest), mais peut-être est-il possible d'en faire davantage (volontairement prendre le sable au front du quai et le mettre du côté sud-ouest). Il serait intéressant d'observer et documenter l'efficacité de cette recharge (volume transporté[17], dispersion effective sur la plage). Il existe aussi des techniques de « bypass » (pompage de sable d'un côté d'une structure vers l'autre), mais il faudrait en étudier le coût.

-Les structures de protection sont souvent la première chose à laquelle on pense quand on veut protéger une côte de l'érosion. Il faut bien s'informer de leur coût et surtout de leurs effets sur le littoral. Bien qu'elles protègent de l'érosion, leur efficacité est d'une durée limitée, elles provoquent la perte de la plage au-devant de la structure et favorisent une accélération de l'érosion à leurs extrémités. Elles peuvent aussi bloquer ou rendre plus dangereux

[17] On peut l'estimer en termes de voyages de camion.

l'accès à la mer. Elles induisent parfois un excès de confiance; souvent on continuera de construire en arrière d'elles, ce qui augmente le risque en cas de mauvais entretien ou de rupture lors de tempêtes violentes ou répétées. Les structures de protections sont surtout utiles dans la sauvegarde d'infrastructures à très grande valeur.

-Le déplacement d'infrastructures (maisons, routes, etc.) est rarement une option désirée de la population, mais parfois c'est la seule ou la meilleure possibilité. Elle peut se faire dans de bonnes conditions s'il y a une aide financière, une réserve foncière désignée et adéquate et un support logistique (aide dans l'opération de déplacement). Elle peut être moins coûteuse que des structures de protection.

Plus globalement, il est suggéré premièrement de réfléchir aux usages et aux infrastructures associés à la zone côtière, deuxièmement d'évaluer les risques qui pèsent sur eux à partir des scénarios d'érosion et finalement d'élaborer une réflexion sur les solutions d'adaptation (technologiques ou non) en tenant compte des coûts de chaque option et de leurs conséquences positives ou négatives sur les usages et infrastructures. Cette réflexion pourrait aider à prioriser les interventions en fonction des valeurs et des besoins de la collectivité et de sa capacité d'action.

Les idées exposées ci-dessus sont assez communes dans ce genre de situation, mais il en existe d'autres. La municipalité gagnera à se renseigner autant que possible sur les options qui existent et choisir soigneusement celles qui lui conviendront.

La municipalité de SMSR détient maintenant un document qui lui permettra de mieux planifier les actions à prendre face à l'érosion. Les zones à risque sont mieux identifiées et l'échéancier mieux connu.

RÉFÉRENCES

Himmelstoss, E.A. (2009). DSAS 4.0 - Installation Instructions and User Guide *in:* Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan. 2009 *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. Updated for version 4.3. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

Jolicoeur, S. et O'Carroll, S. (2012). *Projet de la Péninsule acadienne. Rapport de recherche technique de l'équipe « Photogrammétrie et cartographie »*. Rapport préparé pour l'association interprovinciale Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique (SACCA) dans le cadre du programme d'Initiatives de collaboration pour l'adaptation régionale (ICAR - Ressources naturelles Canada) de l'Atlantique; 63 pages. (Disponible à : http://atlanticadaptation.ca/node/290)

Robichaud, A., I. Simard, A. Doiron et M. Chelbi (2011). *Infrastructures à risque dans trois municipalités de la Péninsule acadienne; volet 3 du projet SACCA-Péninsule acadienne*. Rapport préparé pour l'association interprovinciale Solutions d'adaptation aux changements climatiques pour l'Atlantique (SACCA) dans le cadre du programme d'Initiatives de collaboration pour l'adaptation régionale (ICAR - Ressources naturelles Canada) de l'Atlantique; 54 pages. (Disponible à : http://atlanticadaptation.ca/node/266)

ANNEXES

ANNEXE 1 – LOCALISATION DES POINTS DE CONTRÔLE

Le fragment en noir et blanc représente la partie de la photo aérienne de 1974 qui a été utilisée. Les croix indiquent la position des points de contrôle.

Photo 74-507-82

Photo 74-507-83

ANNEXE 2 - DESCRIPTION DES PROPRIÉTÉS DES ATTRIBUTS

BÂTIMENTS				
FICHIER	**DESCRIPTION**	**ATTRIBUT**	**TYPE**	**VALEUR**
*_BATIMENTS	ADRESSE CIVIQUE	P_LOCATION	TEXTE	Informations extraites de la base de données de biens évalués de Services NB
*_BATIMENTS	TYPE DE PROPRIÉTÉ	P_DESCRIPTION	TEXTE	
*_BATIMENTS	CODE DE PROPRIÉTÉ	P_TYPE_COD	NUM	
*_BATIMENTS	IDENTIFICATION	B_ID	NUM	0000 … 9999
*_BATIMENTS	NOM	B_NOM	TEXTE	Nom
*_BATIMENTS	TYPE DE PROPRIÉTÉ	B_PROP	NUM	Simplification de B_PROP1 à la centaine
*_BATIMENTS	TYPE DE PROPRIÉTÉ	B_PROP1	NUM	Selon les codes des catégories de biens évalués (cadastre). Si inexistant, la valeur du cadastre attribuée à partir de la photographie aérienne par évaluation du voisinage ou de bâtiments apparentés.
*_BATIMENTS	TYPE D'INFRASTRUCTURE	B_TYPE	NUM	*Si B_PROP1 = (1xx), (4xx), (5xx), (6xx), (7xx) :* 1 : principal, 2 : secondaire *Si B_PROP1 = (2xx), (3xx)* : 1 : Tous les bâtiments
*_BATIMENTS	TYPE D'INFRASTRUCTURE	B_TYPE1	NUM	1 : Bâtiment, 2 : Autre
*_BATIMENTS	SOURCE D'INFO	B_SOURCE	NUM	1 : Photo interprétation 2009, 2 : Observation terrain 2012
*_BATIMENTS	ZONE DE RISQUE D'ÉROSION	E_EVAL	NUM	0 : Bâtiment potentiellement sans risque avant 2100 1 : Bâtiment à risque d'érosion entre 2085 et 2100 2 : Bâtiment à risque d'érosion entre 2055 et 2085 3 : Bâtiment à risque d'érosion entre 2025 et 2055 4 : Bâtiment à risque d'érosion d'ici 2025 5 : Bâtiment à risque d'érosion actuel

ROUTES				
FICHIER	**DESCRIPTION**	**ATTRIBUT**	**TYPE**	**VALEUR**
*_ROUTES	IDENTIFICATION	R_ID	NUM	000 … 999
*_ROUTES	NOM	R_NOM	TEXTE	Nom de la route
*_ROUTES	TYPE DE ROUTE	R_TYPE	NUM	1 : Publique, 2 : Privé, 3 : Entrée 4 : Passerelle, 5 : Sentier
*_ROUTES	ÉTAT	R_ETAT	NUM	1 : Asphalte, 2 : Ciment, 3 : Métal, 4 : Roche, 5 : Bois, 6 : Terre, 9 : Autre
*_ROUTES	LONGUEUR DU SEGMENT DE ROUTE	R_LENGTH	NUM	Toutes les catégories de routes ont été segmentées à une distance de 5m (dans certains cas, certains segments font moins de 5m)
*_ROUTES	ZONE DE RISQUE D'ÉROSION	E_EVAL	NUM	0 : Centre de la route potentiellement sans risque avant 2100 1 : Centre de la route à risque d'érosion entre 2085 et 2100 2 : Centre de la route à risque d'érosion entre 2055 et 2085 3 : Centre de la route à risque d'érosion entre 2025 et 2055 4 : Centre de la route à risque d'érosion d'ici 2025 5 : Centre de la route à risque d'érosion actuel