

Impacts des structures rigides de protection sur la côte néo-brunswickoise de la baie des Chaleurs au Canada

Simon Diouf, Dominique Bérubé and André Robichaud

Volume 21, Number 2, October 2021

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1088427ar>

DOI: <https://doi.org/10.4000/vertigo.32393>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Diouf, S., Bérubé, D. & Robichaud, A. (2021). Impacts des structures rigides de protection sur la côte néo-brunswickoise de la baie des Chaleurs au Canada. *VertigO*, 21(2), 1–26. <https://doi.org/10.4000/vertigo.32393>

Article abstract

Hard coastal defences (HCD) have multiplied in the last few decades on the Chaleur Regional Service Commission area, a situation that requires the assessment of their effects on coastal processes and features. In this study, photogrammetric techniques were used to make an accurate appraisal of impacts. Firstly, historical coastline change was measured for two periods: 1934-1985 and 1985-2012/2018. Secondly, beach surface occupied by HCD was quantified. Finally, topographic surveys on beach morphology were carried out. Results show that HCD represent 54 % of the study area coastline. The hardened sections of the coastline become fixed, while adjacent natural sections globally an accelerated retreat. HCD cover 23 % of beaches in Nigadoo, 12 % in Beresford, 37 % in Salmon Beach west and 27 % in Salmon Beach Est. Finally, it was found that the hardened beaches are on average two to four times less wide than natural beaches and present the lowest foreshore elevations.



Impacts des structures rigides de protection sur la côte néo-brunswickoise de la baie des Chaleurs au Canada

Simon Diouf, Dominique Bérubé et André Robichaud

Introduction

- 1 Dans le contexte actuel de changement climatique mondial, l'érosion côtière pourrait connaître une accélération significative (Lozano et al., 2004; IPCC, 2012), notamment dans les provinces maritimes du Canada (Davidson-Arnott et Ollerhead, 2011). L'augmentation probable de la fréquence et de l'intensité des épisodes de tempêtes pourrait devenir spécialement préoccupante dans cette région (Atkinson et al., 2016), en raison de la prédominance de côtes gréseuses très friables. En parallèle, la population côtière mondiale est en augmentation (Zaninetti, 2008) et adopte souvent l'utilisation de structures rigides de protection (SRP) pour se prémunir de l'érosion (Brown et al., 2014).
- 2 La région d'étude, qui correspond au territoire administratif de la Commission de Services régionaux Chaleur, connaît depuis le début des années 1970 une augmentation substantielle de l'occupation de son littoral. Dans plusieurs communautés côtières de la région, les résidences, chalets, commerces ou usines sont souvent installés très près du trait de côte. Cette situation suscite des préoccupations relatives à leur exposition aux aléas marins, dont l'érosion qui, entre autres, entraîne la perte de terrains et peut déstabiliser les fondations ou causer des dommages aux systèmes de drainage. Pour accroître leur capacité à résister, les occupants les plus exposés, ont fortement rigidifié le littoral. Dans certains secteurs, les SRP forment près de 60 % du trait de côte. Bien que ces SRP confèrent un sentiment de sécurité et une certaine protection physique, elles sont réputées avoir des impacts négatifs sur l'évolution du littoral. Ces dernières

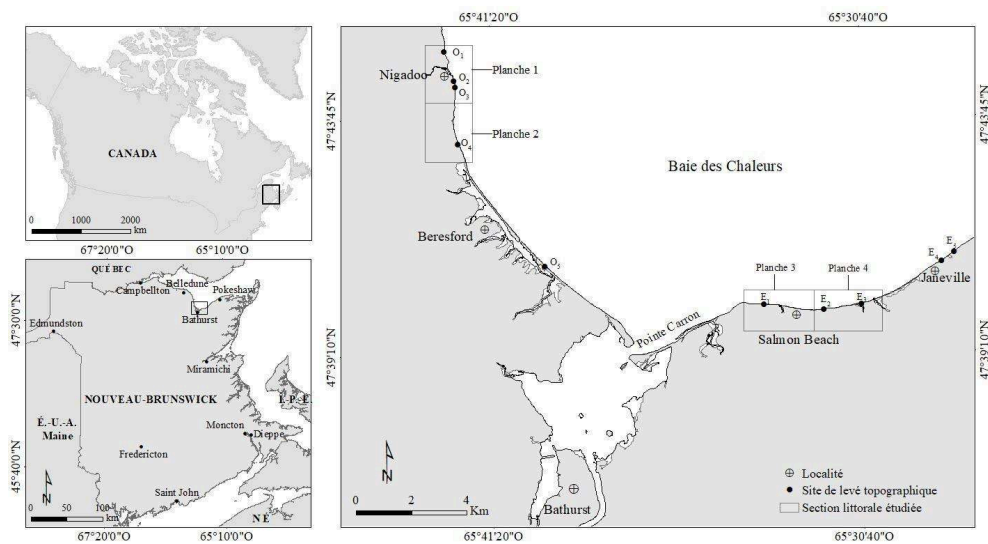
contribuent à la perte d'habitats naturels en empiétant sur la zone riveraine. Elles réduisent également les apports sédimentaires dans la cellule littorale en ralentissant l'érosion naturelle des terres côtières; et peuvent perturber le transit des sédiments en bloquant ou déviant les courants littoraux. De plus, elles peuvent exacerber les problèmes d'érosion le long des plages en amplifiant l'énergie des vagues ou courants (Dugan et al., 2008; Arkal, 2010; Bernatchez et Fraser, 2012). La modification des courants au droit des SRP entraîne également une autre forme d'érosion qui se traduit par un creusement ou affouillement à la base de la SRP (Frihy, 2008). L'érosion aux extrémités des SRP, ou effet de bout, est une autre forme d'érosion des plages qui est directement reliée à la présence des SRP. Ce phénomène peut tout simplement être défini comme une érosion excessive, par rapport à l'érosion naturelle, qui est causée par la présence d'une structure en amont-dérive (Tait et Griggs, 1991; Balaji, 2017). L'érosion excessive résulte de processus de réfraction, de diffraction et de réflexion des vagues à l'extrémité des SRP entraînant ainsi des pertes de sédiments qui donne à la plage la forme d'un croissant (Hsu and Evans, 1989; Hsu et al., 1996, 2010; Balaji, 2017). Toutefois, les effets des SRP sur le littoral du Nouveau-Brunswick n'ont pas été suffisamment étudiés et quantifiés. D'ailleurs, la Commission de Services régionaux Chaleur, qui s'occupe de l'élaboration et l'application des plans d'aménagement du territoire, s'interroge sur les conséquences possibles à long terme des SRP sur le maintien des plages et de leur accessibilité.

- 3 Cette recherche, financée par le Fonds en fiducie pour l'Environnement du Nouveau-Brunswick, fait partie intégrante d'un vaste plan d'adaptation au changement climatique qui concerne certaines communautés côtières du territoire de la Commission de Services régionaux Chaleur. Elle vise donc à mieux documenter les effets des SRP sur le littoral de deux municipalités et deux districts de services locaux de la Commission de Services régionaux Chaleur. Il comporte trois objectifs spécifiques qui nécessitent tous l'acquisition de données géospatiales de grande précision. Le premier concerne l'influence des SRP sur le déplacement historique du trait de côte, le second porte sur leur rôle dans la réduction des superficies de plage au cours de la dernière décennie, et le dernier touche à leurs impacts sur la morphologie des plages en conditions estivales et printanières.

Description du milieu

- 4 Le territoire de la Commission de Services régionaux Chaleur se situe le long de la baie des Chaleurs, dans le nord du Nouveau-Brunswick. Il inclut la portion de côte comprise entre la communauté de Belledune, à l'ouest et celle de Pokeshaw à l'est. Lorsque tous les secteurs estuariens sont pris en compte, incluant ceux associés au havre de Bathurst, le linéaire côtier de la région fait 230 km de long. Les travaux d'acquisition des données géospatiales ont été concentrés dans la portion sud du territoire de la Commission de Services régionaux Chaleur (figure 1). Ces travaux couvraient deux secteurs rattachés aux municipalités de Nigadoo et Beresford Nord, ainsi que deux secteurs rattachés à des districts de services locaux de Salmon Beach Ouest et Est.

Figure 1. Localisation de la région d'étude.



Géologie

- 5 Le substratum rocheux de la région peut être divisé en deux parties de part et d'autre du havre de Bathurst. La partie ouest, comprise entre Belledune et Bathurst a une structure géologique complexe. Elle se compose majoritairement de roches sédimentaires siliceuses fortement indurées, entrecoupées de volcanites mafiques et d'intrusions felsiques, avec par endroit des passages de roches sédimentaires calcaires. À l'est, entre Pokeshaw et Bathurst, le substratum rocheux est plus homogène avec une domination des roches sédimentaires siliceuses moyennement indurées (Fytte et Richard, 2007). La roche en place le long du trait de côte est surmontée par des tills et des sédiments marins post-glaciaires ; ces derniers prennent souvent la forme de placages minces. Les dépôts meubles côtiers se composent donc de sables, silts, argiles, graviers, mais aussi de sédiments organiques associés à des tourbières ou marais salés, qui se sont formés durant l'Holocène (Rampton, 1984).
- 6 La production d'une base de données sur la vulnérabilité côtière, réalisée dans le cadre des projets du Fonds en fiducie pour l'Environnement (Jolicoeur et Bérubé, 2017), a montré que les formations rocheuses de la région d'étude présentaient un risque d'érosion faible à modéré dans la partie ouest, et très élevé dans la partie est. Ces données suggèrent aussi que le potentiel de recul du trait de côte est élevé le long de toutes les falaises meubles de la région, mais qu'il est moins élevé le long des cordons dunaires bénéficiant d'un bon apport sédimentaire issu de l'érosion des falaises et des apports des cours d'eau.

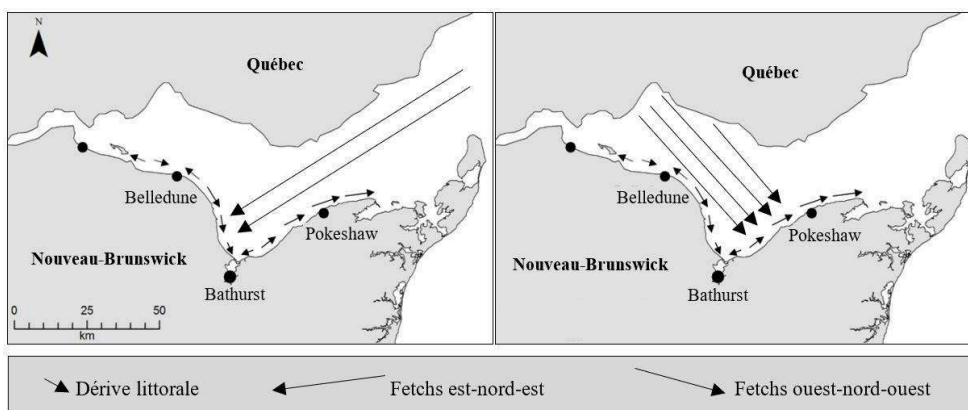
Conditions hydrodynamiques

- 7 Dans la baie des Chaleurs, le régime marégraphique est microtidal mixte avec une composante semi-diurne dominante (Lavoie, 1997). Le marnage des marées moyennes est de 1,6 m, alors que durant les grandes marées, le marnage peut atteindre 2,6 m. L'onde de marée se propage progressivement de l'ouest vers l'est dans la baie. Le régime des vagues est fortement influencé par la forme de la baie des Chaleurs qui

délimite un plan d'eau relativement fermé. À l'entrée de la baie des Chaleurs, le régime des houles provenant du golfe du Saint-Laurent est caractérisé par des vagues significatives d'une hauteur moyenne de 2,1 m et de 9 secondes de période (Long, 2005, p.18). Toutefois, avant d'atteindre le littoral de la Commission de Services régionaux Chaleur, ces vagues sont atténuées par le caractère échancré et étroit de la baie et par des processus de diffraction (Bernatchez et al., 2008a). Une étude devrait être menée sur le littoral sud de la baie des Chaleurs afin de mieux connaître les caractéristiques physiques de la houle sur ce littoral. Les vagues générées localement suivent le régime des vents et sont fortement influencées par l'orientation de la côte par rapport aux fetchs. Il est à noter que la glace est présente de la mi-/fin décembre à la fin mars/début avril (Service canadien des glaces, 2020) et empêche la formation de vagues durant cette période, bien que cet effet tampon pourrait être réduit avec les changements climatiques et le réchauffement des eaux. La partie ouest de la région d'étude fait face à des fetchs longs de 495 m dans l'axe est-nord-est de la baie des Chaleurs (figure 2). Les vents est-nord-est sont relativement peu fréquents selon la station de Belledune (Environnement Canada 1982), mais ils peuvent parfois atteindre les 120 km-heure, produisant ainsi de fortes vagues. Durant les tempêtes d'automne, des vents du nord-est génèrent de puissantes vagues pouvant atteindre 2,4 m, particulièrement érosives qui frappent surtout la partie est du littoral, entre Bathurst et Belledune (Parks et al., 2016). Les vents d'ouest, dominants toute l'année et relativement forts, génèrent des vagues d'une hauteur inférieure à un mètre et favorisent une dérive littorale nord-ouest-sud-est, de Belledune vers Bathurst (Hunter, 1975), sans doute responsable des fortes accumulations sableuses à Beresford et Bathurst.

- 8 Dans la partie est de la région d'étude, les épisodes d'érosion sont plus fréquents puisque générés par les vents dominants de l'ouest. Le plus souvent, les épisodes tempétueux se font ressentir surtout au large. Toutefois, les vagues provenant de l'ouest atteignent souvent le trait de la côte entre Bathurst et Pokeshaw, en particulier là où les rivages sont en pente forte le long des falaises rocheuses. La dérive littorale est en direction du nord-est, sauf dans la portion comprise entre Salmon Beach et le havre de Bathurst où elle est inversée (Hunter, 1975) et favorise la formation de la flèche littorale de Pointe Carron (figure 2).

Figure 2. Direction des fetchs et de la dérive littorale dans la région d'étude.



Géomorphologie côtière

- 9 Dans la partie centrale de la région d'étude (Beresford et Bathurst), la côte est dominée par un long système de flèches sableuses formées de plages larges de 25 m en moyenne et de dunes d'une largeur moyenne de 59 m. Ce système s'est développé à l'embouchure de baies et lagunes estuariennes qui abritent de nombreux marais salés. Dans les parties nord-ouest et nord-est de la région (Belledune à Nigadoo et Pokeshaw à Salmon Beach), le relief côtier est constitué de falaises rocheuses, où les plages sont souvent absentes, et de falaises meubles bordées de plages relativement larges (figure 4). L'érosion de ces falaises libère donc une partie du matériel qui approvisionne les flèches littorales et les plages adjacentes. En ce qui concerne l'apport sédimentaire d'origine fluviatile, aucune donnée n'est disponible à ce sujet dans la région. Cependant, ce type d'apport peut être considéré comme négligeable dans le cas de la rivière Nepisiguit, qui est le plus grand cours d'eau de la région, en raison de la présence d'un barrage situé environ 30 km en amont et qui bloque une partie des sédiments et accentue ainsi le déficit sédimentaire qui arrive à la côte et favorise par conséquent l'érosion des plages. Une description plus détaillée des secteurs et sites étudiés est faite dans la section des résultats.

Figure 4. Falaises meubles dans les secteurs de Nigadoo (C) et Salmon Beach (D).



Méthodes

Traitement des images aériennes

- 10 Quatre séries de photographies aériennes ont servi à caractériser les impacts des SRP dans les quatre secteurs étudiés, soit celles de 1934, 1985, 2012 et 2018. La plus ancienne (1934) provient de la Photothèque nationale de l'Air à Ottawa, alors que celle intermédiaire (1985) provient du Centre de géomatique de la Nouvelle-Écosse à Amherst. Les plus récentes (2012 et 2018) proviennent du bureau du ministère provincial des Ressources naturelles et du Développement de l'Énergie (MRNDE) à Fredericton. L'étude du déplacement historique du trait de côte a été menée plus spécifiquement dans les secteurs de Nigadoo et Beresford Nord, qui présentent un caractère plus urbain (figure 1 : planches 1 et 2), et dans les secteurs de Salmon Beach Ouest et Salmon Beach Est, qui montrent un caractère plus rural (figure 1 : planches 3 et 4). Les secteurs à l'ouest du havre de Bathurst sont couverts par les photographies aériennes de 1934, 1985 et 2018, et ceux à l'est du havre par les photographies

aériennes de 1934, 1985 et 2012. Dans le cas des orthophotographies de 2018 et 2012, elles sont aussi disponibles en formats numériques de haute résolution (taille des pixels : 0,3 mètre en 2012 et 0,1 mètre en 2018) et de grande précision (erreur horizontale : 0,5 mètre en 2012 et 0,1 mètre en 2018). Celles-ci ont donc servi de couche matricielle de base pour géoréférencer et rectifier les autres clichés. D'abord, les clichés ont été numérisés à une résolution de 1100 ppp, puis importés dans le logiciel ArcGIS (version 10.6.1). Pour chaque image, huit à onze points de contrôle ont été sélectionnés pour le travail de géoréférencement et rectification. Ces points ont été répartis de manière équilibrée pour couvrir l'ensemble des images et éventuellement maximiser leur précision horizontale. Les images ont ensuite subi une transformation polynomiale de deuxième ordre et la taille du pixel au sol a été fixée à 0,3 mètre pour le processus de rééchantillonnage. L'ensemble de ces images numériques a servi non seulement à cartographier le trait de côte, mais aussi les limites des SRP et la ligne de flexure.

Cartographie du trait de côte

- 11 Plusieurs lignes de référence peuvent être utilisées pour étudier la dynamique des côtes (Boak et Turner, 2005). L'identification d'une ligne de référence fiable est donc une étape incontournable dans toutes études visant à quantifier le déplacement du trait de côte (Jamal et al., 2007). Ce choix reste cependant délicat (Faye et al., 2008) en raison des difficultés à localiser la limite des terres, ou celle de la mer, dans un environnement aussi dynamique (Parker, 2001). Le plus souvent, la ligne de référence choisie est celle qui est observable sur l'ensemble des photos aériennes utilisées pour une étude (Faye et al., 2008). Les repères de terrain les plus aisément détectables lors de la cartographie de cette ligne sont de nature botanique ou géomorphologique, et dépendent généralement du type de côte. Dans le cas des côtes sableuses basses, la préférence est parfois donnée à la ligne de rivage, qui correspond à la limite entre la partie sèche et la partie humide de l'estran (Thieler et Danforth, 1994b ; Douglas et Crowell, 2000). En ce qui concerne les côtes dunaires, le trait de côte a été assimilé à la limite de la végétation dunaire (Moore, 2000; Ferreira et al., 2006) ou le pied de dune qui est utilisé comme ligne de référence (Faye et al., 2008). Dans le cas des falaises abruptes, rocheuses ou meubles, le sommet est favorisé pour quantifier le déplacement du trait de côte (Dong et Chen, 1999; Moore et Griggs, 2002; Hapke et Reid, 2007). En effet, le risque d'erreurs lié au discernement de la limite inférieure des falaises est plus élevé en raison de la fréquente présence d'ombrages sur les photos aériennes. Dans le cas des falaises meubles affectées par des mouvements de masse, la ligne de référence peut être corrélée au rebord de la cicatrice d'arrachement (Robin, 2002) et parfois au sommet ou au pied de l'éboulis selon les objectifs de l'étude (Priest, 1999; Bonnot-Courtois et Levasseur, 2003).
- 12 Dans ce projet de recherche, le trait de côte a été cartographié à une échelle de 1 : 600 à l'aide du logiciel ArcGIS (version 10.6.1). Des repères topographiques (rupture de pente), botaniques (front de la végétation terrestre ou halophile) ou anthropiques (limites des SRP) ont été utilisés selon le type de côte. Pour les sections du littoral encore à l'état naturel, le trait de côte a été identifié au sommet de la falaise ou la limite de la végétation dans le cas d'une dune bordière. Pour les images aériennes les plus anciennes (1934 et 1985), repérer cette limite s'avère parfois difficile, surtout en raison de leur faible résolution qui ne permet pas de bien distinguer la limite entre le sommet et la base des falaises. Ainsi, une analyse stéréoscopique s'est avérée parfois nécessaire afin de confirmer la position du sommet des falaises. Pour les sections du littoral

bordées par des SRP, le trait de côte a été positionné à la limite interne (côté terres) des SRP, de façon à bien mesurer la stabilisation du trait de côte par les SRP.

Mesure du déplacement du trait de côte

- 13 La comparaison de photos aériennes multidates est le moyen le plus utilisé pour analyser le déplacement historique d'un trait de côte (Paxion et Cohen, 2002; Jamal et al., 2007). Dans ce projet de recherche, le déplacement du trait de côte le long des falaises et cordons dunaires a été analysé en comparant les images aériennes de 1934, 1985 et 2012 ou 2018. La distance de déplacement a été calculée grâce à l'extension DSAS (Digital Shoreline Analysis; version 5) développée par Himmelstoss et al. (2018). D'abord, une ligne virtuelle a été générée à une distance de 75 m du trait de côte de 1934 dans le logiciel ArcGIS. Ensuite, 353 transects équidistants de 30 m ont été tracés perpendiculairement à cette ligne virtuelle dans l'extension DSAS. Le nombre total de transects dans chaque secteur étudié dépend de la sinuosité du trait de côte et varie de la façon suivante : 102 à Nigadoo, 70 à Beresford Nord, 90 à Salmon Beach Ouest et 91 à Salmon Beach Est. L'extension DSAS a finalement permis de mesurer le long de chaque transect la distance séparant les différents traits de côte historiques et de calculer le taux annuel moyen de leur déplacement au cours de chaque période étudiée.
- 14 Il est à noter que la précision des données sur le déplacement du trait de côte dépend du positionnement des orthophotos par rapport à la surface terrestre, de l'alignement des images aériennes de 1934 et 1985 par rapport aux orthophotos de 2012 ou 2018, de la taille des pixels sur chacune des images utilisées pour la cartographie et de la capacité du photo-interprète à bien repérer les limites des formes de terrain et structures anthropiques. Le cumul de ces incertitudes se traduit par un décalage cartographique exprimé en nombre de mètres qui, lorsque divisé par le nombre d'années relatif à la période couverte par les images aériennes, donne la marge d'erreur à considérer dans l'analyse des taux annuels de déplacement du trait de côte (Bernatchez et al. 2012). Dans le cas de ce projet de recherche, la marge d'erreur a été estimée à $\pm 0,09$ m/an pour la période 1934-1985, $\pm 0,07$ m/an pour la période 1985-2012 et $\pm 0,05$ m/an pour la période 1985-2018.

Calcul de la superficie des SRP et de la plage

- 15 Dans ce projet, une SRP désigne tout ouvrage dont le rôle primaire consiste à freiner l'érosion côtière le long des terres privées ou publiques. Les SRP associés aux ports et quais tels que les épis, perpendiculaires à la côte, en sont exclus. Seuls les SRP longitudinaux dont la typologie est présentée au tableau 1 ont été pris en compte. Les enrochements et murs de béton ou de bois sont les SRP les plus fréquemment rencontrés dans la région d'étude (Tableau 1). Une cartographie détaillée des SRP présentes sur les images aériennes de 2012 et 2018 a été réalisée pour chaque secteur d'étude. Les limites interne (côté terre) et externe ou frontale (côté mer) des SRP ont été numérisées séparément de manière à générer deux vecteurs. Le vecteur externe a servi à calculer la longueur totale des SRP et à préciser le pourcentage du trait de côte rigidifié dans chaque secteur étudié. Par ailleurs, la combinaison des vecteurs interne et externe crée un polygone qui circonscrit entièrement une SRP et dont la superficie est automatiquement calculée dans ArcGIS. Dans le cas de la plage, sa superficie a été calculée à l'aide d'un polygone dont le vecteur interne correspond au pied de la dune

ou à la base des falaises et le vecteur externe à la ligne de flexure. La position de cette dernière a été interprétée en fonction de la présence d'un changement de la pente et/ou de la granulométrie, qui pouvait être détectée sur les images aériennes de 2012 et 2018. À l'aide de l'extension DSAS et d'une série de transects, la largeur moyenne de la plage a été calculée selon la distance entre le pied des falaises ou des SRP et la ligne de flexure. La comparaison de l'espace occupé par ces deux classes de polygone a donc permis de quantifier les pertes de superficie de plage occasionnées par la mise en place de SRP.

Cueillette des données d'arpentage

- 16 Les SRP peuvent occasionner des changements dans la morphologie des plages situées directement devant elles. Les principaux indices de ces changements sont les variations de la largeur, de l'élévation et de la pente des plages (Diouf, 2015). Dans ce projet, seule l'élévation de la plage à la base des SRP et au pied des falaises a été mesurée. Les mesures d'élévation de la plage ont toutes été prises en conditions de marée basse à la fin de l'été 2018 et au printemps 2019. Il est important de noter que durant toute la période de prise des données sur le terrain, la région d'étude a connu des conditions météo-marines normales, c'est-à-dire ni une tempête ou des vents violents n'y sont survenus. Un GPS différentiel de marque Leica Viva, dont l'imprécision en X, Y, Z est inférieure à 5 cm, relié au système géodésique de grande précision du Nouveau-Brunswick, a été utilisé pour réaliser ces mesures. Un total de dix sites a été jugé suffisant pour bien illustrer les impacts des SRP. Ceux-ci sont numérotés de O1 à O5 dans le segment ouest et de E1 à E5 dans le segment est (figure 1). Le choix des sites a été motivé par la présence d'un trait de côte naturel et d'un trait de côte rigidifié, les deux étant contigus et bordés par une plage relativement large. De plus, les sites ont été équitablement répartis entre les segments ouest et est pour bien représenter l'effet des fetchs dominants de la région d'étude sur la morphologie des plages. Sur chaque site, les mesures topographiques ont été prises suivant un intervalle de cinq pas de marche correspondant à 3,5 m en moyenne. Au total, plus de 100 mesures ont été réalisées à la base des SRP et des falaises naturelles adjacentes marquant la limite supérieure de la haute-plage ou zone d'influence du jet de rive en conditions de grandes marées de vives-eaux. Le choix de ces limites est motivé par le fait qu'il s'agit de repères fiables permettant de faire un bon suivi des changements morphologiques. Les données topographiques ont ensuite été importées dans le logiciel Excel pour déterminer l'élévation moyenne de la plage. Il est important de souligner que toutes les données d'élévation présentées dans ce projet de recherche sont basées sur le système canadien de référence altimétrique de 1928 (CGVD28) et par conséquent font référence au zéro géodésique (niveau moyen des mers).

Résultats

Impact des SRP sur l'évolution du trait de côte

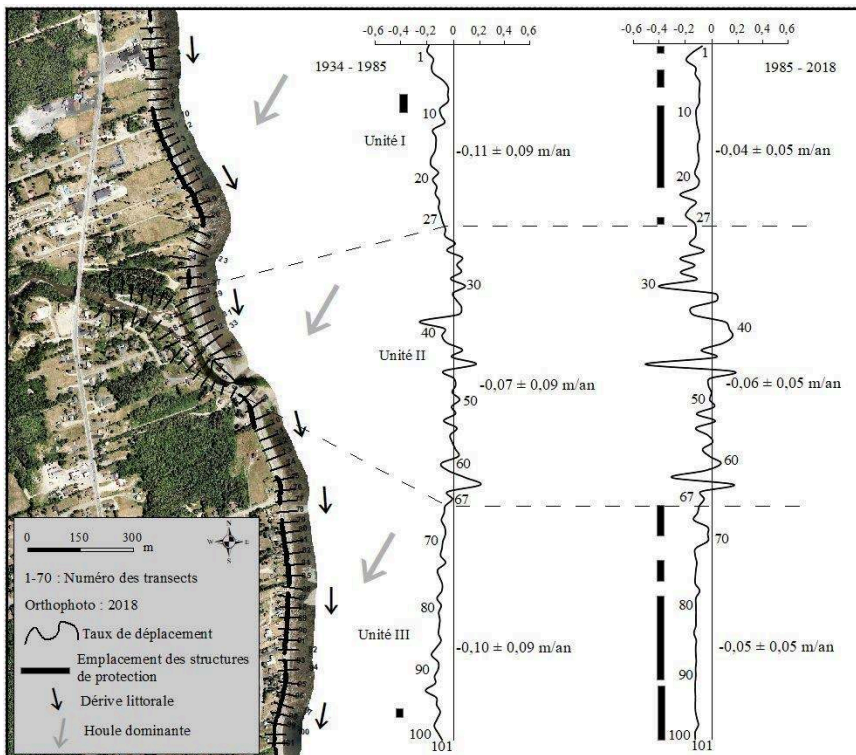
Le secteur de Nigadoo

- 17 Ce secteur, dont le trait de côte fait 3,8 km de long, peut être scindé en trois unités (figure 5). Les unités I et III sont caractérisées par des falaises meubles d'une élévation

moyenne de 6 et 5 m, respectivement par rapport au niveau moyen des mers, et bordées par une plage d'une largeur totale moyenne de 16 et 18 m, respectivement. L'unité II correspond à une côte basse ayant une élévation moyenne de 3 m par rapport au niveau moyen des mers. Elle est constituée d'une flèche littorale recouverte d'une végétation dunaire. Celle-ci protège l'embouchure d'une rivière où se sont formés des marais salés.

- 18 Entre 1934 et 1985. Au cours de cette période, un recul caractérise le trait de côte de ce secteur, en particulier dans les unités I (moyenne $0,11 \pm 0,09$ m/an) et III (moyenne $0,10 \pm 0,09$ m/an). Dans le cas de l'unité II, le trait de côte recule beaucoup moins rapidement (moyenne $0,07 \pm 0,09$ m/an) et est même stable ou en prograde par endroit, mais les taux sont plus variables. Cette évolution peut toutefois être associée à la dynamique sédimentaire de la flèche et de l'estuaire. En 1985, deux SRP sont visibles sur les images aériennes (figure 5). Le trait de côte en avant de ces SRP montre une stabilité par rapport aux secteurs naturels adjacents qui montrent un recul plus important.
- 19 Entre 1985 et 2018. Plusieurs travaux de rigidification du trait de côte ont été réalisés dans les unités I et III durant cette période (figure 5). Les SRP représentent respectivement 67 % et 71 % du trait de côte, qui montre une stabilité. Les sections de côte non rigidifiées continuent de reculer sans toutefois montrer une accélération du recul. L'évolution du trait de côte dans l'unité II est semblable à celle de la période précédente.

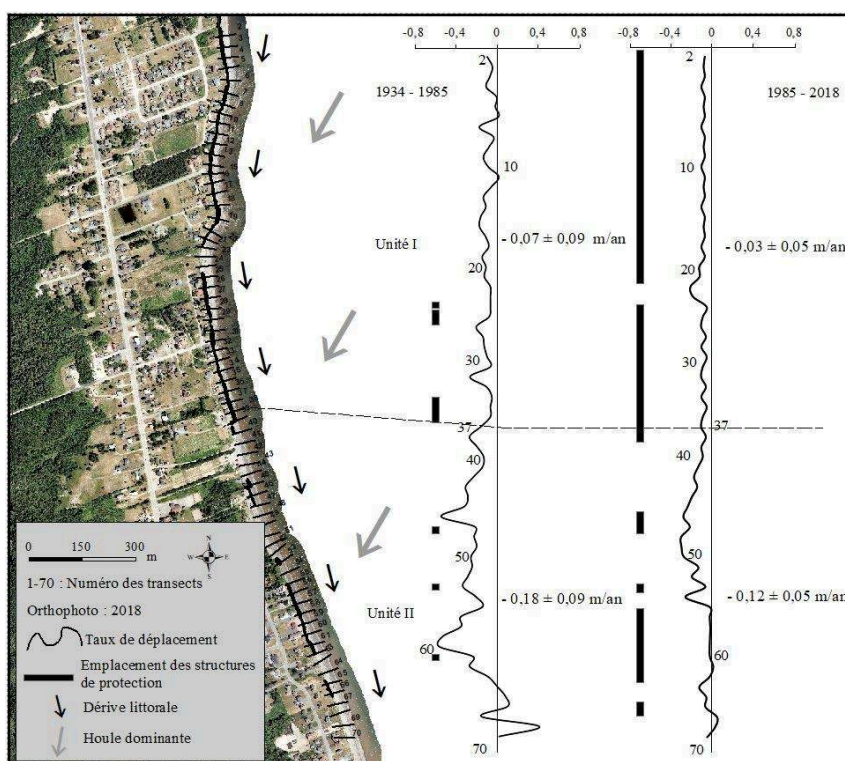
Figure 5. Cartographie des taux d'érosion et de la position des SRP dans le secteur de Nigadoo. Les taux moyens sont indiqués vis-à-vis des unités à chaque période.



Le secteur de Beresford Nord.

- 20 Ce secteur, qui présente un trait de côte long de 2,9 km, est peu varié d'un point de vue géomorphologique, surtout en raison de l'absence de cours d'eau importants arrivant à la mer. En effet, ce secteur se présente sous la forme d'une côte basse d'une élévation moyenne de 3 m par rapport au niveau moyen des mers, bordée d'une plage d'une largeur totale moyenne de 25 m. Il peut cependant être divisé en deux unités sur la base du déplacement du trait de côte (figure 6).
- 21 Entre 1934 et 1985. Durant cette période, le trait de côte de l'unité I est relativement stable ou en léger recul (moyenne $0,07 \pm 0,09$ m/an), alors que celui de l'unité II recule substantiellement (moyenne $0,18 \pm 0,09$ m/an). Une demi-douzaine de SRP peut être détectée sur les images aériennes de 1985. Elles n'occupent cependant que 8,3 % de l'ensemble du trait de côte du secteur qu'elles stabilisent (figure 6).
- 22 Entre 1985 et 2018. De nombreux travaux de rigidification du trait de côte ont été menés sur l'ensemble du secteur durant cette période. Le trait de côte en avant des SRP est ainsi stabilisé, alors que dans les sections non protégées, le trait de côte continue de reculer sans montrer une accélération, notamment dans l'unité II (figure 6). La variabilité du déplacement du trait de côte est plus grande dans les deux unités.

Figure 6. Cartographie des taux d'érosion et de la position des SRP dans le secteur de Beresford Nord. Les taux moyens sont indiqués vis-à-vis des unités à chaque période.



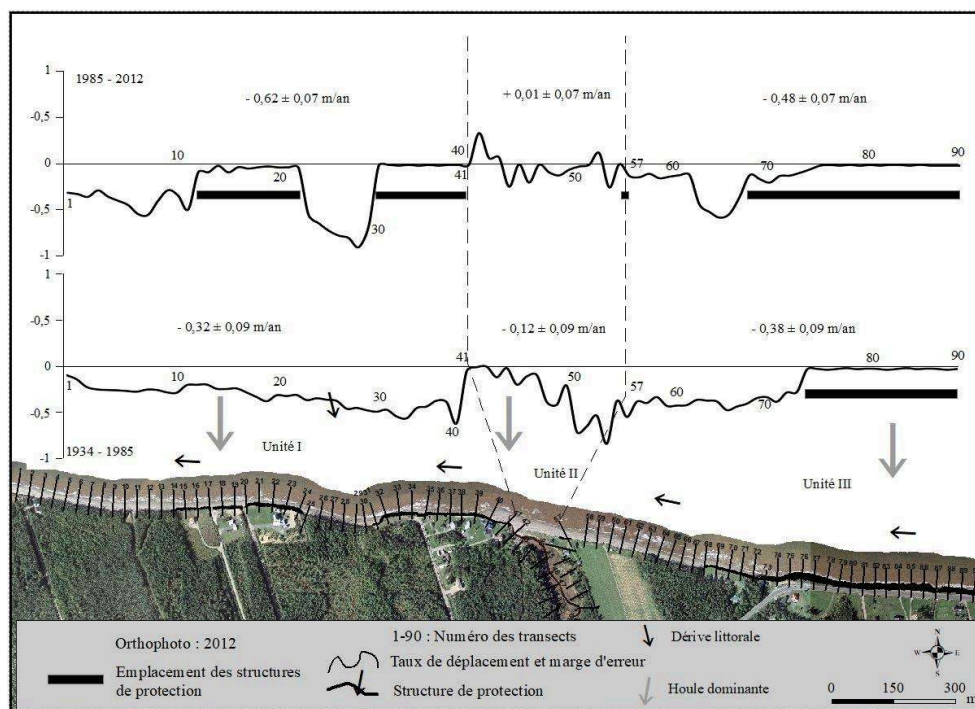
Le secteur de Salmon Beach Ouest.

- 23 Ce secteur, dont le trait de côte s'allonge sur 2,3 km, peut être divisé en trois unités (figure 7). Les unités I et III présentent des falaises meubles, d'une élévation moyenne de 6 et 5 m, respectivement par rapport au niveau moyen des mers. Celles-ci sont

bordées d'une plage d'une largeur totale moyenne de 16 et 11 m, respectivement. L'unité II, dont l'élévation moyenne est de 3 m par rapport au niveau moyen des mers, est constituée d'une petite flèche littorale recouverte de végétation dunaire. Cette flèche isole un marais salé occupant l'embouchure d'un ruisseau.

- 24 Entre 1934 et 1985. Durant cette période, un recul significatif du trait de côte a été mesuré dans presque toutes les sections non protégées des unités I (moyenne $0,32 \pm 0,09$ m/an) et III (moyenne $0,27 \pm 0,09$ m/an). Par ailleurs, le recul du trait de côte a été plutôt modéré dans l'unité II durant ces années (moyenne $0,12 \pm 0,09$ m/an). Il est également important de souligner qu'en 1985, les SRP étaient absentes des unités I et II, mais représentaient 41 % du trait de côte de l'unité III dont elles provoquent la stabilité (figure 7).
- 25 Entre 1985 et 2012. D'importants travaux de rigidification du trait de côte ont été menés dans les unités I et III au cours de cette période. En 2012, les SRP occupaient 42 % du trait de côte de l'unité I et 80 % de celui de l'unité III, ce qui a eu un effet de stabiliser le trait de côte en avant des SRP (figure 7). Cependant, les sections de côte qui sont restées naturelles dans l'unité I montrent une accélération du recul (moyenne $0,48 \pm 0,07$ m/an), en particulier entre les deux longues sections de côte rigidifiées où les taux de recul dépassent le demi-mètre par an (moyenne $0,62 \pm 0,07$ m/an) (figure 7). Dans la section naturelle située dans l'ouest de l'unité III qui est adjacente à la SRP protégeant la route principale, le trait de côte montre aussi une accélération du recul durant cette période (moyenne $0,47$ m/an $\pm 0,07$ m/an). Pour sa part, l'unité II est encore exempte de SRP, mais est néanmoins caractérisée par une stabilité relative du trait de côte, associé à la dynamique sédimentaire de la flèche et du petit estuaire (moyenne $+0,01$ m/an $\pm 0,07$ m/an).

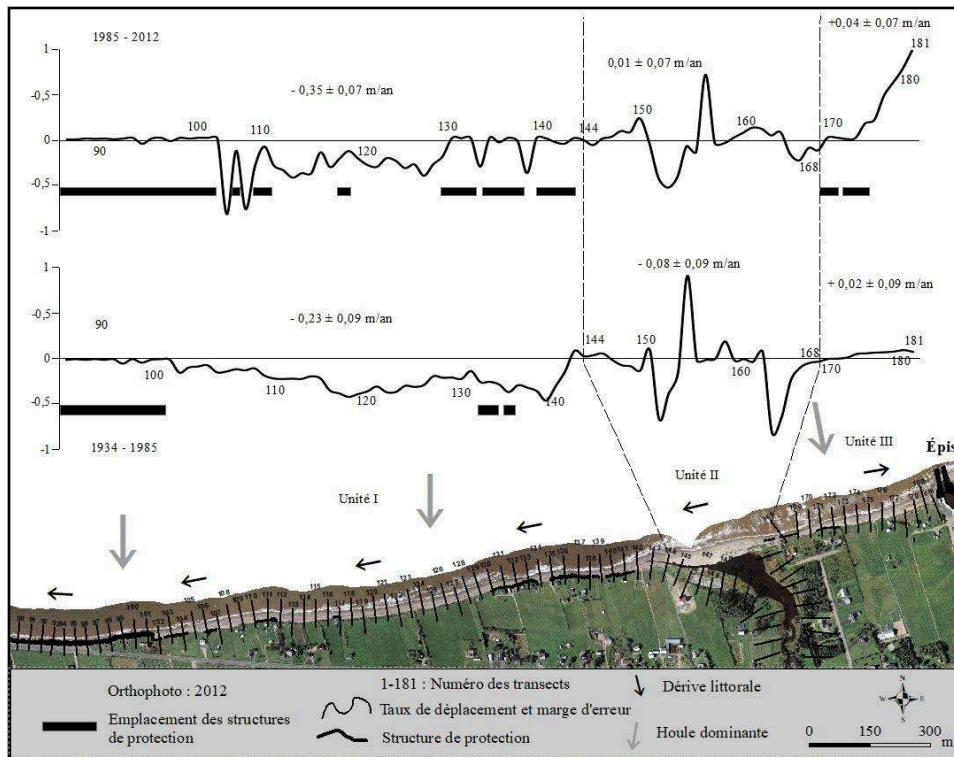
Figure 7. Cartographie des taux d'érosion et de la position des SRP dans le secteur de Salmon Beach Ouest. Les taux moyens sont indiqués vis-à-vis des unités à chaque période



Le secteur de Salmon Beach Est.

- 26 Ce secteur, qui est caractérisé par un trait de côte de 2,5 km de long, comprend trois unités distinctes (figure 8). L'unité I présente une falaise meuble d'une élévation moyenne de 5 m, bordée par une plage d'une largeur totale moyenne de 15 m. L'unité II, dont l'élévation moyenne est de 3 m, est constituée d'une petite flèche littorale recouverte de végétation dunaire sur seulement un tiers de sa longueur. Cette flèche isole un marais salé occupant l'embouchure d'un ruisseau. Enfin, l'unité III se présente sous la forme d'une côte basse, d'une élévation moyenne de 2 m, bordée d'une plage d'une largeur totale moyenne de 21 m. Cette unité se termine à l'est sur l'épi du quai de pêche de Millerbrook (figure 8).
- 27 Entre 1934 et 1985. Durant cette période, un recul significatif (moyenne $0,23 \pm 0,09$ m/an) du trait de côte a été observé dans les sections naturelles de l'unité I, tandis que dans les sections rigidifiées, il a été observé une stabilité liée à la présence des SRP. Pour sa part, l'unité II, qui est exempte de SRP, montre une grande variabilité dans les taux de déplacement entre 1934 et 1985, avec des sections de la côte qui sont restées stables et d'autres qui ont été en fort recul ou en progradation (figure 8). Cette évolution est reliée à la dynamique sédimentaire le long de l'embouchure du ruisseau. En ce qui concerne l'unité III, son trait de côte montre une stabilité durant cette période (moyenne $+ 0,02 \pm 0,09$ m/an), voire une légère avancée, probablement en raison de l'influence positive de l'épi du quai de Millerbrook qui piège une partie des sédiments transportés vers l'est par la dérive littorale secondaire.
- 28 Entre 1985 et 2012. De nombreux travaux de rigidification du trait de côte ont été menés dans les unités I et III au cours de cette période (figure 8). En effet, en 2012 les SRP représentent 66 % du littoral de l'unité I et 40 % de celui de l'unité III. Les parties rigidifiées du trait de côte de l'unité I montrent une stabilité, alors que celles non protégées montrent une accélération du recul (moyenne $0,35 \pm 0,07$ m/an), notamment dans les zones adjacentes aux SRP (transects 105 et 108, 112-116, 134 et 139, figure 8). L'unité III montre une évolution contraire durant ces années. Les travaux de rigidification ont stabilisé le recul du trait de côte (figure 8). Dans les sections non protégées situées à proximité du quai, le trait de côte connaît une progradation qui semble résulter du piégeage des sédiments par l'épi du quai, comme durant la période précédente. Pour sa part, l'unité II, encore exempte de SRP, a une évolution semblable à celle qu'elle a connue durant la période précédente, avec une grande variabilité dans le déplacement de son trait de côte.

Figure 8. Cartographie des taux d'érosion et de la position des SRP dans le secteur de Salmon Beach Est. Les taux moyens sont indiqués vis-à-vis des unités à chaque période.



Superficie de plage occupée par les SRP

- 29 Comme en témoignent la figure 9 et les images aériennes les plus récentes, soit celles de 2018 pour Nigadoo et Beresford Nord, et celles de 2012 pour Salmon Beach Ouest et Est, les SRP couvrent d'importantes superficies de plage le long de ces secteurs. En regroupant les données des deux séries d'images, la région à l'étude dispose de 110346 m² de plage dont 27 928 m², soit 25 %, sont occupés par des SRP. Toutefois, il existe quelques disparités entre les segments ouest et est (tableau 2). Dans le cas du segment ouest, 18 % des 56162 m² de plage sont recouverts par des SRP. Une proportion de 23 % de la plage est recouverte à Nigadoo, alors que celle-ci est de seulement 12 % à Beresford Nord. Pourtant, le trait de côte a été fortement rigidifié dans ce secteur (figure 5), mais les SRP sont très majoritairement faites de murs verticaux de faible superficie et la plage est en moyenne de 8 m de plus large qu'à Nigadoo. Dans le cas du segment est, 32 % des 54184 m² de plage sont recouverts par des SRP, dominés par des enrochements. À Salmon Beach Ouest, c'est 37 % de la plage qui est occupée par des SRP, tandis qu'à Salmon Beach Est, cette proportion est de 27 %, mais la plage est en moyenne 5 m plus large dans ce dernier secteur.

Figure 9. Perte de superficie de plage occasionnée par les enrochements dans le secteur de Salmon Beach ouest : noter la différence de largeur entre la plage naturelle et la plage enrochée.



Effet des SRP sur la morphologie des plages

- 30 L'analyse des données recueillies sur les dix sites d'arpentage est présentée dans le tableau 3. Elle montre une corrélation claire entre la présence ou non des SRP et la morphologie des plages. Ainsi, dans le segment ouest, la largeur des plages naturelles varie entre 7,5 et 13,4 m pour une moyenne de 11,9 m, alors que les plages situées en avant des SRP présentent des largeurs qui varient entre 2,1 et 9,1 m pour une moyenne de 6,3 m. Un constat similaire est fait dans le segment est où les plages naturelles montrent des largeurs qui varient entre 9,1 et 16 m pour une moyenne de 11,8 m, alors que les plages situées en avant des SRP montrent des largeurs qui varient entre 3,5 et 6,8 m pour une moyenne de 3,8 m.
- 31 Les mesures d'élévation prises à l'été 2018 indiquent que les plages caractérisées par la présence d'une SRP montrent, dans le segment ouest, une élévation qui varie entre 1,1 et 2,8 mètres, pour une moyenne de 1,4 mètre, alors que les plages naturelles montrent une élévation qui varie entre 2,3 et 2,8 m pour une moyenne de 2,6 m. Un constat similaire est fait dans le segment est où les plages caractérisées par la présence d'un SRP montrent une élévation qui varie entre 0,4 et 2,2 m pour une moyenne de 1,4 mètre, alors que les plages naturelles montrent une élévation qui varie entre 1,8 et 2,5 m pour une moyenne de 2,2 m. Les mêmes tendances sont observées dans les données prises au printemps 2019 (tableau 3).

Synthèse et discussion

- 32 Les résultats de ce projet de recherche ont permis d'établir des relations significatives entre la présence des SRP et l'évolution du trait de côte. Un constat d'ensemble indique une stabilisation importante des sections protégées, contre une accélération du recul des sections non protégées du trait de côte durant la seconde période étudiée (1985-2012 ou 1985-2018) surtout dans le segment est, en lien avec la prolifération des SRP. Durant la période précédente (1934-1985), où les espaces naturels dominent, le recul du trait de côte est significatif dans la majeure partie des secteurs étudiés, mais il est moins important dans le segment ouest. Les taux de recul durant cette période sont du même ordre de grandeur que ceux observés dans d'autres parties de la Baie-des-Chaleurs. Toutefois, selon la base de données provinciale sur l'érosion des côtes

(GeoNB, 2020), les taux de recul dans cette région sont deux fois moins rapides que ceux le long du golfe du Saint-Laurent, qui est plus exposé aux tempêtes post-tropicales.

- 33 Dans la région d'étude, les taux de recul sont de deux à quatre fois plus rapides le long des falaises meubles que le long des flèches ou estuaires. D'ailleurs, c'est principalement le long de ces falaises qu'une prolifération des SRP a été observée depuis 1985.
- 34 La rigidification du trait de côte a donc profondément modifié son déplacement naturel. D'abord, dans le segment ouest, la mise en place des SRP a permis de stabiliser le trait de côte, alors que les sections non protégées continuent de reculer sans montrer une accélération du recul. Des travaux portant sur les impacts des SRP sur le déplacement du trait de côte, menés sur la Gold Coast (Australie) par Mac Donald et Patterson (1984), à Hawaï par Wiegel (2002) et en Virginie par Jones et Basco (1996) montrent des résultats similaires, c'est-à-dire une stabilisation du trait de côte protégé, contre un recul significatif des parties non protégées du trait de côte. Par ailleurs, il est bien connu que la vitesse de déplacement du trait de côte est fortement influencée par la fréquence et l'intensité des tempêtes (Blaise et al., 2015). Le régime des courants littoraux peut également favoriser l'arrachement de sédiments dans certaines parties de la côte et leur déposition dans d'autres, ce qui a un impact sur l'évolution du trait de côte adjacent (Brown et al., 2011). L'énergie des vagues et l'amplitude des marées sont deux autres facteurs qui déterminent le degré d'exposition du trait de côte aux processus d'érosion ou d'accumulation (Drapeau, 1992). Dans le segment ouest, les affleurements du substratum rocheux constituent une barrière naturelle qui dissipe partiellement l'énergie des vagues avant que celles-ci n'atteignent la côte. De plus, l'orientation du trait de côte par rapport aux principaux fetchs, couplée à des marées microtidales, fait que les processus d'érosion sont surtout présents lors des tempêtes. Ainsi, la côte entre Nigadoo et Beresford est sous influence des vagues de faible énergie grâce aux affleurements du substratum rocheux et à une couverture glacielle en hiver. Ces vagues de faible énergie sont donc à l'origine d'une dérive littorale constructive, mais la présence des SRP semble perturber la distribution naturelle des sédiments le long des plages. Ce qui pourrait expliquer les faibles taux de recul du trait de côte noté dans ce segment. D'une part, certains enrochements très larges (jusqu'à 13 m par endroit) et très avancés vers la mer agissent comme des épis en bloquant partiellement le transit sédimentaire (Tove et Wang, 1990 ; Basco, 2006). Ce phénomène peut même conduire à la formation d'une plage de poche protectrice, en moyenne deux fois plus large que les autres plages naturelles, là où une section de côte naturelle se trouve encaissée entre deux sections rigidifiées proéminentes (figure 11). D'autre part, les sédiments remobilisés au droit des SRP, à la suite d'une augmentation de la turbulence des courants par des processus de réflexion, sont redéposés en aval dérive de la SRP quand la compétence du courant diminue (Birkemeier, 1980). Ce qui pourrait d'ailleurs expliquer l'absence d'effets de bout de mur le long du segment ouest. Cette situation exige cependant que l'énergie des vagues soit généralement modérée et que les sédiments soient abondants dans toutes les parties de la cellule littorale. Toutefois, un projet de recherche sur les impacts SRP mené le long de quatre sections de côte du Nouveau-Brunswick, notamment à la pointe Carron à Bathurst, a démontré qu'un effet de bout de mur ou de l'érosion aux extrémités du mur avait été noté sur cette dernière seulement au lendemain de la grande tempête du 6 décembre 2010 (Jolicoeur et al. 2018).

- 35 Dans le segment est, le trait de côte en bordure de la route principale de Salmon Beach montre une stabilité au cours de la période 1934-1985, en raison de la mise en place de la SRP visant à limiter les effets directs des vagues de tempête et des poussées glacielles sur cette infrastructure vitale pour la communauté. Dans le cas des sections demeurées naturelles, le trait de côte montre une accélération du recul durant cette période, sauf le long des flèches et estuaires. Au cours de la période suivante (1985-2012), plusieurs SRP ont été mises en place et assurent la stabilité du trait de côte. En revanche, dans les sections non protégées adjacentes le recul du trait de côte est soutenu et devient plus rapide à plusieurs endroits, en particulier à Salmon Beach Ouest (unités I et III), mais aussi à Salmon Beach Est (unité I). Cela s'explique par le fait que les SRP ont emprisonné une partie des sédiments qui devrait servir à alimenter les zones en érosion, entraînant ainsi un déficit sédimentaire qui favorise une accélération de l'érosion des plages naturelles adjacentes. Ces résultats rappellent ceux de plusieurs des projets de recherche, dont Niang-Diop (1995) à Rufisque (Sénégal), Fletcher et al. (1997) à Oahu (Hawaï), Miles et al. (2001) à Sprey Point (Royaume-Uni), Valantin et Gourbil (2005) dans les bassins du Rhône et de la Méditerranée (France) et Bernatchez et al. (2008a) à Maria au Québec (Canada), ou le long de falaises du Royaume-Uni dont Brown et al. (2012) à Holderness et Brown et al. (2014) à Christchurch Bay. Dans le segment est, les vagues sont plus turbulentes et martèlent la côte une bonne partie de l'année en raison des vents d'ouest dominants. Ces vagues de plus forte énergie, couplées à l'influence négative des enrochements qui favorisent une plus grande turbulence frontale, pourraient être à l'origine de ces reculs accélérés. Cependant, comme le long du segment ouest, l'énergie de ces vagues est insuffisante pour occasionner des effets de bout de mur le long du segment est. D'après Wang et al. (2016), les effets de bout de mur se forment essentiellement en aval dérive des SRP situées dans un environnement côtier soumis à l'influence des vagues dont l'énergie est suffisamment forte et l'angle d'incidence par rapport à la côte permet la formation d'un vortex en aval dérive des SRP. Ce vortex est à l'origine de la mobilisation des sédiments qui se traduit par un creusement en forme de croissant de la plage à l'extrémité du mur. Par ailleurs, les études portant sur les falaises meubles indiquent que la quantité de sédiments accumulés au pied de celles-ci est corrélée à leur vitesse de recul : plus les sédiments sont abondants, plus le pied est protégé de l'action érosive des vagues, moins les taux de recul des falaises sont élevés (Lee, 2008 ; Brooks et Spencer, 2010 ; Carpenter et al., 2015). Les travaux de terrain effectués le long du segment est, en 2018, ont permis de constater que les falaises sont constituées en majeure partie de sédiments fins, soit des argiles ou silts possiblement associés à des tills. La nature de ces dépôts et la présence de nombreuses SRP semblent donc diminuer la quantité de sédiments plus grossiers, c'est-à-dire des sables, graviers ou blocs, disponibles pour alimenter les plages et protéger le pied des falaises adjacentes. Cette situation pourrait expliquer pourquoi les taux de recul ont été plus prononcés à certains endroits depuis 1985.
- 36 Il est aussi intéressant de constater que, dans le secteur de Salmon Beach Est (unité III), les sections de côte demeurées naturelles montrent une nette avancée au voisinage du quai de pêche de Millerbrook, en raison de l'influence positive de l'épi où s'accumulent les produits de la dérive littorale en provenance de l'ouest. Par contre, dans les sections rigidifiées situées à quelques centaines de m à l'ouest de cet épi, le trait de côte montre une stabilité par rapport à sa position en 1985, probablement en raison de la mise en place des SRP. Enfin, dans la partie centrale des secteurs de Salmon Beach Ouest (unité II) et est (unité II), le trait de côte qui est partout non rigidifié, connaît une évolution

semblable au cours des deux périodes étudiées, montrant une grande stabilité le long des estuaires, probablement en raison de l'effet de protection de la flèche littorale.

- 37 En plus de perturber le déplacement naturel du trait de côte, les SRP ont entraîné d'importantes pertes de superficies de plage le long des segments ouest et est. En effet, ces SRP recouvraient 18 % des plages du segment ouest en 2018 et de 32 % de celles du segment est en 2012. Au total, 25 % des plages de la zone à l'étude sont inutilisables parce que recouvertes par des SRP. Des constats similaires ont été faits dans le sud-est du Nouveau-Brunswick (Environnement Canada, 2006) et au Québec (Leclerc, 2010 ; Bernatchez et Fraser, 2012). Par exemple, sur le littoral entre St-Thomas et le cap des Caissie, le long du détroit de Northumberland, la superficie des plages s'est maintenue entre 1944 et 1973, mais a été réduite de près de 60 % entre 1973 et 2001 avec l'ajout de nombreuses SRP. Ces dernières ont aussi aggravé une crise sédimentaire déjà présente depuis quelques siècles en limitant l'érosion des falaises et la libération de nouveaux sédiments.
- 38 Que ce soit dans le segment est ou le segment ouest, le rétrécissement des plages peut être associé à la mise en place des SRP. L'empiétement de celles-ci sur les plages, couplé au recul de la zone riveraine dans un contexte de montée du niveau marin, explique ce phénomène (Griggs et Tait, 1988 ; Bernatchez et Fraser, 2012). Une étude récente sur la migration des écosystèmes côtiers a d'ailleurs démontré que, si aucune mesure n'est prise, jusqu'à 74 % des plages pourraient disparaître d'ici la fin du siècle le long des littoraux urbanisés du nord et de l'est du Nouveau-Brunswick (Bernatchez et al., 2016). De plus, l'empiétement des SRP sur les plages emprisonne d'importantes quantités de sédiments (Jones et Basco, 1996), ce qui affecte le bilan sédimentaire des plages (Grenier, 1993 ; Bernatchez et al., 2008a). Dans la cellule littorale de Grande-Digue dans le sud-est du Nouveau-Brunswick, c'est environ 135 000 m³ de matériaux qui ont été soustraits du bilan sédimentaire entre 1944 et 2011 en raison des travaux de rigidification du trait de côte (Ka, 2018). Additionnellement, devant les SRP, la turbulence induite par l'interaction houle/structure augmente la capacité de remobilisation et de transport des sédiments par les courants (Kriebel et al., 1986 ; Kriebel, 1987 ; Griggs et Tait, 1988 ; Tait et Griggs, 1990 ; Miles et al., 2001 ; Elbisy, 2006). Il s'ensuit un creusement et un abaissement des plages au droit des SRP comme cela a été mesuré sur le littoral voisin de la Pointe Carron (Jolicoeur et al., 2018).
- 39 Dans le cas des plages naturelles des sites étudiés, puisque le trait de côte n'est pas fixé, il peut, sous l'effet de l'érosion, migrer vers l'intérieur des terres. Cela permet aux plages de conserver un volume sédimentaire et une largeur adaptée à l'hydrodynamisme. Par conséquent, cela augmente leur capacité à absorber partiellement ou totalement l'énergie des vagues (Crapoulet et al., 2007). De plus, les échanges de matériaux entre la haute-plage et l'estran sont plus efficaces pour mieux compenser les pertes en sédiments. Cela pourrait expliquer pourquoi les plages non protégées sont plus larges et plus élevées que les celles qui sont recouvertes d'une SRP.

Conclusion

- 40 Les travaux de rigidification effectués au cours des dernières décennies en vue de freiner l'érosion et protéger les infrastructures côtières ont influencé le déplacement du trait de côte de la Commission de Services régionaux Chaleur. Dans le segment ouest, les sections de côte rigidifiées se sont stabilisées, alors que celles naturelles

adjacentes ont continué de reculer de manière substantielle sans toutefois montrer une accélération. Dans le segment est, par contre, les plages naturelles non protégées montrent une accélération du recul. Les résultats de ce projet de recherche ont aussi confirmé l'influence des SRP sur la morphologie des plages. En effet, de telles structures réduisent la largeur et l'élévation des plages situées directement devant. De plus, elles entraînent une perte d'habitats naturels et une réduction du potentiel d'utilisation récréative. Avec la hausse du niveau marin et l'urbanisation galopante du littoral, de plus en plus de communautés seront exposées aux risques d'érosion et voudront avoir recours à la rigidification du trait de côte surtout dans les secteurs du segment est où une accélération du recul du trait de côte a été notée. Ce qui pourrait aboutir à une rigidification de l'ensemble du trait de côte d'ici aux prochaines décennies. Il s'avère dès lors important de prendre en compte les effets des SRP dans la gestion du territoire côtier.

Remerciements

- 41 Nos sincères remerciements vont à Jim Walker, Nicole Hatheway, Marc Desrosiers, aux autres membres du bureau des Études géologiques du Nouveau-Brunswick à Tétagouche Nord pour l'accueil et le soutien inestimable apportés et à Stéphane O'Carroll pour le soutien et les conseils apportés. Cette recherche a bénéficié d'une subvention du Fonds en fiducie pour l'Environnement du Nouveau-Brunswick et de certains fonds de l'université de Moncton, campus de Shippagan.

BIBLIOGRAPHIE

- Atkinson, D. E., D. L. Forbes et T.S. James, 2016, Un littoral dynamique dans un contexte de climat en mutation, dans *Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, T.S. James, C. Mercer Clarke (éd.); Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), pp. 27-68
- Balaji, R., S. Sathish Kumar, et A. Misra, 2017, Understanding the effects of seawall construction using a combination of analytical modelling and remote sensing techniques: Case study of Fansa, Gujarat, India. *International journal of Ocean and Climate Systems*, 8, 3, pp. 153-160
- Basco, D. R., 2006, Seawall impacts on adjacent beaches: Separating fact from fiction. *Journal of Coastal Research*, SI 39 Proceedings of the 8th International Coastal Symposium, pp. 741-744
- Bernatchez, P., C. Fraser, et D. Lefavre, 2008, Effets des structures rigides de protection sur la dynamique des risques naturels côtiers: érosion et submersion; *4e Conférence canadienne sur les géorisques*, Université Laval, QC, Canada, pp. 487-494
- Bernatchez, P., C. Fraser., 2012, Evolution of coastal defence structures and consequences for beach width trends, Québec, Canada. *Journal of Coastal Research*, 28, 6, pp. 1550-1566.
- Bernatchez, P., S. Drejza, et S. Dugas, 2012, *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, 92 p.

Bernatchez, P., S. Jolicoeur, C. Quintin, J.-P. Savard, M. Corriveau, S. O'Carroll, D. Bérubé, M. Garneau, G. L. Chmura, T. Nguyen-Quang, C. K. Lieou, D. Torio, L. Van Ardenne, H. Sammari, et M. St-Pierre, 2016, *Impacts des changements climatiques et des contraintes physiques sur le réajustement des écosystèmes côtiers (coastal squeeze) du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent (GESL) et évaluation des mesures d'atténuation de ces impacts*, Rapport de recherche remis à Ouranos et Ressources naturelles Canada, mars 2016, 189 p.

Birkemeier, W. A., 1980, *The effect of structures and lake level on bluff and shore erosion in Berrigen County, Michigan, 1970-74*, Coastal Engineering Research Center, Miscellaneous Report No. 80-2, US Army Corps of Engineers, 74 p.

Blaise E., S. Sunaez, P. Stephan, B. Fichaut, L. David, V. Cuq, R. Autret, J. Houtron, M. Rouan, F. Floc'h, F. Arduin, R. Cancouët, R. Davidson, S. Costa, et C. Delacourt, 2015, Bilan des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la dynamique de recul du trait de côte en Bretagne, *Géomorphologie, relief, processus, environnement* 21, 3, pp. 267-292. DOI:10.4000/geomorphologie.11104

Boak, E. H., I. L. Turner, 2005, Shoreline Definition and Detection: A Review, *Journal of Coastal Research* 21, 4, pp. 688-703. doi.org/10.2112/03-0071.1

Bonnot-courtois, C., J. E. Levasseur, 2003, Recherche d'indicateurs "naturalistes" de la limite supérieure du domaine maritime, *Cahiers Nantais*, 59, pp. 47-56.

Brooks, S. M., T. Spencer, 2010, Temporal and spatial variations in recession rates and sediment release from soft rock cliffs, Suffolk coast, UK. *Geomorphology* 124, 1-2, pp. 26-41 <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.08.005>

Brown, S., E. M. Barton et J. R. Nicholls, 2014, Shoreline response of eroding soft cliffs due to hard defences, *Maritime engineering*, 167, 1-14 <http://dx.doi.org/10.1680/maen.11.00026>

Brown, S., E. M. Barton et J.R. Nicholls, 2012, The effect of coastal defences on cliff top retreat along the Holderness coastline, *Proceedings of the Yorkshire geological society* 59, 1, pp. 1-13 doi: 10.1144/pygs.59.1.288

Brown, S., E. M. Barton et J.R. Nicholls, 2011, Coastal retreat and or advance adjacent to defenses in England and Wales, *Journal of coastal conservation*, pp. 659-670

Carpenter, N. E., M. E. Dickson, M. Walkden, R. J. Nicholls et W. Powrie, 2015, Lithological controls on soft cliff plan shape evolution under high and low sediment availability, *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, pp. 840-852 <https://doi.org/10.1002/esp.3675>

Crapoulet, A., A. Héquette, F. Levoy et P. Bretel, 2007, Évaluation de l'évolution du trait de côte et du bilan sédimentaire littoral en baie de Wissant (nord de la France) par LiDAR aéroporté, *Géomorphologie* 21, 4, pp. 313-330 <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11146>

Davidson-Arnott, R. G. D., J. Ollerhead, 2011, *Coastal erosion and climate change. Report prepared for the PEI*, Department of Environment, Labour and Justice, 41 p.

Diouf, S., 2015, *Évolution morphosédimentaire du littoral de Saly Portudal dans un contexte d'installation de Brise-lames*, Mémoire de master, Université de Dakar, 65 p.

Dong, P. et H. Chen, 1999, A probability method for predicting time-dependent long-term shoreline erosion, *Coastal Engineering*, 36, 3, pp. 243-261

Douglas, B. C., M. Crowell, 2000, Long-term Shoreline Position Prediction and Error Propagation, *Journal of Coastal Research* 16(1), pp. 145-152

- Drapeau, G., 1992, Dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent, *Géographie physique et Quaternaire* 46, 2, pp. 233-242, DOI: <https://doi.org/10.7202/032907ar>
- Dugan, J. E., D. M. Hubbard, I. F. Rodil, D. L. Revell, et S. Schroeter, 2008, Ecological effects of coastal armoring on sandy beaches, *Marine Ecology* 29, pp. 160-170
- Elbisy, M., 2006, Bed changes at the toe of inclined seawalls. *Ocean engineering* 34, 2007, pp. 510-517, doi: 10.1016/j.oceaneng.2006.02.006
- Environnement Canada, 1982, Normales climatiques du Canada 1951 – 1980. Programme climatologique canadien, 283 p., [en ligne] URL : http://publications.gc.ca/collections/collection_2019/eccc/En56-60-2-1982.pdf
- Environnement Canada, 2006, *Impacts de l'élévation du niveau de mer et du changement climatique sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick*, Ottawa, Environnement Canada, 644 p., [en ligne] URL <http://publications.gc.ca/collections/Collection/En84-45-2006F.pdf>
- Faye, I., F. Gourmelon et A-T. Diaw, 2008, Évolution du trait de côte à Nouakchott (Mauritanie) de 1954 à 2005 par photointerprétation. *Norois*, 208, pp. 11-27, <https://doi.org/10.4000/norois.2146>
- Ferreira O., T. Garcia, A. Matias, R. Tabordac, et J.A. Dias, 2006, An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores, *Continental Shelf Research*, 26, pp. 1030-1044
- Fletcher, C. H., R. A. Mullane, et B. M. Richmond, 1997, Beach loss along armored shorelines on Oahu, Hawaiian Islands, *Journal of Coastal Research* 13, 1, pp. 209-215
- Frihy, O. E., S. M., Shereet, et M. M. El banna, 2008, Pattern of beach erosion and scour depth along the Rosetta promontory and their effect on the existing protection works, Nile Delta, Egypt, *Journal of coastal research* 24, 4, pp. 857-866
- Fytte, L. R., D. Richard, 2007, *Carte lithologique du Nouveau-Brunswick. Direction des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick. Direction des ressources minérales*, Division des politiques et de la planification, Planche 2007-2018
- Geonb, 2020, Base de données sur l'érosion côtière du Nouveau-Brunswick, Site visité en février 2020, [en ligne] URL : <http://geonb.snb.ca/erosion/index.html>
- Grenier, A., 1993, *Évolution littorale récente et impact des structures artificielles aux Îles de la Madeleine, golfe du Saint-Laurent, Québec*. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 275 p.
- Griggs G. B., J. F. Tait, 1988, The effects of Coastal protection structures on beaches along northern Monterey Bay, California, *Journal of Coastal Research*, 4, pp. 93-111.
- Hapke C. J., D. Reid, 2007, National assessment of shoreline change, Part 4: historical coastal cliff retreat along the California coast. U.S. Geological Survey, Open file Report 2007-1133, 51 p., [en ligne] URL <https://pubs.usgs.gov/of/2007/1133/of2007-1133.pdf>
- Hegde, A. V., 2010, Coastal erosion and mitigation methods-Global state of art, *Indian journal of Geo-Marine Sciences*, 34, 4, pp. 521-530
- Himmelstoss, E. A., R. E. Henderson, M.G. Kratzmann, et A.S. Farris, 2018, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S., *Geological Survey Open-File Report*, 2018-1179, 51 p.
- Hsu J. R. C., C. Evans, 1989, Parabolic bay shapes and applications, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 87, 4, pp. 557-570

- Hsu J. R. C., M. J. Yu, F. C. Lee et L. Benedet, 2010, Static bay beach concept for scientists and engineers: A review, *Coastal Engineering*, 57, 2, pp. 76–91. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.09.004>
- Hsu J. R. C., R. Silvester et M. Asce, 1996, Stabilizing beaches downcoast of harbor extensions. *Coastal Engineering*, 25, pp. 3986-3999, [en ligne] URL : <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a087262.pdf>
- Hunter, G., 1975, Beach resources, estern New-Brunswick. Toronto Airphoto analysis associates, 205 p.
- IPCC, 2012, *Summary for Policymakers. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, P. M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 3-21
- Jamal, E., E. Abdellaoui., et A. Ozer, 2007, Étude diachronique et historique de l'évolution du trait de côte de la baie de Tanger. *Téledétection* 7, 1-2-3-4, pp. 157-171
- Jolicoeur, S., D. Bérubé, 2017, *Production d'un indice de vulnérabilité côtière pour le Nouveau-Brunswick*, Rapport préparé par l'Université de Moncton et le Ministère du Développement de l'Énergie et des Ressources du Nouveau-Brunswick pour le Fonds en Fiducie pour l'Environnement du Nouveau-Brunswick, 22 p.
- Jolicoeur, S., M. Desrosiers, et D. Bérubé, 2018, Changements dans l'élévation de la plage à la Pointe Carron sur la côte nord du Nouveau-Brunswick selon les relevés RTK-GPS de 2008 (17 novembre versus 17 octobre), 2009 (20 novembre versus 22 octobre) et 2010 (07 décembre versus 08 octobre), Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick; Division des terres, des minéraux et du pétrole, Planches : 2018-1A, 2018-1B, 2018-1C
- Jones, B. N., D. R. Basco, 1996, Seawall effects on historically receding shorelines, *Coastal Engineering Proceedings* 1, 25, pp. 1985-1997
- Ka, P., 2018, *Étude des causes de la déstabilisation de la flèche littorale de grande-digue et des facteurs à considérer dans un projet de restauration*, Thèse de maîtrise, Université de Moncton, 174 p.
- Kraus, N. C., 1988, The Effects of Seawalls on the Beach: An Extended Literature Review, *Journal of Coastal Research*, 4, pp. 1-28
- Kriebel, D. L., 1987, Beach recovery following hurricane Elena, *Proceeding Coastal Sediments* 87, 1987, pp. 990-1005.
- Kriebel, D. L., W. R. Dally, et R.G. Dean, 1986, *Beach profile response following severe erosion events*, Coastal and Oceanographic Engineering Department. University of Florida, pp. 2434-244
- Lavoie, D., 1997, *Réponse hydrodynamique de la baie des Chaleurs au passage d'une forte tempête*, Thèse de doctorat, Université du Québec à Rimouski, 171 p.
- Leclerc, A. M., 2010, *Ouvrages de protection du littoral : effets sur la morphologie des plages et sur les communautés benthiques intertidales, région de Saint-Siméon et de Bonaventure, baie des Chaleurs (Québec, Canada)*, Mémoire de maîtrise université du Québec à Rimouski, 141 p.
- Lee, E. M., 2008, Coastal cliff behavior: observations on the relationship between beach levels and recession rates, *Geomorphology* 101, 2008, pp. 558-571 <https://doi:10.1016/j.geomorph.2008.02.010>

Long, B., 2005, Étude hydrodynamique, sédimentologique et biologique des sites de Maria, Saint-Siméon, Bonaventure, Newport et Cap d'Espoir dans la baie des Chaleurs, Québec, Canada, Ministère des Transports du Québec. Contrat 3100- 00-QH02, 21 p.

Lozano, I., R. J. N. Devoy, W. May, et U. Anderson, 2004, Storminess and vulnerability along the Atlantic coastlines of Europe: Analysis of storm records and of a greenhouse gas induced climate scenario, *Marine geology*, 210, pp. 205-225 <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.05.026>

Mac Donald, H. V., D.C. Patterson, 1984, *Beach response to coastal works Gold Coast, Australia, Proceeding of the 19th Coastal Engineering Conference*, September 3-7, 1984, Houston Texas, pp 1522-1538

Miles, J. R., P. E. Russel, et D. A. Huntley, 2001, Field measurement of sediment dynamics in front of a seawall, institute of Marine Studies University of Plymouth, *Journal of Coastal Research*, 17, 1, pp. 195-206

Moore, L. J., 2000, - Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 16, 1, pp. 111-124

Moore, L. J., G. B. Griggs, 2002, Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary, *Marine Geology*, 181, 1-3, pp. 265-283

Niang-Diop, I., 1995, L'érosion sur la petite côte du Sénégal à partir de l'exemple de Rufisque. Thèse de doctorat. Université D'Angers, 157 p.

Parker, B., 2001, Where is the shoreline? The answer is not as simple as one might expect, *Hydro International*, 5, 5, pp. 6-9

Parks, G. S., G. K. Manson, R. Chagnon et L. A. Ketch, 2016, *Climatologie - Ondes de tempête, Vents, Vagues et Glace. Dans Le littoral maritime du Canada face à l'évolution du climat*, Lemmen, D. S., Warren, F. J., James, T. S. et Mercer Clarke, C. S. L. (éditeurs); Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), pp. 101-233

Paxion, K., O. Cohen, 2002, La baie de Wissant : cent ans d'évolution du rivage, *Mappemonde*, 67, 3, pp. 24-27

Priest, G. R., 1999, Coastal shoreline changes study northern and central Lincoln county, Oregon, *Journal of Coastal. Research*, 28, pp. 140 - 157

Rampton, V. N., 1984, Géologie des formations en surface, Nouveau-Brunswick, Commission géologique du Canada. Carte 1594A

Robin M., 2002, Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique, dans Baron-yelles, N., L. Goeldner-gianella, S. Velut (éd.) : *Le littoral, regards, pratiques et savoirs. Editions Rue d'Ulm*, Presses universitaires de l'Ecole Normale Supérieure, Paris, pp. 95-115.

Service canadien des glaces, 2020, *Atlas climatique des glaces de mer, côte est du Canada de 1981 à 2010*, Ministère des travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 250 p.

Tait J. F., G. B. Griggs, 1990, Beach response to the presence of a seawall, *Shore and Beach*, 58, 2, pp. 11-28

Tait, J. F., G. B. Griggs, 1991, *Beach Response to the Presence of a Seawall; Comparison of Field Observations*, Washington, DC: US Army Corps of Engineers, 39 p.

Thieler, E. R., W. W. Danforth, 1994b, Historical shoreline mapping II: Application of the digital shoreline mapping and analysis systems (DSMS/DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico, *Journal of Coastal Research* 10, 3, pp. 600-620.

Tove, T., H. Wang, 1990, Three dimensional effects of seawall on the adjacent beach, Proceedings, 22nd International Conference on Coastal Engineering, ASCE, NY, pp. 2785-2795

Valantin P.-Y., C. Gourbil, 2005, *Connaissance et gestion de l'érosion du littoral*, Guide technique préparé pour le secrétariat du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin Rhône-Méditerranée-Corse, 52 p.

Wang, D., S. Li, et H. Gen, 2016, ISPH Simulation of Scour Behind Seawall Due to Continuous Tsunami Overflow, *Coastal Engineering Journal*, 58, 3, pp. 1-23

Wiegel R. L., 2002, Seawalls, seacliffs, beach rock: what beach effects? part2. *Shore and beach*, 70, 1, pp. 28-39

Zaninetti, J. M., 2008, Le peuplement de la terre se concentre-t-il sur les littoraux ? *Population & Avenir* vol. 4, n°689, pp 14-16

ANNEXES

Tableau 1

Typologie des structures rigides de protection côtière.

Secteur	Typologie des structures rigides de protection côtière (SRP)			
	Enrochement		Mur (béton et bois)	
	Nombre	(%)	Nombre	(%)
Nigadoo	20	87	3	13
Beresfrod nord	30	55	25	45
Salmon Beach ouest	7	100	0	0
Salmon Beach est	13	100	0	0

Tableau 2

Superficie de plage occupée par les SRP.

Secteur	Superficie (m ²)		
	Plage état naturel	Structure de protection	Superficie perdue (%)
Nigadoo	31363	7263	23 %
Beresford nord	24799	3089	12 %
Sous-total	56162	10352	18 %
Salmon Beach ouest	28882	10808	37 %

Salmon Beach est	25302	6768	27 %
Sous total	54184	17576	32 %
Total	110346	27928	25 %

Tableau 3

Caractéristiques morphologiques des plages naturelles et rigidifiées.

Site	État de la côte	Plage du segment ouest (O_1-O_5)		Plage du segment est (E_1-E_5)	
		Largeur (m)	Élévation (m)	Largeur (m)	Élévation (m)
Été 2018					
O_1/E_1	Naturelle	7,5	2,3	16,0	2,1
	Rigidifiée	4,8	1,1	3,5	0,4
O_2/E_2	Naturelle	13,4	2,8	14,3	2,5
	Rigidifiée	3,0	1,2	2,7	2,2
O_3/E_3	Naturelle	11,4	2,4	11,9	2,3
	Rigidifiée	2,1	1,3	3,9	1,2
O_4/E_4	Naturelle	10,2	2,7	10,8	2,2
	Rigidifiée	9,1	1,8	2,3	1,8
O_5/E_5	Naturelle	17,2	2,5	9,1	1,8
	Rigidifiée	12,5	2,8	6,8	1,5
Moyenne	Naturelle	11,9	2,6	11,8	2,2
	Rigidifiée	6,3	1,4	3,8	1,4
Printemps 2019					
O_1/E_1	Naturelle	NA	2,6	NA	1,9
	Rigidifiée	NA	1,0	NA	1,1
O_2/E_2	Naturelle	NA	2,9	NA	2,5
	Rigidifiée	NA	1,2	NA	0,2
O_3/E_3	Naturelle	NA	2,3	NA	2,5

	Rigidifiée	NA	1,3	NA	0,6
O_4/E_4	Naturelle	NA	3,1	NA	2,0
	Rigidifiée	NA	1,6	NA	1,8
O_5/E_5	Naturelle	NA	2,8	NA	1,9
	Rigidifiée	NA	2,8	NA	1,3
Moyenne	Naturelle	NA	2,7	NA	2,2
	Rigidifiée	NA	1,6	NA	0,9

RÉSUMÉS

En raison de l'érosion côtière, les structures rigides de protection (SRP) sont devenues particulièrement nombreuses sur le territoire de la Commission de Services régionaux Chaleur, ce qui pose la nécessité de mesurer leurs impacts sur ce littoral. Pour cela, les techniques de la photogrammétrie ont été utilisées sur quatre sites. Dans un premier temps, le déplacement historique du trait de côte a été mesuré entre 1934-1985 et entre 1985-2012/2018. Ensuite, la superficie de plage occupée par les SRP a été quantifiée. Finalement, des levés topographiques sur la morphologie des plages ont été réalisés. Les résultats montrent que les SRP représentent en moyenne 54 % du trait de côte de la région d'étude. Les parties rigidifiées du trait de côte deviennent fixes, alors que les parties naturelles adjacentes montrent globalement une accélération du recul. Les SRP recouvrent 23 % des plages de Nigadoo, 12 % de celles de Beresford Nord, 37 % de celles de Salmon Beach Ouest et 27 % de celles de Salmon Beach Est. Finalement, il a été constaté que les plages rigidifiées sont en moyenne deux à quatre fois moins larges que les plages naturelles et présentent les plus faibles élévations du haut estran.

Hard coastal defences (HCD) have multiplied in the last few decades on the Chaleur Regional Service Commission area, a situation that requires the assessment of their effects on coastal processes and features. In this study, photogrammetric techniques were used to make an accurate appraisal of impacts. Firstly, historical coastline change was measured for two periods: 1934-1985 and 1985-2012/2018. Secondly, beach surface occupied by HCD was quantified. Finally, topographic surveys on beach morphology were carried out. Results show that HCD represent 54 % of the study area coastline. The hardened sections of the coastline become fixed, while adjacent natural sections globally an accelerated retreat. HCD cover 23 % of beaches in Nigadoo, 12 % in Beresford, 37 % in Salmon Beach west and 27 % in Salmon Beach Est. Finally, it was found that the hardened beaches are on average two to four times less wide than natural beaches and present the lowest foreshore elevations.

INDEX

Mots-clés : photogrammétrie, rigidification du trait de côte, structure rigide de protection, Nouveau-Brunswick

Keywords : photogrammetry, coastline hardening, rigid protective structures, Nouveau-Brunswick.

AUTEURS

SIMON DIOUF

Géomorphologue côtier, Université de Moncton, campus de Moncton, 18 Av Antonine-Maillet, Moncton, Canada, courriel : Dioufsymon@gmail.com

DOMINIQUE BÉRUBÉ

Géomorphologue côtier, ministère provincial des Ressources naturelles et du Développement de l'Énergie, Direction des études géologiques, Nouveau-Brunswick, Canada, courriel : Dominique.Berube@gnb.ca

ANDRÉ ROBICHAUD

Professeur de géographie, Département de géographie, développement durable et zone côtière, Université de Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada, courriel : andre.j.robichaud@umoncton.ca