



Évolution historique et géomorphologique d'une plage anthropique urbaine : Le développement et la chute d'un système hydrosédimentaire résilient

Mémoire

Sydney Meury

Maîtrise en sciences géographiques - avec mémoire
Maître en sciences géographiques (M. Sc. géogr.)

Québec, Canada

© Sydney Meury, 2022

**Évolution historique et géomorphologique d'une
plage anthropique urbaine :
Le développement et la chute d'un système
hydrosédimentaire résilient**

Mémoire de maîtrise

Sydney W. Meury

Sous la direction de :

Patrick Lajeunesse, directeur de recherche



UNIVERSITÉ
LAVAL

Résumé

Les estuaires font partie des endroits les plus peuplés du monde et sont vastement transformés pour répondre aux activités humaines. Les pressions anthropiques générées par l'aménagement du territoire, les stratégies de gestion déficientes, le manque de communication et les approches décisionnelles non intégrées contribuent à exacerber la vulnérabilité du cadre bâti, des éco- et géosystèmes ainsi que des communautés littorales. L'érosion des côtes sableuses présente un défi significatif pour les municipalités de l'estuaire fluvial du Saint-Laurent (EFSL), lesquelles possèdent un littoral densément aménagé et peuplé. Les plages avec une morphogénèse anthropique sont par ailleurs davantage problématiques, car elles sont généralement plus sensibles à la dynamique hydrosédimentaire locale qui est aussi perturbée par les activités humaines. C'est le cas de l'Anse-Tibbits, située sur le littoral de la Ville de Lévis, qui a été remblayée au 19^e siècle pour recevoir des installations ferroviaires. En fait, depuis la seconde moitié du 20^e siècle, des mécanismes d'érosion ont dégradé ces structures désormais abandonnées et ont exposé un talus peu cohésif à cet aléa. Cette conjoncture a ultimement mené vers le développement d'une plage sableuse atypique au reste du littoral de Lévis, mais grandement apprécié des locaux pour ses aspects récréotouristiques. Par manque d'information sur les processus à l'œuvre sur les plages de l'EFSL, un enrochement a rapidement été mis en place en novembre 2020 afin d'éviter la perte potentielle d'infrastructures à proximité. En effet, peu de connaissances scientifiques portent sur la dynamique morpho-sédimentaire et sur la gestion appropriée de telles plages dans la littérature.

Les enjeux d'érosion dans l'EFSL sont bien connus des acteurs locaux, mais peu ont les outils pour comprendre la nature du problème, l'origine de ces enjeux et les interventions adéquates. En documentant de façon scientifique la transition historique d'un site ainsi que son régime de perturbations, il devient plus facile de prendre des décisions éclairées sur des aménagements riverains à court, moyen et long terme. Il est donc impératif de mettre en place un cadre théorique et juridique, afin d'encourager cette pratique et de limiter les décisions hâtives ou motivées par la peur. Cette étude tente de mieux comprendre la dynamique morpho-sédimentaire d'une plage anthropique en milieu estuarien froid, par l'entremise

d'une approche multisource de suivi des berges, afin de simplifier les prises de décisions en termes d'aménagements.

Abstract

Estuaries are among the most populated places in the world and are extensively transformed to accommodate human activities. Anthropogenic pressures from land use, poor management strategies and lack of communication contribute to the vulnerability of the built environment, eco- and geosystems, and coastal communities. Sandy shoreline erosion presents a significant challenge to the municipalities of the St. Lawrence Fluvial Estuary (EFSL), which have a densely developed and populated coastline. Beaches with anthropogenic morphogenesis are more problematic because they are generally more responsive to local hydrosedimentary dynamics that are also disturbed by human activities. This is the case of Anse-Tibbits, located on the shoreline of the City of Lévis, which was filled in during the 19th century to accommodate railway installations. In fact, since the second half of the 20th century, erosion mechanisms have degraded these now abandoned structures and have exposed a slope with little cohesion to this hazard. This situation ultimately led to the development of a sandy beach atypical of the rest of the Lévis coastline, but greatly appreciated by the locals. Due to a lack of information on the processes at work on the EFSL beaches, riprap was quickly installed in November 2020 to avoid the potential loss of nearby infrastructure. Indeed, there is little scientific knowledge on the morpho-sedimentary dynamics and appropriate management of such beaches in the literature.

Erosion issues in the EFSL are well known to local stakeholders, but few have the tools to understand the nature of the problem, the origin of these issues, and the appropriate interventions. By scientifically documenting the historical transition of a site and its disturbance regime, it becomes easier to make informed decisions on short-, medium- and long-term coastline development. It is therefore imperative that a theoretical and legal framework to be put in place to encourage this practice and to limit hasty or fear-driven decisions. This study attempts to better understand the morpho-sedimentary dynamics of an anthropogenic beach in a cold estuarine environment, through a multisource approach to shoreline monitoring, in order to simplify decision-making in terms of development.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract.....	iv
Table des matières	v
Liste des figures, tableaux, illustrations	vii
Liste des abréviations, sigles, acronymes	ix
Remerciements.....	xi
Avant-propos	xii
Introduction	1
Chapitre 1 : Suivi historique et géomorphologique d'une plage anthropique urbaine : Le développement et la chute d'un système morfo-sédimentaire résilient/ Historical and geomorphological monitoring of an anthropogenic urban beach: Rise and fall of a resilient system	9
1.1 Résumé	9
1.2 Abstract.....	11
1.3 Introduction	13
1.4 Zone d'étude.....	15
1.5 Méthodologie	18
1.5.1 Mouvement latéral du trait de côte 2D (DSAS).....	19
1.5.2 Analyse qualitative de la transition historique de l'Anse-Tibbits	21
1.5.3 Index d'événements majeurs potentiellement érosifs	22
1.6 Résultats.....	24
1.6.1 Évolution historique de l'Anse-Tibbits.....	24
1.6.1.1 Première phase d'aménagement au 19 ^e siècle.....	24
1.6.1.2 Deuxième phase d'aménagement au 19 ^e siècle	24
1.6.1.3 L'abandon du secteur par les industries.....	25
1.6.1.3 Transformation en parc urbain	25
1.6.1.4 Érosion et risque	29
1.6.2 Contexte sédimentaire.....	29
1.6.3 Déplacement latéral du trait de côte et exposition au vent	32
1.6.4 Événements majeurs potentiellement érosifs	34
1.6.4.1 Les niveaux d'eau	34
1.6.4.2 Événements hydrométéorologiques cumulés	34
1.7 Discussion	36

1.7.4 Modification physiographique du site	36
1.7.4 Régime de perturbations : le régime fluvio-estuarien froid	37
1.7.2.1 Les conditions hydrodynamiques à fetch limité	37
1.7.2.2 L'influence des processus glaciels	39
1.7.4 Régime de perturbations : les pressions anthropiques.....	40
1.7.3.1 Opportunisme et aménagements récréatifs successifs	40
1.7.4 La trajectoire hydrogéomorphologique de l'Anse-Tibbits.....	42
1.7.4.1 L'évolution de la résilience d'un milieu anthropique	42
1.7.4.2 Une approche holistique pour une gestion durable des environnements côtiers	44
1.8 Conclusion	47
Conclusions et perspectives	49
Bibliographie	51

Liste des figures, tableaux, illustrations

Figure 1 : (A) Localisation du Fleuve Saint-Laurent ; (B) L'estuaire du Saint-Laurent et ses divisions (Bernier et al., 2021)	2
Figure 2 : État des berges du fleuve Saint-Laurent fluvial. (A) Accent sur les berges artificielles et leur état de dégradation et (B) sur les berges naturelles et leur état. L'encadré rouge représente les terrasses de plages. (Bernier et al., 2021).....	3
Figure 3 : Éléments naturels et anthropiques qui peuvent induire de l'érosion sur des berges de rivières affectées par les glaces (Bernier et al., 2021).....	6
Figure 4 : Synthèse des processus, des facteurs de contrôle et de leurs interactions, lesquels agissent sur la dynamique d'un fleuve peuplé en milieu froid (Chassiot et al., 2020)	8
Figure 5 : (A) Localisation du site et données de vents dans la région d'étude dans l'EFSL ; les segments en jaune représentent les endroits où le trait de côte est artificialisé. (B) Plage de l'Anse-Tibbits, localisation des échantillons granulométriques et identification des structures anthropiques présent sur le site.....	17
Figure 6 : Transition historique de l'état de l'Anse-Tibbits suite aux diverses interventions entre 1854 et 2020 ; (A) Cartographie du chemin de fer traversant l'Anse-Tibbits ; (B) Remblai de l'anse pour l'agrandissement du terminus du Grand-Tronc ; (C) Abandon du secteur par les industries ; (D) Début des travaux pour l'aménagement de la piste cyclable des anses avant la déforestation pour les percées visuelles ; (E) L'Anse-Tibbits et sa plage à marée basse avant l'enrochement du talus ; (F) Enrochement du talus de la plage par la Ville de Lévis.....	27
Figure 7: Interventions et développement de l'anse au 20 ^e siècle ; (A) Le retrait des poutres des vestiges du chemin de fer en 1996 ; (B) La végétation ajoutée au sommet de l'Anse-Tibbits suite au retrait des poutres ; (C) Photographie aérienne de l'anse en 1950 exposant le début de la brèche dans la structure ferroviaire ; (D) Photographie aérienne de l'anse en 1962 et l'apparition d'accumulation sédimentaire ; (E) Photographie aérienne de l'anse en 1993 et développement des plages de l'anse.....	28
Figure 8 : Résultats de l'analyse granulométrique ; (A) Le talus en érosion d'où proviennent les échantillons représentés sur le graphique ; (B) L'enrochement recouvert de sable ; (C) La forte concentration de gravier dans le bas de la portion nord de la plage à la suite de l'enrochement de 2020 ; (D) Un exemple du pouvoir destructeur des glaces sur les structures anthropiques ; (E) Le talus de l'Anse-Tibbits et ses unités stratigraphiques ; (F) Distribution granulométrique des modes du talus (lignes pleines) et des échantillons de la plage (lignes pointillées).....	31
Figure 9: (Dessus) Taux de déplacements du trait de côte par période couverte par les photos aériennes disponibles pour la portion nord de la plage de l'Anse-Tibbits ; (Dessous) « Weighted linear regression (WLR) » de 1950 à novembre 2020 et fetch pondéré affectant la zone d'étude. ...	33
Figure 10: Fréquences des EMPes entre 1950 et 2020.....	35
Figure 11: Représentation schématique de l'évolution de la résilience/réponse de la plage de l'Anse-Tibbits au régime de perturbations de l'EFSL au niveau de la ville de Québec ; Les seuils représentent la capacité du système à maintenir son état ; La résilience représente la capacité d'un système à répondre à des perturbations qui peuvent entraîner un changement d'état ; Les pointillés rouges marquent les interventions de 1996 et 2001 ; (A) Correspond à l'enrochement mis en place en novembre 2020 ; (B) Représente l'alternative de délocaliser la piste cyclable et laisser le système évoluer sans intervention ; (C) Représente l'alternative d'une recharge de plage.	46

Tableau 1 : Facteurs contribuant à la présence et à la taille des plages dans les environnements à fetch limité (Nordstrom et Jackson, 2012).	4
Tableau 2 : Dates et incertitudes définies pour les divers jeux de données utilisées lors du calcul des taux de migrations latéraux du trait de côte de l'Anse-Tibbits.	21

Liste des abréviations, sigles, acronymes

BANQ : Banque des Archives Nationales du Québec

CGVD2013 : Canadian Geodetic Vertical Datum of 2013

CMQ : Communauté Métropolitaine de Québec

DSAS : Digital Shoreline Analysis System

EFSL : Estuaire fluvial du Saint-Laurent

EMPE : Événement Majeur Potentiellement Érosif

EPR : End Point Rate

G.M : Glace Mobile

GPS : Global Positioning System

MELCC : Ministère de l'Environnement et Lutte aux Changements Climatiques

MNS : Modèle Numérique de Surface

NAD83 UTM19 : National American Datum 1983 Universal Transverse Mercator 19

N.E : Niveau d'eau

PMSGM : Pleine Mer Supérieur Grande Marrée

PPK : Post-Processing Kinematic

SATP : Système d'Aéronef Télépiloté

USGS : United States Geological Survey

V \angle : Vent et direction

WLR : Weighted Linear Regression

ZIP : Zone d'Intervention Prioritaire

*« Toutes choses sont dites déjà ; mais comme
personne n'écoute, il faut toujours
recommencer. »
André Gide, 1891*

Remerciements

Un mémoire de maîtrise est un travail exigeant qui nécessite l'aide de nombreux collaborateurs, particulièrement en temps de pandémie. Il faut savoir prendre la critique, accepter de devoir recommencer certaines choses et toujours avancer dans la bonne direction, car un bon mémoire est un mémoire terminé.

Je tiens donc à remercier mon directeur de recherche Patrick Lajeunesse, professeur à l'Université Laval, pour son soutien moral et logistique, pour son intérêt, sa confiance et ses nombreux conseils. Ce travail n'aurait pas été possible sans son aide, ce qui m'a permis de me consacrer sagement à l'élaboration de mon mémoire. Merci de ta confiance.

Je remercie aussi Jean-François Bernier pour ses talents de technicien et de graphiste, son soutien scientifique, pour le temps qu'il m'a consacré pour répondre à mes nombreuses questions ainsi que pour le solide coup de main qu'il m'a donné dans l'encadrement de la rédaction de ce mémoire. Merci aux autres membres du laboratoire de géosciences marines : Léo Chassiot, Samuel Vaillancourt, Alexis Belko et tous les autres membres de l'équipe pour leurs supports, les encouragements et les discussions enrichissantes. Je tiens aussi à remercier Maxime Boivin (UQAC) et Pascale Roy-Léveillé (U.Laval), pour avoir accepté d'être membres de mon comité sans grand préavis. Merci à vous.

Finalement, merci à mes parents, mes amis et ma copine pour m'avoir supporté et écouté lors de ces deux dernières années. Vos encouragements m'ont permis d'avancer dans les moments difficiles et grâce à vous je termine aujourd'hui ce parcours ardu.

Bref, merci à tous ceux et celles qui ont travaillé de près ou de loin avec moi sur ce projet et j'espère que le contenu de ce mémoire sera vous satisfaire !

Merci !

Avant-propos

Dans le cadre du plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques, le ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MELCC) a financé deux projets spécifiques au tronçon fluvial du Saint-Laurent, visant à soutenir les municipalités confrontées aux aléas d'érosion et d'inondation. Dans le cadre d'un de ces projets, l'équipe du Laboratoire de géosciences marines du Département de géographie de l'Université Laval a mis sur pied une base d'informations géospatiales essentielle pour l'appréciation des risques liés à l'érosion des berges du tronçon fluvial du Saint-Laurent. À la suite de ce projet, le site de l'Anse-Tibbits est ressorti comme étant particulièrement intéressant au niveau géomorphologique et historique. Sa proximité avec l'Université Laval a permis à l'équipe d'utiliser ce site pour expérimenter une nouvelle méthode de suivi pour un second mandat avec le MELCC.

Pour ce second projet avec le MELCC, l'équipe a eu le mandat de réaliser la surveillance de plusieurs sites uniques afin de réaliser un portrait global et développer une méthode de suivi de l'érosion qui se produit dans la portion fluviale du fleuve Saint-Laurent. Ce mémoire s'articule donc autour de l'évaluation du site de l'Anse-Tibbits et du développement d'un protocole de suivi qui serait applicable à l'échelle du Saint-Laurent fluvial.

Le chapitre 1 de ce mémoire est composé d'un article en préparation qui n'a pas encore été soumis. Je suis l'auteur principal de cet article, mais j'ai bénéficié de l'encadrement de Patrick Lajeunesse et Jean-François Bernier, plus particulièrement pour l'élaboration de la problématique et de la rédaction, ce qui leur mérite le titre de coauteurs.

Introduction

Alors que 61% de la population mondiale réside en milieux côtiers (Alongi, 1998 ; Bianchi, 2007), les aléas d'érosion constituent un enjeu particulièrement important pour ces communautés, lesquelles subissent une exposition accrue à ce phénomène (Nordstrom et Jackson, 2012 ; Prahalad et al., 2015 ; Gonçalves et Henriques, 2015 ; Bernier et al., 2021). Initialement, l'amélioration des connaissances sur l'érosion est passée par de nombreuses études sur les processus naturels, ce qui a permis d'identifier certains des facteurs dominants pouvant être impliqués dans les dynamiques côtières, telles que les conditions hydrométéorologiques, la physiographie des littoraux, la végétation, etc. (Dean et Galvin, 1976 ; Troudes et Sérodes, 1988 ; Drapeau, 1992 ; Nordstrom et Jackson 2012 ; Short et Jackson, 2013 ; Balasubramanian, 2017). Toutefois, cette tendance semble se renverser avec l'avènement de l'Anthropocène qui pousse les chercheurs à se pencher davantage sur les facteurs de contrôle d'origine humaine, comme le batillage, l'aménagement du littoral, les exploitations de sédiments, qui participent eux aussi directement à l'évolution du littoral (Bernatchez et Dubois, 2006 ; Bernatchez et Fraser, 2012 ; Nordstrom et Jackson, 2012 ; Short et Jackson, 2013 ; Best, 2019). De plus, les travaux sur la dynamique des littoraux ont majoritairement été réalisés sur des milieux tempérés/chauds, alors que les connaissances sur les environnements affectés saisonnièrement par un couvert de glace demeurent disparates et ponctuelles (Lawler, 1986 ; Nordstrom et Jackson, 2012 ; Kessler et al., 2013 ; Chassiot et al., 2020). Ce manque de connaissances est encore plus prononcé dans les environnements froids densément peuplés, tels que l'estuaire du Saint-Laurent (Troudes et Sérodes, 1988 ; Drapeau, 1992). Les milieux estuariens ont des dynamiques qui les différencient des grands littoraux, principalement le fetch réduit (< 50 km) et l'aspect cloisonné qui caractérise ces environnements (Short et Jackson, 2013 ; Short et Jackson 2020, Didier et al., 2020). Ces géo-, éco- et anthroposystèmes sont donc vitaux sur le plan socio-économique et récréotouristique, tout en étant constitués d'habitats sensibles aux changements abrupts.

Avec une longueur de 1200 km, le fleuve Saint-Laurent constitue le troisième plus grand cours d'eau en Amérique du Nord (Matte et al., 2017) et l'une des plus grandes rivières affectées par les glaces au monde (Bernier et al., 2021). Divisé entre rivière, estuaire et golfe, le fleuve Saint-Laurent accueille 70 % de la population québécoise et s'étend des Grands

Lacs jusqu'à l'océan Atlantique (Hamel et Anne, 2000). L'estuaire du Saint-Laurent se divise en trois sections (1) l'EFSL, qui est la portion la moins documentée (Matte, 2014), (2) l'estuaire moyen et (3) l'estuaire maritime (Hamel et Anne, 2000) (Figure 1). La portion fluviale de l'estuaire du Saint-Laurent s'étire sur plus de 180 kilomètres (Matte et al., 2017) dont 40 % ont été artificialisés par des aménagements industriels ou pour accommoder la population qui y réside (Bernier et al., 2021). Ce secteur se distingue par sa topographie complexe, mariant îles, hauts-fonds, chenal maritime, ouvrages anthropiques, zones profondes et l'influence fluviale, qui tient son origine du lac Ontario et des nombreux tributaires du Saint-Laurent (Matte, 2014 ; Bernier et al., 2021). Les marées, les vagues et les glaces demeurent les principaux facteurs contrôlant la dynamique sédimentaire au sein de l'estuaire (Drapeau, 1992).

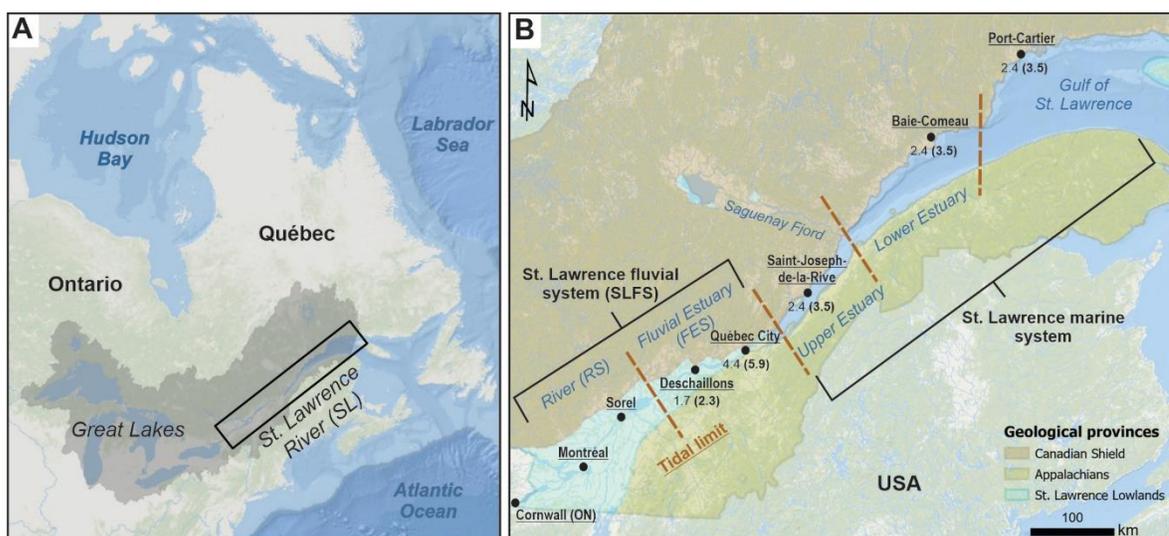


Figure 1 : (A) Localisation du Fleuve Saint-Laurent ; (B) L'estuaire du Saint-Laurent et ses divisions (Bernier et al., 2021)

Au cours des deux dernières décennies, plusieurs études ont porté sur l'évaluation de l'importance de l'érosion sur divers types de milieux littoraux dans les estuaires (Jackson et al., 2002 ; Prahalad et al., 2015 ; Gonçalves et Henriques, 2015 ; Chassiot et al., 2020). Parmi les constats, la nature du substrat a été identifiée comme un facteur majeur pour l'érosion, car moins il est cohésif, plus le milieu est sensible à l'érosion (Prahalad et al., 2015). Par conséquent, les plages et les remblais sont particulièrement sensibles à cet aléa étant donné leur nature généralement sableuse ou peu cohésive. De plus, l'impact croissant des changements climatiques sur cet aléa et sur la dynamique de ces milieux pourrait exacerber

les impacts de l'érosion sur ces systèmes (Rondeau-Genesse, 2020). Des études, comme celle de Drapeau (1992), Bernatchez et Dubois (2004) et Bernier et al. (2021), se sont attardées à quantifier et à relever l'état des berges, dont les milieux sableux, dans l'EFSL. Pour le secteur fluvio-estuarien, près de 50 % des terrasses de plages sont en érosion légère ou sévère (Figure 2). Bien que les plages ne soient pas les seules à être menacées, elles sont particulièrement importantes dans les régions densément peuplées, comme les estuaires, pour leurs fonctions récréotouristiques et d'exploitation (Vousdoukas et al., 2020a ; Vousdoukas et al., 2020b ; Jacob et al., 2021).

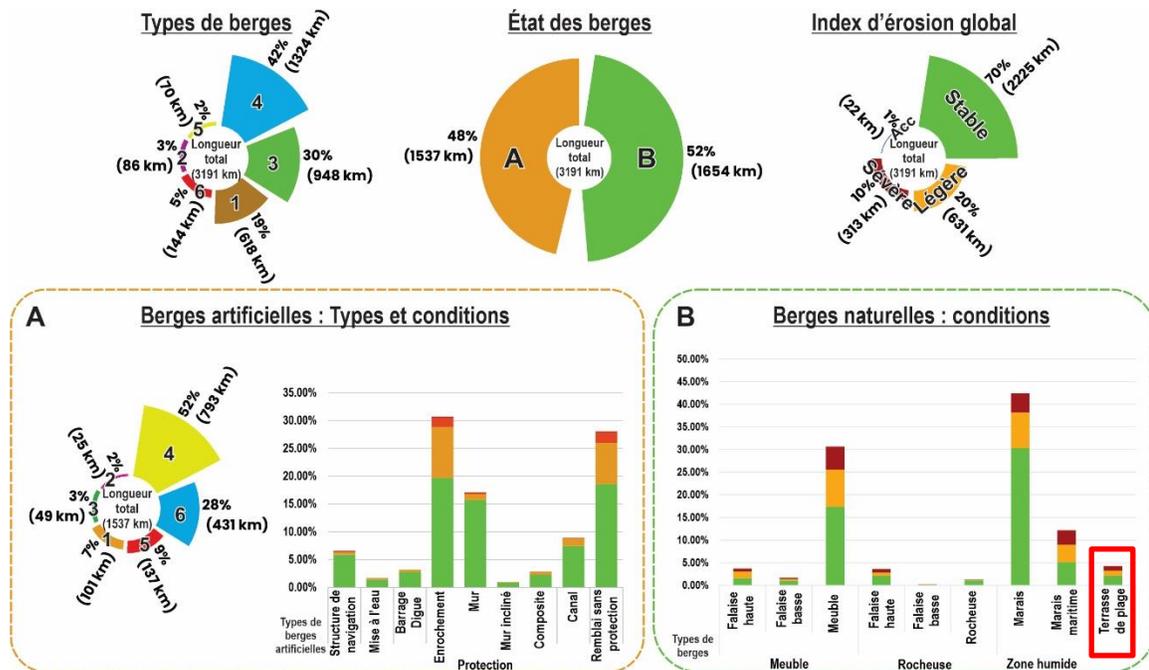


Figure 2 : État des berges du fleuve Saint-Laurent fluvial. (A) Accent sur les berges artificielles et leur état de dégradation et (B) sur les berges naturelles et leur état. L'encadré rouge représente les terrasses de plages. (Bernier et al., 2021).

Plus précisément, les plages estuariennes ont fait, par exemple, l'objet d'études soulignant (1) l'impact des plateformes sur la dissipation des vagues et la morphologie du haut de plage (Nordstrom et Jackson, 2012), (2) l'importance des tempêtes dans les milieux estuariens (Tableau 1) (Drapeau, 1992 ; Bernatchez et Dubois, 2006 ; Vila-Concejo, 2010), et (3) le rôle des vagues sur ces systèmes (Freire et al., 2013 ; Didier et al., 2020) (...). L'impact des tempêtes a été particulièrement étudié (Drapeau, 1992 ; Jackson et al., 2002 ; Bernatchez et Dubois, 2004 ; Short et Jackson, 2013) ; il est aujourd'hui reconnu comme étant aussi un facteur de contrôle déterminant pour la morphodynamique des plages

estuariennes. Résultant d'une exposition à un fetch réduit, les conditions normales ne sont pas toujours suffisantes pour modifier le profil du milieu alors que les tempêtes peuvent transformer complètement une côte. Par exemple, les tempêtes extratropicales se déplaçant entre le Saint-Laurent et l'Atlantique peuvent provoquer des surcotes importantes qui exacerbent le phénomène d'érosion dans de nombreux secteurs de l'EFSL, principalement en automne (septembre à décembre) (Xu et al., 2006 ; Matte, 2014). De plus, il est parfois nécessaire que les tempêtes soient couplées à des événements de fortes marées ou de crues importantes pour qu'elles aient un impact marquant sur les plages estuariennes. Ces systèmes, qui sont parfois résilients et qui s'ajustent aux conditions normales, peuvent être modifiés significativement lorsqu'un événement cumulé se produit, à savoir une onde de tempête lors d'une marée haute (Short et Jackson, 2013 ; Bernier et al., 2021). Bref, bien que des travaux aient abordé les plages de milieux estuariens, il reste encore à approfondir les connaissances scientifiques sur les littoraux anthropiques localisés dans les estuaires froids.

Facteurs contribuant à la présence et la taille des plages dans les environnements de fetch limités

Contrôle	Effets
Structure géologique	
Taille du bassin	Détermine le potentiel maximum du fetch
Forme du bassin	Détermine l'exposition des sites aux vents et aux vagues
Profondeur du bassin	Affecte la formation et la dissipation des vagues
Composition des formations côtière	Détermine l'érodabilité et la disponibilité sédimentaire
Climat	
Précipitation, écoulement, évapotranspiration	Détermine profondeur d'eau, localisation de l'action des vagues
Direction du vent	Affecte la formation des vagues, des courants, du transports éolien
Glace	Modifie l'efficacité des vagues; Crée des formes mineures
Âge du plan d'eau	Temps de remaniement de la formation côtière par les vagues
Proximité de rivières, bassin externe	Introduction de vagues, de courants, de sédiments externe
Marée (estuaires)	Crée des courants, change l'emplacement de l'action des vagues
Type de végétation, densité, vigueur	Détermine la stabilité et la résistance à l'érosion d'une surface
Actions anthropique et structures	
Contrôle du niveau d'eau par les barrages	Modifie grandement la profondeur d'eau, emplacement de l'action des vagues
Battillage	Érosion lors de période calme
Piétinement et retrait de végétations	Augmente le potentiel de formation et de migration de plage
Résidences et structures récréatives	Augmenter le nombre d'utilisateurs et d'actions pour protéger les investissements
Ouvrages de protection	Stabilise les berges, mais détruit les plages
Recharge de plage	Augmente la probabilité et la longévité des plages

Tableau 1 : Facteurs contribuant à la présence et à la taille des plages dans les environnements à fetch limité (Nordstrom et Jackson, 2012).

Étant donné le climat continental humide avec des hivers froids, les glaces font leurs apparitions dans le fleuve en décembre et disparaissent en avril. Cette particularité est importante pour l'EFSL, car les glaces peuvent se combiner et interagir avec les processus terrestres et fluviaux présents dans le secteur (Figure 3). Les glaces impactent ainsi la dynamique sédimentaire de l'EFSL de deux manières distinctes. La première consiste à la protection des berges, en hiver, en créant une barrière naturelle qui protège les berges de l'érosion en limitant l'impact du débit du fleuve, des vagues, des ondes de tempête, des glaces dérivantes ou des courants littoraux (Nordstrom et Jackson, 2012 ; Chassiot et al., 2020). La deuxième a un effet plutôt érosif, alors qu'au printemps et au début de l'hiver, lors de la fonte et de la formation du pied de glace, la glace peut être mobilisée par le vent ou les courants et ainsi éroder les berges en frottant cette surface et/ou en transportant des galets, des blocs et des sédiments (Dionne, 1973, 1993 ; Boone, 2010). D'autres processus érosifs associés aux conditions hivernales sont aussi à prendre en compte, comme le gel-dégel et la glace de ségrégation, qui peut déstabiliser une berge et créer des structures en porte-à-faux qui vont éventuellement s'effondrer (Figure 3). Cependant, les impacts des glaces sont toujours incertains, alors que certains auteurs avancent même que leurs impacts morpho-sédimentaires semblent mineurs (Nordstrom et Sherman, 1982 ; Rosen et Leach, 1987 ; Nordstrom et Jackson, 2012) tandis que d'autres proposent que les glaces soient parmi les facteurs de contrôle les plus dominants (Drapeau, 1992 ; Dionne, 1993 ; Barnes et al., 1994 ; Chassiot et al., 2020). Les auteurs semblent pourtant s'entendre sur les effets nuisibles qu'ont les glaces sur les structures de natures anthropiques (Nordstrom et Jackson, 2012).

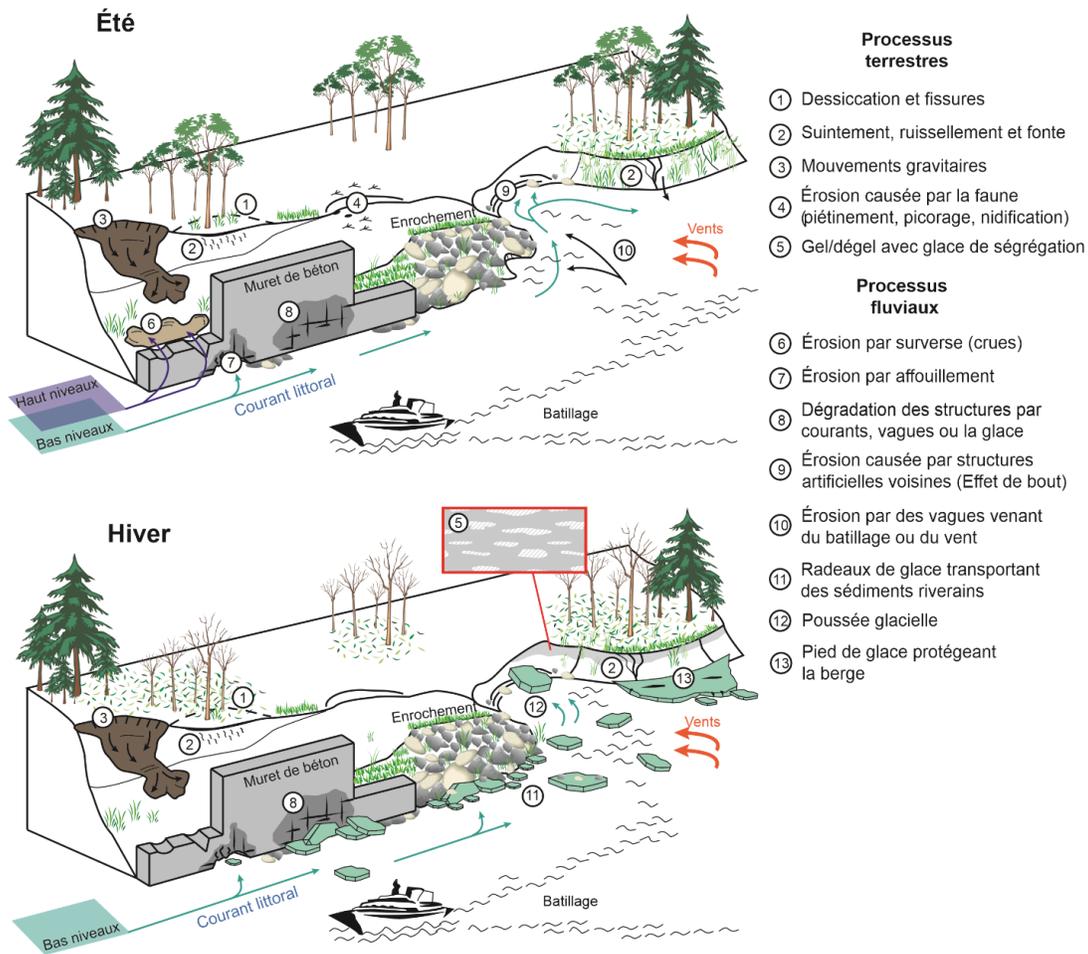


Figure 3 : Éléments naturels et anthropiques qui peuvent induire de l'érosion sur des berges de rivières affectées par les glaces (Bernier et al., 2021)

La résilience, soit la capacité d'un système à répondre à des perturbations qui peuvent entraîner un changement d'état, est un terme vastement utilisé de nos jours lorsqu'on aborde les milieux côtiers et riverains. Pour bien comprendre la résilience d'un site anthropique, l'utilisation d'une échelle d'analyse temporelle bien précise, soit humaine et non géologique, est nécessaire (Piégay et al., 2020b). En effet, elle doit permettre de capter la rapidité d'apparition des impacts liés aux interventions anthropiques, lesquelles peuvent venir exacerber la non-linéarité de la dynamique de ces milieux, voire modifier complètement leur trajectoire hydrogéomorphologique (Dufour et Piégay, 2009). Souvent, les aménagements peuvent entraîner localement des changements irréversibles et possiblement éliminer la capacité d'un système à répondre aux processus naturels qui l'affectent. Un système ne pouvant plus s'adapter aux processus qui l'affecte n'est plus résilient et pourrait possiblement être considéré comme gravement endommagé, voire « défunt » (Cooper et Jackson, 2019). Il

est aussi possible qu'un aménagement entraîne la création de nouveaux systèmes qui développeront leur propre résilience au fil du temps (Freire et al., 2013). Que le système soit en phase de dégradation ou de formation, il est important de percevoir positivement l'avenir de ces systèmes anthropiques afin de ne pas envisager leur passé naturel comme une référence à atteindre, mais bien comme des conditions initiales (Nordstrom et al., 2000). Pour ce faire, il est nécessaire d'abandonner la vision cyclique de la résilience pour intégrer le principe de trajectoire hydrogéomorphologique (Piégay et al., 2020b). Le concept de trajectoire superpose les cycles, les tendances à long terme et les fluctuations à court terme d'un système, permettant ainsi d'observer les impacts cumulatifs qui ont impacté la résilience de ce système au fil du temps (Dufour et Piégay, 2009).

Diverses perspectives d'études concernant les plages à morphogénèse anthropique en milieu froids sont soulevées dans les travaux antérieurs (Chassiot et al., 2020 ; Bernier et al., 2021) dans le but de documenter la contribution de l'érosion par les processus glaciels et hydrologiques. Afin d'évaluer l'importance de mécanismes érosifs, il est nécessaire (1) de quantifier les taux de déplacements des berges et d'identifier les risques associés ; (2) d'évaluer les impacts à court, moyen et long terme des interventions humaines ; et (3) de déterminer l'importance et les impacts des processus hydrologiques et hydrodynamiques sur la stabilité des berges (Chassiot et al., 2020).

Afin d'appliquer une approche de suivi côtier appropriée pour quantifier l'érosion et les taux de déplacements du trait de côte, il est nécessaire de collecter différentes données morphologiques et hydrodynamiques avec des échelles spatio-temporelles variables (Mallet et Michot, 2012 ; Piégay et al., 2020a). De nombreuses techniques de télédétection applicables au domaine côtier ont été utilisées dans des travaux antérieurs (Mallet et Michot, 2012, Hénaf et al., 2014 ; Joyal et al., 2016 ; Tomsett et Leyland, 2019). Les méthodes d'acquisition aéroportées, tel que les systèmes d'aéronefs télépilotés (SATPs) ont été jugés efficaces ainsi qu'abordables et permettent d'obtenir des suivis sédimentaires précis et à haute fréquence sur les plages sableuses. Même si l'utilisation de ces techniques d'acquisition peut être complexe et chronophage (Piegay et al., 2020a), elles demeurent couramment utilisées. Les conditions météorologiques peuvent aussi devenir rapidement contraignantes,

car les SATPs ne peuvent pas être opérés lors de grands vents, de pluie, de neige ou de températures inférieures à -10 °C (varie en fonction du modèle).

Ce projet vient donc s'intégrer dans le domaine de la géographie physique, plus précisément en géomorphologie et en sédimentologie côtière. L'objet d'étude est une plage d'origine anthropique située dans la portion fluviale de l'estuaire du SL. La morphodynamique de cette plage évolue en réponse à plusieurs mécanismes d'érosion et facteurs naturels ainsi qu'anthropiques ce qui nécessite une approche multidisciplinaire et multisource afin de mieux comprendre l'ensemble des processus œuvrant dans le secteur (Figure 4). Ce projet de recherche permettra de combler un manque de connaissances quantitatif sur les facteurs de contrôle dans l'EFSL, tout en permettant de définir les processus et la dynamique sédimentaire interannuelle sur une plage de morphogénèse anthropique dans un milieu estuarien froid, une thématique peu approfondie dans la littérature existante.

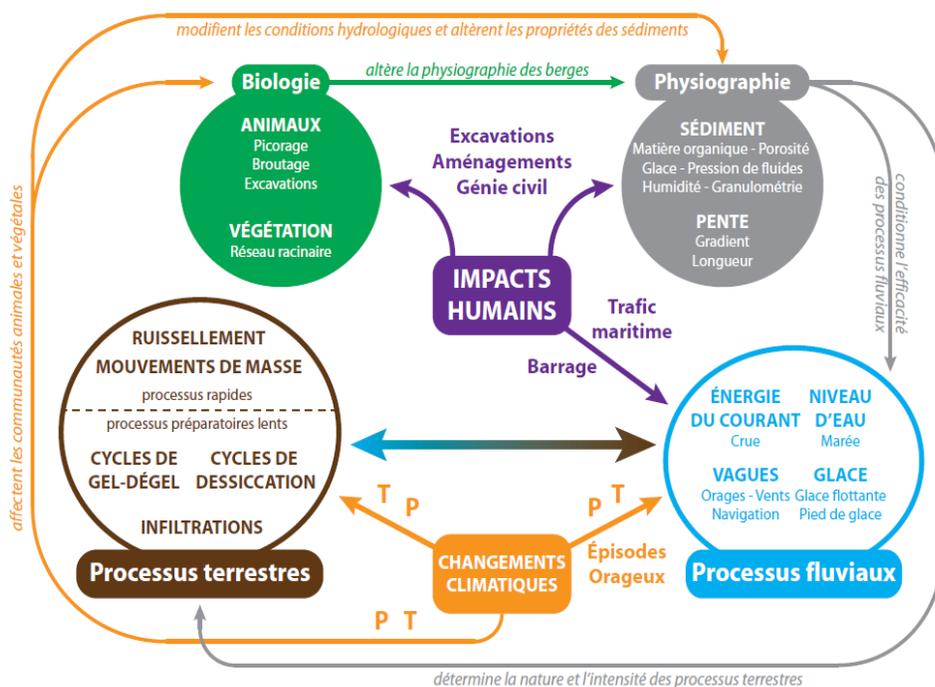


Figure 4 : Synthèse des processus, des facteurs de contrôle et de leurs interactions, lesquels agissent sur la dynamique d'un fleuve peuplé en milieu froid (Chassiot et al., 2020)

Chapitre 1 : Suivi historique et géomorphologique d'une plage anthropique urbaine : Le développement et la chute d'un système morpho-sédimentaire résilient/ Historical and geomorphological monitoring of an anthropogenic urban beach: Rise and fall of a resilient system

1.1 Résumé

L'érosion des côtes sableuses présente un défi significatif pour les municipalités de l'estuaire fluvial du Saint-Laurent (EFSL), lesquelles possèdent un littoral densément peuplé et aménagé. Les pressions anthropiques générées par l'aménagement du territoire, les stratégies de gestion déficientes, le manque de communication et les approches décisionnelles non intégrées contribuent à exacerber la vulnérabilité du cadre bâti des écosystèmes et des communautés riveraines. Les plages avec une morphogénèse anthropique sont par ailleurs davantage problématiques, car elles sont généralement plus sensibles à la dynamique hydrosédimentaire locale qui est aussi perturbée par les activités humaines. C'est le cas de l'Anse-Tibbits, située sur le littoral de la Ville de Lévis, qui a été remblayée au 19^e siècle pour recevoir des installations ferroviaires désormais dégradées qui ont exposé un talus peu cohésif aux aléas d'érosion. Cette conjoncture a ultimement mené au développement d'une plage sableuse atypique au reste du littoral de Lévis, mais laquelle est grandement appréciée des locaux. Par manque d'information sur les processus hydrogéomorphologiques à l'œuvre sur les plages de l'EFSL, un enrochement a rapidement été mis en place en novembre 2020 afin d'éviter la perte potentielle d'infrastructures à proximité.

Les enjeux d'érosion dans la portion fluviale de l'estuaire sont bien connus des acteurs locaux, mais peu de connaissances sont à ce jour disponibles sur la nature de ces problèmes afin de définir les interventions adéquates. Dans l'objectif de développer ces connaissances, cette étude s'est attardée à mieux comprendre la transition historique du site de l'Anse-Tibbits ainsi que son régime de perturbations tant naturelles qu'humaines. En combinant un suivi historique des interventions humaines, des événements hydrométéorologiques majeurs et des taux de déplacements du trait de côte, il a été possible de mieux comprendre (1)

l'évolution morpho-sédimentaire d'une plage anthropique, (2) les facteurs de contrôle dominants dans ce secteur de l'EFSL et (3) la résilience riveraine en milieu urbain afin d'améliorer la prise de décisions en matière d'aménagement côtier en documentant. La trajectoire hydrogéomorphologique de la plage de l'Anse-Tibbits ne semble pas contrôlée par l'action des vagues et des tempêtes comme dans les autres estuaires, mais plutôt par les interventions humaines et possiblement la glace littorale. Bien que les processus naturels jouent un rôle important dans les réponses du système fluvial du Saint-Laurent, les interventions humaines peuvent modifier complètement la trajectoire des milieux qui s'y sont développés. Les actions humaines répétées sur le littoral ont permis le développement d'une plage urbaine reculant de -0,3 m/an, mais ayant la capacité de répondre au régime de perturbations local, alors que ces mêmes actions contribuent aujourd'hui à la disparition de ce site. Cette analyse a donc permis d'approfondir la dynamique sédimentaire d'une plage anthropique en milieu fluvio-estuarien froid, par l'entremise d'une méthode multisource de suivi des berges, dans le but de faciliter les prises de décisions en termes d'aménagement du territoire.

1.2 Abstract

Erosion on sandy coasts presents a significant challenge to the municipalities of the St. Lawrence Fluvial Estuary (SLFE), which have a densely developed and populated coastline. Anthropogenic pressures generated by land use planning, poor management strategies and lack of communication contribute to exacerbate the vulnerability of the built environment, eco-geosystems and coastal communities. Anthropogenic beaches are also more problematic, as they are generally more responsive to local hydrosedimentary dynamics that are also disturbed by human activities. This is the case for Anse-Tibbits, located on the shoreline of the City of Lévis, which was filled in in the 19th century to accommodate railroad facilities that are now degraded and have exposed a poorly cohesive coastline to erosion hazards. This ultimately led to the development of a sandy beach that is an atypical coastline in the vicinity of Lévis, but which is greatly appreciated by the locals. Due to a lack of information on the hydrogeomorphic processes at work on the EFSL beaches, a rock armor was quickly installed in November 2020 to avoid the potential loss of nearby infrastructure.

Erosion issues in the fluvial portion of the estuary are well known to local stakeholders, but little knowledge is available to explain the nature of the problem to define appropriate interventions. To develop this knowledge, this study focused on better understanding the historical transition of the Anse-Tibbits site and its natural and human disturbance regime. By combining historical monitoring of human interventions, major hydrometeorological events, and coastline displacement rates, it was possible to better understand (1) the morpho-sedimentary evolution of this anthropogenic beach, (2) the dominant controlling factors in this area of the EFSL, and (3) the coastline resilience in an urban setting to improve coastal development decision-making by documenting. The hydrogeomorphic trajectory of the Anse-Tibbits beach does not appear to be controlled by waves and storms action as in other estuaries, but rather by human interventions and possibly nearshore ice. Although natural processes play an important role in the responses of the St. Lawrence River system, human interventions can completely alter the trajectory of the environments that have developed there. Repeated human actions on the coastline have allowed the development of an urban beach retreating by -0.3 m/yr, but with the capacity to respond to the local disturbance regime, while these same actions are now contributing to the

disappearance of this site. This analysis therefore provided a deeper understanding of the sediment dynamics of an anthropogenic beach in a cold river-estuarine environment, through a multisource shoreline monitoring method, with the aim of facilitating land-use planning decisions.

1.3 Introduction

Les estuaires constituent l'un des milieux les plus peuplés du monde et sont vastement transformés par l'urbanisation et les activités socio-économiques (Goudie et Viles, 2016 ; Best, 2019). Ainsi, au cours des dernières décennies, plusieurs études ont porté sur l'évaluation de l'importance de l'érosion sur divers types de milieux littoraux dans les estuaires (Jackson et al., 2002 ; Prahalad et al., 2015 ; Gonçalves et Henriques, 2015 ; Chassiot et al., 2020). L'inclusion des aménagements anthropiques actuels et historiques dans la compréhension des dynamiques sédimentaires des milieux estuariens est devenue essentielle depuis notre entrée dans l'Anthropocène (Best, 2019). L'analyse spatio-temporelle des milieux anthropisés représente cependant un défi en raison de (1) l'augmentation de la complexité des relations entre les différents facteurs de contrôle d'origine naturelle et anthropique (Piégay et al., 2020b), (2) la sensibilité des milieux anthropiques au régime de perturbation locale (Prahalad et al., 2015) et (3) l'impact croissant des changements climatiques sur l'aléa de l'érosion et sur la dynamique sédimentaire des sites artificiels (Bernier et al., 2021). De plus, les modifications historiques apportées sur ces larges espaces riverains obligent l'utilisation d'une échelle d'analyse temporelle bien précise, soit humaine et non géologique (Piégay et al., 2020b). Cette échelle doit permettre de capter la rapidité d'apparition des impacts liés aux interventions anthropiques, lesquelles peuvent venir exacerber la non-linéarité de la dynamique de ces milieux, voire modifier complètement leur trajectoire hydrogéomorphologique (Dufour et Piégay, 2009). Les réponses morphosédimentaires, à savoir la résilience du milieu, sont ainsi complexes et difficiles à prédire. Les aménagements peuvent souvent entraîner localement des changements irréversibles tels que la dégradation de sites naturels, mais ils peuvent aussi contribuer à la formation et au développement, volontaire ou involontaire, d'éco-géosystèmes côtiers (Freire et al., 2013). Ces nouveaux systèmes peuvent développer une valeur écologique parvenant parfois à rendre les mêmes services écosystémiques que leur contrepartie naturelle (Jacob et al., 2021 ; Biondo et al., 2020).

Cette situation est observable sur certaines plages anthropiques à travers le monde (Ojeda et Guillén, 2008 ; Pagán et al., 2016 ; Biondo et al., 2020). Cependant, la compréhension de ces milieux demeure limitée étant donné le manque d'intérêt et de données

scientifiques dans le passé sur les milieux artificialisés (Freire et al, 2013 ; Piégay et al., 2020a). Cette lacune en connaissances s'accroît dans les régions froides, où les glaces saisonnières jouent un rôle important dans la dynamique des plages urbaines (Chassiot et al., 2020 ; Bernier et al., 2021). À l'opposé, la morphodynamique des plages naturelles dans les environnements estuariens fait l'objet d'une bonne couverture scientifique (Komar, 1998 ; Drapeau, 1992 ; Nordstrom et Jackson, 2012 ; Jackson et Short, 2013 ; Didier et al., 2020 ; Senechal et Ruiz de Alegria-Arzaburu, 2020). Pourtant, sans une meilleure compréhension de la dynamique et des facteurs qui contrôlent ces plages anthropiques, il devient difficile de mettre en œuvre un plan de gestion durable face aux aléas naturels qui peuvent affecter ces plages (Sauvé et al., 2020 ; Bernier et al., 2021). Le manque de connaissances scientifiques sur la dynamique sédimentaire, sur les impacts possibles des interventions humaines sur la structure et les fonctions de tels systèmes anthropiques peut amener beaucoup d'improvisation au moment venu de la prise de décision par les parties prenantes (Bernatchez et Dubois, 2004 ; Ojeda et Gullién, 2008 ; Montanari et al., 2014 ; Jacob et al., 2021).

L'estuaire du fleuve Saint-Laurent (Québec, Canada), plus précisément sa section fluviale (EFSL), correspond à un milieu complexe et dynamique qui implique l'action combinée des débits fluviaux et des marées ainsi qu'un vaste environnement bâti (Matte, 2014). En effet, près de 40 % du littoral de l'EFSL est artificialisé pour accommoder la population qui y réside, laquelle est surtout concentrée dans la communauté métropolitaine de Québec (CMQ) (Bernier et al., 2021). Les travaux de Bernier et al. (2021) ont par ailleurs permis d'identifier, à l'aide d'une caractérisation côtière à haute résolution, une grande quantité d'aménagements industriels dégradés datant du 19^e siècle dans la CMQ, dont quelques-uns sont aujourd'hui entrecoupés de plages et de grèves.

Sur le littoral de Lévis, la plage urbaine de l'Anse-Tibbits expose de nombreux vestiges ferroviaires, navals et industriels datant de près de 150 ans. C'est en observant les berges locales qu'il est possible de constater que cette anse se démarque comme ayant une des rares plages sableuses du secteur ; ces conditions ont par ailleurs permis de développer une forte vocation récréotouristique sur le site. Récemment, d'importants épisodes d'érosion sur le talus côtier ont créé un sentiment d'urgence pour les entités décisionnelles afin de protéger les aménagements récréatifs du site. Afin d'aider les décideurs à prendre la meilleure

décision possible pour d'améliorer la résilience et préserver ce système morfo-sédimentaire anthropique, des observations ainsi que le développement de connaissances scientifiques sont nécessaires sur ce site.

La morphogénèse de cette plage qui semble liée à son patrimoine industriel souligne l'importance de comprendre l'évolution historique de (1) la position de son trait de côte et (2) sa résilience, c'est-à-dire sa capacité à répondre à des perturbations qui peuvent entraîner un changement d'état (Holling, 1973 ; Piégay et al., 2020b). Une meilleure compréhension de ces éléments permettra de mieux cerner les facteurs qui peuvent venir modifier la trajectoire hydrogéomorphologique des plages artificielles en milieu fluvio-estuarien froid. Par l'entremise d'une approche historique et géomorphologique, cet article vise ainsi à (1) mieux comprendre l'évolution des plages anthropiques, (2) déterminer les facteurs humains et naturels qui contrôlent la migration latérale du trait de côte dans un régime fluvio-estuarien froid et (3) améliorer la prise de décisions en matière d'aménagement côtier en documentant la résilience riveraine en milieu urbain.

1.4 Zone d'étude

Long de 1200 km, le fleuve Saint-Laurent est le troisième plus grand fleuve en Amérique du Nord (Matte et al., 2017). Divisé entre rivière, estuaire et golfe, le Saint-Laurent héberge près de 70 % de la population québécoise et s'étend des Grands Lacs jusqu'à l'océan Atlantique (Hamel et Anne, 2000). L'estuaire du Saint-Laurent est parmi les plus grands au monde et comprend trois divisions principales : l'estuaire maritime (~250 km), l'estuaire moyen (~150 km) et l'estuaire fluvial du Saint-Laurent (EFSL) (~180 km) (Bernier et al., 2021).

L'EFSL se distingue par sa physiographie complexe caractérisée par des îles, des hauts-fonds, un chenal étroit bordé de falaises et de larges battures, une voie navigable et de nombreux ouvrages anthropiques (Bernier et al., 2021). Sa dynamique d'écoulement est quant à elle contrôlée par (1) un climat continental humide avec des hivers froids qui entraîne la formation de glace saisonnière entre décembre et avril (Boone, 2010), (2) des marées et (3) une influence fluviale, laquelle est issue des apports du lac Ontario et des nombreux

tributaires du Saint-Laurent (Figure 5A ; Matte, 2014). Au Québec, cette influence fluviale se reflète surtout dans l'augmentation du débit au printemps, lequel peut atteindre 32 700 m³/s comparativement à la moyenne de 12 200 m³/s (Matte et al., 2017). Les autres paramètres hydrodynamiques de la zone d'étude incluent des marées semi-diurnes et macrotidales, pouvant atteindre 7 m d'amplitude, ainsi que des hauteurs de vagues évaluées à < 0,25 m lors de conditions normales (Environnement Canada, 2021 ; Ropars, 2021). Certains événements de plus fortes énergies peuvent tout de même se produire, comme les tempêtes extratropicales qui se déplacent, généralement en automne (septembre à décembre), entre le Saint-Laurent et l'Atlantique ; elles peuvent provoquer des surcotes et des vagues plus importantes qui exacerbent l'activité géomorphologique (Xu et al., 2006 ; Matte, 2014). Malgré la présence de ces aléas hydrométéorologiques, le potentiel de vagues supérieures à 1,3 m reste rare en raison du fetch très limité causé par l'étroit chenal (< 3 km) au niveau de Québec (Ropars, 2021). Ce milieu qui favorise des vagues de faibles amplitudes et de courtes périodes en conditions normales ou de tempêtes est donc associé à un environnement de faible énergie (Nordstrom et Jackson, 2012 ; Vila-Concejo et al., 2020).

La plage sableuse de l'Anse-Tibbits est située sur le territoire de la Ville de Lévis, soit sur la rive sud de la CMQ. Mesurant 250 m de longueur avec un estran de 110 m de largeur, la plage de l'Anse-Tibbits est dissipative à marée basse grâce à une large plateforme rocheuse peu profonde formant l'avant-plage, alors qu'à marée haute deux sections se distinguent, soit (1) la partie nord, caractérisée par un enrochement et une plage réfléchive de sable et gravier ; et (2) la partie sud, constituée d'une plage sableuse qui demeure dissipative. En raison de son orientation nord-est, l'anse est principalement affectée par les vagues des vents dominants du sud-ouest, alors que la distance du secteur avec la voie maritime rend négligeable l'impact des vagues de batillage (Figure 5). La forme de baie de l'anse vient aussi limiter l'effet des autres directions de vent ainsi que les impacts des courants (Figure 5B). La géologie locale est composée de schiste argileux appalachien de la formation de Lévis datant de l'Ordovicien (Ministère des Ressources naturelles, 2012). Les falaises composées de ce roc friable le long du littoral de Lévis, favorisent normalement la formation de grèves, c'est-à-dire des terrasses de plage de graviers à granulométrie grossière. Au niveau du site d'étude, les falaises de roches sédimentaires se situent plutôt entre 100 et 200 m à l'intérieur des terres, ce qui empêche leur contribution au bilan sédimentaire à la côte (Figure 5B). Outre les

grèves, de nombreuses battures rocheuses couvertes d'une mince couche de sédiments fins et des sites anthropisés viennent compléter le paysage du littoral local (Figure 5A).

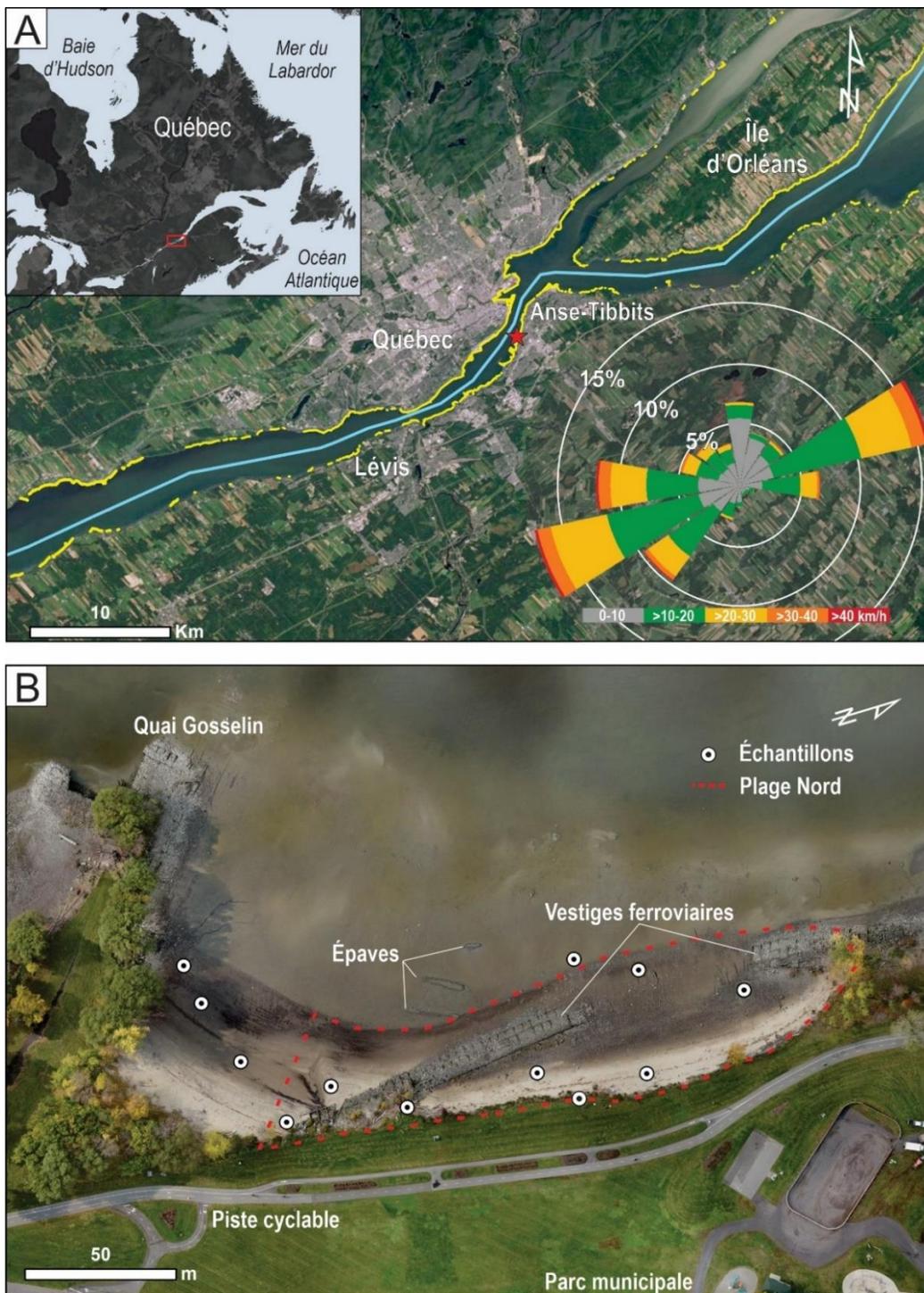


Figure 5 : (A) Localisation du site et données de vents dans la région d'étude dans l'EFSL ; les segments en jaune représentent les endroits où le trait de côte est artificialisé. (B) Plage de l'Anse-Tibbits, localisation des échantillons granulométriques et identification des structures anthropiques présentes sur le site.

L'Anse-Tibbits se situe dans l'ancienne zone portuaire/industrielle de Lévis et était au cœur du développement économique de la ville au 19^e siècle, avec l'industrie navale, le transport maritime et la métallurgie (ZIP de Québec et Chaudière-Appalaches, 2006). Ces industries ont nécessité la construction de quais qui ont empiété sur le fleuve, accentuant l'effet de baie qui contribue aujourd'hui à isoler l'anse des processus hydrologiques (Figure 5B). De plus, afin de soutenir les diverses activités économiques de l'époque, la grève au pied de la falaise a été complètement réaménagée. Des vestiges de ces structures, soit des tronçons de chemin de fer, des quais et même des épaves sont toujours présents sur le site et témoignent de ce patrimoine industriel (Figure 5B). À la suite de cette vocation industrielle, l'Anse-Tibbits est devenue un parc municipal important pour la ville de Lévis. Ce site possède aujourd'hui la seule plage publique de la ville et une piste cyclable aménagée sur l'ancien tracé du chemin de fer, lesquelles sont achalandées par plusieurs milliers de personnes annuellement (ZIP de Québec et Chaudière-Appalaches, 2006). La plage de l'Anse-Tibbits rend également de nombreux services écosystémiques, soit en limitant les impacts des ondes de tempête et des submersions côtières ainsi qu'en offrant des activités récréotouristiques et autres services culturels. Ces services contribuent grandement à l'importance du secteur pour la ville. Des travaux d'enrochement ont ainsi été entrepris sur la plage en novembre 2020 dans le but de protéger ces commodités.

1.5 Méthodologie

Une méthode basée sur des données géospatiales historiques et actuelles couplées à une approche géomorphologique a été utilisée pour comprendre la dynamique morphosédimentaire dans l'EFSL puisque les activités humaines influencent à des rythmes différents la dynamique sédimentaire (Oyedotun, 2014 ; Best, 2019 ; Volpano et al., 2020 ; Roland et al., 2021). Des données d'imageries avec des échelles décennales et annuelles ont ainsi été utilisées afin de produire (1) une analyse quantitative de l'évolution latérale (2D) du trait de côte de la plage et (2) une analyse qualitative évaluant la transition historique de l'Anse-Tibbits. La combinaison de ces méthodes permet de mieux situer le mouvement latéral du trait de côte dans le temps et dans son contexte socio-environnemental et ainsi approfondir les connaissances sur la résilience des plages anthropiques principalement en déterminant quels facteurs jouent sur la migration du trait de côte dans le secteur. Les

résultats de ces analyses ont ensuite été corrélés à des archives météorologiques afin d'identifier les moments les plus potentiellement intenses en termes d'érosion ainsi que les processus dominants de l'érosion. De plus, des données granulométriques ont été utilisées pour mieux comprendre l'origine sédimentaire de la plage. La cartographie a été produite dans le système d'information géographique ArcGIS Pro 2.9 dans une référence planimétrique associée au NAD83 (SCRS) UTM 19N ; toutes les altitudes inscrites dans cette étude ont été converties au CGVD2013.

1.5.1 Mouvement latéral du trait de côte 2D (DSAS)

Afin de quantifier les mouvements latéraux de la plage, l'outil *DSAS* v5.0 développé par l'USGS pour ESRI ArcMap a été utilisé. Plusieurs jeux de photographies aériennes historiques et d'orthomosaiques récentes ont été récupérés ou acquis entre 1950 et 2020 afin de fournir la meilleure couverture temporelle possible de la zone à l'étude (Tableau 2). Les photographies aériennes historiques ont été géoréférencées manuellement dans la projection NAD83 (SCRS) UTM 19N dans ArcMap. Les mosaïques récentes ont été réalisées avec un SATP *WingtraOne* muni d'une caméra optique de 42 MP et qui permet un géoréférencement direct à l'aide de son système PPK. Le logiciel Agisoft Metashape V1.7 a été utilisé pour les traitements photogrammétrique, soit l'alignement des photographies, le nettoyage et la création des nuages de points 3D, des MNS et des orthomosaiques. Basées sur plusieurs études (Westoby et al., 2012 ; Brunier et al., 2016 ; Clapuyt et al., 2016 ; James et al., 2017a ; James et al., 2017b ; James et al., 2019 ; Volpano et al., 2020, Tmušić et al., 2020 ; Roland et al., 2021), les étapes de traitement suivent les techniques de validation les plus à jour dans la littérature scientifique. Les orthomosaiques ont une résolution de 3 cm, alors que les MNS ont une résolution de 5 cm par pixel.

À l'aide de l'imagerie aérienne et par drone, des modèles ombrés et des modèles de pentes, la position du trait de côte — soit le haut du talus de la plage qui sépare l'arrière-plage de la plage (Quintin et al., 2016 ; Fraser et al., 2017) — a été numérisée à une échelle cartographique de 1:500. Cette limite géomorphologique a été choisie, car elle représente la limite la plus cohérente à tracer, puisqu'elle est majoritairement émergée contrairement à d'autres limites géomorphologiques (ligne de rivage, humide/sec, laisses de marées, etc.) qui peuvent être submergées lors de l'acquisition des images aériennes. La précision du traçage

est dépendante de la qualité et de la résolution spatiale de l'image. La différence de qualité et de format des jeux de données a été compensée par des valeurs d'incertitude variables prises en charge par *DSAS* (Tableau 2). Ces valeurs tiennent compte à la fois des incertitudes de position associées aux influences naturelles sur la position du littoral (vent, vagues et marées) et des incertitudes de mesure (p. ex. : erreurs de numérisation) (Himmelstoss et al., 2018). Ainsi, la position du trait de côte sur les jeux de photos plus anciens possède une exactitude plus faible, notamment en raison des petites échelles cartographiques d'acquisition et des erreurs potentielles liées au géoréférencement manuel. De plus, il faut mentionner que les taux de déplacement fournis dans cette étude sont des estimations ; c'est d'ailleurs davantage le cas dans les milieux anthropisés, à cause de la non-linéarité des mouvements latéraux (Piégay et al., 2020b). Des transects perpendiculaires à un espacement d'un mètre ont été générés avec *DSAS* pour calculer les taux de déplacement et les statistiques de ces mouvements. La formule « End Point Rate » (*EPR*) (Oyedotun, 2014 ; Volpano et al., 2020) a été utilisée pour mesurer les taux de recul et d'accrétion sédimentaire entre les périodes comportant seulement deux images, alors que le « Weighted Linear Regression » (*WLR*) a été utilisé pour le calcul total, étant donné que cet indice accorde un poids plus important aux données plus précises permettant d'obtenir des taux mieux ajustés à la réalité (Himmelstoss et al., 2018). Les intervalles d'analyses temporelles ont été déterminés par la disponibilité des jeux de données historiques ; ces intervalles peuvent donc varier légèrement.

<i>Date</i>	<i>Incertitudes (m)</i>	<i>Jeux de données</i>
1852	NA	Carte historique
1855	NA	Carte historique
1950	3	Photo aérienne
1962	2	Photo aérienne
1970	2	Photo aérienne
1993	2	Photo aérienne
2003	1	Orthomosaique
2009	2	Orthomosaique
2010	2	Orthomosaique
2011	2	Orthomosaique
2015	2	Orthomosaique
2016	2	Orthomosaique
2017	2	Orthomosaique
2018	2	Orthomosaique
2019	1	SATP Orthomosaique
2020	1	SATP Orthomosaique

Tableau 2 : Dates et incertitudes définies pour les divers jeux de données utilisées lors du calcul des taux de migrations latéraux du trait de côte de l’Anse-Tibbits.

1.5.2 Analyse qualitative de la transition historique de l’Anse-Tibbits

Pour faciliter l’identification des interventions notables sur le secteur d’étude, les différentes imageries récupérées ont été positionnées en ordre chronologique, afin de réaliser une ligne du temps. En plus des orthomosaiques et des photos aériennes, des photos de terrain actuelles et historiques, des cartes historiques provenant de la BANQ ainsi qu’une analyse des médias locaux (journaux, films documentaires, photos captées par la population) et de rapports d’études ont été utilisées. Différentes interventions ont été identifiées et corrélées avec les taux de migrations du trait de côte des années correspondantes, afin d’évaluer les effets de ces dernières sur la dynamique de l’Anse-Tibbits. Outre l’importance pour le suivi géomorphologique, l’étude de la transition historique ayant pris place dans le secteur de l’anse permet aussi d’obtenir d’importantes informations qualitatives au niveau de l’état des structures, de l’apparence générale de la plage et de son évolution. Ces données ont l’avantage de couvrir une longue période temporelle, de 1855 à aujourd’hui, et de permettre l’évaluation des changements qui se sont produits rapidement après une intervention afin de consolider la compréhension des déplacements du trait de côte qui ont suivi (Ruggiero et al., 2000).

De plus, afin de confirmer l'origine sédimentaire et de documenter la granulométrie de la plage, onze échantillons de sédiments ont été récupérés le 16 juin 2020 sur différentes sections de la plage et dans chacune des unités stratigraphiques du talus en érosion, lequel correspondait en fait à la position du trait de côte avant l'encrochement (Figure 5B). Les échantillons ont été séchés, pesés et ensuite tamisés à un intervalle $\frac{1}{2}\phi$ pour finalement être analysés à l'aide du logiciel Gradistat 9.1 (Blott et Pye, 2001). Les sédiments fins ($< 63 \mu\text{m}$) n'ont pas été analysés, de même pour les blocs. Les échantillons du talus ont ensuite été comparés à ceux pris sur la plage afin d'observer une corrélation entre les différentes classes modales (Flemming, 2020).

1.5.3 Index d'événements majeurs potentiellement érosifs

Afin de mieux comprendre le rôle des facteurs de contrôle naturel sur la plage de l'Anse-Tibbits, trois facteurs environnementaux déterminants dans le contrôle de l'érosion côtière dans l'EFSL ont été pris en compte, soit (1) les niveaux d'eau maximum journaliers, (2) la vitesse et la direction des vents ainsi que (3) les périodes où des glaces mobiles seraient présentes sur le fleuve (Drapeau, 1992). Ces facteurs, surtout lorsque combinés entre eux, peuvent venir altérer le talus et ainsi affecter l'état et la position de ce dernier de manière plus ou moins importante (Dionne, 1973 ; Castelle et Harley, 2020 ; Chassiot et al., 2020). Les données hydrométéorologiques utilisées dans le cadre de cette étude couvrent la période de 1950 à 2020. Elles proviennent des stations fédérales situées à proximité : données météorologiques, aéroport de Jean-Lesage (# 71714 et # 71708) ; données marégraphiques, stations de Lauzon (# 03250), pour les années 1950 À 2012, et du Vieux-Québec (# 3248), pour les années 2012 à 2020. Ces données ont permis de créer un indice sur les événements majeurs potentiellement érosifs (EMPE). Pour faciliter l'analyse, les valeurs horaires des niveaux d'eau ont été rapportées en données maximales journalières. Le 99^e percentile (3,76 m), ce qui correspond également au niveau de la PMSGM, a ensuite été identifié sur l'ensemble de la période d'étude pour prendre en compte seulement les journées avec des niveaux extrêmes. Pour les valeurs horaires de vents, elles ont été groupées en une moyenne journalière. Elles ont ensuite été filtrées avec le 99^e percentile (34,5 km/h) afin d'isoler les vagues modérées et importantes selon l'échelle de Beaufort et de garder une certaine cohérence avec les valeurs de submersion. Puis, un second filtre a été appliqué pour conserver

seulement les événements qui correspondent à une direction de 220 à 250 degrés, soit l'angle du fetch maximal qui affecte le site à l'étude. Le fetch a été modélisé à l'aide de la méthode « SPM » et pondéré en fonction de l'exposition 360° (Rohweder et al., 2012). Les valeurs de fetch ont été calculées à partir de modélisations basées sur des équations d'ingénierie côtière dans ArcGIS avec l'outil « *Wave 2012* » de l'USGS. Quant au potentiel érosif des glaces mobiles, soit lors de la formation et du retrait du pied de glace, il a été jugé comme présent dans la région entre le 7 décembre et 31 décembre, puis entre le 17 mars et 7 avril. Afin de déterminer ces intervalles, des observations visuelles sur l'apparition de la glace ont été réalisées lors de cette étude, entre 2019 et 2021. Ces intervalles englobent également les périodes moyennes identifiées dans la littérature scientifique où la glace s'installe et se démantèle (Dionne, 1970 ; Chen et She, 2020).

Pour l'identification des EMPEs, les facteurs ont été divisés en quatre classes :

1. Niveau d'eau $\geq 3,76$ m (N.E)
2. Niveau d'eau $\geq 3,76$ m et vent $\geq 34,5$ km/h entre 220 ° et 250 ° (N.E + V \angle)
3. Niveau d'eau $\geq 3,76$ m et glaces mobiles (N.E + G.M)
4. Niveau d'eau $\geq 3,76$ m, vent $\geq 34,5$ km/h entre 220 ° et 250 ° et glaces mobiles (N.E + V \angle + G.M)

Dans le cadre de cette étude, il a été déterminé que l'influence des événements individuels de glaces flottantes et de vagues n'ont pas d'effet sur le recul du trait de côte, car sans être combinés à d'importante submersion ces processus n'atteignent pas le trait de côte. Pour ce qui est des événements combinés, les événements de N.E + V \angle et N.E + G.M ont été considérés comme similaire, alors que les N.E + V \angle + G.M auraient le plus grand potentiel érosif. Les dates avec des événements cumulés, soit les trois dernières classes, représentent les moments où les mécanismes d'érosion ont probablement été les plus importants (Khanal et al., 2018 ; Zscheischler et al., 2018 ; Couasnon et al., 2020).

1.6 Résultats

1.6.1 Évolution historique de l'Anse-Tibbits

1.6.1.1 *Première phase d'aménagement au 19^e siècle*

Il est possible de retracer la trajectoire historique de l'Anse-Tibbits dès le début du 19^e siècle, alors que le secteur était toujours à l'état naturel. Les premières infrastructures à faire leurs apparitions sur les photographies aériennes datent de 1854. Il s'agit de deux quais, soit un premier, le quai Gosselin, au sud et un second au nord (ZIP de Québec et Chaudière-Appalaches, 2006). Ces infrastructures servaient principalement à la réception de marchandises et permettaient l'entreposage de bois flotté dans l'anse, qui était ensuite acheminé aux scieries à proximité. Ce n'est qu'en 1852 que les premières discussions sont entreprises sur la construction d'un chemin de fer reliant Lévis aux pôles économiques de l'époque, soit Montréal, Toronto et certaines grandes villes des États-Unis. En 1854-1855, un terminus de la compagnie de chemin de fer du Grand-Tronc et une voie ferrée sont rapidement aménagés à l'Anse-Tibbits (Figure 6A). Ces deux infrastructures marquent le début de la deuxième révolution industrielle de 1860 au Canada et le début d'un volume important de trafic ferroviaire dans le secteur (Encyclopédie canadienne, 2021). Le chemin de fer traverse l'anse et est aménagé en hauteur sur des caissons à claire-voie remplis de blocs granitiques ou calcaires. Étant donné que l'anse est, à cette époque, toujours exploitée pour le stockage du bois flotté, des ouvertures sont aménagées sous le chemin de fer afin de continuer cette pratique.

1.6.1.2 *Deuxième phase d'aménagement au 19^e siècle*

Avec les industries ferroviaires et navales en pleine croissance dans la région, le manque d'espace se fait rapidement sentir. En 1870, l'anse est ainsi complètement remblayée pour permettre l'expansion de ces industries (Figure 6B). Cette intervention marque du même coup la fin du stockage de bois à l'anse et la possibilité à l'eau de s'infiltrer à l'arrière du chemin de fer, car les ouvertures aménagées en 1855 sont colmatées. Le terminus, qui est déjà très important à l'époque étant donnée sa position stratégique, devient l'un des plus importants dans l'est du Canada, alors que plusieurs milliers d'immigrants et de grands volumes de marchandises transitent annuellement par l'Anse-Tibbits (Gagné et Frank, 2008).

L'importance de l'industrie navale décline au profit du chemin de fer, alors que les quais reçoivent moins de marchandises pour la CMQ.

1.6.1.3 L'abandon du secteur par les industries

Malgré le remblaiement de l'anse et l'agrandissement du terminus, l'exiguïté du secteur créé par la proximité des falaises et du Saint-Laurent force les compagnies ferroviaires à délaisser le secteur (Figure 6C). Dès 1889, la majorité des activités du Grand-Tronc est transférée à Charny près de la rivière Chaudière, alors que l'anse ne sert plus qu'à entreposer des wagons. En 1914, le secteur est finalement complètement abandonné et n'est plus entretenu par les industries ou la municipalité. Il est possible d'observer les premiers signes de dégradation du site sur les photographies aériennes de 1950, alors qu'une brèche d'une dizaine de mètres s'est incisée dans les structures ferroviaires abandonnées (Figure 7C). Avec le temps, la brèche a continué de s'agrandir et, dès 1962, une accumulation de sédiments commence à être visible à la base du quai Gosselin, dans la portion sud, et au pied de la structure ferroviaire (Figure 7D). Durant cette période, une microfalaise d'érosion se forme à l'arrière de la structure et s'agrandit considérablement avec les années, pour finalement parcourir l'entièreté de la portion nord de la plage au début des années 1990 (Figure 7E). L'accumulation au sud prend de l'ampleur et finit par se stabiliser au même moment. Le laisser-aller du secteur a aussi permis l'apparition de végétation relativement dense alors que de nombreux arbres et arbustes sont visibles sur les photographies aériennes dès 1993 (Figure 7E).

1.6.1.3 Transformation en parc urbain

C'est en 1996 que survient la première modification sur le littoral depuis le laisser-aller qui a précédé durant des décennies dans le secteur. Certaines poutres et vestiges du premier chemin de fer de 1854 sont alors retirés (Figure 7A) et des arbustes sont plantés au niveau de l'arrière-plage (Figure 7B). Ces interventions, réalisées par le comité de la zone d'intervention prioritaire (ZIP) de la région de Québec et de Chaudière-Appalaches, ont pour but de mettre en valeur l'Anse-Tibbits, étant donné l'apparition d'une plage sableuse et du potentiel récréotouristique du site (ZIP de Québec et Chaudière-Appalaches, 2006). En 1998, la vocation du secteur change, alors que l'anse est réaménagée en parc municipal. De plus, une piste cyclable est aménagée en 2001 sur l'ancien tracé du chemin de fer, ce qui permet

de maximiser le potentiel récréotouristique de l'Anse-Tibbits (Figure 6D). La construction de la piste cyclable est combinée à la coupe de la végétation ligneuse présente dans le secteur afin de créer des percées visuelles sur le fleuve et la ville de Québec. Cette dernière intervention expose davantage le talus de remblai, lequel montre déjà d'importants signes d'érosion causés par des événements hydrométéorologiques (Figure 7).

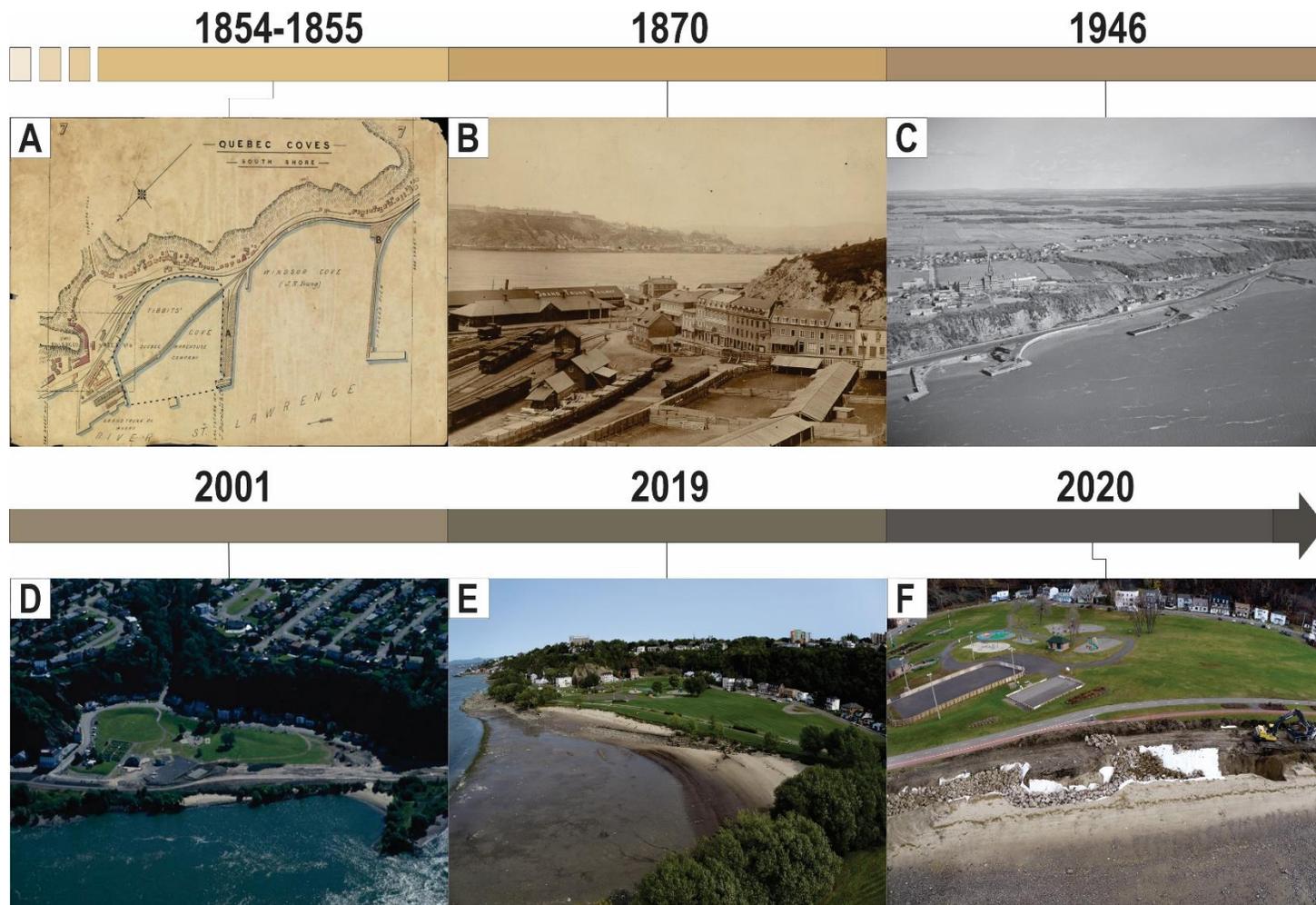


Figure 6 : Transition historique de l'état de l'Anse-Tibbits suite aux diverses interventions entre 1854 et 2020 ; (A) Cartographie du chemin de fer traversant l'Anse-Tibbits ; (B) Remblai de l'anse pour l'agrandissement du terminus du Grand-Tronc ; (C) Abandon du secteur par les industries ; (D) Début des travaux pour l'aménagement de la piste cyclable des anses avant la déforestation pour les percées visuelles ; (E) L'Anse-Tibbits et sa plage à marée basse avant l'encochement du talus ; (F) Encochement du talus de la plage par la Ville de Lévis.

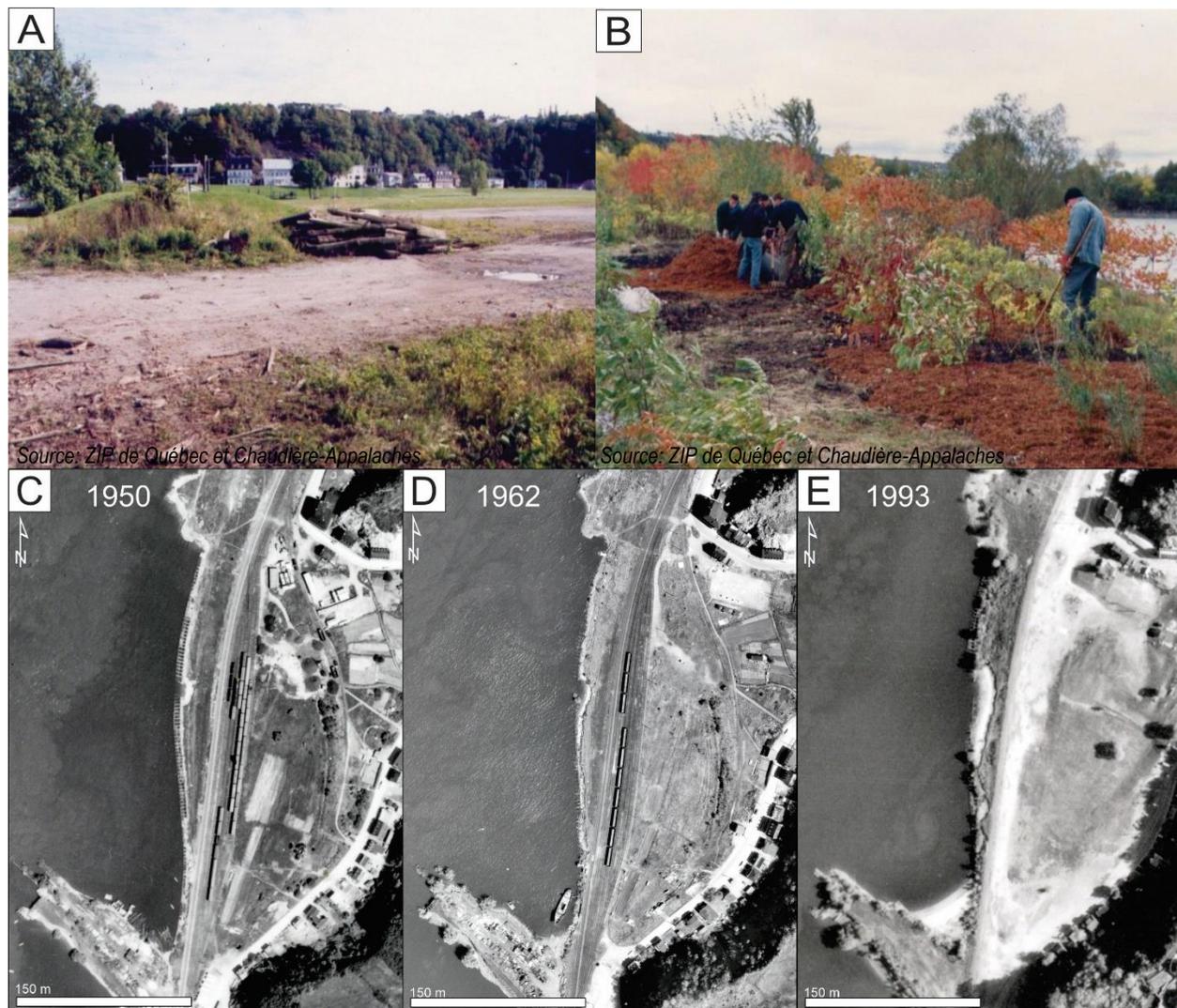


Figure 7: Interventions et développement de l'anse au 20^e siècle ; (A) Le retrait des poutres des vestiges du chemin de fer en 1996 ; (B) La végétation ajoutée au sommet de l'Anse-Tibbits suite au retrait des poutres ; (C) Photographie aérienne de l'anse en 1950 exposant le début de la brèche dans la structure ferroviaire ; (D) Photographie aérienne de l'anse en 1962 et l'apparition d'accumulation sédimentaire ; (E) Photographie aérienne de l'anse en 1993 et développement des plages de l'anse.

1.6.1.4 *Érosion et risque*

La dernière intervention sur l'anse est réalisée en novembre 2020, alors que la Ville de Lévis prend la décision d'enrocher la portion nord de la plage sur 210 m. En 2019, la microfalaise d'érosion s'était rapprochée de la piste cyclable, soit à 3 m de distance dans le cas le plus critique. Cette proximité effraie la municipalité qui décide d'agir afin de limiter l'érosion qui se produit depuis le début des années 50s. L'aménagement de cette structure a nécessité (1) l'excavation du talus et la coupe de plusieurs arbres et arbustes, (2) l'installation d'un géotextile afin de limiter l'apparition de nouvelle végétation, (3) un déversement de pierres granitiques de tailles variées, et (4) le remblaiement de la structure avec du sable et la plantation de graminées à son sommet. Plus tard, deux belvédères en pierre ont été aménagés au sommet de l'enrochement sur la portion nord de la plage (Figure 6F). De manière similaire qu'au 19^e siècle, cette intervention fige la position du trait de côte de la portion nord de la plage pour les années futures et marque la fin de l'étude de l'évolution 2D de la plage dans le cadre de cette étude.

1.6.4 Contexte sédimentaire

Une caractérisation visuelle du talus en érosion situé en haut de la plage couplée à une analyse granulométrique a permis de (1) distinguer cinq unités stratigraphiques distinctes, (2) connaître leurs propriétés granulométriques et (3) de fournir des données granulométriques et lithologiques afin de les comparer avec les sédiments qui composent la plage (Figures 5 et 8). D'abord, les sédiments de l'ensemble des unités sont mal ou très mal triés et sont composés de matériel hétérométrique de nature variable, principalement granitique. L'unité 1 mesure 48 cm d'épaisseur et est caractérisée par une matrice de sable granitique grossier à moyen qui compose 74,7 % de l'unité avec une proportion de 1,1 % de silt et d'argile, alors que le reste se caractérise par du gravier et des galets à 23,8 %. L'unité 2 mesure près de 10 cm d'épaisseur. Les sédiments qui la composent sont beaucoup plus grossiers et grisâtres que le reste du talus. Elle est composée de 73,6 % de gravier, de 24,9 % de sable et 1,3 % de silt et d'argile, ce qui en fait l'unité ayant les sédiments les plus grossiers de la coupe. L'unité 3 s'étend sur 20 cm d'épaisseur. Elle est constituée d'une matrice de sable moyen et fin, entrecoupée de lits de gravier avec quelques galets. En proportion, cette unité se compose de sable à 72,3 %, de gravier à 25,4 % et de matière fine à 2 %. L'unité 4

mesure 25 cm d'épaisseur. Elle est composée presque exclusivement d'antracite, un charbon organique noir et brillant, de tailles variables, qui est aussi présent partout plus bas sur la plage (Cornwell, 1971). Dans cette unité, il est possible d'observer l'empreinte de l'industrie ferroviaire de l'époque, alors que l'unité se décrit en un motif bosselé représentant les traverses du chemin de fer (Figure 8E). Les sédiments présents dans cette unité sont constitués de 67,8 % de sable moyen, à 30,4 % de gravier et 1,6 % d'argile et de silt. Au sommet du talus, l'unité 5 mesurant 13 cm d'épaisseur est composée de sols mixtes contenant une importante proportion de matière organique. L'unité se divise en 74,5 % de sable fin, 4,6 % de gravier et 20,1 % de silt et d'argile.

Les échantillons récupérés sur la plage correspondent majoritairement à une granulométrie de sable graveleux d'origine granitique, comme l'illustrent les modes de ces échantillons (Figure 8), alors qu'une forte concentration sédimentaire est observée entre 100 et 1000 μm . Une seconde concentration granulométrique plus faible à 10000 μm est observée, ce qui correspond à du gravier moyen et grossier. Ce gravier est présent principalement dans les unités 2-3-4. Il est aussi présent dans certains échantillons sur la plage. À la suite de l'enrochement de 2020, il a été possible d'identifier visuellement une augmentation de la concentration de gravier de 10000 μm et plus dans le bas de la plage nord (Figure 8C). Finalement, la concentration sédimentaire à 63 μm dans l'unité 5 n'est pas observée dans les échantillons de la plage en 2020.

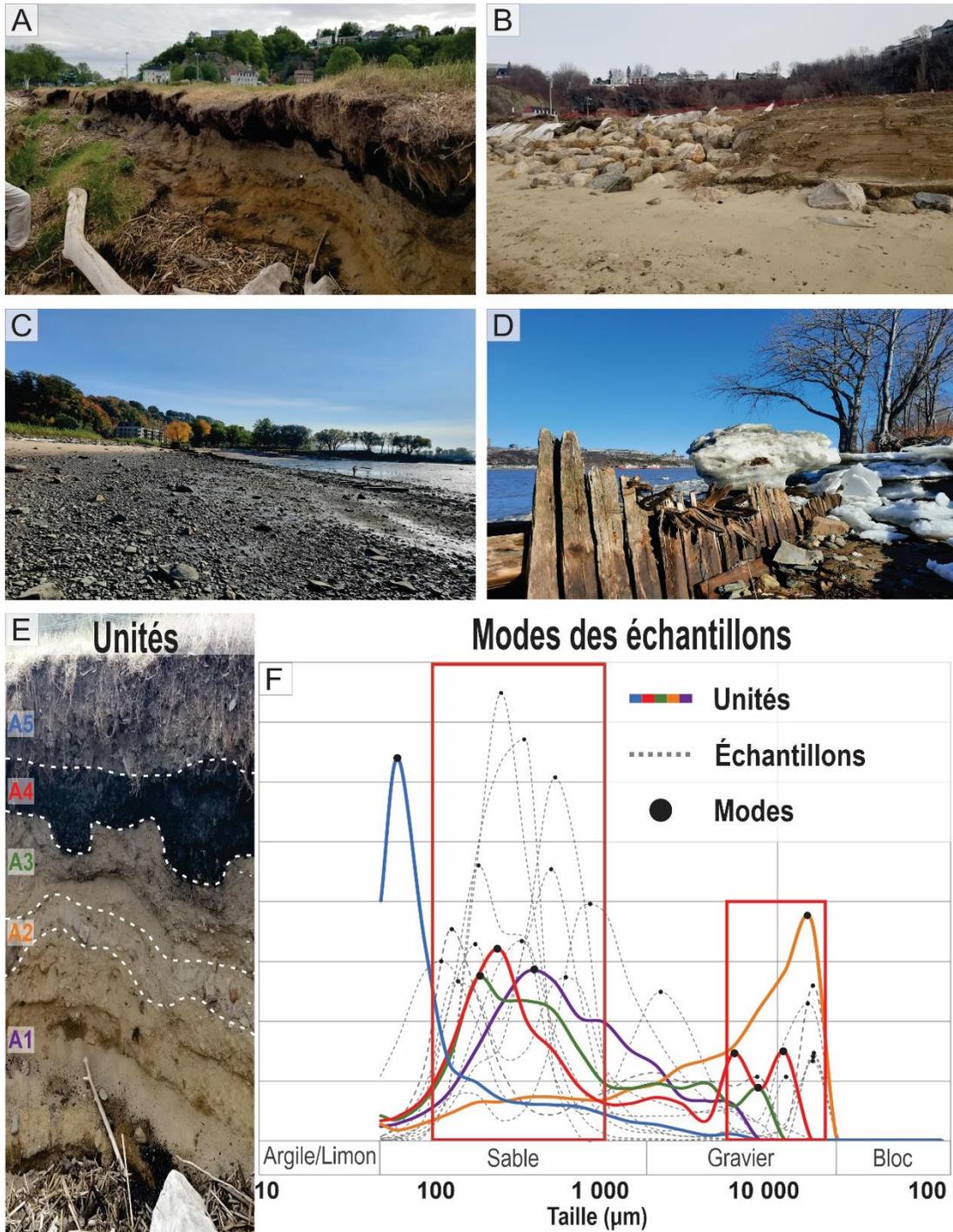


Figure 8 : Résultats de l'analyse granulométrique ; (A) Le talus en érosion d'où proviennent les échantillons représentés sur le graphique ; (B) L'énrochement recouvert de sable ; (C) La forte concentration de gravier dans le bas de la portion nord de la plage à la suite de l'énrochement de 2020 ; (D) Un exemple du pouvoir destructeur des glaces sur les structures anthropiques ; (E) Le talus de l'Anse-Tibbits et ses unités stratigraphiques ; (F) Distribution granulométrique des modes du talus (lignes pleines) et des échantillons de la plage (lignes pointillées).

1.6.3 Déplacement latéral du trait de côte et exposition au vent

Les informations tirées des photographies aériennes sur l'intensité du déplacement latéral du trait de côte observé à l'Anse-Tibbits varient de manière importante entre la portion nord et sud de la plage. Les données de déplacements latéraux tirés de DSAS exposent une plus grande activité érosive dans la portion nord, laquelle a été initiée avec l'apparition de la brèche dans la structure ferroviaire en 1950. Cette activité érosive correspond aussi à l'exposition maximale au fetch pondéré, qui atteint plus de 2,5 km pour la portion nord, et au fetch maximal du site d'étude, soit 10 km (Figure 9). À l'inverse, la portion sud, où le fetch pondéré demeure inférieur à 350 m, étant donné la présence du quai Gosselin qui limite l'exposition au vent, l'action érosive s'est accrue entre 1950 et 1970 de 20 à 25 m pour éventuellement se stabiliser à sa position actuelle au début des années 1990.

Malgré l'agrandissement de la brèche apparu en 1950 situé au niveau de la plage nord, le recul du trait de côte nord-est demeuré relativement constant entre 1950 et 2003, variant entre -0,13 et -0,29 m/an. Cette période correspond principalement à la phase d'abandon de l'Anse-Tibbits, marquée par le développement d'une végétation ligneuse. À partir de 2003, au moment où l'anse se transforme en parc urbain, le recul au niveau du talus de la portion nord. À la suite de cette période, le recul du talus au nord augmente de manière drastique et atteint -0,54 m/année pour la période 2009-2015. Cette tendance grandissante se poursuit après 2015, alors que l'érosion atteint un nouveau sommet avec un recul moyen de -1,0 m/année. La rapidité des processus érosifs est presque cinq fois plus importante que par le passé, et ce, principalement dans le secteur le plus exposé aux vents et où la brèche de 1950 se situait. Il est donc possible entre 1950 et 2020 d'observer un recul moyen du trait de côte de -19,2 m et jusqu'à un maximum de -34 m dans le pire secteur (Figure 9).

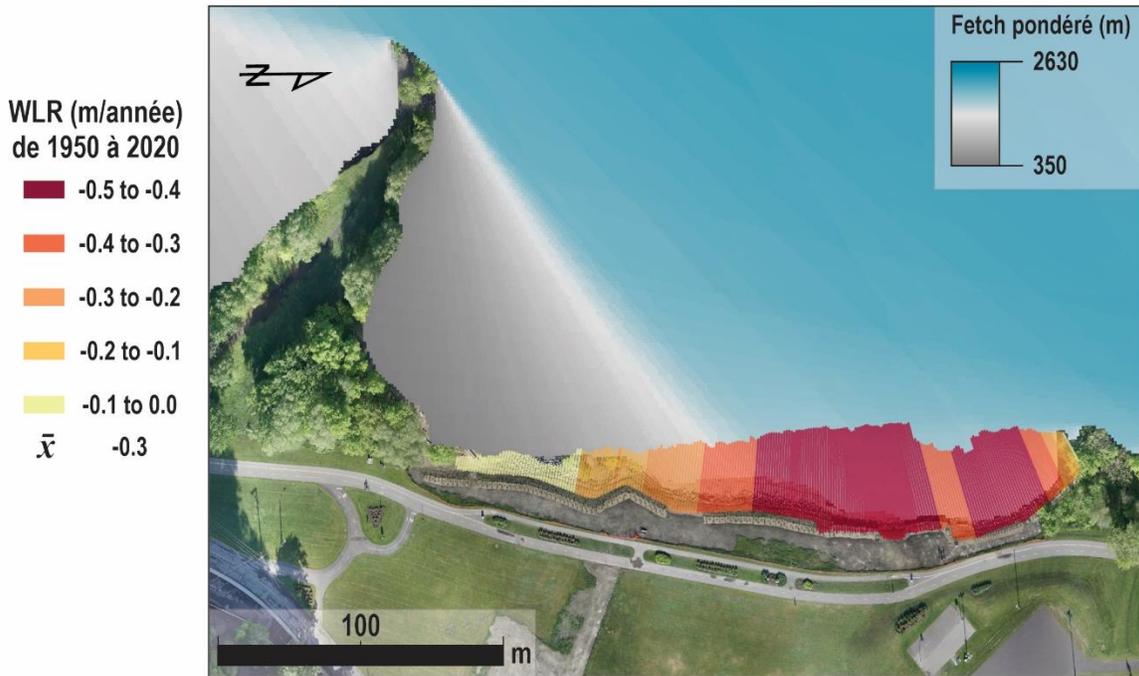
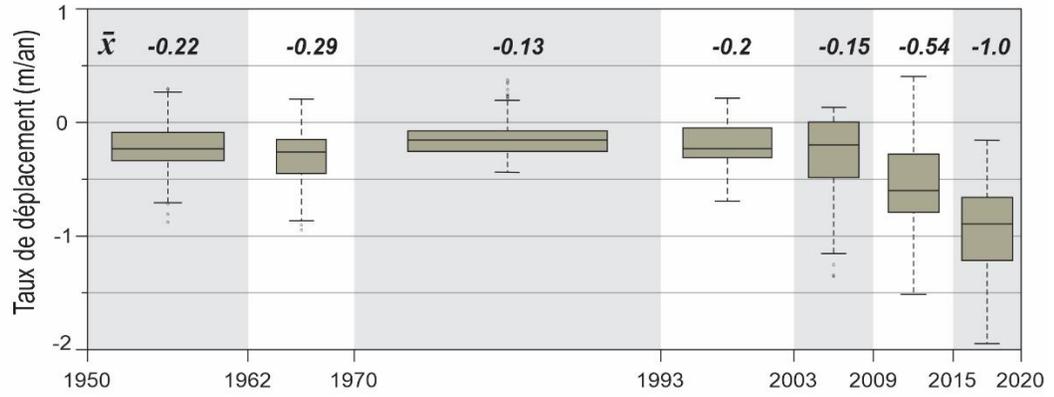


Figure 9: (Dessus) Taux de déplacements du trait de côte par période couverte par les photos aériennes disponibles pour la portion nord de la plage de l'Anse-Tibbits ; (Dessous) « Weighted linear regression (WLR) » de 1950 à novembre 2020 et fetch pondéré affectant la zone d'étude.

1.6.4 Événements majeurs potentiellement érosifs

Les EMPEs correspondent aux événements où les plus grands déplacements du trait de côte devraient se produire. Ces événements sont observables de manière quasi-annuelle et/ou récurrente, lorsque les niveaux d'eau sont particulièrement haut et où les glaces flottantes apparaissent en automne et au printemps. Certaines périodes sont plus actives que d'autres, comme la période de 2015 à 2020 où une moyenne de 7,2 événements par année est observée, alors qu'une moyenne de 3,2 événements par année est observée pour le reste de la période d'étude.

1.6.4.1 Les niveaux d'eau

Les événements hydrométéorologiques les plus fréquents entre 1950 et 2020 ont été les niveaux d'eau extrêmes, qui se produisent généralement au printemps et à l'automne (Figure 10). Avec 255 événements enregistrés, ce type d'événements se produit généralement plusieurs fois par an, alors que les années (n=6) où ces événements ne sont pas observés sont rares. Les fréquences pour les années 1955, 1960, 2017 et 2018 sont les plus importantes pour ce facteur, alors qu'entre 8 et 10 événements se sont produits. Les années 2017 et 2019 correspondent à deux événements d'inondations historiques pour le Québec méridional, ce qui explique les niveaux d'eau anormalement élevés pour la région de Québec/Lévis pour cet intervalle (Institut de la statistique du Québec, 2019). Les périodes entre 1965 et 1980 et de 2005 à aujourd'hui concentrent la majorité des événements de submersions, ce qui en fait les périodes les plus actives pour ce processus. Pourtant, les taux de recul pour ces intervalles demeurent faibles, à l'exception des événements les plus récents de 2015 à aujourd'hui (Figure 9).

1.6.4.2 Événements hydrométéorologiques cumulés

Pour les événements cumulés, ce sont les glaces flottantes combinées avec de hauts niveaux qui sont les plus fréquemment observés, avec 39 occurrences principalement entre 1965 et 1978 ainsi qu'entre 1995 et 2005 (Figure 10). Dans ce cas aussi, l'érosion n'est pas particulièrement importante lors des périodes de nombreux événements de glaces flottantes, mais des cicatrices de glaces sont présentes sur les vestiges ferroviaires et sur certains arbres (Figure 8D). Bien que la glace se forme de manière annuelle dans l'EFSL, elles ne se combinent que quelques fois avec des événements de submersions, et ce, principalement au

printemps et au début de l'hiver. Ces combinaisons de processus ne s'observent généralement qu'une à deux fois par année, ce qui limite leurs impacts. Cependant, il arrive, comme en 2003, qu'un redoux au printemps ou une vague de froid tardive en automne permette l'enregistrement d'un plus grand nombre d'événements.

Un seul événement de vent de plus de 35 km/h dans l'axe maximal du fetch couplé au niveau d'eau a été enregistré pour toute la période d'étude, soit en 1959 (Figure 10). Il est important de préciser que malgré cette faible fréquence d'événement, des ondes de tempête peuvent se produire dans l'EFSL, mais sans qu'elles contiennent nécessairement tous les éléments pour correspondre à une tempête « parfaite ». Pour ce qui est des événements où les trois facteurs auraient pu être combinés, aucun enregistrement n'a été identifié depuis 1950.

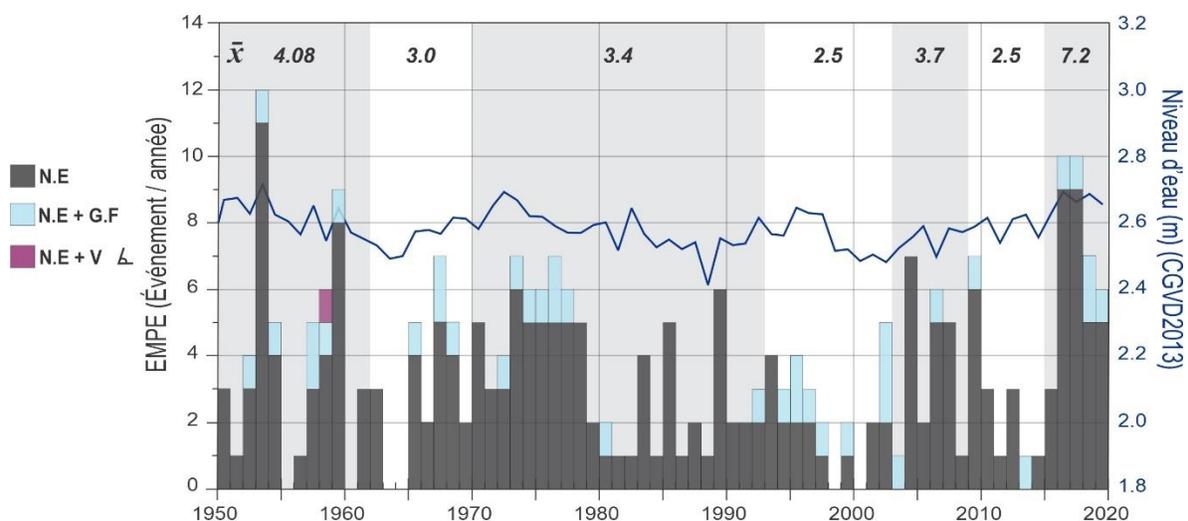


Figure 10: Fréquences des EMPEs entre 1950 et 2020

1.7 Discussion

1.7.4 Modification physiographique du site

Depuis le 19^e siècle, la grande région de Québec a connu plusieurs phases d'aménagements côtiers marquées par des empiètements fluviaux qui ont dégradé de grandes superficies de sites naturels (ZIP de Québec et Chaudière-Appalaches, 1998 ; BAPE, 2006). Cependant, l'abandon ou la dégradation de certains aménagements peuvent aussi contribuer à la création de nouveaux systèmes sédimentaires ayant plusieurs bénéfices écosystémiques et récréotouristiques (Freire et al., 2013). L'analyse de l'évolution historique et géomorphologique de l'Anse-Tibbits a permis de confirmer qu'un tel contexte s'est produit dans ce secteur, alors que la genèse du site découle des nombreuses interventions anthropiques de l'époque industrielle.

Les analyses granulométriques ont démontré que l'origine sédimentaire de la plage de l'Anse-Tibbits provient de l'érosion du remblai, qui a été mis en place en 1870 afin d'installer le terminus du Grand-Tronc et, ainsi, permettre l'expansion du secteur ferroviaire. Ce sable de taille variable, qui marquait le remblai avant son enrochement et qui compose la plage actuelle de l'Anse-Tibbits, aurait été fourni par une ancienne fonderie à proximité, ce qui explique à la fois l'inconformité du site avec la géologie et la physiographie environnante. Le littoral de Lévis est en fait marqué par des plateformes rocheuses couvertes de sédiments fins, des marais intertidaux et des grèves composées de schiste appalachien offrant peu de sources de sédiments sableux (Matte, 2014). La seule source de sables pour l'Anse-Tibbits correspond donc au talus de remblai vertical qui provient des aménagements anthropiques de la période industrielle de Lévis. La concordance des modes des échantillons entre les sédiments sableux de la plage et ceux du talus, soit entre 0,1 et 1,0 mm, confirme cette source. Pour ce qui est de l'antracite présent sur la plage et dans le talus, elle proviendrait de l'utilisation de locomotives aux charbons et des activités de transbordement de charbon dans le secteur (Gagné, 2013).

Parmi les nombreux facteurs limitant la formation d'une plage identifiée dans les études passées, certains sont présents à l'Anse-Tibbits ; (1) l'absence de contribution sédimentaire de la géologie locale (López-Ruiz et al., 2020), (2) la présence de nombreuses

structures anthropiques limitant la formation de plage (Nordstrom et Jackson, 2012) et (3) la présence d'une grande terrasse rocheuse peu profonde augmentant la dissipation des vagues (Freire et al., 2013). La situation de l'Anse-Tibbits n'est donc pas favorable à l'accumulation de sédiments sableux. Ainsi, lorsque ces sédiments sont transportés à l'extérieur de la cellule hydrosédimentaire, peu de sédiments de même granulométrie ont la possibilité de revenir vers la plage pour maintenir un bilan sédimentaire stable. Aujourd'hui, avec la coupure de l'apport de sédiment sableux par l'enrochement, la plage est beaucoup plus caillouteuse que par le passé, ce qui vient confirmer la présence d'une telle dynamique sédimentaire dans le secteur (Figure 8C). La dégradation du chemin de fer par les aléas hydrométéorologiques aurait ainsi permis de révéler un talus peu cohésif à l'érosion et la mise en place de la plage au fil du temps.

1.7.4 Régime de perturbations : le régime fluvio-estuarien froid

1.7.2.1 Les conditions hydrodynamiques à fetch limité

Les facteurs de contrôle naturels les plus fréquents ayant eu une implication sur la dynamique du système de l'Anse-Tibbits ont été identifiés avec l'indice EMPE. Cet indice a ensuite permis de hiérarchiser le rôle de ces facteurs de contrôle dans la dynamique fluvio-estuarienne en milieu froid. D'abord, les hauts niveaux d'eau constituent le facteur impactant le plus fréquemment le mouvement latéral du trait de côte (Figure 10). L'influence fluviale présente dans L'EFSL semble accroître la fréquence de ces événements, particulièrement lors des crues printanières qui font gonfler les niveaux d'eau moyens du fleuve Saint-Laurent (Matte, 2014 ; Matte et al., 2017). C'est d'ailleurs lors de cette période que la grande fréquence et les très hauts niveaux d'eau de 2017 et 2019 ont été observés (Institut de la statistique du Québec, 2019). Ces événements de submersion ont le potentiel de modifier la position du trait de côte (Komar, 1998 ; Bernatchez et Marie, 2004 ; Nordstrom et Jackson, 2012). Pour l'Anse-Tibbits, ces événements se produisaient quand le niveau d'eau dépassait la PMSGM, soit 3,825 m (CGVD2013), car ils altéraient le talus vertical composé de remblai très friable. Ce talus, présent depuis l'ouverture de la brèche en 1950, aurait contribué à former la plage sud et nord avec l'aide de l'érosion engendrée par le régime de perturbations locales. Le secteur sud s'est accru jusqu'en 1970, pour finalement se stabiliser à sa position actuelle. N'exposant pas de talus vertical et abrité par l'ancien quai Gosselin, cette portion

est moins sensible aux vagues et au niveau d'eau (Bonte et Levoy, 2015). Pour la plage nord, elle a continué de se développer jusqu'en novembre 2020, moment où l'enrochement a été mis en place.

Les événements de submersion à partir de 2016 coïncident avec le moment dans l'histoire de l'anse où l'érosion a atteint son maximum, soit avec des reculs de plus de 1 m/année (Figure 9). D'autres périodes concentrées en événements de haut niveau d'eau se sont pourtant produites avant 2016, mais leurs effets ne transparaissent pas aussi intensément dans les taux de recul de 1950 à 2003 (Figure 9). Il est probable que l'évolution de l'état de la structure ferroviaire de 1855 ait servi de protection pour la berge et ainsi contribué à réduire le recul du trait de côte. Lors de la formation de la brèche en 1950, des effets de bout ont tout de même accéléré et concentré l'érosion, mais l'état de la structure permettait toujours de protéger une bonne portion du talus jusqu'au début des années 1990. Ce constat permet de supposer que d'autres facteurs, environnemental ou anthropique, ont été responsables de l'augmentation importante de l'érosion à la suite de 2003, car les taux de recul sont demeurés constants jusqu'à cette période malgré la dégradation de la structure.

Le potentiel érosif des événements de submersion est moindre que les autres événements combinés pouvant se produire dans l'EFSL (Khanal et al., 2018 ; Zscheischler et al., 2018 ; Couasnon et al., 2020). Outre les niveaux d'eau, la dynamique des plages estuariennes est généralement dictée par les vagues de conditions normales et les tempêtes (Jackson et al., 2002 ; Didier et al., 2020), mais cela ne semble pas être le cas dans l'EFSL. En fait, certaines particularités de l'estuaire fluvial telles que (1) les crues printanières, (2) la glace saisonnière, (3) le fetch très limité (< 15 km) limitant la formation des vagues à moins de 50 cm en conditions normales et (4) le peu de tempêtes dans l'axe du fetch maximal font en sorte que les vagues et les tempêtes n'auraient possiblement pas un rôle prédominant dans la dynamique de l'EFSL (Drapeau, 1992 ; Jackson et al., 2002 ; Matte, 2014, Chassiot et al., 2020 ; Bernier et al., 2021). Le cas de l'Anse-Tibbits illustre l'incapacité des tempêtes à dicter la dynamique de l'EFSL, car même si l'érosion correspond spatialement avec l'exposition du fetch et des vagues, les caractéristiques de l'EFSL ne semblent pas permettre à ces processus de dégager suffisamment d'énergie pour engendrer des reculs de plus de 1 m/année. Il est important de préciser que les ondes de tempêtes constituent des événements

ponctuels d'une intensité suffisante pour modifier l'évolution successive de la plage (Freire et al., 2009), sans toutefois constituer un facteur de contrôle déterminant sur la plage de l'Anse-Tibbits.

1.7.2.2 *L'influence des processus glaciels*

Les glaces mobiles combinées à des niveaux d'eau extrêmes sont les événements composés plus fréquents ce qui laisse croire que ces événements composés sont les plus érosifs du régime fluvio-estuarien froid étudié (Figure 10). Les glaces mobiles ont été identifiées dans la littérature comme étant un agent érosif important pour les plages et les marais en milieu estuarien, alors qu'elles sont en mesure de capter d'importants volumes de sédiments (Troudes et Sérodes, 1988 ; Drapeau et al., 1992 ; Barnes et al., 1994 ; Kempema et al., 2001), en plus d'avoir la capacité de causer d'importants dommages sur les structures rigides (Figure 8D ; Nordstrom, 1992 ; Gabriel, 2004). La présence de nombreuses marques d'abrasion et de dégradation laissées par les glaces sur la structure ferroviaire et sur certains arbres suggère que les glaces flottantes pourraient avoir participé à l'augmentation de l'exposition du talus, en créant en bonne partie la brèche identifiée dès 1950. Dans les environnements de faible énergie, les processus qui produisent le plus d'énergie sont les processus qui dominent la dynamique sédimentaire (Lowe et Kennedy, 2016). Avec l'absence de grand épisode de vent (Figure 10), les glaces flottantes auraient donc un impact prépondérant sur la dynamique sédimentaire de l'Anse-Tibbits. Bien que la glace semble avoir contribué à augmenter la sensibilité du site aux mécanismes d'érosion, la faible fréquence annuelle des glaces flottantes (4-6 semaines) (Dionne, 1970 ; Chen et She, 2020) ne semble pas permettre à ce processus d'être apte à entraîner à lui seul des reculs aussi importants que ceux observés après 2009. Cette hypothèse sur les processus glaciels est suggérée par le fait que les événements combinés de glaces et de niveau d'eau n'aient pas vu leur fréquence augmenter, alors que la réponse érosive du trait de côte de la plage est passée de -0,2 m/année en 1993 et 2003 à -1,0 m/année après 2015. De plus, le rôle des glaces sur l'érosion est généralement mitigé dans l'estuaire du Saint-Laurent (Troudes et Sérodes, 1988 ; Bernatchez et Dubois, 2004 ; Chassiot et al., 2020). Outre leur capacité érosive importante, la glace littorale peut aussi protéger la côte lors de tempêtes hivernales (Forbes et Taylor, 1994 ; Bernatchez et Dubois, 2004 ; Neumeier et Cheng, 2015). Tel que mentionné précédemment, les tempêtes avec un fort potentiel érosif sont rares dans l'EFSL (Figure 10),

ce qui rendrait ainsi les effets protecteurs de la glace plutôt négligeables par rapport à leur rôle érosif au courant d'une saison glacielle. Dans la région de Québec, un taux de recul annuel moyen des plages naturelles de -0.2 m/année a été observé pour la période de 2007-2014 (Quintin et al., 2016), ce qui correspond à la situation pré-2009 de l'Anse-Tibbits. Selon nos observations sur l'EFSL, les processus qui pourraient intensifier de manière drastique l'érosion, soit les EMPEs, semblent se révéler incapables d'engendrer une réponse érosive aussi importante que celle observée à l'Anse-Tibbits après 2009. Il est donc probable que d'autres facteurs contrôlent la sensibilité de la côte à répondre aux EMPEs.

1.7.4 Régime de perturbations : les pressions anthropiques

1.7.3.1 Opportunisme et aménagements récréatifs successifs

Contrairement au régime naturel de perturbations, les pressions dans un régime anthropique n'agissent pas sur le milieu de façon annuelle, mais plutôt de façon très ponctuelle ou par vague dans le cadre de projets d'aménagement (Piégay et al., 2020b). Les nombreuses interventions ayant eu lieu à l'Anse-Tibbits l'ont façonné tout en impactant de manière importante son évolution sédimentaire. Avec l'apparition d'une plage sableuse au début des années 1960, une opportunité s'est présentée pour utiliser le site de l'anse à des fins récréotouristiques. Les acteurs locaux ont donc saisi cette opportunité dès les années 1990, mais le manque de connaissances sur le système récemment apparu a entraîné des décisions d'aménagements aléatoires qui ont influencé les déplacements latéraux du trait de côte. C'est notamment le cas de certaines interventions, tel que (1) le retrait de plusieurs poutres du chemin de fer de 1855, pour faciliter l'accès à la plage en 1996, (2) le retrait complet de la végétation en bordure du trait de côte en 2001, afin de créer des percées visuelles sur le fleuve et sur la ville de Québec et (3) l'enrochement du talus en 2020 pour protéger les aménagements récréotouristiques.

Les interventions humaines peuvent venir augmenter la sensibilité de la berge et ainsi engendrer une réponse plus importante (Rangel-Butriago et al., 2018a). Selon l'évolution des taux de déplacements latéraux de l'Anse-Tibbits, le retrait des poutres aurait eu comme effet d'augmenter la sensibilité du talus au régime naturel de perturbations, alors qu'elles offraient autrefois une protection suffisante pour atténuer partiellement l'influence de ces processus. Cette intervention semble donc être une des causes ayant mené à la croissance des taux de

déplacements sur le secteur nord depuis le début des années 2000. Le retrait de la végétation derrière la plage et l'enlèvement des poutres a mené à une importante réduction de la cohésion et de la stabilité du talus (Feagin et al., 2015, Chassiot et al., 2020), augmentant à nouveau la sensibilité de l'anse au régime naturel de perturbations. À la suite de ces interventions, les taux de recul annuels ont quintuplé, passant de -0,2 m entre 1993 et 2003 à -1 m entre 2016 et 2020. Selon Carrasco et al. (2012), il n'est pas rare que dans les environnements de faible énergie, les conséquences de ce type d'interventions sur la stabilité du trait de côte soient observées à retardement. La capacité des plages de faible énergie à présenter des changements morphologiques majeurs est faible. Par conséquent, l'état de la plage à un moment donné n'est pas nécessairement en réponse aux événements ponctuels récents, mais plutôt lié à aux processus à action continue, ce qui peut engendrer un délai dans la perception d'un phénomène (Carrasco et al., 2012). Ce délai expliquerait donc pourquoi que le déplacement du trait de côte a continué de croître jusqu'à -0,54 m/année entre 2009 et 2015, quoiqu'aucune nouvelle intervention majeure n'ait eu lieu. Cette augmentation de la sensibilité du trait de côte au régime naturel de perturbations par la mise en œuvre d'interventions depuis 1996 aurait donc permis davantage de mouvement du trait de côte, et ce, sans nécessairement impliquer un changement drastique dans l'exposition à des EMPES entre 1996 et 2015. La réponse du talus face à une fréquence élevée de EMPES à partir de 2017 a été la plus importante dans l'histoire récente de la plage. Ainsi, il est clair que, sans les changements apportés au site depuis près de 20 ans, les valeurs de recul auraient été de moins grande magnitude que celles observées avant 1996. C'est à la suite de cette période de quatre années de haut niveau d'eau que la Ville de Lévis a pris la décision d'embrocher le talus, afin de limiter l'exposition à court et moyen termes de la piste multifonctionnelle située quelques mètres derrière le talus. Cependant, cet aménagement a coupé la seule source sédimentaire pouvant alimenter la plage, devenue très appréciée des locaux et touristes.

Il n'est pas rare que des plages façonnées par les activités humaines soient aux prises avec des déficits sédimentaires, car elles sont généralement mal adaptées aux conditions hydrogéomorphologiques locales (Bernier et al., 2021). Les impacts négatifs des adaptations de ces sites anthropiques sur le bilan sédimentaire sont nombreux, que ce soit la modification de la granulométrie naturelle (Ojeda et Guillén, 2008 ; Pagán et al., 2016 ; Biondo et al., 2020), la surexposition du site aux événements tempétueux (Nordstrom et Jackson, 2012 ;

Prahalad et al., 2015 ; Lowe et Kennedy, 2016) ou le simple manque de sédiments disponibles pour l'équilibre sédimentaire de la plage (Freire et al., 2013 ; López-Ruiz et al., 2020). Pour l'Anse-Tibbits, ces interventions ne se sont pas basées sur des fondements scientifiques ou sur des observations de la dynamique du milieu, ce qui a mené à son déclin. Pourtant, les travaux de recherche portant sur le rôle et les conséquences des structures rigides, telles que les poutres et les enrochements (Bernatchez et Fraser, 2012 ; Rangel-Butriago et al., 2018a ; Rangel-Butriago et al., 2018b), leurs impacts sur la végétation (Türker et al., 2006 ; Freire et al., 2013 ; Feagin et al., 2015) et sur l'érosion et la stabilité des plages sont nombreux et explicites. Ce type d'action anthropique doit être pris en compte lors de l'analyse du régime de perturbations d'un secteur (Haff, 2003 ; Pranzini et al., 2015), mais elles sont souvent omises ou ignorées (Best, 2019 ; Piégay et al., 2020a). Négliger d'inclure les facteurs anthropiques dans le régime de perturbations pourrait donc entraîner une surévaluation de l'importance des processus naturels et une tendance à jeter tout le blâme sur les processus naturels ainsi qu'à favoriser des comportements interventionnistes mettant de l'avant un renforcement du littoral (Cooper et McKenna, 2008 ; Di Stefano et al., 2013 ; Chacón Abarca et al., 2021).

1.7.4 La trajectoire hydrogéomorphologique de l'Anse-Tibbits

1.7.4.1 L'évolution de la résilience d'un milieu anthropique

Les systèmes anthropiques ne sont pas toujours bien compris et valorisés. Cependant, il faut percevoir positivement l'avenir de ces systèmes urbains afin de ne pas envisager le passé comme une référence à atteindre, mais bien comme des conditions initiales (Nordstrom et al., 2000). Pour plusieurs, l'état souhaité d'un système est défini comme non-perturbé, jugé comme possiblement plus résilient, mais la réalité est que la plupart des systèmes étaient déjà influencés par les activités humaines depuis qu'ils sont fréquentés (Dufour et Piégay, 2009). Tant que le milieu peut perdurer dans le temps, aucun état antérieur ne peut donc être justifié préférable à un autre, ce qui implique la nécessité d'abandonner la vision cyclique de la résilience pour intégrer le principe de trajectoire hydrogéomorphologique (Piégay et al., 2020b). Le concept de trajectoire superpose les cycles, les tendances à long terme et les fluctuations à court terme d'un système, permettant ainsi d'observer les impacts cumulatifs qui ont impacté la résilience de ce système au fil du temps (Dufour et Piégay, 2009).

La résilience des systèmes anthropomorphiques, tels que le système urbain de l'Anse-Tibbits, passe obligatoirement par la connaissance des perturbations tant anthropiques que naturelles (Haff, 2003). L'objectif de comprendre le régime de perturbations est de connaître les interactions de ces perturbations avec l'ensemble des acteurs biotiques, abiotiques et humains sur les systèmes artificialisés (Figure 11). Les facteurs humains et naturels influencent un système de manière fondamentalement distincte ; les premiers agissent comme rupture et entraînent un changement d'état d'un système alors que les seconds sont majoritairement de nature événementielle et maintiennent un équilibre dynamique (Piégay et al., 2020b). En modifiant une ou de multiple fois le régime de perturbations avec lesquels ces systèmes ont évolué avec le temps, c'est leur résilience/élasticité et leur capacité dynamique à maintenir les services écosystémiques qui sont affectés (Jacob et al., 2021).

La complexité de la trajectoire de l'Anse-Tibbits illustre les conséquences des initiatives humaines sur la résilience de la plage, alors qu'après chaque intervention, l'humain a modifié l'état du système avec une incompréhension de la résilience du milieu. Certaines modifications peuvent entraîner un changement d'état du milieu sans pour autant faire disparaître sa résilience et son dynamisme ; c'est le cas de l'installation du chemin de fer en 1856 qui permettait une exposition partielle de l'anse au régime de perturbations. Il est aussi possible que des interventions plus drastiques, comme le remblayage de l'anse en 1870, éliminent complètement la possibilité du système à répondre aux divers facteurs événementiels naturels et transforme un système résilient, en santé et dynamique en système non résilient, « défunt » et statique (Cooper et Jackson, 2019). Entre 1950 et 1996, le système de l'Anse-Tibbits a toutefois réussi à atteindre une certaine résilience précaire à la suite de l'abandon du secteur par le chemin de fer du Grand-Tronc (Figure 11). Cette période représente le moment dans l'histoire où le système a développé sa valeur écologique et récréotouristique, devenant ainsi un secteur attrayant à plusieurs niveaux. Avec de rares sources sédimentaires (géologie locale défavorable, dérive littorale perturbée, peu d'embouchures de cours d'eau, etc.) autres que celles provenant de l'érosion du talus et les aléas hydrométéorologiques, le site a évolué à un rythme similaire aux autres plages de l'EFSL (Quintin et al., 2015).

L'analyse du cas du système anthropique de l'Anse-Tibbits souligne qu'il est nécessaire de mieux comprendre la sensibilité d'un milieu avant d'intervenir sur celui-ci, et ce, afin d'éviter d'entraîner une réponse plus rapide et importante du système aux aléas hydrométéorologiques (Figure 11). Après la mise en place de l'encochement et la coupure de la principale source sédimentaire, la résilience du système a été compromise. De façon similaire à l'intervention de remblaiement de l'anse en 1870, le système ne peut désormais plus récupérer à la suite des divers événements érosifs (Bernatchez et Fraser, 2012 ; Cooper et al., 2020). Bien qu'aucun état antérieur ne puisse être justifié préférable à un autre, paralyser la résilience et la capacité naturelle de maintien d'un système est forcément négatif et nuisible. La plage forme donc aujourd'hui un système sédimentaire anthropique moins adapté et fonctionnel face aux conditions hydrométéorologiques, en plus de possiblement être vouée à disparaître.

1.7.4.2 Une approche holistique pour une gestion durable des environnements côtiers

Au Québec, en fonction de la loi sur la qualité de l'environnement, il n'est pas obligatoire de réaliser des études hydrosédimentaires préalables avant d'aménager certaines structures sur le littoral lorsque celles-ci ont une longueur inférieure à 500 m ou une surface de moins de 5000 m² (Sauvé et al., 2020). Avec une longueur inférieure à 250 m, le site de l'Anse-Tibbits démontre que ces barèmes sont inappropriés pour l'EFSL ; ils ont dans ce cas contribué à la mise en place d'un encochement sans analyse sédimentaire et sans évaluation de l'origine du système, de l'évolution du site et des conséquences possibles à long terme de la mise en place d'une telle structure. Rangel-Butriago et al. (2018 b) ont observé que plusieurs interventions d'aménagements peuvent être motivées par les bénéfices, par réaction ou par la peur et non en connaissance de cause, ce qui entraîne généralement de mauvais résultats. Le cas de l'Anse-Tibbits est similaire, alors que c'est en réaction à la crainte de dommages aux infrastructures locales que l'encochement a été mis en place.

Afin d'optimiser la gestion à long terme de l'Anse-Tibbits et d'éviter la dégradation de la plage tout en protégeant les infrastructures, il aurait été essentiel de réaliser au préalable une analyse hydrogéomorphologique et géohistorique du site afin d'informer les preneurs de décisions et la population locale des effets d'une telle intervention. Les stratégies d'aménagement pour ce type d'infrastructures peuvent être nombreuses selon l'enjeu, à

savoir (1) des recharges de plages, (2) un retrait planifié des infrastructures, (3) un retrait complet des infrastructures et l'abandon du secteur ou (4) l'adaptation de la plage aux conditions hydrosédimentaires locales (Figure 11 ; William et al., 2018 ; Rangel-Butriago et al., 2018a). Certaines de ces mesures plus douces sont difficilement applicables au Québec pour de nombreuses raisons pratiques et légales (Sauvé et al., 2020), mais méritent l'attention des instances gouvernementales afin d'améliorer la gestion du littoral. Malgré tout, ces alternatives auraient dû être étudiées afin de tenter de préserver la résilience du milieu, car chaque intervention anthropique peut faire basculer un système résilient vers un qui ne l'est plus (Rangel-Butriago et al., 2018b).

L'approche intégrant un suivi historique et une analyse géomorphologique, utilisée dans le cadre de ce présent travail de recherche, s'est prouvée simple, rapide et efficace pour approfondir la dynamique d'une plage anthropique. Elle permet de mieux comprendre l'évolution d'un système et de fournir des pistes de réponses sur sa réaction à une nouvelle intervention (Ruggiero et al., 2000 ; Ojeda et Gullien, 2008 ; Lowe et Kennedy, 2016). De nombreuses études ont d'ailleurs prouvé l'efficacité de ce type de méthode sur les milieux littoraux (Ojeda et al., 2010 ; Págan et al., 2017 ; Págan et al., 2020). Cette approche permet de mettre les bases d'un programme d'aménagement côtier intégré et d'un développement d'une base de données détaillée et précise, visant à maintenir et comprendre la résilience des systèmes naturels et anthropiques au fil du temps. Conjointement, cette approche permettrait l'avancée des connaissances scientifiques sur un large éventail d'environnements, favorisant l'identification de stratégies de gestion durable plus efficaces afin de limiter la perte de services écologiques et de systèmes à haute valeur environnementale ou récréotouristique (Págan et al., 2020).

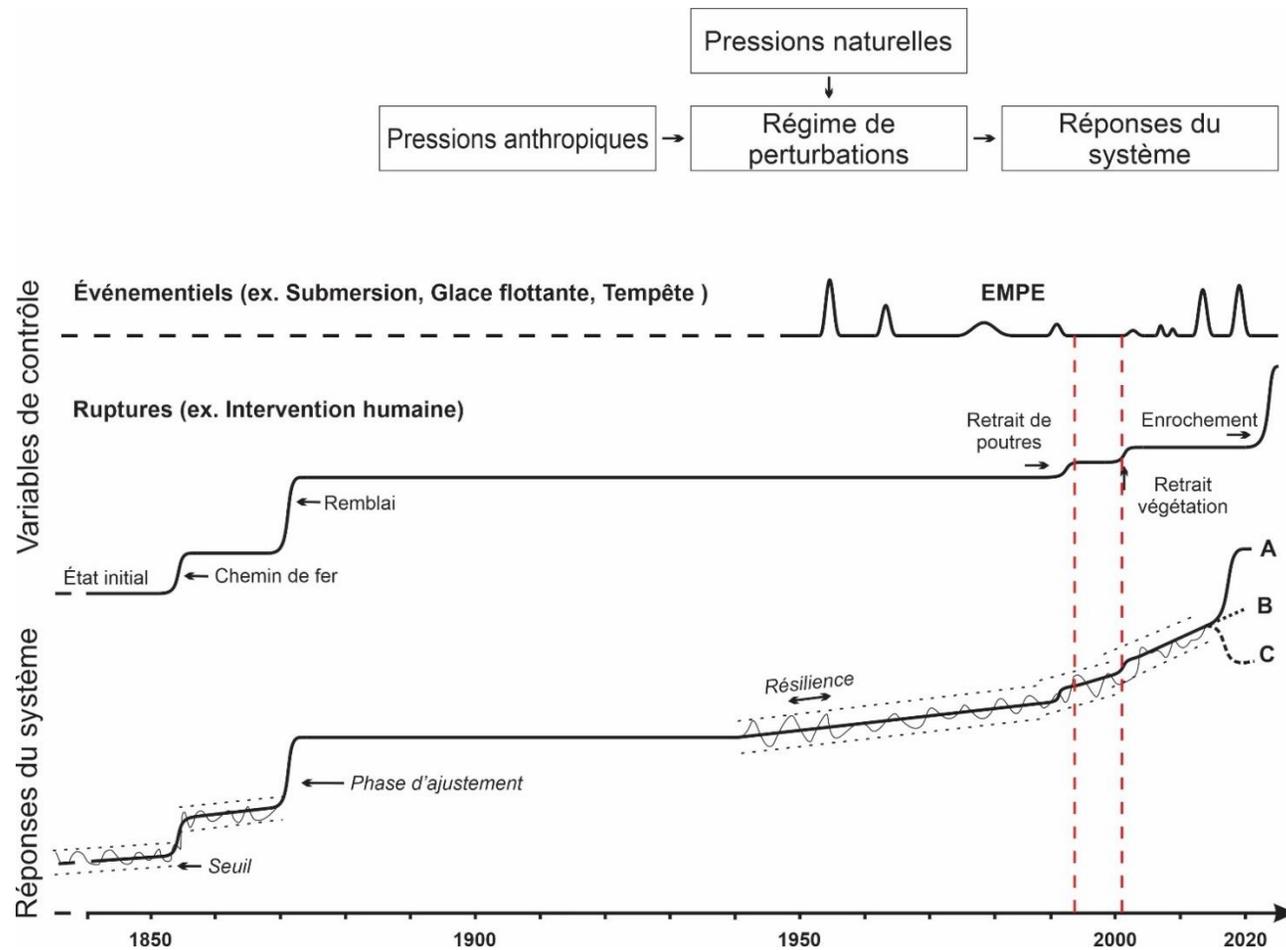


Figure 11: Représentation schématique de l'évolution de la résilience/réponse de la plage de l'Anse-Tibbits au régime de perturbations de l'EFSL au niveau de la ville de Québec ; Les seuils représentent la capacité du système à maintenir son état ; La résilience représente la capacité d'un système à répondre à des perturbations qui peuvent entraîner un changement d'état ; Les pointillés rouges marquent les interventions de 1996 et 2001 ; (A) Correspond à l'enrochement mis en place en novembre 2020 ; (B) Représente l'alternative de délocaliser la piste cyclable et laisser le système évoluer sans intervention ; (C) Représente l'alternative d'une recharge de plage.

1.8 Conclusion

Cette étude, basée sur des données historiques et sédimentaires, a permis d'améliorer la compréhension du régime de perturbations des berges l'EFSL et, plus spécifiquement, à identifier les processus contribuant à l'érosion des plages urbaines et anthropiques dans les régions froides. Cette étude a aussi permis de mettre sur pied une méthode permettant de faciliter la prise de décisions en matière d'aménagement et informant et en impliquant les différentes parties prenantes de l'aménagement du littoral.

L'analyse historique a permis d'identifier les phases de l'évolution de l'Anse-Tibbits depuis la fin du 19^e siècle. Ces informations se sont révélées primordiales dans la compréhension de la situation géomorphologique actuelle du site et pour situer l'anse dans le contexte physiographique et géologique de la région de Québec. Les phases d'aménagements, suivis par l'abandon du secteur, ont mené à la mise en place d'une plage atypique qui fut transformée en pôle récréotouristique pour la région par les acteurs locaux. Cependant, cette plage est d'origine humaine, car elle est composée d'un ancien remblai ferroviaire. De ce fait, la plage de l'Anse-Tibbits est plus sensible aux conditions hydrogéomorphologiques locales. Parmi ces conditions, nos analyses météorologiques historiques ont permis d'identifier deux facteurs de contrôles érosifs naturels dominant dans la région, soit les hauts niveaux d'eau et la combinaison des événements de submersions avec les glaces mobiles. Bien que leurs impacts dans l'histoire de l'anse soient non linéaires dans l'espace et le temps, il a été possible d'identifier un taux de déplacements latéraux du trait de côte variant de -0,13 m/année à -1,0 m/année entre 1950 et 2020. Dans un régime fluvio-estuarien à fetch très limité, l'action des glaces saisonnières semble être le mécanisme ayant le plus grand potentiel érosif sur les plages artificielles, surtout si le lien avec la source sédimentaire de ce système est coupé. Afin de tester cette hypothèse, il est nécessaire d'approfondir le sujet en impliquant des données de suivi quantitatives et une étude des conditions météorologiques plus poussée de la région.

C'est à la suite de taux de recul important qu'un enrochement mis en place en novembre 2020 a marqué la chute de la résilience dynamique du secteur. Désormais, seulement une réponse érosive devrait être observable dans le secteur, car le système n'a plus

de capacité de recharge sédimentaire à la suite des aléas régionale. Les lacunes juridiques concernant les enrochements au Québec et les limitations sur les mesures plus douces n'ont pas favorisé l'étude de l'ensemble des options d'aménagements pour ce secteur (Sauvé et al., 2020), ce qui aurait possiblement permis de préserver la résilience dynamique de l'anse. La question se pose à savoir combien de fois cette situation s'est produite par le passé, sachant que plus de 30 % des berges du Saint-Laurent fluvial sont enrochées (Bernier et al., 2021). Il serait aussi intéressant d'analyser le contexte socio-économique qui entoure la décision d'enrocher un secteur, afin de comprendre pourquoi cette décision est si répandue. Le cas de la plage de l'Anse-Tibbits aurait pu constituer une étude de cas type pour les systèmes anthropiques, tout en permettant d'informer et d'impliquer la population dans le processus décisionnel pour favoriser une meilleure gestion du milieu. En effet, les quelques milliers de visiteurs annuels et les locaux seront sûrement déçus de voir la seule plage de la municipalité éventuellement disparaître.

Les dernières études qui se sont penchées sur les enjeux dans l'EFSL ont permis de mieux comprendre l'évolution du littoral uniquement avec des approches vectorielles (2D) et avec des intervalles d'analyse temporels irréguliers. Afin de mieux comprendre le rôle de chaque facteur de contrôle en milieu fluvio-estuarien froid, une méthode 3D de suivi morphodynamique (Ruggiero et al., 2000) à une échelle saisonnière est nécessaire (Chassiot et al., 2020 ; Bernier et al., 2021). Ce type d'analyse permettrait de quantifier les mécanismes d'érosion verticale, lesquels n'ont pas été encore analysés dans l'EFSL. Un suivi post-EMPEs, à la suite d'événements d'ondes de tempêtes, de surcotes ou de débâcles printanières, permettrait aussi de mieux définir leurs impacts sur la morphodynamique des plages urbaines en milieu froid, lesquels ont été présentés principalement de façon qualitative dans la présente étude. Considérant l'importance probable de la glace dans l'EFSL, des analyses supplémentaires doivent être entreprises pour mieux comprendre les processus glaciels et mieux éclairer les décisions d'aménagement des berges. Enfin, les études portant sur l'érosion côtière visant à élaborer des outils géospatiaux pouvant être utilisés pour la planification locale du littoral sont une tâche complexe. Afin d'assurer leur succès et obtenir une gestion intégrée et responsable des littoraux naturels et anthropiques, il est nécessaire d'intégrer une voie de communication permettant l'échange d'informations entre les différentes parties prenantes du territoire.

Conclusions et perspectives

Ce mémoire a permis de mieux comprendre comment une plage urbaine d'origine anthropique peut évoluer dans un estuaire froid à l'aide d'un suivi historique couplé à une approche géomorphologique. Il a été possible de combler partiellement le manque de connaissances entourant ces systèmes estuariens en réalisant certains constats :

- L'aménagement du territoire peut entraîner la destruction ou la modification d'éco-géosystèmes, mais aussi la création de systèmes anthropiques, comme l'a révélé la transition historique de l'Anse-Tibbits et l'étude granulométrique. Ces nouveaux milieux peuvent posséder une valeur écologique et récréotouristique importante qui doit être prise en compte lors des futures décisions d'aménagement du littoral ;
- L'estuaire fluvial du Saint-Laurent n'est pas contrôlé par les mêmes facteurs de contrôle naturels dominants que son homologue maritime. La faible implication des vents et des tempêtes, une fois depuis 1950, permet à d'autres processus, comme la glace, de possiblement prendre plus de place dans le contrôle de la dynamique des plages anthropiques ;
- Lorsqu'on évalue le régime de perturbations d'un système sédimentaire, il faut prendre en compte l'ensemble des variables, soit naturel et anthropique, afin d'éviter de surestimer l'importance d'un de ces facteurs. C'est souvent le cas des événements hydrométéorologiques à forts potentiels érosifs, alors qu'ils sont souvent blâmés à l'inverse des interventions humaines ;
- La réalisation d'interventions anthropiques sans étude ou planification peut entraîner des résultats non désirables, comme l'augmentation de la sensibilité ou la disparition d'un système. L'impact de telles interventions a été relevé alors qu'une augmentation des déplacements latéraux du trait de côte et une dégradation du site ont été observées à la suite d'interventions mal planifiées ;
- La résilience d'un système sédimentaire peut être précaire et les interventions anthropiques peuvent entraîner des modifications importantes sur cette dernière. Si la compréhension d'un milieu n'est pas adéquate, il est possible de réduire, voire

d'éliminer, la résilience et le dynamisme d'un système et de le transformer en système statique/défunt, effaçant ainsi la capacité du système à répondre à son régime de perturbations. L'enrochement de l'Anse-Tibbits illustre cette situation, car à la suite de son enrochement, la plage n'est plus en mesure de s'alimenter et de se réajuster après des EMPEs.

Pour l'avenir de l'Anse-Tibbits et des autres systèmes sédimentaires de l'EFSL, il reste encore de nombreux paramètres à évaluer, notamment la morphodynamique et l'importance de la glace sur les mouvements verticaux. Pour ce faire, une étude saisonnière comportant des analyses 3D et d'événements en temps réel devient nécessaire. De plus, afin d'approfondir les connaissances sur la dynamique morpho-sédimentaire de l'EFSL, il serait nécessaire de (1) comparer la morphodynamique de plusieurs plages d'origine anthropique, (2) de réaliser des études similaires sur l'ensemble du fleuve Saint-Laurent et (3) d'instaurer un protocole d'analyse systématique avant d'intervenir sur une berge. Par ailleurs, il serait pertinent de mieux comprendre le processus de prise de décision lors de l'aménagement d'une structure rigide comme un enrochement. Enfin, dans une perspective de conscientisation, il est nécessaire d'impliquer la population locale dans le processus décisionnel d'aménagement ce qui leur permettrait de mieux comprendre les implications d'une intervention sur le littoral et de développer un sentiment d'attachement aux paysages locaux.

Bibliographie

- Alongi, D.M. 1998. Coastal Ecosystem Processes (1st ed.). CRC Press.
Doi: <https://doi.org/10.1201/9781003057864>
- Balasubramanian, A. 2017. Soil Erosion—Causes and Effects. University of Mysore, Mysore. Rapport technique. Doi: [10.13140/RG.2.2.26247.39841](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26247.39841).
- Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE). 2006. Projet d'aménagement de la promenade Samuel-De Champlain entre le pont Pierre-Laporte et la côte de l'Église à Québec. Rapport d'enquête et d'audience publique. Url: <https://www.bape.gouv.qc.ca/fr/dossiers/amenagement-promenade-samuel-de-champlain-pont-pierre-laporte-cote-eglise-quebec/>
- Barnes, P. W., Kempema, E. W., Reimnitz, E., et McCormick, M. 1994. The influence of ice on southern Lake Michigan coastal erosion. *Journal of Great Lakes Research*, 20 (1), 179-195. Doi:
- Best, J. 2019. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. *Nature Geoscience* 12 (1): 7–21. Doi: [10.1038/s41561-018-0262-x](https://doi.org/10.1038/s41561-018-0262-x).
- Bernatchez, P., et Fraser, C. 2012. Evolution of coastal defence structures and consequences for beach width trends, Québec, Canada. *Journal of coastal research*, 28 (6), 1550–1566. Doi: <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-1000189.1>
- Bernatchez, P., et J.-M. M. Dubois. 2004. Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie physique et Quaternaire* 58 (1) : 45-71. Doi: [10.7202/013110ar](https://doi.org/10.7202/013110ar).
- Bernier, J. F., Chassiot, L., et Lajeunesse, P. 2021. Assessing bank erosion hazards along large rivers in the Anthropocene: a geospatial framework from the St. Lawrence fluvial system. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12 (1), 1584-1615. Doi: <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1935333>
- Bianchi, T. S. 2007. *Biogeochemistry of estuaries*. Oxford University Press on Demand.
- Biondo, M., Buosi, C., Trogu, D., Mansfield, H., Vacchi, M., Ibba, A., et De Muro, S. 2020. Natural vs. Anthropogenic Influence on the Multidecadal Shoreline Changes of Mediterranean Urban Beaches: Lessons from the Gulf of Cagliari (Sardinia). *Water*, 12 (12), 3578. Doi: <https://doi.org/10.3390/w12123578>
- Blott, S.J. et Pye, K. 2001 GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1237-1248. Url: <http://www.kpal.co.uk/gradistat.html>
- Bonte, Y., et Levoy, F. 2015. Field experiments of beach scarp erosion during oblique wave, stormy conditions (Normandy, France). *Geomorphology*, 236, 132-147. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.014>
- Boone, W., et Verhoest, N. 2010. *Cryo-thermal-hydrodynamics of tidal flats: a case study of the St. Lawrence Fluvial Estuary* (Mémoire de maîtrise, Ghent University, Belgium). [En ligne] Url:

https://www.researchgate.net/publication/273124535_Cryo-thermal-hydrodynamics_of_tidal_flats_A_case_study_of_the_St_Lawrence_Fluvial_Estuary

- Brunier, G., J. Fleury, E. J. Anthony, A. Gardel, et P. Dussouillez. 2016. Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach. *Geomorphology* 261: 76- 88. Doi: [10.1016/j.geomorph.2016.02.025](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.025).
- Carrasco, A. R., Ferreira, Ó., Matias, A., et Freire, P. 2012. Natural and human-induced coastal dynamics at a back-barrier beach. *Geomorphology*, 159, 30-36. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.03.001>
- Castelle, B., et Harley, M. 2020. Extreme events: Impact and recovery. In *Sandy Beach Morphodynamics* (pp. 533-556). Elsevier. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00022-9>
- Chacón Abarca, S., Chávez, V., Silva, R., Martínez, M. L., et Anfuso, G. 2021. Understanding the dynamics of a coastal lagoon: drivers, exchanges, state of the environment, consequences and responses. *Geosciences*, 11 (8), 301. Doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences11080301>
- Chassiot, L., P. Lajeunesse, et J.-F. Bernier. 2020. Riverbank erosion in cold environments: Review and outlook. *Earth-Science Reviews* 207: 103231. Doi: [10.1016/j.earscirev.2020.103231](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103231).
- Chen, Y., et She, Y. 2020. Long-term variations of river ice breakup timing across Canada and its response to climate change. *Cold Regions Science and Technology*, 176, 103091. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103091>
- Clapuyt, F., V. Vanacker, et K., Van Oost. 2016. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. *Geomorphology* 260: 4- 15. Doi: [10.1016/j.geomorph.2015.05.011](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.011)
- Cooper, J. A. G., et McKenna, J. 2008. Working with natural processes: the challenge for coastal protection strategies. *Geographical Journal*, 174(4), 315-331. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2008.00302.x>
- Cooper, J. A. G., O'connor, M. C., et McIvor, S. 2020. Coastal defences versus coastal ecosystems: a regional appraisal. *Marine Policy*, 111, 102332. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.02.021>
- Cornwell, S. M. 1971. Anthracite mining spoils in Pennsylvania. I. Spoil classification and plant cover studies. *Journal of Applied Ecology*, 401-409. Doi: <https://doi.org/10.2307/2402879>
- Couasnon, A., Eilander, D., Muis, S., Veldkamp, T. I., Haigh, I. D., Wahl, T., et Ward, P. J. 2020. Measuring compound flood potential from river discharge and storm surge extremes at the global scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 489-504. Doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-20-489-2020>
- Dauphin D. 2000. Influence de la navigation commerciale et de la navigation de plaisance sur l'érosion des rives du Saint-Laurent dans le tronçon Cornwall–Montmagny.

- Final report. Québec, QC : Ministère des Transports du Québec, Service du transport maritime. Doi: <http://belsp.uqtr.ca/id/eprint/985>
- Dean, R. G., et Galvin Jr, C. J. 1976. Beach erosion: causes, processes, and remedial measures. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 6 (3), 259-296. Doi: <https://doi.org/10.1080/10643387609381643>
- Didier, D., Caulet, C., Bandet, M., Bernatchez, P., Dumont, D., Augereau, E., Floc'h, F., et Delacourt, C. 2020. Wave runup parameterization for sandy, gravel and platform beaches in a fetch-limited, large estuarine system. *Continental Shelf Research*, 192, 104024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.104024>
- Dionne, J. C. 1970. *Aspects morpho-sédimentologiques du glacier : en particulier des côtes du Saint-Laurent*. Service canadien des forêts, Ministère des pêches et des forêts. Url : <https://d1ied5g1xfgpx8.cloudfront.net/pdfs/15074.pdf>
- Dionne, J.-C. 1973. La notion de pied de glace (Icefoot), en particulier dans l'estuaire du Saint-Laurent. *Cahiers de géographie du Québec*, 17 (41), 221–250. Doi: <https://doi.org/10.7202/021116ar>
- Dionne, J. C. 1993. Sediment load of shore ice and ice rafting potential, upper St. Lawrence estuary, Quebec, Canada. *Journal of coastal research*, 628-646. Doi: <https://www.jstor.org/stable/4298118>
- Di Stefano, A., De Pietro, R., Monaco, C., et Zanini, A. 2013. Anthropogenic influence on coastal evolution: A case history from the Catania Gulf shoreline (eastern Sicily, Italy). *Ocean & coastal management*, 80, 133-148. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.02.013>
- Drapeau, G. 1992. Dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent. *Géographie physique et Quaternaire*, 46 (2), 233-242. Doi: <https://doi.org/10.7202/032907ar>
- Dufour, S., et Piégay, H. 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. *River research and applications*, 25 (5), 568-581. Doi: <https://doi.org/10.1002/rra.1239>
- Encyclopédie canadienne. 2021. Industrialisation au Canada. Dans *l'Encyclopédie canadienne*. Doi: <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/industrialisation>
- Environnement Canada. 2021. Marée Lauzon – 03250. Gouvernement du Canada. [En ligne] Url : <https://www.marees.gc.ca/fr/stations/3250> (Consulté le 06/01/2022)
- Feagin, R. A., Figlus, J., Zinnert, J. C., Sigren, J., Martínez, M. L., Silva, R., et Carter, G. 2015. Going with the flow or against the grain? The promise of vegetation for protecting beaches, dunes, and barrier islands from erosion. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(4), 203-210. Doi: <https://doi.org/10.1890/140218>
- Flemming, B. 2020. Beach sand and its origins. In *Sandy Beach Morphodynamics* (pp. 15-37). Elsevier. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00002-3>

- Forbes, D. L., et Taylor, R. B. 1994. Ice in the shore zone and the geomorphology of cold coasts. *Progress in Physical Geography*, 18(1), 59-89. Doi: <https://doi.org/10.1177/030913339401800104>
- Fuller, I. C., Gilvear, D. J., Thoms, M. C., et Death, R. G. 2019. Framing resilience for river geomorphology: Reinventing the wheel?. *River Research and Applications*, 35 (2), 91-106. Doi: <https://doi.org/10.1002/rra.3384>
- Fraser, C., Bernatchez, P., et Dugas, S. 2017. Development of a GIS coastal land-use planning tool for coastal erosion adaptation based on the exposure of buildings and infrastructure to coastal erosion, Québec, Canada. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8 (2), 1103-1125. Doi: <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1294114>
- Freire, P., Ferreira, Ó., Taborda, R., Oliveira, F. S. B. F., Carrasco, A. R., Silva, A., et Santos, J.A. 2009. Morphodynamics of fetch-limited beaches in contrasting environments. *Journal of coastal research*, 183-187. Doi: <https://www.jstor.org/stable/25737562>
- Freire, P., Jackson, N. L., et Nordstrom, K. F. 2013. Defining beaches and their evolutionary states in estuaries. *Journal of Coastal Research*, (65 (10065)), 482-487. Doi: <https://doi.org/10.2112/SI65-082.1>
- Gabriel, A. O. 2004. Impacts, perceptions, and management of shoreline hazards and water levels on a fluctuating reservoir: A case study of the Winnebago System, Wisconsin. *Lake and Reservoir Management*, 20 (3), 197-210. Doi: <https://doi.org/10.1080/07438140409354244>
- Gagné, D. et Franck, A. 2008. Québec - Lévis : dialogue interrives. *Continuité*, (116), 51-53. Doi: <https://id.erudit.org/iderudit/17410ac>
- Gagné, D. 2013. Le secteur de la Traverse. Rapport remis à la ville de Lévis. [En ligne] Url : https://www.ville.levis.qc.ca/fileadmin/Documents_PDF/Histoire-secteur-Traverse.pdf
- Gonçalves, J. A., et R. Henriques. 2015. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*: 11. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>
- Goudie AS, Viles HA. 2016. *Geomorphology in the Anthropocene*. Cambridge : Cambridge University Press. Doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781316498910>
- Haff, P. K. 2003. Neogeomorphology, prediction, and the anthropic landscape. *GEOPHYSICAL MONOGRAPH-AMERICAN GEOPHYSICAL UNION*, 135, 15-26.
- Hamel, J-F. et Mercier, A. 2000. *Le Saint-Laurent : beautés sauvages du grand fleuve*. Les Éditions de l'homme, Canada. 226 p.
- Hénaff, A. et Philippe, M. 2014. Gestion des risques d'érosion et de submersion marines-Guide méthodologique. Rapport réaliser dans le cadre du projet ANR Cocorisco (2011-2015), P.156.

- Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., and Farris, A.S., 2021, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1091, 104 p. Doi: <https://doi.org/10.3133/ofr20211091>
- Holling, C. S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 4 (1), 1-23.
- Institut de la statistique du Québec. 2019. Analyse des territoires inondés en 2017 et en 2019 à l'aide des Comptes des terres du Québec méridional, [En ligne], Québec, L'Institut, 15 p. www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/environnement/comptesterres-inondations.pdf
- Jackson NL, Nordstrom KF, Eliot I, et Masselink G. 2002. 'Low energy' sandy beaches in marine and estuarine environments: a review. *Geomorphology* 48 (1–3): 147–162. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00179-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00179-4)
- Jackson, D., et Short, A. (Eds.). 2020. *Sandy beach morphodynamics*. Elsevier. Doi: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-02420-2>
- Jacob, C., Bernatchez, P., Dupras, J., et Cusson, M. 2021. Not just an engineering problem: The role of knowledge and understanding of ecosystem services for adaptive management of coastal erosion. *Ecosystem Services*, 51, 101349. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101349>
- James, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., et Niethammer, U. 2017a. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280, 51–66. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>
- James, M. R., Robson, S., et Smith, M. W. 2017b. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42 (12), 1769–1788. Doi: <https://doi.org/10.1002/esp.4125>
- James, M. R., Chandler, J. H., Eltner, A., Fraser, C., Miller, P. E., Mills, J. P., et Lane, S. N. 2019. Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44 (10), 2081–2084. Doi: <https://doi.org/10.1002/esp.4637>
- Joyal, G., Lajeunesse, P., Morissette, A., et Bernatchez, P. 2016. Influence of lithostratigraphy on the retreat of an unconsolidated sedimentary coastal cliff (St. Lawrence estuary, eastern Canada). *Earth Surface Processes and Landforms*, 41 (8), 1055–1072. Doi: [10.1002/esp.3886](https://doi.org/10.1002/esp.3886)
- Kempema, E. W., Reimnitz, E., et Barnes, P. W. (2001). Anchor-ice formation and ice rafting in southwestern Lake Michigan, USA. *Journal of Sedimentary Research*, 71 (3), 346–354. Doi: <https://doi.org/10.1306/2DC40948-0E47-11D7-8643000102C1865D>
- Kessler, A. C., Gupta, S. C., et Brown, M. K. 2013. Assessment of riverbank erosion in Southern Minnesota rivers post European settlement. *Geomorphology*, 201, 312–322. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.07.006>

- Khanal, S., Ridder, N., de Vries, H., Terink, W., et van den Hurk, B. (2018). Storm surge and extreme river discharge: a compound event analysis using ensemble impact modelling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-25. Doi: <https://doi.org/10.5194/hess-2018-103>
- Komar, P. D. 1998. *Beach processes and sedimentation*. 2^e édition. Upper Saddle River, New Jersey. Prentice Hall. 544 p.
- Lawler, D. M. 1986. Riverbank erosion and the influence of frost: a statistical examination. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 227–242. Doi: <https://doi.org/10.2307/622008>
- López-Ruiz, A., Ortega-Sánchez, M., et Losada, M. Á. 2020. Mixed sand and gravel beaches. In *Sandy Beach Morphodynamics* (pp. 317-341). Elsevier. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00014-X>
- Lowe, M. K., et Kennedy, D. M. (2016). Stability of artificial beaches in Port Phillip Bay, Victoria, Australia. *Journal of Coastal Research*, (75 (10075)), 253-257. Doi: <https://doi.org/10.2112/SI75-51.1>
- Mallet, C., et Michot, C. 2012. Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte. BRGM/RP-60616-FR, Rapport soumis au BRGM.
- Marie, G. 2022. Boulder transport by ice in the St. Lawrence Estuary (Canada): Influence of shore platform geomorphology and ice-foot development. *Marine Geology*, 106815. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2022.106815>
- Matte, P. 2014. Modélisation hydrodynamique de l'estuaire fluvial du Saint-Laurent. Thèse. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Doctorat en sciences de l'eau, 334 p.
- Matte, P., Secretan, Y., et Morin, J. 2017. Hydrodynamic modeling of the St. Lawrence fluvial estuary. I: Model setup, calibration, and validation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 143 (5), 04017010. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000397](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000397)
- Ministère des ressources naturelles du Québec. 2012. [Compilation géologique – Québec. \[Document cartographique\]. 1 : 50 000. \[CG-21L14-2012-01\]. Service d'information géominière du Québec. \[En ligne\] : https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/CG21L14201201/CG21L14201201PLAN.pdf \(Consulté le 06/06/2022\)](https://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/CG21L14201201/CG21L14201201PLAN.pdf)
- Montanari, A., Londei, A., et Staniscia, B. 2014. Can we interpret the evolution of coastal land use conflicts? Using Artificial Neural Networks to model the effects of alternative development policies. *Ocean & coastal management*, 101, 114-122. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.09.021>
- Nordstrom, K. F. 1992. Estuarine beaches: an introduction to the physical and human factors affecting use and management of beaches in estuaries, lagoons, bays and fjords. Springer Science & Business Media.

- Neumeier, U., et Cheng, C. 2015. Hydrodynamics and sediment dynamics in an ice covered tidal flat. In *The Proceedings of the Coastal Sediments 2015*. Doi: https://doi.org/10.1142/9789814689977_0083
- Nordstrom, K. F., et N. L. Jackson. 2012. Physical processes and landforms on beaches in short fetch environments in estuaries, small lakes and reservoirs: A review. *Earth Science Reviews* 111 (1,2): 232 - 247. Doi: [10.1016/j.earscirev.2011.12.004](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.12.004).
- Nordstrom, K. F., Lampe, R., et Vandemark, L. M. 2000. Reestablishing naturally functioning dunes on developed coasts. *Environmental management*, 25(1), 37-51. Doi: <https://doi.org/10.1007/s002679910004>
- Nordstrom, K.F., Sherman, D.J., 1982. Ice effects on mid-latitude marine and estuarine beaches. *Northeastern Geology* 4, 134–138.
- Ojeda, E., et Guillén, J. 2008. Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches. *Marine Geology*, 253 (1-2), 51-62. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.03.010>
- Ojeda, E., Guillén, J., et Ribas, F. 2010. The morphodynamic responses of artificial embayed beaches to storm events. *Advances in geosciences*, 26, 99-103. Doi: <https://doi.org/10.5194/adgeo-26-99-2010>
- Oyedotun, T. D. 2014. Shoreline geometry: DSAS as a tool for historical trend analysis. *Geomorphological Techniques*, 3 (2.2), 1-12. Url: https://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/chapters/3.2.2_ShorelineGeometry.pdf
- Pagán, J. I., Aragonés, L., Tenza-Abril, A. J., et Pallarés, P. 2016. The influence of anthropic actions on the evolution of an urban beach: Case study of Marineta Cassiana beach, Spain. *Science of the Total Environment*, 559, 242-255. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.134>
- Pagán, J. I., López, I., Aragonés, L., et Garcia-Barba, J. 2017. The effects of the anthropic actions on the sandy beaches of Guardamar del Segura, Spain. *Science of The Total Environment*, 601, 1364-1377. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.272>
- Pagán, J. I., López, I., Bañón, L., et Aragonés, L. 2020. Consequences of Anthropic Actions in Cullera Bay (Spain). *Journal of marine science and engineering*, 8(4), 240. Doi: <https://doi.org/10.3390/jmse8040240>
- Pereira, L., Concejo, A. V., et Trindade, W. 2020. Tidal modulation. In *Sandy Beach Morphodynamics* (pp. 87-101). Elsevier. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00005-9>
- Piégay, H., F. Arnaud, B. Belletti, M. Bertrand, S. Bizzi, P. Carbonneau, S. Dufour, F. Liébault, V. Ruiz-Villanueva, et L. Slater. 2020a. Remotely sensed rivers in the Anthropocene: state of the art and prospects. *Earth Surface Processes and Landforms* 45 (1): 157 - 188. Doi: [10.1002/esp.4787](https://doi.org/10.1002/esp.4787).
- Piégay, H., Chabot, A., et Le Lay, Y. F. 2020b. Some comments about resilience: From cyclicity to trajectory, a shift in living and nonliving system

- theory. *Geomorphology*, 367,106527. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.018>
- Prahalad, V., Sharples, C., Kirkpatrick, J., et Mount, R. 2015. Is wind-wave fetch exposure related to soft shoreline change in swell-sheltered situations with low terrestrial sediment input? *Journal of Coastal Conservation*, 19 (1), 23–33. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11852-014-0352-x>
- Pranzini, E., Wetzel, L., et Williams, A. T. 2015. Aspects of coastal erosion and protection in Europe. *Journal of coastal conservation*, 19(4), 445-459. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11852-015-0399-3>
- Quintin C., Arsenault, E. et Bernatchez, P. 2016. Caractérisation côtière du territoire de la Table de concertation régionale, zone de Québec. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis à la Communauté Métropolitaine du Québec (CMQ), 50 p + annexes.
- Rangel-Buitrago, N., de Jonge, V. N., et Neal, W. 2018a. How to make integrated coastal erosion management a reality. *Ocean & Coastal Management*, 156, 290-299. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.01.027>
- Rangel-Buitrago, N., Williams, A. T., et Anfuso, G. 2018b. Hard protection structures as a principal coastal erosion management strategy along the Caribbean coast of Colombia. A chronicle of pitfalls. *Ocean & Coastal Management*, 156, 58-75. Doi: <https://doi-org/10.1016/j.ocecoaman.2017.04.006>
- Roland, C. J., Zoet, L. K., Rawling III, J. E., et Cardiff, M. 2021. Seasonality in cold coast bluff erosion processes. *Geomorphology*, 374, 107520. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107520>
- Rondeau-Genesse, G. 2020. Impact des changements climatiques sur les facteurs hydroclimatiques influençant les inondations et les processus d'érosion des berges du tronçon fluvial du Saint-Laurent. Rapport technique 510031. Ouranos : Montréal.
- Ropars, Yann. 2021. Parc de la plage Jacques-Cartier, Québec, QC – Étude de la stabilisation des berges du parc. Déposé au bureau d'audiences publiques sur l'environnement. [En Ligne] Url : <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiG3feUtZn4AhW3mYQIHQZwDP0QFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fvoute.bape.gouv.qc.ca%2Fdl%2F%3Fid%3D00000210274&usg=AOvVaw3EZ4b1AZV3Q12qQXCY6kqk> (Consulté le 06/06/2022)
- Rosen, P.S., Leach, K., 1987. Sediment accumulation forms, Thompson Island, Boston Harbor, Massachusetts. In: FitzGerald, D.M., Rosen, P.S. (Eds.), *Glaciated Coasts*. Academic Press, San Diego, pp. 233–249.
- Rohweder, J. J., Rogala, J. T., Johnson, B. L., Anderson, D., Clark, S., Chamberlin, F., et Runyon, K. 2008. Application of wind fetch and wave models for habitat rehabilitation and enhancement projects (No. 2008-1200, pp. 0-0). Geological Survey (US). Doi: <https://doi.org/10.3133/ofr20081200>

- Ruggiero, P., Voigt, B., et Kaminsky, G. 2000, July. Beach monitoring for enhanced decision-making. In *Coastal Society 17th Conference Coasts at the Millennium Portland, Oregon* (pp. 516-524). Url: <https://nsgl.gso.uri.edu/oresu/oresuc00002/pdf/papers/087.pdf>
- Sauvé, P., Bernatchez, P., et Glaus, M. 2020. The role of the decision-making process on shoreline armoring: A case study in Quebec, Canada. *Ocean & Coastal Management*, 198, 105358. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105358>
- Senechal, N., et de Alegría-Arzaburu, A. R. 2020. Seasonal imprint on beach morphodynamics. *Sandy Beach Morphodynamics*, 461-486. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00020-5>
- Short, A. D., et Jackson, D. W. T. 2013. Beach morphodynamics. *Treatise on Geomorphology*, 106–129. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00275-X>
- Tmušić, G., Manfreda, S., Aasen, H., James, M. R., Gonçalves, G., Ben-Dor, E., et McCabe, M. F. 2020. Current practices in UAS-based environmental monitoring. *Remote Sensing*, 12 (6), 1001. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs12061001>
- Toffoli, A., et Bitner-Gregersen, E. M. 2017. Types of ocean surface waves, wave classification. *Encyclopedia of maritime and offshore engineering*, 1-8. Doi: <https://doi.org/10.1002/9781118476406.emoe077>
- Tomsett, C., et Leyland, J. 2019. Remote sensing of river corridors: A review of current trends and future directions. *River Research and Applications*, 35 (7), 779-803. Doi: <https://doi.org/10.1002/rra.3479>
- Troudes, J.P. et J.B Sérodes. 1988. Le rôle des glaces dans le régime morpho sédimentologique d'un estran de l'estuaire moyen du Saint-Laurent. *Canadian Journal of Engineering*: 15, 348–354.
- Türker, U., Yagci, O., et Kabdaşlı, M. S. 2006. Analysis of coastal damage of a beach profile under the protection of emergent vegetation. *Ocean Engineering*, 33(5-6), 810-828. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2005.04.019>
- Vila-Concejo, A., Hughes, M. G., Short, A. D., et Ranasinghe, R. 2010. Estuarine shoreline processes in a dynamic low-energy system. *Ocean Dynamics*, 60 (2), 285–298. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10236-010-0273-7>
- Vila-Concejo, A., Gallop, S. L., et Largier, J. L. 2020. Sandy beaches in estuaries and bays. In *Sandy Beach Morphodynamics* (pp. 343-362). Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00015-1>
- Volpano, C. A., Zoet, L. K., Rawling III, J. E., Theuerkauf, E. J., et Krueger, R. 2020. Three-dimensional bluff evolution in response to seasonal fluctuations in Great Lakes water levels. *Journal of Great Lakes Research*, 46 (6), 1533–1543. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.08.017>

- Ville de Lévis. 2020. *Histoire et archéologie*. Ville de Lévis : Québec. Url : <https://www.ville.levis.qc.ca/culture/histoire-patrimoine/histoire-archeologie/> (Consulté 06/06/2022)
- Vousdoukas, M. I., R. Ranasinghe, L. Mentaschi, T. A. Plomaritis, P. Athanasiou, A. Luijendijk, et L. Feyen. 2020a. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change* 10 (3): 260 - 263. Doi: [10.1038/s41558-020-0697-0](https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0).
- Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., et Feyen, L. 2020 b. Reply to: Sandy beaches can survive sea-level rise. *Nature Climate Change*, 10 (11), 996–997. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00935-1>
- Westoby, M. J., J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey, et J. M. Reynolds. 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300- 314. Doi: [10.1016/j.geomorph.2012.08.021](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021).
- Williams, A. T., Rangel-Buitrago, N., Pranzini, E., et Anfuso, G. (2018). The management of coastal erosion. *Ocean & Coastal Management*, 156, 4-20. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.03.022>
- WSP. 2018. Nettoyage du puits d’alimentation en eau brute au terminal maritime - Évaluation environnementale. PROJET NO : 171-16491-00. Consulté le 27 septembre 2021. [En ligne] Url : https://consultation-citoyens.portquebec.ca/system/pdf_documents/attachments/000/000/017/original/15032018_Avis_de_projet_pour_travaux_de_nettoyage_du_puits_d'alimentation_en_eau_brute_FINALE.pdf?1530630170
- Xu Z, Saucier FJ et Lefavre D, 2006, Water level variations in the Estuary and Gulf of St. Lawrence. Understanding Sea-Level Rise and Variability Workshop. (Paris, France, June 6-9, 2006).
- Zone d’Intervention Prioritaire (ZIP) de Québec et Chaudière-Appalaches. 1998. Création d’une plage publique à l’anse au Foulon – Étude de préféabilité de processus d’ensablement. Url : <https://www.zipquebec.com/images/stories/actions/projets-et-etudes/plage-anse-au-foulon/plage-anseaufoulon1.pdf>
- ZIP de Québec et Chaudière-Appalaches. 2006. Potentiel de baignade à l’Anse-Tibbits – Modélisation de la qualité des eaux. Url: https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/promenade_champlain_phase3/documents/DC4.pdf
- Zscheischler, J., Westra, S., Van Den Hurk, B. J., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., et Zhang, X. 2018. Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 8(6), 469-477 Doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>