



UNIVERSITÉ
LAVAL

Mars 2020

Caractérisation des berges de la partie fluviale du Saint- Laurent

Rapport final

Livré au :
***Ministère de l'Environnement et de la
Lutte contre les changements
climatiques (MELCC)***



Équipe de réalisation

Département de géographie, Université Laval

Patrick Lajeunesse, Ph.D., Professeur chercheur

Jean-François Bernier, M.Sc., Professionnel de recherche

Thibault Labarre, M.Sc., Professionnel de recherche

Claudine Ouellet, M.Sc., Professionnelle de recherche

Léo Chassiot, Ph.D., Stagiaire postdoctoral

Sydney Meury, B.Sc., Auxiliaire de recherche

Hugo Morin, B.Sc., Auxiliaire de recherche

Simon Lachapelle, B.Sc., Auxiliaire de recherche

Louis-Charles Perreault, B.Sc., Auxiliaire de recherche

Clara Pelletier Boily, B.Sc., Auxiliaire de recherche

Jean Pruvost, M.Sc., Stagiaire

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)

Élisabeth Bussières, M. Env.

Ce projet a été financé par le Fonds vert dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques 2013-2020 (PACC 2013-2020) du gouvernement du Québec.



Référence complète du livrable

Bernier, J.-F., Chassiot, L., Ouellet, C. et Lajeunesse, P. 2020. Caractérisation des berges de la partie fluviale du Saint-Laurent. Laboratoire de géosciences marines, Département de Géographie, Université Laval, Rapport soumis au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 120 pp + annexes.

TABLE DES MATIERES

Liste des figures	v
Liste des tableaux	x
Faits saillants	1
1 Mise en contexte et objectifs du projet	2
1.1 Contexte du volet fluvial de la mesure 2.6 du PACC 2013-2020 « Soutien aux municipalités situées le long du Saint-Laurent confrontées aux aléas côtiers d'inondation et d'érosion »	2
1.2 Contexte spécifique du projet Érosion	2
1.3 Objectifs du projet	3
2 Physiographie du secteur à l'étude	5
2.1 Aire d'étude et paramètres physiques	5
2.1.1 Délimitation de l'aire d'étude	5
2.1.2 Paramètres physiques généraux et spécifiques	6
3 Rétrospective et classification des processus d'érosion du tronçon fluvial	9
3.1 Processus érosifs	9
3.2 Facteurs de contrôle	11
3.2.1 Facteurs naturels	11
3.2.2 La pression humaine	17
4 Méthodologie	22
4.1 Revue de littérature et acquisition des données géospatiales existantes	22
4.1.1 Revue de littérature	22
4.1.2 Données géospatiales existantes	23
4.2 Caractérisation des berges du tronçon fluvial	24
4.2.1 Étape 1 : Numérisation des limites géomorphologiques de la berge	24
4.2.2 Étape 2 : Segmentation et caractérisation des segments	27
4.2.3 Étape 3 : Observations et validations sur le terrain	29
4.3 Consultations et ateliers auprès des TCR	30
4.3.1 Rencontres de démarrage	30
4.3.2 Ateliers d'identification de sites d'intérêt	31
4.3.3 Présentations et discussions autour des résultats finaux	32
4.4 Identification des secteurs vulnérables à l'érosion	33
4.5 Limites et contraintes de l'étude	35
5 Résultats et analyses	36

5.1	TCR de Québec	36
5.1.1	Statistiques sur la caractérisation	36
5.1.2	Inventaire des sites vulnérables à l'aléa de l'érosion des berges.....	43
5.2	TCR de l'Estuaire fluvial	46
5.2.1	Statistiques sur la caractérisation	46
5.2.2	Inventaire des sites vulnérables à l'aléa de l'érosion des berges.....	54
5.3	TCR du lac Saint-Pierre	57
5.3.1	Statistiques sur la caractérisation	57
5.3.2	Inventaire des sites vulnérables à l'aléa de l'érosion des berges.....	64
5.4	TCR du Haut-Saint-Laurent et Grand-Montréal	67
5.4.1	Statistiques sur la caractérisation	67
5.4.2	Inventaire des sites vulnérables à l'aléa de l'érosion des berges.....	79
5.5	Synthèse	84
5.5.1	Statistiques sur la caractérisation	84
5.5.2	Inventaire des sites vulnérables à l'aléa de l'érosion des berges.....	85
6	Discussion	87
6.1	Caractérisation des berges et répartition spatiale de l'érosion dans le tronçon fluvial	87
6.1.1	Caractérisation des berges : une actualisation du tracé et des enjeux	87
6.1.2	Répartition spatiale de l'érosion au sein du Saint-Laurent dulcicole	91
6.2	Rôle des changements climatiques et de l'anthropisation	101
6.3	Gestion intégrée et stratégies d'aménagement face aux défis actuels et futurs... ..	105
7	Lacunes, besoins et recommandations pour le tronçon fluvial	108
8	Sommaire et conclusions	110
9	Références	113
10	Abréviations	120
11	Annexe A : Légendes pour la caractérisation des berges du tronçon fluvial.....	121
11.1	Segmentation maritime	122
11.1.1	Légende pour la TCR de Québec et de l'Estuaire fluvial (modifiée de Quintin et al., 2016).....	122
11.2	Segmentation fluviale	137
11.2.1	Légende pour la TCR du lac Saint-Pierre et du Haut-Saint-Laurent et Grand-Montréal	137
12	Annexe B : Base de données géospatiales.....	153
13	Annexe C : Fiches qualitatives imagées des sites vulnérables à l'érosion	154

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de localisation de la région étudiée et des quatre TCR.	5
Figure 2. (A) Image aérienne oblique d'une berge composite constituée d'argile et de blocs affectés par le ruissellement à la base et de sable colonisé par les oiseaux au sommet. (B) Processus de ruissellement et de ravinement au sein d'une falaise de schiste argileux. (C) Processus de dessiccation et de formation de feuillets réduisant la cohésion de la berge dans des matériaux fins. (D) Lentilles de glace (flèches blanches) dans une falaise de schiste argileux illustrant les cycles de gel-dégel. (E) Mouvements gravitaires (affaissement) initiés à la base d'une berge de schiste argileux (flèches noires). (F) Chute d'arbres le long d'une berge abrupte (flèche noire). (G, H) Berge naturelle creusée par les rats musqués (Modifiée de Chassiot et al., sous presse).....	10
Figure 3. (A) Couverture de glace incomplète dans le chenal du fleuve Saint-Laurent. (B) Image de drone illustrant la zone de transition avec la couverture de neige sur la rive, la banquise côtière et les blocs de glace ou la glace dérivante. (C, D, E) Illustrations de banquise côtière et de blocs de glace à la dérive déposés devant une berge bétonnée. (F) Radeaux de glace poussés par la glace et glace dérivante le long d'un mur de béton. (G) Végétation dégradée après le retrait de la glace de rive (Tirée de Chassiot et al., sous presse).	12
Figure 4. Survol de différents types de berges identifiés dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent. (A) Falaise rocheuse (> 5 m). (B) Faciès rocheux d'une berge basse (< 5 m). (C) Falaise constituée de dépôts meubles. (D) Berge basse meuble. (E) Terrasse de plage. (F) Milieu humide. (G) Empierrement artificiel d'une berge. (H) Empierrement artificiel et mur de béton (protection mixte) (Tirée de Chassiot et al., sous presse).	14
Figure 5. Synthèse des processus d'érosion pouvant agir sur des berges naturelles d'un fleuve en milieu froid lors (A) de conditions estivales et (B) lors de conditions hivernales (Modifiée de Chassiot et al., sous presse).....	16
Figure 6. Types d'impacts des processus d'érosion sur des artificialités au niveau de la berge.....	18
Figure 7. Illustration de l'impact des aménagements anthropiques sur la dynamique sédimentaire pour les milieux riverains. (A) Effet de bout résultant de la diffraction des vagues suite à un empierrement du bas de talus (B). Photographie prise par l'UQAR. (C) Coincement des berges en raison des structures de protection construites en arrière des terres. (D) Amplification de la sédimentation au profit du milieu humide à proximité des structures bâties au pied de la falaise.	18
Figure 8. (A) Image aérienne oblique illustrant l'étendue du trafic maritime dans le fleuve Saint-Laurent entre Québec et Montréal. (B) Vagues induites par un navire de type cargo qui frappent les berges. Remblayage et canalisation d'un milieu humide riverain par un développement résidentiel. (C) La berge est protégée par divers murs et enrochements. (D) Mur incliné en dalles de béton endommagé par les processus d'altération et l'action	

des vagues. (E) Eaux turbulentes à l'exutoire du barrage de Carillon. (F) Érosion par surverse derrière un enrochement lors de la crue printanière de 2019.	20
Figure 9. Interactions entre les processus fluviaux et terrestres, les facteurs de contrôle environnementaux (physiographie et biologie), les changements climatiques (P = Précipitations et T = Températures) et les impacts anthropiques (Traduite de Chassiot et al., sous presse).....	21
Figure 10. Aperçu de l'index en format Access.....	22
Figure 11. Numérisation préliminaire dans le secteur de Nicolet. Un exemple de liste déroulante est visible dans la table attributaire.....	25
Figure 12. Schéma exposant les types de lits fluviaux et les niveaux d'eau associés (Tirée de Piégay, 2020).	26
Figure 13. Aperçu du trait de berge (en brun) et du trait d'un milieu humide protecteur (en vert).....	27
Figure 14. Schéma d'un arbre décisionnel pour le choix de critères dans la caractérisation des berges.	28
Figure 15. (A) Photo oblique prise lors d'un vol en hélicoptère près de Deschaillons-sur-Saint-Laurent. (B) Ensemble des photos obliques géoréférencées entre la TCREF et la TCRLSP intégré dans Google Earth Pro.	28
Figure 16. Site en érosion près de Saint-Anne-de-la-Pérade visité lors d'une sortie sur le terrain.....	29
Figure 17. Exemple d'analyse vidéo dans l'interface ArcMap avec Full Motion Video avec la position de l'embarcation en simultané (tracé rose).....	30
Figure 18. Participants réunis pendant un atelier sur l'érosion.....	32
Figure 19. Exemple de l'identification du site sensible QC-11 dans la TCR de Québec. La combinaison de l'état de la berge (A) et des artificialités (B) a été intégrée dans le processus de sélection des sites (C). Voir la section 5.1.1 pour la symbologie des cartes.	33
Figure 20. Exemple de la fiche imagée du site QC-11b avec légende explicative.	34
Figure 21. Niveau d'eau élevé sur une orthomosaïque de 2017 dans l'archipel du lac Saint-Pierre.	35
Figure 22. Carte et diagramme des types de côtes pour la TCR de Québec.	38
Figure 23. Carte et diagramme indiquant la présence d'une artificialité au niveau de la berge pour la TCR de Québec.	39
Figure 24. Carte et diagramme des types d'artificialité au niveau de la berge pour la TCR de Québec.	40
Figure 25. Carte et diagramme de l'état de l'artificialité pour la TCR de Québec.	41
Figure 26. Carte et diagramme de l'état de la côte pour la TCR de Québec.	42
Figure 27. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR de Québec (secteur aval).	44

Figure 28. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR de Québec (secteur amont).	45
Figure 29. Carte et diagramme des types de côtes pour la TCR de l'Estuaire fluvial.	49
Figure 30. Carte et diagramme de la présence d'une artificialité au niveau de la côte pour la TCR de l'Estuaire fluvial.	50
Figure 31. Carte et diagramme des types d'artificialité pour la TCR de l'Estuaire fluvial.	51
Figure 32. Carte et diagramme de l'état de l'artificialité au niveau de la côte pour la TCR de l'Estuaire fluvial.	52
Figure 33. Carte et diagramme de l'état de la côte pour la TCR de l'Estuaire fluvial.	53
Figure 34. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR de l'Estuaire fluvial (secteur aval).	55
Figure 35. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR de l'Estuaire fluvial (secteur amont).	56
Figure 36. Carte et diagramme du type de berge pour la TCR du lac Saint-Pierre.	59
Figure 37. Carte et diagramme de la présence d'une artificialité au niveau de la berge pour la TCR du lac Saint-Pierre.	60
Figure 38. Carte et diagramme du type d'artificialité au niveau de la berge pour la TCR du lac Saint-Pierre.	61
Figure 39. Carte et diagramme de l'état de l'artificialité au niveau de la berge pour la TCR du lac Saint-Pierre.	62
Figure 40. Carte et diagramme de l'état de la berge pour la TCR du lac Saint-Pierre.	63
Figure 41. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR du lac Saint-Pierre (secteur aval).	65
Figure 42. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR du lac Saint-Pierre (secteur amont).	66
Figure 43. Carte et diagramme des types de berges pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval).	69
Figure 44. Carte et diagramme des types de berges pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur amont).	70
Figure 45. Carte et diagramme de la présence d'une artificialité au niveau de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval).	71
Figure 46. Carte et diagramme de la présence d'une artificialité au niveau de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur amont).	72
Figure 47. Carte et diagramme du type d'artificialité au niveau de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval).	73
Figure 48. Carte et diagramme du type d'artificialité au niveau de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur amont).	74

Figure 49. Carte et diagramme de l'état de l'artificialité au niveau de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval).	75
Figure 50. Carte et diagramme de l'état de l'artificialité au niveau de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur amont).	76
Figure 51. Carte et diagramme de l'état de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval).	77
Figure 52. Carte et diagramme de l'état de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur amont).	78
Figure 53. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval).	80
Figure 54. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval-central).	81
Figure 55. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur amont-central).	82
Figure 56. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur amont).	83
Figure 57. Synthèse globale du tronçon fluvial. A) État de la berge fluviale. B) État de la côte de l'estuaire fluvial. C) Type d'artificialité du tronçon fluvial. D) L'état de l'artificialité du tronçon fluvial. E) État de la berge/côte du tronçon fluvial (Se référer à la section 5 pour l'identification du code de couleur utilisé dans cette figure).	86
Figure 58. Classification des profils types de talus pour le tronçon fluvial (Tirée d'Argus Groupe-Conseil, 1996).	88
Figure 59. Différence de précision de l'emplacement et de la segmentation des berges entre la présente étude (trait brun et noir) et celle de Sergy (2008).	90
Figure 60. (A) Rose des vents pour le secteur de Québec représentant des données horaires entre 1996 et 2019. (B) Rose des vents pour le secteur de Trois-Rivières représentant des données horaires entre 1996 et 2019.	92
Figure 61. (A) Cicatrices de glissement de terrain (flèches noires) au niveau de Leclercville. (B) Talus d'éboulis au pied d'une falaise rocheuse près de Saint-Antoine-de-Tilly.	93
Figure 62. (A) Évolution de la bathymétrie du lac Saint-Pierre avec la mise en place de la voie maritime (Tirée de Morin et Côté, 2003). (B) État de la berge et le degré d'impact du batillage des navires commerciaux.	95
Figure 63. Bilan de l'érosion entre 2001 et 2018 près de la voie navigable pour l'archipel du lac Saint-Pierre.	96
Figure 64. Progradation moderne du delta de la rivière Yamachiche (Tirée de Bondue et al., 2006).	97
Figure 65. (A) Rose des vents pour le secteur de Nicolet représentant des données horaires entre 1996 et 2019. (B) Rose des vents pour le secteur de Montréal représentant des données horaires entre 1996 et 2019.	98

Figure 66. Rôle des milieux humides de type marais (pointillé bleu) dans la protection des berges près de Verchères.	100
Figure 67. Évolution du paysage de la section des rapides de Soulanges : (a) Pré-1800, (b) vers 1900 et (c) vers 1960 (Tirée de Morin et Leclerc, 1998).	102
Figure 68. (A) Érosion par surverse pendant les inondations de 2019 derrière un enrochement mis en place à la suite des événements de 2017, lequel protège un terrain de remblai dans la municipalité de Pointe-Fortune. (B) Érosion par affouillement d'un remblai au printemps 2019 sur une route de l'île Saint-Ignace.	103
Figure 69. Tendances de niveau statistiquement significatives (p value < 0.05) calculées aux bouées et aux marégraphes de Pêches et Océans Canada entre les années 1990 et 2017 (Tirée de Rondeau-Genesse, 2020).	104
Figure 70. Schématisation des interventions les plus fréquentes dans la gestion des berges (Modifiée de Williams et al., 2018).	106
Figure 71. Stratégies d'intervention envisageables pour la gestion des problématiques d'érosion, en ajoutant la dimension intervention sur les causes (Traduite de Rangel-Buitrago et al., 2018b).	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau A. Données géospatiales utilisées pour la réalisation de la caractérisation des berges.....	23
Tableau B. Fiche descriptive pour l'identification des sites d'intérêt.....	31
Tableau C. Proportion relative d'érosion par types de côte.....	37
Tableau D. Proportion relative d'érosion par types d'artificialité.....	37
Tableau E. Inventaire des fiches de la TCR de Québec.....	43
Tableau F. Proportion relative d'érosion par types de côte.....	47
Tableau G. Proportion relative d'érosion par types d'artificialité.....	47
Tableau H. Proportion relative d'érosion par types de dépôt.....	48
Tableau I. Inventaire des fiches de la TCR de l'Estuaire fluviale.....	54
Tableau J. Proportion relative d'érosion par types de berge.....	58
Tableau K. Proportion relative d'érosion par types d'artificialité.....	58
Tableau L. Proportion relative d'érosion par types de dépôt.....	58
Tableau M. Inventaire des fiches de la TCR du lac Saint-Pierre.....	64
Tableau N. Proportion relative d'érosion par types de berge.....	67
Tableau O. Proportion relative d'érosion par types d'artificialité.....	68
Tableau P. Proportion relative d'érosion par types de dépôt.....	68
Tableau Q. Inventaire des fiches de la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal.....	79
Tableau R. Proportion relative de la présence d'artificialité dans le tronçon fluvial.....	84
Tableau S. Proportion relative d'érosion par types d'artificialité pour toute la zone d'étude.....	85
Tableau T. Nombre de sites d'intérêt et identifiés par TCR.....	85
Tableau U. Comparaison d'attributs entre la présente étude et les précédentes pour l'ensemble de l'aire d'étude. Les valeurs de la TCREF sont en italiques.....	90
Tableau V. Liste de besoins émis par les acteurs locaux et les recommandations leur étant associées.....	109
Tableau W : Description des champs attributaires du fichier de caractérisation des berges (remplacer le terme « berge » par le terme « côte » pour la segmentation maritime) ..	121
Tableau X : Type de côte	122
Tableau Y : État de la côte	127
Tableau Z : Présence d'artificialité.....	128
Tableau AA : Type d'artificialité	128

Tableau BB : État de l'artificialité	132
Tableau CC : Type de dépôt de surface	133
Tableau DD : Description des types de ligne	136
Tableau EE : Type de berge.....	137
Tableau FF : État de la berge	141
Tableau GG : Présence d'artificialité	142
Tableau HH : Type d'artificialité.....	142
Tableau II : État de l'artificialité.....	147
Tableau JJ : Type de dépôt de surface	149
Tableau KK : Description des types de ligne	152

FAITS SAILLANTS

- ❖ Ce projet s'inscrit dans le cadre de la mesure 2.6 du PACC 2013-2020 « Soutien aux municipalités situées le long du Saint-Laurent confrontées aux aléas d'inondation et d'érosion » ;
- ❖ La présente étude de caractérisation des berges et des processus d'érosion est venue mettre en place une base de connaissance scientifique adaptée aux spécificités du tronçon fluvial, et ce, dans l'intérêt et l'objectif d'augmenter la résilience des communautés riveraines face à cet aléa ;
- ❖ Une cartographie précise de la position du trait de berge a été réalisée sur 3 190 km. Les caractéristiques intrinsèques des berges ont été documentées sur la base des données géospatiales numériques à haute résolution (LiDAR et orthomosaïques) et près de 18 000 photos géolocalisées prises sur le territoire ;
- ❖ Un bilan des connaissances a permis de produire une classification exhaustive des processus d'érosion et des facteurs environnementaux les contrôlant. Marquant l'ère de l'Anthropocène, les facteurs de contrôle issus de la pression humaine (p. ex. : batillage, gestion des débits, aménagements de la voie navigable, etc.) semblent dominer sur ceux d'origine naturelle et ceux liés aux changements climatiques dans l'axe le plus densément peuplé du Québec. Ce contrôle anthropique, particulièrement marqué dans le secteur amont du fleuve, s'atténue graduellement en se dirigeant vers le tronçon maritime ;
- ❖ En modulant les dynamiques hydrosédimentaires et les différents facteurs de contrôle environnementaux, le climat et les activités anthropiques sont susceptibles d'altérer les processus d'érosion des berges. En raison des changements climatiques et des pressions anthropiques grandissantes le long du fleuve Saint-Laurent, les berges pourraient alors devenir plus sensibles à l'érosion, en voyant les taux de recul s'intensifier ;
- ❖ Des signes d'érosion ont été observés sur 940 km de berges (30 %) dont 313 km présentant un degré d'activité supérieur (10 %). Ces secteurs sont principalement localisés au niveau : (1) des îles fluviales entre Montréal et le lac Saint-Pierre, (2) des embouchures des tributaires du Saint-Laurent, (3) des marais maritimes du chenal entre la côte de Beauport et l'île d'Orléans et (4) des falaises meubles et rocheuses de l'estuaire fluvial ;
- ❖ Entre Québec et Cornwall, les berges sont artificialisées à 48% (1 540 km), soit par une majorité d'enrochement (31%, 472 km) et de remblais non protégés (28%, 431 km). La TCR du HSLGM représente à elle seule 74% (1 146 km) des berges aménagées.
- ❖ Pour l'ensemble des TCR, les structures sont généralement en bon état, soit pour 75% (1 144 km) du tracé ;
- ❖ En combinant les résultats des ateliers participatifs auprès des TCR avec ceux provenant de la caractérisation des berges, 251 sites vulnérables à l'érosion ont été identifiés et illustrés sous la forme de 400 fiches descriptives. Cet atlas cartographique a permis de soulever les secteurs prioritaires où des études de suivi à moyen et long termes pourraient être effectuées dans l'avenir ;
- ❖ Des programmes préventifs et flexibles plutôt que des mesures réactives suite à des événements extrêmes devront être adoptées afin de soutenir une gestion intégrée de l'érosion qui profitera directement aux municipalités concernées. Les futures stratégies de gestion devront (i) incorporer l'ensemble du contexte dans lequel les impacts des changements climatiques se produisent et (ii) inclure la prise en compte des questions pertinentes liées ou non au climat. Le mode de gestion souhaitable ne se limite pas à résoudre un problème au moyen de l'ingénierie conventionnelle, mais prend en compte également l'habitabilité et la qualité future du milieu riverain/fluvial ;
- ❖ Un important manque de connaissances scientifiques et d'outils d'aide à la décision dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent engendre plusieurs incertitudes pour les acteurs locaux et limite l'adoption de choix éclairés dans les stratégies d'intervention. Plusieurs besoins exprimés par les acteurs locaux au cours de ce projet ont été recueillis par les participants afin d'améliorer la prise de décisions dans l'aménagement en milieu riverain, mais aussi sur la compréhension du territoire, et ce, afin de mieux cohabiter avec les effets de l'érosion.

1 MISE EN CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

1.1 CONTEXTE DU VOLET FLUVIAL DE LA MESURE 2.6 DU PACC 2013-2020 « SOUTIEN AUX MUNICIPALITÉS SITUÉES LE LONG DU SAINT-LAURENT CONFRONTÉES AUX ALÉAS CÔTIERS D'INONDATION ET D'ÉROSION »

Les municipalités situées le long du tronçon fluvial du Saint-Laurent sont exposées aux fluctuations des niveaux d'eau et à l'érosion des berges, dont la fréquence et l'intensité sont affectées par les changements climatiques. Ces aléas menacent les berges, les écosystèmes riverains, le cadre bâti et la sécurité des populations.

Le volet fluvial de la mesure 2.6 du PACC 2013-2020 du gouvernement du Québec, qui vise à répondre aux préoccupations exprimées par les municipalités sur les aléas riverains, s'appuie sur une collaboration étroite entre les équipes du Laboratoire de géosciences marines de l'Université Laval, du MELCC, du consortium Ouranos et des organismes coordonnant les Tables de concertation régionales (TCR) du territoire étudié.

Le volet fluvial est constitué de trois projets. Le premier, réalisé par l'Université Laval, porte sur la caractérisation des berges et l'appréciation des vulnérabilités liées à l'érosion. Le second projet, piloté par le MELCC, concerne l'évaluation des zones vulnérables aux fluctuations de niveaux d'eau en climat actuel et futur. Le troisième projet, réalisé par le consortium Ouranos, vise à documenter l'évolution des principaux facteurs hydroclimatiques influençant les risques naturels de fluctuation des niveaux d'eau et d'érosion.

1.2 CONTEXTE SPÉCIFIQUE DU PROJET ÉROSION

Les municipalités riveraines du fleuve Saint-Laurent sont exposées à des aléas hydroclimatiques et à des processus géomorphologiques naturels et anthropiques qui peuvent agir sur la stabilité des berges, des écosystèmes, des infrastructures ainsi que sur la sécurité de leur population. Une meilleure connaissance de la nature des berges du Saint-Laurent ainsi que leur réponse aux processus géomorphologiques et aux changements environnementaux (anthropiques et climatiques) est donc nécessaire afin de mieux évaluer les vulnérabilités et les risques liés à leur dégradation.

En étant exposées à des aléas naturels tels que les crues majeures de 2011, 2017 et 2019, les municipalités riveraines sont actuellement peu outillées pour faire face à des processus complexes où les connaissances scientifiques sont manquantes, ce qui, dans le cadre des changements climatiques, pourrait les rendre vulnérables. Par exemple, plusieurs berges ont subi des reculs majeurs lors de ces hauts niveaux d'eau printaniers, malgré la présence de structures de protection ayant été submergées pendant ces événements.

Dans cette perspective, aucune base d'information scientifique n'existe jusqu'à ce jour afin d'évaluer les risques liés à l'érosion en milieu fluvial. Le développement d'une base

de données géospatiales portant sur l'état des berges du fleuve devient dès lors nécessaire afin d'établir un cadre et un temps de référence pour des études de suivi à haute résolution spatiale et temporelle de l'érosion des berges, afin de mesurer leurs taux de changements dans l'avenir par rapport à leur position actuelle. Ces informations sont essentielles pour mieux comprendre l'impact des événements hydroclimatiques récents, et futurs, sur les berges du fleuve Saint-Laurent. Cette base de données permettrait également de soutenir les intervenants clés de l'aménagement du territoire dans le choix de mesures appropriées, lesquelles assureront une plus grande résilience et une protection adéquate à long terme des communautés riveraines.

À titre comparatif, le secteur maritime, documenté depuis près de 20 ans par des chercheurs de l'UQAR, est doté de plusieurs centaines de stations de suivi, lesquelles sont monitorées en continu par leurs équipes de recherche. Cependant, de telles stations de suivi n'ont toujours pas été mises en place sur les berges du tronçon fluvial du Saint-Laurent. Par conséquent, dans l'intérêt de combler ces manques en termes de connaissances scientifiques, il était impératif de définir et mieux connaître les types de berges de la région ainsi que les mécanismes associés à leur érosion à court, moyen et long termes. Ces nouvelles informations cruciales permettront de déterminer les solutions d'adaptation concrètes à l'érosion des berges pour l'une des aires les plus densément peuplées du Québec et du Canada.

Il est donc opportun et essentiel d'améliorer la cartographie ainsi que l'état des connaissances des berges du fleuve Saint-Laurent afin d'augmenter l'appréciation des risques liés à l'érosion et aux inondations en milieu fluvial et pour soutenir les intervenants clés de l'aménagement du territoire. Cette nouvelle base d'information permettrait donc de mieux définir les mesures qui assureraient une plus grande résilience et une protection adéquate des communautés riveraines et de l'environnement naturel sur le long terme.

1.3 OBJECTIFS DU PROJET

Ce projet vise à établir un portrait actuel et détaillé de l'aléa de l'érosion des berges dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent en constituant une base d'information géospatiale combinée à une analyse qualitative des processus érosifs et des facteurs environnementaux les contrôlant, et ce, dans le but de réduire la vulnérabilité des communautés riveraines.

Les objectifs spécifiques du projet sont :

1. Inventorier et rassembler les informations provenant des études et des données géospatiales existantes le long du fleuve Saint-Laurent ;
2. Segmenter et caractériser à hautes résolution et précision les berges avec les données les plus récentes afin de documenter l'état actuel de l'érosion et de l'artificialisation ;

3. Produire un bilan des connaissances et une analyse qualitative des processus d'érosion de la portion fluviale du Saint-Laurent, tout en intégrant le rôle des changements climatiques et de l'anthropisation ;
4. Communiquer les connaissances relatives à l'érosion des berges auprès des TCR concernées et favoriser une approche participative à l'aide d'ateliers pour faciliter les échanges d'information et la compréhension de leurs besoins ;
5. Identifier les secteurs qui semblent être les plus vulnérables à l'érosion suite à la caractérisation des berges et aux ateliers avec les acteurs locaux.

2 PHYSIOGRAPHIE DU SECTEUR À L'ÉTUDE

2.1 AIRE D'ÉTUDE ET PARAMÈTRES PHYSIQUES

2.1.1 Délimitation de l'aire d'étude

Pour ce présent projet, le tronçon fluvial du Saint-Laurent correspond au territoire des TCR 1 à 4 établies lors de la mise en fonction du Plan d'action Saint-Laurent 2011-2026, soit la zone se situant sommairement entre Cornwall et l'est de l'île d'Orléans (Figure 1). Ce territoire représente une distance approximative de 400 km, et ce, en ne tenant pas compte de l'embouchure de la rivière des Outaouais depuis le barrage de Carillon et des rivières des Mille-Îles et des Prairies, lesquelles ont aussi été analysées dans le cadre du projet. Parmi les 68 affluents du tronçon fluvial du Saint-Laurent, seuls ceux ayant une embouchure d'une largeur supérieure à 25 m ont été inclus dans la caractérisation des berges. Plus précisément, au niveau de ces embouchures, la berge considérée dans la cartographie et la caractérisation se termine à la fin du premier méandre ou à la première structure rigide (p. ex. : pont, barrage, etc.) rencontrée en se dirigeant vers l'amont des tributaires.

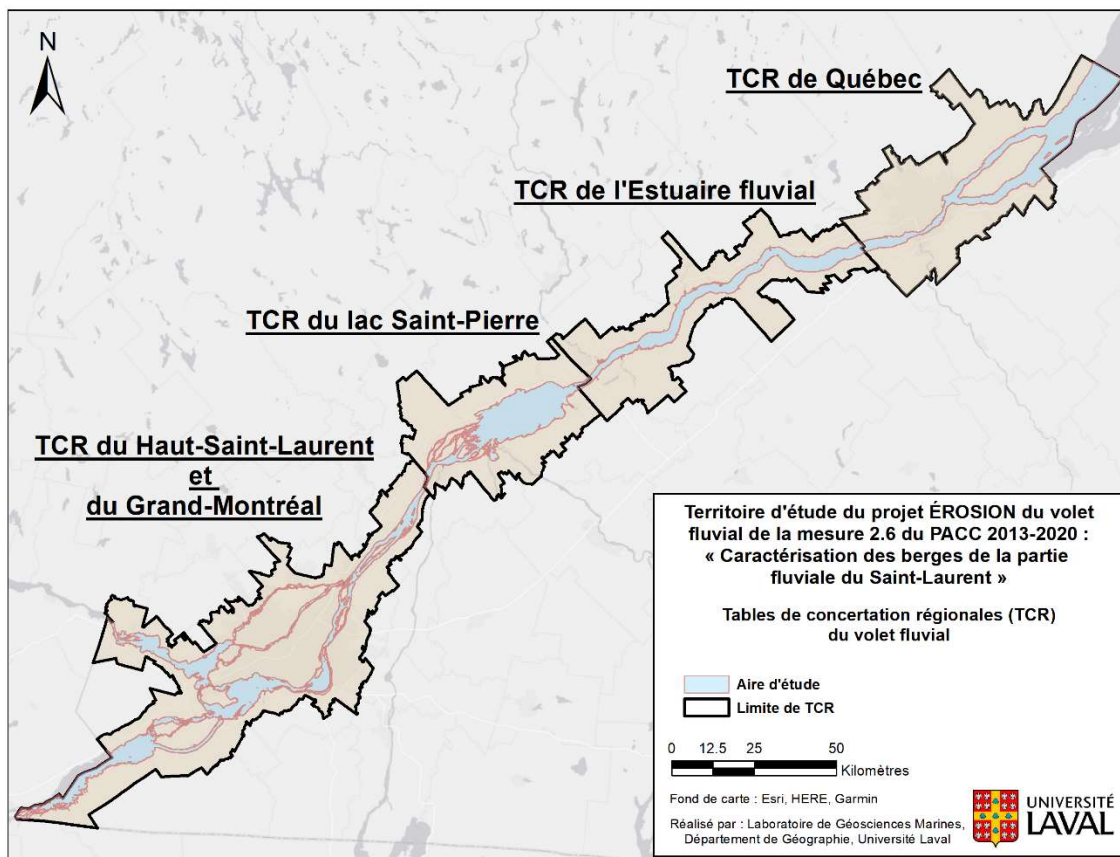


Figure 1. Carte de localisation de la région étudiée et des quatre TCR.

2.1.2 Paramètres physiques généraux et spécifiques

Long d'environ 1 200 km, le fleuve Saint-Laurent est l'émissaire du lac Ontario, où il draine un bassin versant couvrant environ 1,6 million de km² en incluant les Grands Lacs. Il s'écoule sur la plate-forme du Saint-Laurent, une province géologique constituée de roches sédimentaires située entre le Bouclier canadien (massif des Laurentides composé de roches cristallines) et la chaîne des Appalaches (roches sédimentaires, ignées et métamorphiques). Son réseau hydrographique s'est formé lors du retrait de l'Inlandsis laurentidien, une grande calotte glaciaire qui recouvrait la région il y a 21 000 ans (Dyke, 2004 ; Occhietti et al., 2011). À l'aval, il forme le plus grand estuaire du monde, qui évolue en golfe à partir de la Pointe-des-Monts avant de rejoindre Terre-Neuve et l'Atlantique Nord. Son débit élevé le classe parmi les 25 plus grands fleuves du monde et parmi les trois plus importants en région froide, à cause de la présence de glace saisonnière.

La portion fluviale du Saint-Laurent forme un écosystème complexe, composé de différents tronçons parsemés de chenaux, d'îles et de lacs fluviaux. Le fleuve Saint-Laurent correspond aussi à la région la plus densément peuplée du Québec; il a été fortement aménagé et modifié par l'homme depuis le début du XIX^e siècle. Selon des observations récentes, les impacts des activités anthropiques seraient d'ailleurs plus importants que celles associées à des variations du climat (Morneau et al., 2014). En effet, le système du Saint-Laurent a été considérablement modifié pour la navigation commerciale, la production hydroélectrique et la gestion des débits (c'est-à-dire pour la gestion des crues). En parallèle, l'agriculture, l'industrialisation et l'urbanisation des basses-terres du Saint-Laurent maintiennent une pression importante sur le fleuve qui s'exprime à travers des contaminations des eaux des tributaires et des sédiments du fleuve (Gobeil et al., 2005 ; Montiel-León et al., 2019 ; Pelletier et al., 2016).

Ces transformations majeures ont produit des changements hydrologiques et morphologiques (p. ex. : îles découpées dans l'archipel du lac Saint-Pierre, déviation de courants, création de canaux et d'écluses, etc.) et ont eu un impact notable sur l'érosion et la sédimentation dans le système fluvial (Morneau et al., 2014). À titre d'exemple, le chenal de navigation situé entre Québec et les Grands Lacs, inauguré en 1959, possède une largeur minimale de 230 m et une profondeur minimale de 11,3 m. Entre l'année de création et 1985, il a nécessité l'excavation d'environ 100 millions de m³ de sédiments. Il faut ajouter à cette valeur le retrait de plus de 190 millions de m³ d'argile marine pour la mise en œuvre du canal de Beauharnois dans lequel circule actuellement 90% du débit du fleuve à cette hauteur (Lasserre, 1983 ; Hydrotech Consultants Inc., 1985). Cet imposant chantier a mené à remobilisation d'une grande quantité de dépôts fins qui a ensuite été prise en charge par les eaux du fleuve : un impact qui se fait encore ressentir aujourd'hui (Rondeau et al., 2000). Cependant, le fleuve ne transporte que très peu de sédiments en suspension par rapport à son débit en raison des Grands Lacs en amont, lesquels agissent comme bassins de sédimentation, c'est-à-dire en captant les sédiments. Dans son état actuel, le fleuve Saint-Laurent, est un jeune fleuve en déséquilibre qui circule dans des dépôts meubles mis en place principalement lors de la dernière glaciation (Occhietti, 1990 ; Rondeau et al., 2000). Selon Rondeau et al. (2000), la principale source (soit 65%) des sédiments en suspension dans la portion fluviale proviendrait de l'érosion des berges et du lit du fleuve. En fait, environ 15% proviendraient du canal de Beauharnois, 40% entre Montréal-Les Grèves et 45% entre Port Saint-François-Portneuf.

Quant aux tributaires, ils fourniraient 32% des sédiments en suspension, alors que le lac Ontario contribuerait pour seulement 3% de la charge totale. L'établissement de la voie maritime a aussi comme effet de concentrer près de 70% du courant dans le chenal, avec des vitesses de 2 à 3 m/s, comparativement à 0,05 à 0,2 m/s dans les masses d'eau périphériques (Frenette et Verrette, 1976 ; Carignan et Lorrain, 2000).

D'autre part, en se basant sur des critères géomorphologiques, océanographiques et biologiques, le tronçon fluvial se divise en deux portions distinctes : 1) **le segment fluvial**, constitué d'une rivière avec un courant unidirectionnel et sans aucune influence marine, et 2) **l'estuaire fluvial**, soit un estuaire d'eau douce où l'influence des marées est encore ressentie.

2.1.2.1 Segment fluvial

Le segment fluvial québécois, lequel regroupe la TCR du Haut-Saint-Laurent et Grand-Montréal (TCRHSLGM) ainsi que celle du lac Saint-Pierre (TCRLSP), débute à Cornwall avec un débit moyen de 7 500 m³/s et se termine à l'exutoire du lac Saint-Pierre, soit près de Trois-Rivières (Figure 1). La présence de lacs fluviaux peu profonds, tels que les lacs Saint-François, Saint-Louis et Saint-Pierre, avec une profondeur moyenne est de 5,1 m, 3,4 m et 2,7 m, respectivement, constitue un élément caractéristique du segment fluvial. Plusieurs îles constituées de dépôts fins sont également présentes entre l'île de Montréal et la tête du lac Saint-Pierre. Le principal affluent du fleuve, la rivière des Outaouais, se trouve dans cette portion. Longue de 1 270 km, cette rivière draine un bassin hydrographique de 146 000 km² et possède un débit moyen de 1950 m³/s au niveau du barrage Carillon. À l'est de ce barrage, 70% de son débit est dirigé vers son émissaire, la rivière des Prairies. Le volume d'eau restant alimente d'une part le fleuve Saint-Laurent par le lac Saint-Louis et de l'autre la rivière des Mille-Îles par le lac des Deux Montagnes. La confluence de ces cours d'eau forme l'archipel d'Hochelaga sur lequel sont établies les villes de Montréal et Laval. Le tronçon se rétrécit à l'aval pour s'écouler sur 50 km en direction du nord-est, avant de se séparer en plusieurs chenaux entourant l'archipel du lac Saint-Pierre (De Koninck, 2000). La confluence de ces chenaux forme le lac Saint-Pierre, un important lac fluvial de 30 km de longueur par 12 km de largeur alimenté, au nord, par les rivières Maskinongé et Yamachiche et, au sud, par les rivières Richelieu, Saint-François et Yamaska. Initialement peu profond, le lac Saint-Pierre a été plusieurs fois dragué au cours des XIX^e et XX^e siècles afin de créer un chenal favorable à la navigation maritime (Morin et Côté, 2003). Ce lac se caractérise par de nombreuses zones humides; il constitue aujourd'hui un site possédant à la fois une désignation de la convention de Ramsar et de la réserve mondiale de la biosphère classée à l'UNESCO (Dauphin et Jobin, 2016).

2.1.2.2 Estuaire fluvial

L'estuaire fluvial, qui regroupe la TCR de l'Estuaire fluvial (TCREF) et celle de Québec (TCRQC), débute à l'embouchure du lac Saint-Pierre et à la confluence de la rivière Saint-Maurice, à la hauteur de Trois-Rivières; un secteur marquant également la limite supérieure de l'influence des ondes de marées provenant de l'estuaire et du golfe (Figure 1). À l'aval, le fleuve s'écoule à travers un chenal de 2 à 4 km de largeur et évoluant dans une plaine côtière constituée de sédiments fins et délimitée par des marais maritimes et des terrasses littorales. Ce paysage évolue vers l'est en des rives caractérisées par des falaises composées de matériaux meubles et de roc friable jusqu'à Québec, où le fleuve se resserre pour atteindre un débit d'environ 12 600 m³/s. En aval de Québec, l'estuaire se divise pour contourner l'île d'Orléans avant de s'élargir progressivement pour former l'estuaire moyen du Saint-Laurent et marquer la fin de l'estuaire fluvial.

3 RÉTROSPECTIVE ET CLASSIFICATION DES PROCESSUS D'ÉROSION DU TRONÇON FLUVIAL

L'érosion est un phénomène naturel entraînant la prise en charge des matériaux qui peuvent ensuite être transportés sur de plus ou moins grandes distances, selon les types et l'énergie des mécanismes de transport impliqués. Elle affecte autant les milieux terrestres (p. ex. : érosion des sols, mouvements de terrain) que les milieux aquatiques (p. ex. : érosion des berges, érosion des lits de cours d'eau). Dans un espace défini, la mesure de l'érosion se fait à travers des bilans sédimentaires mesurant les entrées, soit les apports sédimentaires, versus les sorties, soit les exports sédimentaires. Un site est décrit comme en érosion lorsque le bilan est négatif et en accumulation, soit en sédimentation, lorsque ce bilan est positif. Ces mécanismes s'inscrivent dans un cycle dynamique avec trois composantes : l'érosion, le transport et la sédimentation. Ces composantes sont affectées par différents processus géomorphologiques d'origine naturelle et anthropique, qui peuvent être considérés comme instantanés, récurrents ou cycliques.

La spécificité géographique du système du fleuve Saint-Laurent, c'est-à-dire un cours d'eau qui interagit saisonnièrement avec des températures sous le point de congélation, s'accompagne d'une grande variété de processus hydro-sédimentaires ayant façonné depuis des millénaires ses paysages riverains. Ces processus régissent l'érosion des berges et les dynamiques sédimentaires au sein du tronçon fluvial. Leur compréhension est donc nécessaire à une gestion durable de ces milieux. Les paragraphes suivants visent à présenter et décrire ces processus ainsi que leurs facteurs de contrôle à partir d'une typologie basée sur des observations de terrain en milieu fluvial et maritime (Bernatchez et Dubois, 2004).

3.1 PROCESSUS ÉROSIFS

Historiquement, de nombreux auteurs classifient les processus érosifs en trois catégories (p. ex. : Lawler, 1992) : 1) les processus subaériens, souvent décrits comme des processus lents et préparatoires, qui conditionnent la stabilité des berges et leur susceptibilité face à l'érosion (Figure 2A à 2D) ; 2) l'entraînement fluvial, ou de prise en charge du matériel, soit de délitement de la berge par la force hydraulique du cours d'eau; et 3) les mouvements gravitaires, soit les glissements de terrain (Figure 2E et 2F). Chassiot et al. (sous presse) ont récemment révisé cette classification en distinguant les processus aquatiques, c'est-à-dire ceux liés à l'action des glaces et/ou à la force hydraulique du cours d'eau, des processus subaériens, qui opèrent sur les berges exposées à l'air libre. Pour ces derniers, les auteurs distinguent toutefois les processus préparatoires lents, qui affectent la stabilité des berges à moyen ou long terme, des processus rapides, voire instantanés, comme le ruissellement ou les glissements de terrain, qui peuvent entraîner des quantités importantes de matériel depuis le haut du talus vers le pied de la berge.

L'occurrence, la fréquence et l'intensité de ces différents processus sont très variables et dépendent en outre de nombreux facteurs de contrôle naturels et anthropiques. Les

berges sont des écosystèmes et des géosystèmes dynamiques dont la stabilité dépend d'un équilibre entre les forces gravitationnelles et les forces de cisaillement. Aussi, les processus érosifs qui interagissent sur différentes échelles spatiales (soit du cm au km) et temporelles (soit de durée et de fréquence variées) affectent cet équilibre.



Figure 2. (A) Image aérienne oblique d'une berge composite constituée d'argile et de blocs affectés par le ruissellement à la base et de sable colonisé par les oiseaux au sommet. (B) Processus de ruissellement et de ravinement au sein d'une falaise de schiste argileux. (C) Processus de dessiccation et de formation de feuillets réduisant la cohésion de la berge dans des matériaux fins. (D) Lentilles de glace (flèches blanches) dans une falaise de schiste argileux illustrant les cycles de gel-dégel. (E) Mouvements gravitaires (affaissement) initiés à la base d'une berge de schiste argileux (flèches noires). (F) Chute d'arbres le long d'une berge abrupte (flèche noire). (G, H) Berge naturelle creusée par les rats musqués (Modifiée de Chassiot et al., sous presse).

3.2 FACTEURS DE CONTRÔLE

L'occurrence, la magnitude et la répartition spatiale des mécanismes d'érosion sont contrôlées par de multiples facteurs naturels, comme ceux d'origine hydraulique liés au débit du fleuve et à la glace fluviale ainsi que ceux d'origine non hydraulique liés aux caractéristiques hydrogéomorphologiques intrinsèques à la berge. S'ajoutent à ces deux classes les facteurs issus des aménagements humains, qui à l'ère de l'Anthropocène, semblent prendre le pas sur ceux d'origine naturelle (Goudie et Viles, 2016). Les différents processus d'érosion s'opérant sur les berges du tronçon fluvial du Saint-Laurent sont présentés et décrits dans les sections suivantes, en distinguant les facteurs d'origine naturelle de ceux de nature anthropique.

3.2.1 Facteurs naturels

3.2.1.1 *Facteurs hydrauliques*

Le premier facteur de contrôle de l'érosion des berges est de nature hydrologique, avec la vitesse d'écoulement du cours d'eau, en particulier les courants latéraux qui viennent prendre en charge, ou déliter, les matériaux constituant la berge (Figure 5). Ce facteur est particulièrement important dans les chenaux étroits et peu profonds, où l'étranglement du fleuve accentue l'action érosive de la force hydraulique. L'action érosive de la vitesse d'écoulement est notamment accentuée en période de crue, lorsqu'un débit important peut engendrer une inondation des zones riveraines, provoquer des remous et des courants turbulents, ou encore générer de forts courants littoraux. Plus généralement, les variations du niveau d'eau du fleuve lors des crues ou des cycles de marées, en particulier pour les secteurs situés à l'aval de Trois-Rivières, peuvent modifier l'humidité des berges et donc amplifier les processus d'érosion non hydrauliques. L'érosion des berges peut également être renforcée par l'action des vagues lors d'onde de tempêtes, d'orages et de vents violents (Ouellet et Baird, 1978). Selon l'orientation du vent et le *fetch* (soit la longueur de la course du vent sur un plan d'eau), les vagues peuvent atteindre une amplitude importante. Le vent est donc un second facteur à considérer, notamment pour certains secteurs avec un long *fetch*, comme sur les principaux lacs fluviaux. La prévalence des vents dans l'axe nord-est sud-ouest du fleuve Saint-Laurent fait des secteurs situés en amont ou en aval de ces lacs fluviaux des zones particulièrement vulnérables à l'action des vagues engendrées par des vents violents. À titre d'exemple, la section est de l'archipel du lac Saint-Pierre, l'île Perrot à proximité de l'île de Montréal ou encore l'entrée du canal Lachine sont fortement exposées à ces vagues naturelles.

La formation saisonnière de glace sur le fleuve Saint-Laurent (Morse et al., 2003 ; Turcotte et Morse, 2013) affecte la dynamique hydrologique, le transport sédimentaire et notamment les phénomènes d'érosion de multiples manières (Dionne, 1973 ; Turcotte et al., 2011). Cette formation est toutefois très inégale le long du tronçon fluvial en fonction des conditions météorologiques et hydrologiques locales (Figure 3A). L'orientation nord-est sud-ouest du fleuve créant un gradient de température, les glaces tendent à fondre plus vite à l'amont qu'à l'aval, si bien que des embâcles sont fréquemment observés au cours ou à la fin de l'hiver. Dès lors, les berges peuvent être érodées suite à une montée des eaux ou lors de surverses de blocs de glace. La largeur du fleuve et le passage répété des brise-glaces semblent toutefois minimiser les dégâts associés aux embâcles de glace

le long des berges. La formation rapide de glace de rive joue de plus un rôle protecteur contre les blocs à la dérive (Gatto, 1984 ; Chassiot et al., sous presse) (Figure 3B). En revanche, lors du dégel, les glaces attachées à la berge, formant un pied de glace, peuvent entraîner des sédiments avec elles, participant ainsi à l'érosion des berges, à la destruction des habitats et à la dégradation de structures artificielles (Figure 3C à 3G).



Figure 3. (A) Couverture de glace incomplète dans le chenal du fleuve Saint-Laurent. (B) Image de drone illustrant la zone de transition avec la couverture de neige sur la rive, la banquise côtière et les blocs de glace ou la glace dérivante. (C, D, E) Illustrations de banquise côtière et de blocs de glace à la dérive déposés devant une berge bétonnée. (F) Radeaux de glace poussés par la glace et glace dérivante le long d'un mur de béton. (G) Végétation dégradée après le retrait de la glace de rive (Tirée de Chassiot et al., sous presse).

3.2.1.2 Facteurs morphologiques

En plus des facteurs hydrauliques, d'autres facteurs environnementaux viennent influencer la stabilité des berges. Il s'agit de facteurs géomorphologiques et hydrologiques contrôlant la susceptibilité aux processus d'érosion. Ils s'opèrent là aussi à différentes échelles (spatiales comme temporelles), fréquences et intensités.

La typologie des berges joue ainsi un rôle crucial dans la compréhension de l'érosion, car selon des critères donnés (p. ex. : topographie, lithologie, etc.), le degré d'exposition face à chacun des processus peut varier de façon significative. Dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent, la lithologie des berges identifiées est de nature rocheuse, avec des schistes et des calcaires (Figure 4A et 4B), ou meuble (Figure 4C et 4D), avec des dépôts glaciaires, fluviaux, littoraux (Figure 4E), lacustres ou marins. En outre, il faut distinguer les berges basses, qui possèdent un dénivelé inférieur à 5 m, des berges hautes, avec dénivelé supérieur à 5 m. Ces dernières sont plus présentes dans le secteur aval en raison de l'incision du cours d'eau dans la plate-forme du Saint-Laurent. Plusieurs milieux humides sont également identifiés le long du fleuve (Figure 4F), notamment autour du lac Saint-Pierre et de son archipel. Ces milieux font office de zone tampon contre les courants ou les vagues, offrant ainsi une protection des berges face à l'érosion. Enfin, l'artificialisation des berges inclut la construction de nombreux ouvrages de protection, comme des talus artificiels (remblais), des empièvements (Figure 4G) ou des murs de béton (Figure 4H).

La pente des berges joue également un rôle déterminant sur la sensibilité des berges aux processus d'érosion. Une pente faible favorise ainsi l'infiltration et les écoulements souterrains, au détriment du ruissellement, mais sera plus sensible au débordement du fleuve lors d'une inondation. À l'inverse, une pente forte, formant parfois une falaise, est plus susceptible de provoquer des glissements de terrain. Elle favorise le ruissellement en surface, mais limite la surface affectée par l'érosion lorsque le fleuve est en crue. Une forte pente peut toutefois favoriser le sapement basal des berges où des structures en porte-à-faux peuvent apparaître (Thorne et Tovey, 1981).

Il a été démontré que la pente et le type de dépôt constituant la berge, en particulier la teneur en matière organique ou la taille des grains, affectent la susceptibilité des berges à l'érosion (Gaskin et al., 2003). Les matériaux plus fins comme les limons et les argiles sont moins sensibles à l'action érosive des forces hydrauliques comparativement aux dépôts grossiers, qui sont moins cohésifs (Thorne et Tovey, 1981). Ainsi, sur un dépôt de berge stratifié, des structures en porte-à-faux peuvent se développer si les matériaux grossiers, recouverts par des dépôts plus fins et cohésifs, sont situés au pied de berge.



Figure 4. Survol de différents types de berges identifiés dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent. (A) Falaise rocheuse (> 5 m). (B) Faciès rocheux d'une berge basse (< 5 m). (C) Falaise constituée de dépôts meubles. (D) Berge basse meuble. (E) Terrasse de plage. (F) Milieu humide. (G) Empierrement artificiel d'une berge. (H) Empierrement artificiel et mur de béton (protection mixte) (Tirée de Chassiot et al., sous presse).

En revanche, les dépôts fins de type limon et argile ont une plus grande capacité de rétention d'eau. Les berges constituées de tels types de dépôts sont donc plus sensibles aux cycles d'humification induits par les conditions hydrologiques et météorologiques du milieu ainsi que par les variations du niveau du fleuve (voir section précédente). De façon similaire, les écoulements d'eau en surface et en profondeur, tout comme la suffosion, peuvent altérer la morphologie des berges, modifier les conditions hydriques et, ainsi, réduire leur stabilité en créant des conduits souterrains (Fox et al., 2007). Les écoulements d'eau sur les berges s'accompagnent d'un transport sédimentaire entre le haut du talus et le pied de berge. Dans des cas extrêmes, ce transit s'effectue par le biais de glissements de terrain qui contribuent au rééquilibrage des berges par une diminution de l'angle de la pente. Les glissements de terrain résultent d'une déstabilisation de la cohésion des particules composant un dépôt sédimentaire suite à une onde de choc (p. ex.: séisme, détonation) ou une surcharge, mais ils peuvent également survenir si la berge est gorgée d'eau suite à une période prolongée de précipitations intenses, soit par l'augmentation des pressions interstitielles.

À l'inverse, la dessiccation des argiles survient lorsque les berges sont exposées à l'air libre sur de longues périodes. Ce mécanisme est accentué lors des fortes températures pendant l'été et lorsque le niveau du fleuve se situe au-dessous de la normale en raison d'un débit plus faible. Il s'agit là encore d'un processus préparatoire de l'érosion, formant des fissures de tension, des polygones et des blocs de sédiments facilement érodables (Gaskin et al., 2003). Les cycles de gel-dégel participent également activement à l'érosion des berges et agissent comme des processus préparatoires à l'érosion. Ils dépendent de la formation de glace de ségrégation dans les premiers centimètres du sol (Lawler, 1993 ; Yomoto et al., 2006 ; Wallemacq et al., 2011), dont la croissance est liée aux conditions météorologiques et hydrologiques du milieu. Au Québec, les cycles de gel-dégel sont prépondérants durant la fin de l'hiver, lorsque les températures de l'air oscillent autour du point de congélation (Fortin, 2000).

Le rôle de la végétation est aussi souvent mentionné dans la littérature scientifique pour expliquer les différences observées dans les dynamiques des processus d'érosion de berges (Simon et Collison, 2002 ; Thorne, 1990). Le consensus général existant à propos du rôle de la végétation est qu'elle contribue à une diminution de l'érosion grâce à la rétention des sédiments par le réseau racinaire qui exerce un ancrage de la berge. Toutefois, des visions s'opposent pour déterminer quel type de végétation serait le plus efficace pour stabiliser la berge (Simon et Collison, 2002). Selon certains auteurs, la végétation supérieure arborescente possède des racines développées qui permettent un ancrage profond dans le sol, favorisant ainsi la stabilité des berges. Grâce à la couverture végétale, les berges sont également moins exposées aux variations météorologiques et donc aux effets du gel, des cycles d'humidification et du ruissellement. En revanche, les racines profondes favorisent les infiltrations d'eau à la mort des organismes, ce qui a pour effet de déstabiliser les berges. À l'inverse, le réseau racinaire de la végétation herbacée ou arbustive est plus dense que celui des végétaux arborescents, ce qui, selon d'autres auteurs, offrirait une plus grande stabilité pour les berges (Simon et Collison, 2002 ; Murgatroyd et Ternan, 1983).

Les milieux riverains sont des écosystèmes abritant de nombreux animaux aquatiques comme les castors, les rats musqués ou encore les oiseaux. Certains de ces animaux

nichent directement sur les berges et sont à même de modifier leur morphologie (Fei et al., 2014). Ils doivent donc être considérés comme des agents naturels contribuant à la dynamique des processus érosifs sur les berges (Figure 4G et 4H).

3.2.1.3 Synthèse des facteurs naturels

Les vitesses de l'écoulement, les débits, les inondations, les marées, les ondes de tempêtes et les glaces fluviales constituent un ensemble de facteurs naturels affectant l'érosion des berges dans le fleuve Saint-Laurent (Figure 5). Ils sont associés aux forces hydrauliques du cours d'eau et dépendent des conditions météorologiques et hydrologiques locales. Toutefois, l'érosion des berges est favorisée par des facteurs morphologiques et météorologiques, qui rendent certains secteurs plus vulnérables que d'autres en raison de la nature et de la morphologie des dépôts, de la présence d'animaux, de la nature et de la densité de la végétation riveraine.

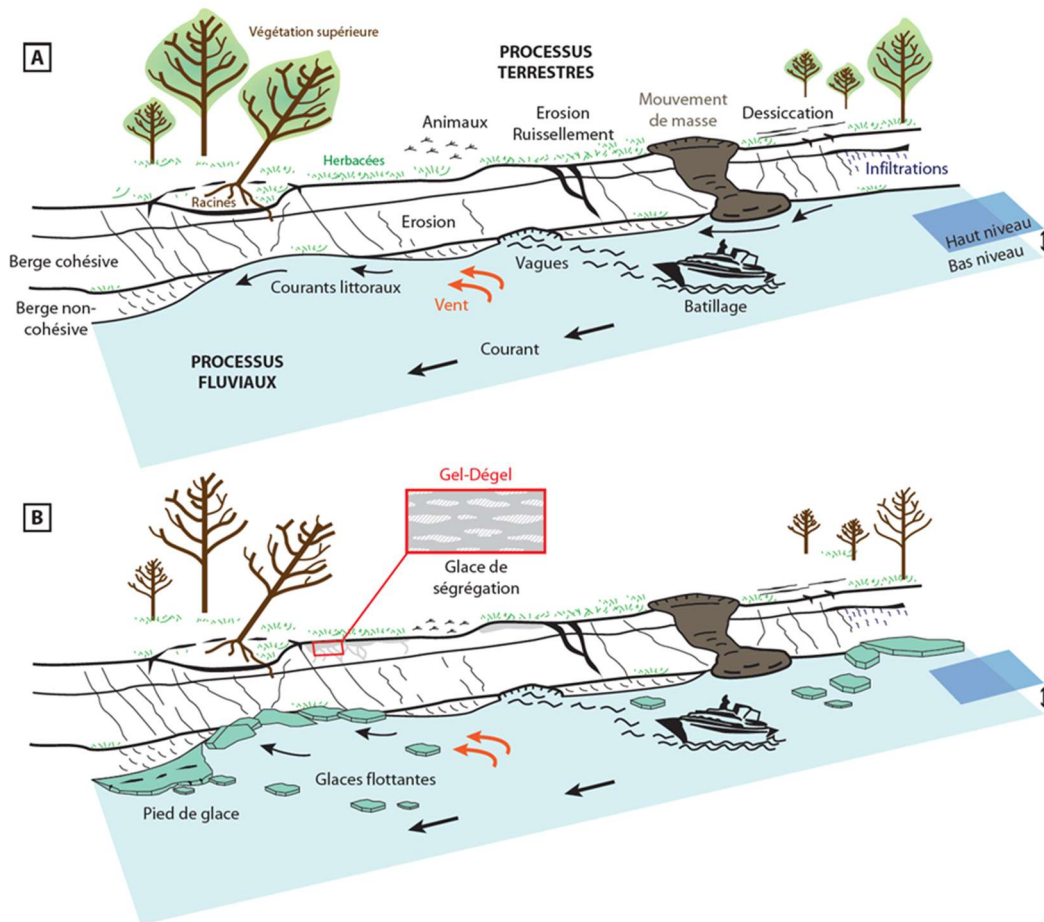


Figure 5. Synthèse des processus d'érosion pouvant agir sur des berges naturelles d'un fleuve en milieu froid lors (A) de conditions estivales et (B) lors de conditions hivernales (Modifiée de Chassiot et al., sous presse).

Tous ces facteurs s'opèrent généralement de concert, mais souvent à des fréquences et des intensités différentes. Certains processus sont de nature cyclique, comme les marées, d'autres de nature saisonnière, comme les crues ou les cycles de gel-dégel, ou encore de

nature ponctuelle, comme les ondes de tempêtes et les périodes de sécheresse. Ces différences font en sorte que l'érosion des berges sera plus importante durant certaines périodes de l'année. Si peu d'étude a documenté la variabilité spatiale et temporelle de l'érosion des berges dans le fleuve Saint-Laurent ou ses affluents (Bégin et al., 1991 ; Boyer et al., 2010 ; Hamel et al., 2013), les liens entre érosion des berges et débit des cours d'eau ont été démontrés dans des environnements climatiques tempérés (Jugie et al., 2018 ; Henshaw et al., 2013). D'autres études focalisées sur les milieux périglaciaires ont également montré l'importance de la débâcle sur l'érosion des berges (Boucher et al., 2009 ; Morin et al., 2015). Par analogie, il est donc possible d'affirmer que le printemps, caractérisé par une augmentation du ruissellement et du débit, mais aussi une récurrence des cycles de gel-dégel, semble être la période la plus propice à l'érosion des berges dans le fleuve Saint-Laurent.

3.2.2 La pression humaine

Le fleuve Saint-Laurent concentre les plus grandes métropoles du Québec, principalement parce qu'il constitue un axe historique majeur pour le commerce maritime. Son bassin versant est fortement impacté par les activités domestiques, industrielles et agricoles. Les dynamiques du cycle de l'eau et du transport sédimentaire sont aujourd'hui profondément modifiées par les aménagements réalisés depuis plusieurs siècles sur les berges, dans les terres, mais aussi directement sur le fleuve. Ces aménagements du territoire, de nature très variée, ont contribué à un déséquilibre des dynamiques sédimentaires et agissent indirectement sur les processus érosifs. Cette section illustre différents exemples d'impacts anthropiques dans le tronçon fluvial du fleuve Saint-Laurent et explique comment la pression humaine est devenue un facteur de contrôle essentiel dans les processus d'érosion des berges.

3.2.2.1 Aménagement des berges et structures de protection

L'anthropisation des berges du fleuve Saint-Laurent se traduit par la multiplication des aménagements et des structures de protection. Pendant des décennies, les milieux naturels entourant les îles de la région de Montréal et des autres grandes villes ont disparu au profit du cadre bâti urbain, résidentiel et commercial. Le tracé des berges sur certains secteurs découle aujourd'hui entièrement d'interventions humaines (p. ex. : quai, marina, empierrement, blocs de béton, talus artificiels), lesquelles peuvent impacter l'équilibre sédimentaire. À titre d'exemple, des aménagements, comme des quais et des marinas, qui empiètent sur le lit du fleuve créent une barrière au transit sédimentaire en modifiant les courants latéraux ou la dérive littorale, ce qui perturbe le bilan sédimentaire et limite la recharge sédimentaire des milieux riverains. Les structures anthropiques se dégradent naturellement sous l'effet des conditions météorologiques et des processus d'érosion actifs le long du fleuve, mais elles peuvent également renforcer la réflexion et la diffraction des vagues (Figures 6 ; 7A et 7B ; 8D et 8F). La résilience des berges et des milieux humides aux modifications environnementales est aussi affectée dans de nombreux secteurs par des aménagements de protection établis par les communautés riveraines (Figure 7C). Dans certains cas, la construction dans le lit du fleuve altère les milieux humides et favorise l'accumulation de sédiments plus grossiers (Figure 7D et 8C).

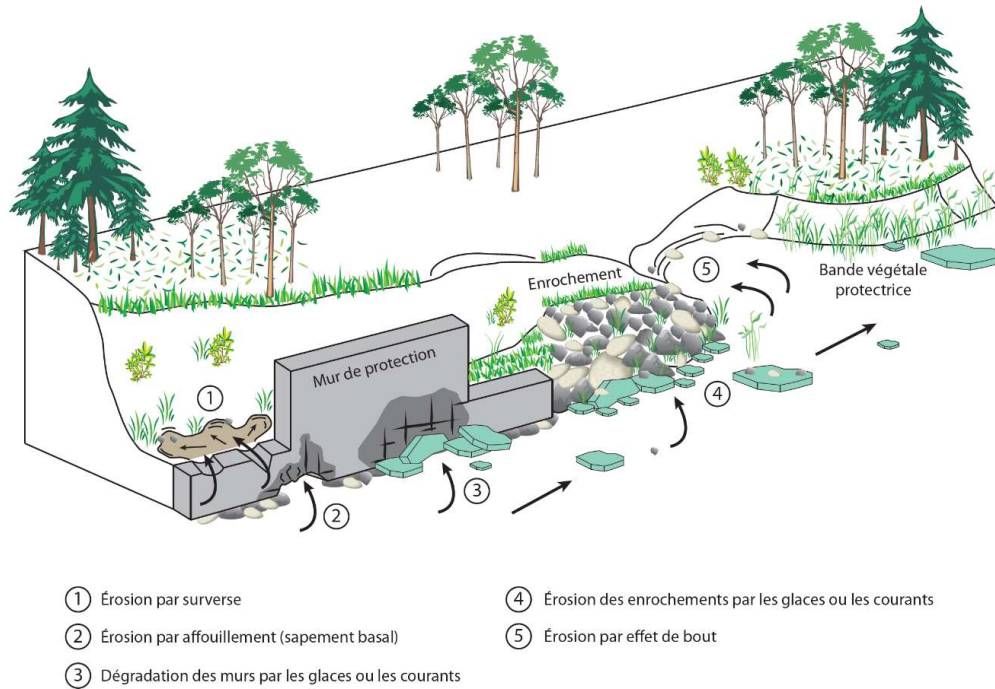


Figure 6. Types d'impacts des processus d'érosion sur des artificialités au niveau de la berge.

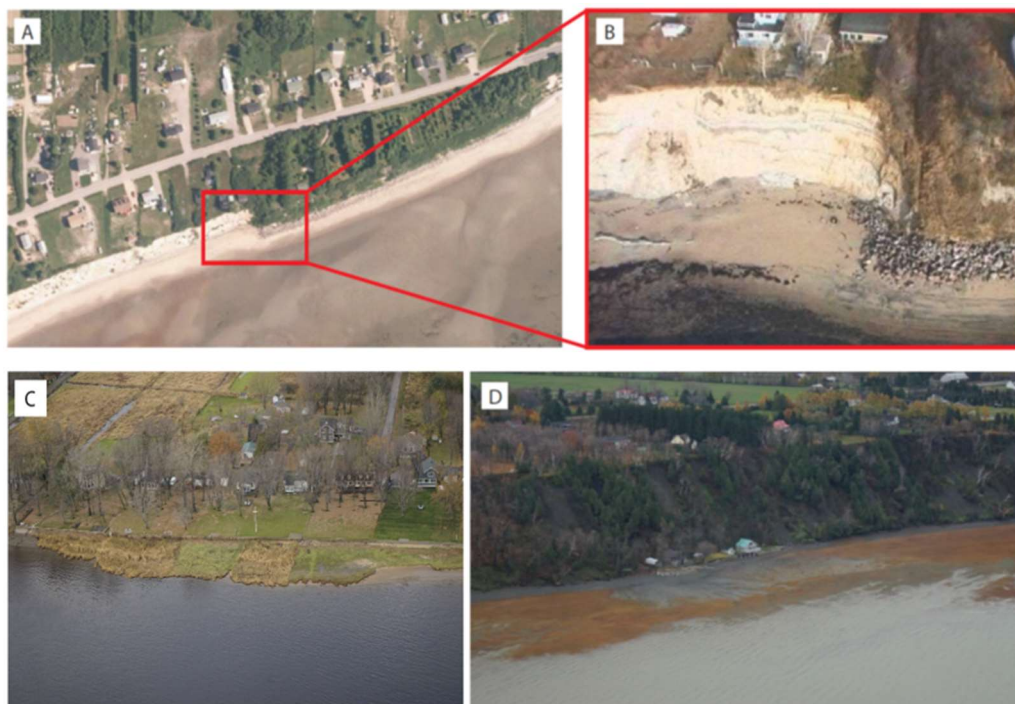


Figure 7. Illustration de l'impact des aménagements anthropiques sur la dynamique sédimentaire pour les milieux riverains. (A) Effet de bout résultant de la diffraction des vagues suite à un empierrement du bas de talus (B). Photographie prise par l'UQAR. (C) Coincement des berges en raison des structures de protection construites en arrière des terres. (D) Amplification de la sédimentation au profit du milieu humide à proximité des structures bâties au pied de la falaise.

3.2.2.2 Transport fluvial

L'aménagement de la voie maritime du Saint-Laurent a permis l'essor du commerce en Amérique du Nord, qui se poursuit aujourd'hui avec le passage d'environ 4 500 navires commerciaux en 2018 (CGVMSL, 2018). Maintenir cette voie navigable nécessite l'entretien d'un chenal par le dragage des sédiments le long d'un corridor central. Les opérations de dragage perturbent les dynamiques d'écoulement naturel et des apports sédimentaires. Le passage des navires engendre également des vagues, c'est-à-dire le batillage, parfois plus puissantes que celles causées par les vents (Figure 5 ; 8A et 8B). La navigation maritime est suspectée d'être à elle seule responsable de 70% des fluctuations du niveau d'eau au sein du fleuve Saint-Laurent (Gaskin et al., 2003). Ces fluctuations ont un effet non négligeable sur l'érosion des berges situées à proximité du chenal. D'après les travaux de Ouellet et Baird (1978) et de Dauphin (2000), l'impact des vagues liées au transport maritime dans le fleuve serait responsable de 60% de l'érosion des berges. Les vagues induites par la navigation de plaisance peuvent également s'avérer problématiques pour certains secteurs, comme l'archipel du lac Saint-Pierre où les chenaux très étroits sont plus vulnérables à ce type de batillage.

3.2.2.3 Obstacles à l'écoulement

L'anthropisation du bassin versant du fleuve Saint-Laurent s'exprime aussi par la multiplication des obstacles à l'écoulement depuis le milieu du XX^e siècle. Parmi eux, les barrages forment des réservoirs de forte contenance qui ont contribué au développement hydroélectrique pour les besoins industriels du Québec ainsi qu'à l'établissement d'une voie maritime vers les Grands Lacs aux États-Unis, laquelle nécessite des niveaux d'eau stables pour les navires à fort tirant d'eau. Les ouvrages les plus imposants rencontrés dans le fleuve et ses affluents sont le (i) barrage Moses-Saunders, situé à hauteur de Cornwall en Ontario, (ii) le barrage de Carillon, sur la rivière des Outaouais, et (iii) les barrages de Shawinigan, sur la rivière Saint-Maurice (Figure 8E).

La dynamique hydrosédimentaire du fleuve et de ses affluents est aujourd'hui fortement affectée par les barrages et les réservoirs, auxquels il faut ajouter les digues et les canaux ; l'exemple le plus emblématique étant le canal Lachine coupant l'île de Montréal. Les réservoirs ont une capacité de rétention d'eau, mais aussi de sédiments limitant ainsi les apports sédimentaires vers l'aval du système et les recharges des berges en sédiments dans les secteurs riverains. L'ajustement des débits au niveau des vannes des barrages ou au sein des canaux engendre des changements dans l'intensité et la direction des courants (Figure 8E). Ces ajustements peuvent avoir pour effet de rediriger des courants vers des berges situées à l'aval des ouvrages et, ainsi, favoriser les mécanismes d'entraînement fluvial. À l'inverse, ils peuvent faire dévier les courants vers le centre du chenal et, ainsi, protéger les berges de l'action érosive des courants latéraux. Le contrôle des niveaux d'eau peut aussi amener certains secteurs en amont ou en aval des barrages à être inondés ou en étiage selon les conditions hydrologiques. Par conséquent, une submersion prolongée des berges et une plus grande fréquence de cycles d'humidification peuvent potentiellement les rendre plus vulnérables à l'érosion.



Figure 8. (A) Image aérienne oblique illustrant l'étendue du trafic maritime dans le fleuve Saint-Laurent entre Québec et Montréal. (B) Vagues induites par un navire de type cargo qui frappent les berges. Remblayage et canalisation d'un milieu humide riverain par un développement résidentiel. (C) La berge est protégée par divers murs et enrochements. (D) Mur incliné en dalles de béton endommagé par les processus d'altération et l'action des vagues. (E) Eaux turbulentes à l'exutoire du barrage de Carillon. (F) Érosion par surverse derrière un enrochement lors de la crue printanière de 2019.

La section 3 apporte des éléments de connaissances sur les processus d'érosion des berges. Celles-ci sont résumées dans la Figure 9, montrant les interactions existantes entre les processus fluviaux et terrestres et les facteurs de contrôle environnementaux (physiographie et biologie). Cette figure souligne aussi les rôles que peuvent exercer les changements climatiques et les impacts anthropiques directement sur ces processus, ou indirectement en modifiant les facteurs de contrôle environnementaux.

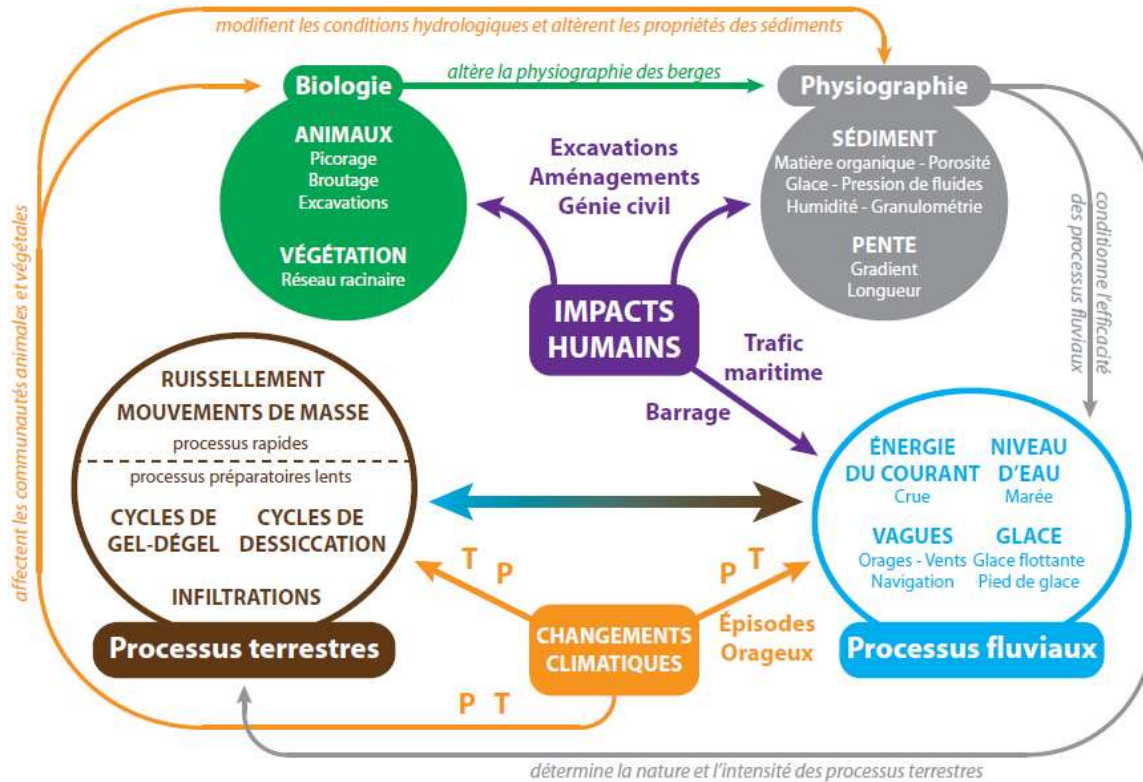


Figure 9. Interactions entre les processus fluviaux et terrestres, les facteurs de contrôle environnementaux (physiographie et biologie), les changements climatiques (P = Précipitations et T = Températures) et les impacts anthropiques (Traduite de Chassiot et al., sous presse).

4 MÉTHODOLOGIE

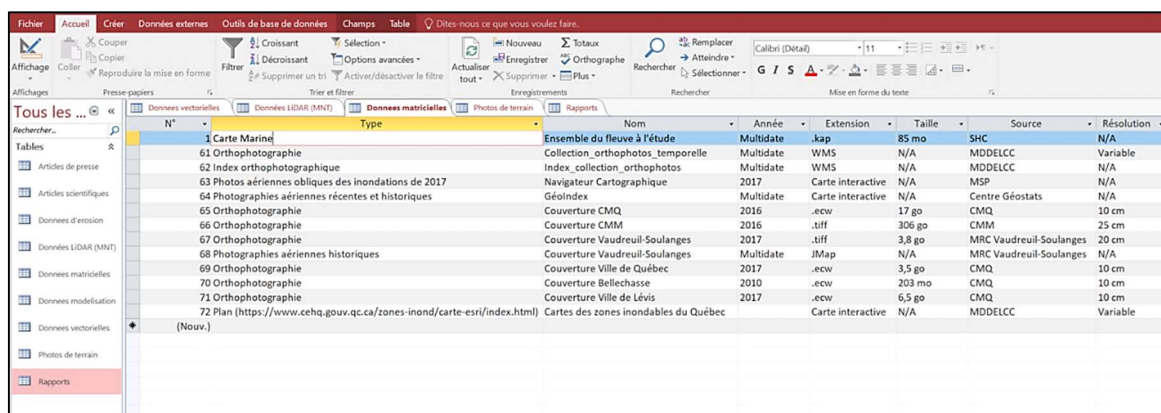
4.1 REVUE DE LITTÉRATURE ET ACQUISITION DES DONNÉES GÉOSPATIALES EXISTANTES

4.1.1 Revue de littérature

Une recherche bibliographique exhaustive a été réalisée en début de projet afin de regrouper, et ce, dans une seule et même base de données, l'ensemble des articles et rapports d'expertise portant sur l'érosion et la dynamique sédimentaire dans la région d'étude. Ces études ont principalement été rassemblées à l'aide de divers moteurs de recherche publics et académiques. Certains documents ont également été transmis par les membres de différents ministères (MELCC, MSP) ainsi que par des collaborateurs internes (CMQ) et externes (UQAR) au projet. Une collecte d'informations a aussi été réalisée auprès des acteurs locaux au cours des rencontres avec les quatre TCR du projet. Plusieurs documents supplémentaires ont donc été ajoutés ou rendus accessibles au terme de ces consultations ou ateliers participatifs.

Une seconde revue de littérature sur l'érosion des berges des grands fleuves du monde et les rivières en milieu froid, au niveau de l'international, a été réalisée afin de : 1) fournir des informations sur les méthodes et approches utilisées par d'autres projets de caractérisation de berges de cours d'eau dans le monde ; 2) produire une classification et une description des processus d'érosion adaptée à un fleuve aménagé en région froide (section 3) ; et 3) mieux cerner les lacunes en connaissances scientifiques sur la dynamique de l'érosion dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent (section 6).

La totalité des documents et fichiers acquis a été inscrite sous la forme d'un index en format Access afin de structurer le grand volume d'information récupéré dans le cadre de l'étude (Figure 10 ; Annexe B).



N°	Type	Nom	Année	Extension	Taille	Source	Résolution
1	Carte Marine	Ensemble du fleuve à l'étude	Multidate	.kap	85 mo	SHC	N/A
61	Orthophotographie	Collection orthophotos temporelle	Multidate	WMS	N/A	MDDELCC	Variable
62	Index orthophotographique	Index_collection orthophotos	Multidate	WMS	N/A	MDDELCC	N/A
63	Photos aériennes obliques des inondations de 2017	Navigateur Cartographique	2017	Carte interactive	N/A	MSP	N/A
64	Photographies aériennes récentes et historiques	Géolindex	Multidate	Carte interactive	N/A	Centre Géostats	N/A
65	Orthophotographie	Couverture CMQ	2016	.ecw	17 go	CMQ	10 cm
66	Orthophotographie	Couverture CMM	2016	.tiff	306 go	CMM	25 cm
67	Orthophotographie	Couverture Vaudreuil-Soulanges	2017	.tiff	3,8 go	MRC Vaudreuil-Soulanges	20 cm
68	Photographies aériennes historiques	Couverture Vaudreuil-Soulanges	Multidate	IMap	N/A	MRC Vaudreuil-Soulanges	N/A
69	Orthophotographie	Couverture Ville de Québec	2017	.ecw	3,5 go	CMQ	10 cm
70	Orthophotographie	Couverture Bellechasse	2010	.ecw	203 mo	CMQ	10 cm
71	Orthophotographie	Couverture Ville de Lévis	2017	.ecw	6,5 go	CMQ	10 cm
72	Plan (https://www.echq.gouv.qc.ca/zones-inond/carte-esri/index.html)	Cartes des zones inondables du Québec		Carte interactive	N/A	MDDELCC	Variable

Figure 10. Aperçu de l'index en format Access.

4.1.2 Données géospatiales existantes

Plusieurs rencontres et échanges avec le département de géomatique du MELCC ont permis d'accéder à une grande quantité de données géospatiales numériques compatibles avec le système d'information géographique (SIG) utilisé dans le cadre du projet, soit ArcGIS 10.7 d'*ESRI*. L'ensemble des données a été colligé dans une base de données afin de simplifier leur utilisation. D'autres échanges avec différents acteurs régionaux (p. ex. : ZIP, CMQ, CMM, ECCC, etc.) ont permis l'acquisition de données supplémentaires et complémentaires.

Les principales données numériques qui ont été acquises ou mises à la disposition du projet sont présentées dans le Tableau A.

Tableau A. Données géospatiales utilisées pour la réalisation de la caractérisation des berges.

Type de données	Date	Source
Orthomosaïque couleur	1993 à 2018	MERN, CMQ, CMM, MRC de Vaudreuil-Soulanges
Couverture LiDAR	2001 à 2018	MFFP, CMQ, CMM, MRC de Vaudreuil-Soulanges
Banque de photographies obliques	2008 à 2017	MSP, MRC de Vaudreuil-Soulanges, UQAR
Caractérisation des berges de la TCR de Québec	2016	UQAR
Carte de dépôts de surface	Variable	MERN
Base de données des zones inondables (BDZI)	2015	MELCC
Base de données des milieux humides du Québec	2009	Canards Illimités, MELCC
Géobase de l'occupation du sol des Basses-terres du Saint-Laurent	2019	ECCC
Classification de la ligne de rivage	2016	ECCC

4.2 CARACTÉRISATION DES BERGES DU TRONÇON FLUVIAL

Une synthèse de la littérature scientifique a été réalisée sur les différentes méthodes de caractérisation des berges à travers le monde (Currin et al., 2015 ; Rogers et Woodroffe, 2016 ; Williams et al., 2018 ; Cooper et Jackson, 2019). Cependant, afin de garder une cohérence sur l'ensemble du Saint-Laurent, il avait été suggéré d'adopter la méthodologie du tronçon maritime mise en place depuis plusieurs années par l'équipe de Pascal Bernatchez, professeur à l'Université du Québec à Rimouski (UQAR).

L'ensemble des traitements numériques a été effectué sur la plateforme ArcGIS 10.7 d'ESRI, où les fichiers géospatiaux ont été classés dans une base de données de type GDB fichier (*file geodatabase*) (Annexe B). Le système de coordonnées projetées qui a été utilisé dans le cadre du projet correspond au NAD83 Québec Lambert. Une description de la structure de la base de données utilisée pour la caractérisation est présentée dans le Tableau W de l'Annexe A; l'intégralité de la légende est présentée en Annexe A. Par ailleurs, pour chaque critère de caractérisation, une abréviation, basée sur le terme complet (p. ex. : MHR pour Milieu humide riverain), a servi à la création de domaines attributaires dans la GDB (Annexe A ; Tableaux X à KK). Cette méthode de domaines de valeurs précodées a permis l'élaboration de menus déroulants dans chacun des champs de la table attributaire, ce qui a empêché l'apparition d'erreur de frappe dans la GDB (Figure 11). Enfin, la liste ci-dessous énumère les classes de données qui ont été utilisées pour la caractérisation des berges, soit par leur intégration dans SIG ou par leur consultation sur des sites web :

- Orthomosaïques couleur de photographies aériennes ;
- Couvertures topographiques LiDAR ;
- Images obliques géoréférencées ;
- Photos et vidéos géoréférencées prises lors des sorties sur le terrain pour validation ;
- Géobase de l'occupation du sol des Basses-terres du Saint-Laurent ;
- Informations récoltées auprès d'intervenants locaux (photos, commentaires, ateliers, etc.) ;
- *Google Maps/Streets* ;
- Rapports/études existant(e)s ;
- Cartes de dépôts de surface (PACES, SIGEOM).

4.2.1 Étape 1 : Numérisation des limites géomorphologiques de la berge

La numérisation, soit le traçage de limites géomorphologiques observées, s'est réalisée avec l'appui d'orthomosaïques (10 cm) et de données topographiques LiDAR (1 m), lesquelles ont été fournies par différents ministères (MERN, MFFP, MELCC et MSP) ou acteurs locaux (municipalités, MRC, etc.) (Figure 11). La haute résolution de ces données géospatiales a permis une cartographie précise en utilisant une échelle d'analyse au 1:600 pour les lignes primaires et au 1:2 000 pour les lignes secondaires. Les définitions associées aux types de ligne ou limites géomorphologiques sont présentées dans les Tableaux DD et KK de l'Annexe A, et correspondent à celles développées par l'équipe de l'UQAR (Quintin et al., 2016 ; Fraser et al., 2017). En fait, leur analyse a permis de déterminer que l'emploi des concepts du haut de talus en milieu côtier (trait de côte) ainsi

que de ligne de rivage établissait la position des principales limites géomorphologiques pour la caractérisation côtière. Cette méthode a donc été appliquée pour les deux TCR de l'estuaire fluvial (TCREF et TCRQC). Toutefois, pendant l'avancement de la numérisation préliminaire du trait de côte, une réflexion a été amorcée pour les deux TCR du projet situées à l'ouest, soit celles du HSLGM et du LSP. Lors des observations initiales de ces deux territoires, il était clair que les paramètres physiques et biologiques étaient distincts de la zone située à l'est de Trois-Rivières où les berges sont soumises à des processus tidaux. Ainsi, avec les différences géomorphologiques majeures engendrées par les marées, les TCR du HSLGM et du LSP se devaient d'être dotées d'une méthodologie et d'une classification qui leur étaient adaptées.

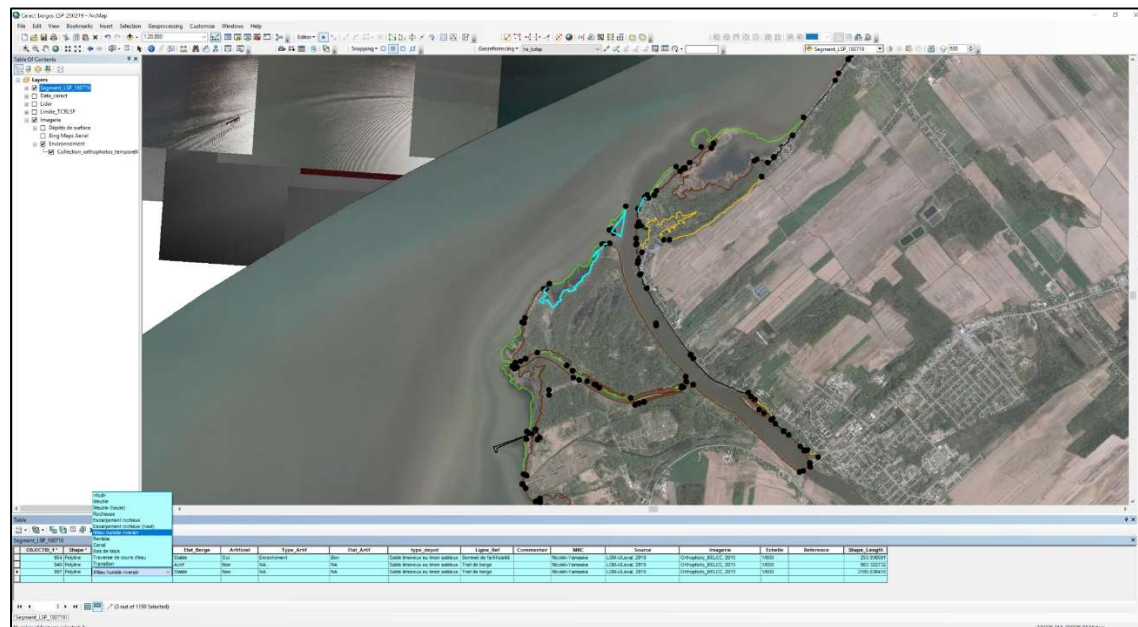


Figure 11. Numérisation préliminaire dans le secteur de Nicolet. Un exemple de liste déroulante est visible dans la table attributaire.

Pour clarifier cette disparité, la première étape a été de définir les limites morphologiques de ce tronçon correspondant à un géosystème strictement fluvial, lequel est principalement composé de berges associées à des terrasses fluviales. Le terme « côte » n'est donc plus applicable pour ce secteur, ce qui fait en sorte que la caractérisation fluviale utilisera plutôt le concept de « trait de berge », soit généralement le premier haut de talus rencontré au niveau de la rive (Figure 12). Le choix de cette limite géomorphologique vient principalement de la notion de débit plein bord (*bankfull discharge*). En se basant sur la littérature scientifique, la majorité des études géomorphologiques en milieu fluvial réalisées au Québec (Boucher et al., 2009 ; Biron et al., 2013, 2014 ; Buffin-Bélanger et al., 2015 ; Rousseau et al., 2018) et à l'international (Bizzi et Lerner, 2012 ; Schmitt et al., 2014 ; Heitmuller et al., 2015) aborde le concept de débit plein bord pour délimiter le haut du talus (berge) du chenal principal (lit mineur) des cours d'eau. Ce débit, associé à une récurrence 0-2 ans, serait le principal processus qui modèle les berges du lit mineur et le volume limite avant que l'eau déborde dans la plaine d'inondation. En d'autres termes, le trait de berge correspond à la limite supérieure du

talus du lit mineur et, par le fait même, à la limite géomorphologique qui est la plus susceptible d'évoluer face aux processus érosifs (Figure 12). Cependant, cette limite morphologique n'est pas toujours discernable en raison de pentes trop faibles ($< 1\%$), ce qui fait en sorte que l'identification d'un haut de talus pour certains segments riverains (p. ex. : milieux humides) peut devenir rapidement complexe. Pour ces exceptions, le trait de berge correspond à la limite perceptible sur les orthomosaïques entre la végétation à prédominance aquatique et celle à prédominance terrestre (p. ex. : limite entre marécages arborescents ou les prairies humides et les marais fluviaux), soit une limite botanique également associée à une récurrence de deux ans (Michaud et al., 2015). Le traçage de ce trait a aussi été guidé par la consultation de la base de données géospatiales de l'occupation du sol des basses-terres du Saint-Laurent développée par Environnement et Changement climatique Canada.

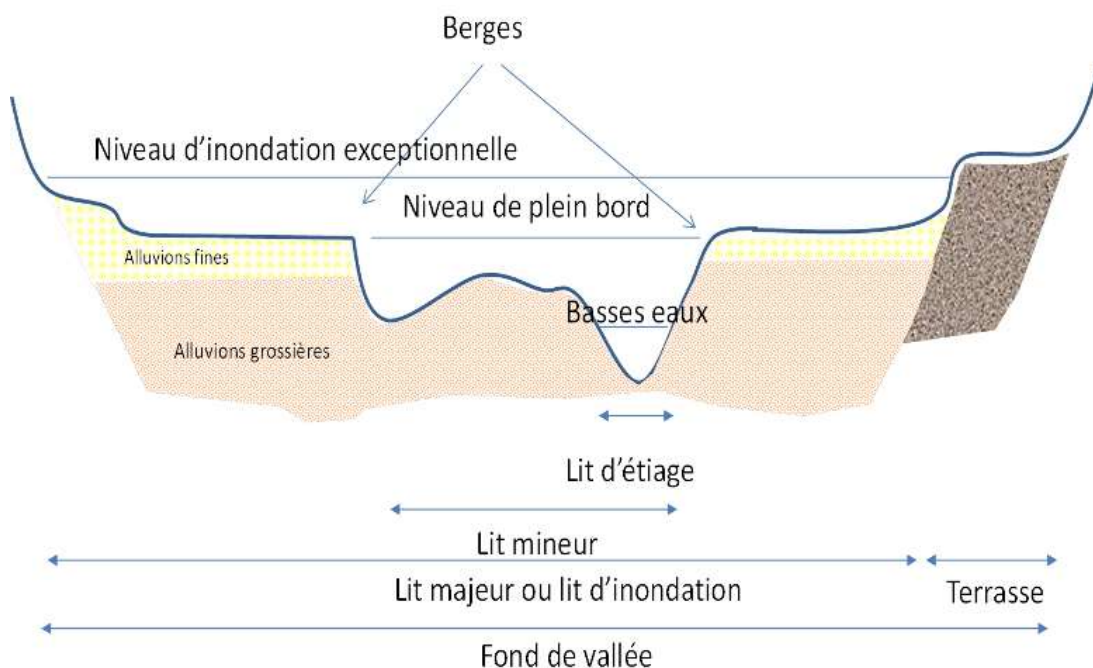


Figure 12. Schéma exposant les types de lits fluviaux et les niveaux d'eau associés (Tirée de Piégay, 2020).

D'autre part, en se basant sur nos observations et des études antérieures (Biron et al., 2014 ; Currin et al., 2015), un trait, lequel correspond à la limite d'un milieu humide protecteur (marais fluvial), a été ajouté aux types de ligne complémentaires pour la caractérisation en milieu fluvial. Ce trait a été numérisé à une plus basse résolution (soit au 1:2 000) et n'a pas été caractérisé comme les traits primaires (Annexe A ; Tableau KK). Sans concorder à la limite supérieure du débit plein bord (0-2 ans), ce trait délimite un milieu humide riverain au pied d'une berge servant de protection naturelle (p. ex. : atténuation des vagues) (Figure 13). Toutefois, cette limite n'est pas toujours franche. Dans cette situation, le trait correspond plutôt à l'endroit où la végétation semble stable et non fragmentée. Le niveau de l'eau observé sur l'orthomosaïque va également grandement influencer la position de ce trait complémentaire.

En résumé, la TCR de Québec et de l'Estuaire fluvial utilise la méthodologie développée par l'équipe de l'UQAR, qui utilise des limites géomorphologiques associées à un environnement fluvial avec une influence maritime, tandis que la TCR du LSP et du HSLGM utilise une méthodologie similaire, mais avec des définitions adaptées au tronçon strictement fluvial du Saint-Laurent.



Figure 13. Aperçu du trait de berge (en brun) et du trait d'un milieu humide protecteur (en vert).

4.2.2 Étape 2 : Segmentation et caractérisation des segments

Une fois que les limites géomorphologiques ont été tracées, une segmentation des traits a été réalisée afin de permettre une caractérisation exhaustive des berges. Plus précisément, le tracé est fractionné en segments homogènes selon des caractéristiques qualitatives spécifiques. Un nouveau segment est déterminé dès qu'un changement au niveau de la berge (soit le type et l'état de la berge ainsi que le type et l'état de l'artificialité) a été identifié sur une longueur minimale d'environ cinq mètres (Figure 14). La liste de ces caractéristiques est présentée dans les Tableaux X à KK de l'Annexe A. Encore, les types de berges ont été modulés selon la présence ou non de processus tidaux.

Dans le cadre de ce projet, les variations de la berge ont été déterminées généralement avec des photographies aériennes obliques acquises par hélicoptère. Plus de 15 000 images géolocalisées ont été captées pendant deux périodes de levés, soit en octobre 2018 pour la TCREF et TCRLSP et en juin 2019 pour la TCRHSLGM. Des images obliques acquises en septembre 2017 par l'équipe de l'UQAR ont été empruntées pour la TCRQC (LDGIZC, 2017). Ces photos ont permis de fournir un portrait précis de l'ensemble des berges du territoire à l'étude (Figure 15A). Ces données ont été intégrées dans

Google Earth Pro afin de faciliter leur consultation lors de l'étape de la caractérisation des berges (Figure 15B).

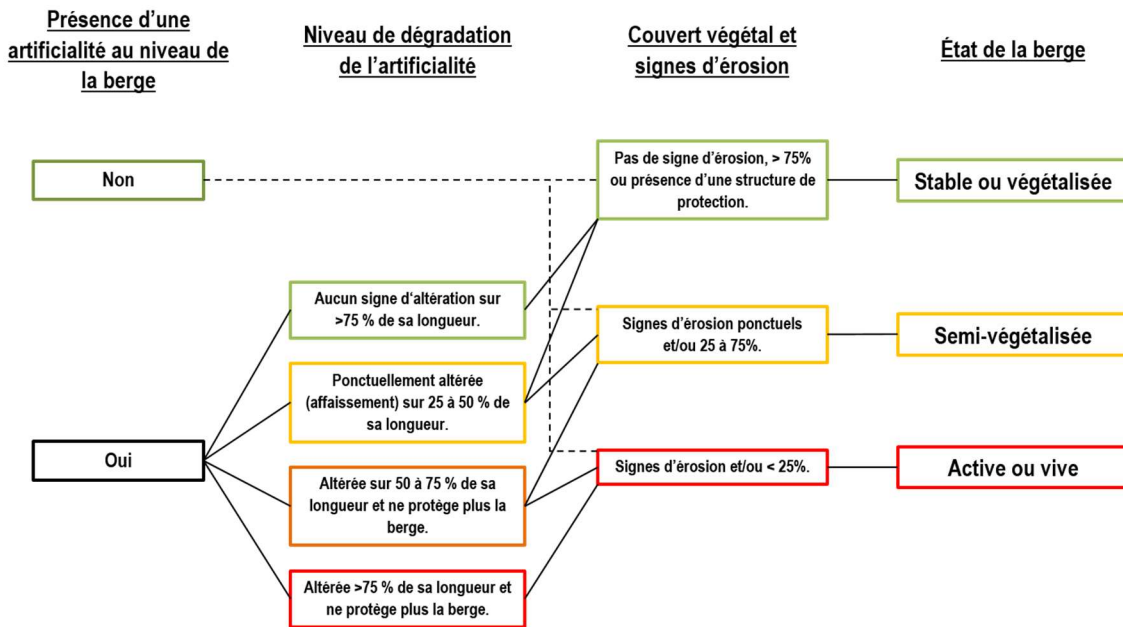


Figure 14. Schéma d'un arbre décisionnel pour le choix de critères dans la caractérisation des berges.



Figure 15. (A) Photo oblique prise lors d'un vol en hélicoptère près de Deschaillons-sur-Saint-Laurent. (B) Ensemble des photos obliques géoréférencées entre la TCREF et la TCRLSP intégré dans Google Earth Pro.

4.2.3 Étape 3 : Observations et validations sur le terrain

Les relevés de validation, qu'ils soient terrestres ou sur l'eau, se sont avérés essentiels à la réalisation du projet. En fait, le rôle premier des photos et vidéos a d'abord été de combler les éléments de la berge que les orthomosaïques, les couvertures LiDAR et les images obliques n'ont pas permis de fournir pour compléter une caractérisation à haute résolution. La combinaison de ces méthodes d'observation d'origine multiscalaire a également permis d'améliorer l'apport de renseignements sur les processus d'érosion et les facteurs de contrôle présents sur les berges du Saint-Laurent.

Près de vingt sorties sur le terrain ont été effectuées dans les TCR afin de rassembler environ 2 600 images dont la majorité est géolocalisée (Figure 16). À l'instar des images obliques, l'ensemble des photos a été indexé dans un fichier KMZ afin de faciliter leur localisation dans l'aire d'étude et leur consultation.

Des vidéos géolocalisées ont été acquises en 2018 à bord d'une embarcation et à l'aide d'une caméra *GoPro Hero 5*. Ce type d'observation a uniquement été nécessaire dans les chenaux de l'archipel du lac Saint-Pierre. En effet, la prise d'image oblique de qualité aurait été complexe, puisque la plupart des chenaux sont étroits et présentent, par endroit, un dense couvert végétal. De plus, l'accès aux berges des îles par voie terrestre était généralement irréalisable. L'entreprise Biophare/Randonnée Nature de Sorel a donc été mandatée le 5 et 6 septembre 2018 par l'équipe de l'Université Laval afin de parcourir l'ensemble des chenaux de l'archipel. Les données ont pu être par la suite intégrées dans la base de données et ArcGIS 10.7, puis analysées avec l'outil *Full Motion Video* d'ESRI (Figure 17).



Figure 16. Site en érosion près de Saint-Anne-de-la-Pérade visité lors d'une sortie sur le terrain.

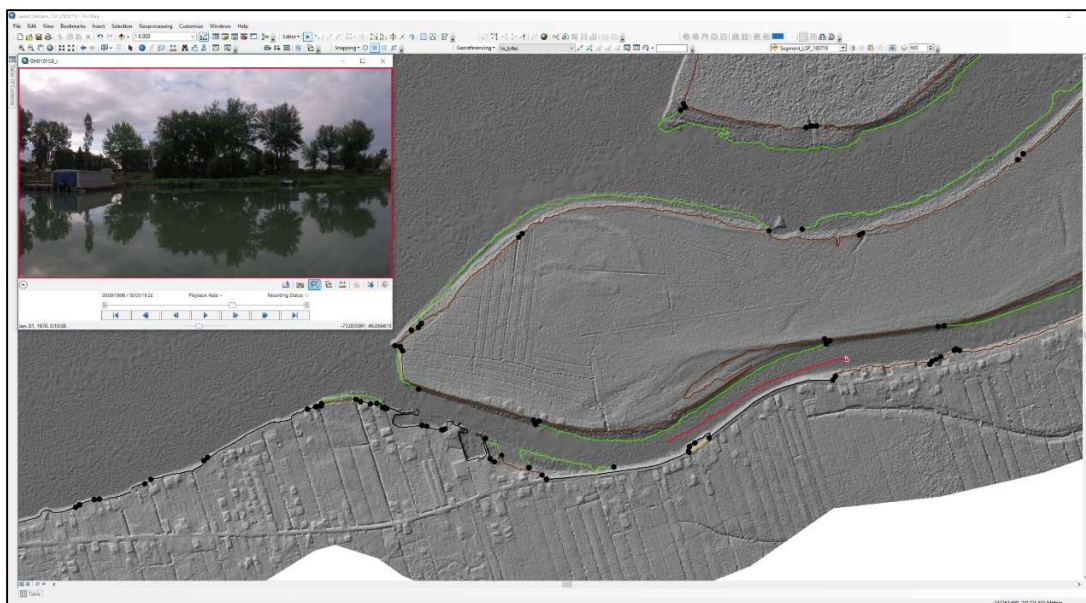


Figure 17. Exemple d'analyse vidéo dans l'interface ArcMap avec Full Motion Video avec la position de l'embarcation en simultané (tracé rose).

4.3 CONSULTATIONS ET ATELIERS AUPRÈS DES TCR

Le volet consultation a été une étape importante pour les équipes de recherche impliquées dans le projet. Ces journées de partage de connaissances ont été organisées et coordonnées principalement par les membres d'Ouranos ainsi que les équipes des TCR. En effet, cette approche consultative et participative a été fondamentale pour le volet Érosion, car elle a permis de mieux orienter et renseigner l'équipe de l'Université Laval sur plusieurs détails de l'environnement naturel et du cadre bâti propre à chacune des TCR. Par ailleurs, les intervenants ont été encouragés à transmettre leurs informations en tout temps au coordonnateur de leur TCR respective, lequel communiquait par la suite avec l'équipe d'Ouranos, responsable de coordonner et d'animer les activités d'échange avec les représentants du milieu pour l'ensemble du projet. D'ailleurs, il est important de préciser que chacune des équipes de recherche (MELCC, Ouranos et Université Laval) a été des participants actifs lors de ces ateliers ; tous ont collaboré activement dans le déroulement et l'animation des activités.

4.3.1 Rencontres de démarrage

Une rencontre de démarrage a été réalisée dans chacune des TCR pendant l'hiver 2018. Les discussions suivant la présentation des orientations du projet ont permis d'étendre la réflexion de certains aspects conceptuels et méthodologiques envisagés pour le volet Érosion. De plus, l'élaboration de cartes de localisation préliminaires a également permis de corriger et de mieux établir les limites de l'aire d'étude.

Plusieurs données ont été partagées à l'équipe par les participants suite à cette première rencontre, comme des orthomosaïques, des données LiDAR et des rapports. Dans la plupart des cas, ces intrants sont venus compléter la base de données de certains

secteurs avec des données ministérielles plus anciennes. Ils ont permis, par le fait même, d'augmenter la précision de la caractérisation des berges et l'analyse des processus d'érosion. À titre d'exemple, la Communauté Métropolitaine de Québec (CMQ), laquelle dirige la TCR de Québec, a transmis un rapport issu d'une étude réalisée sur leur territoire par le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC, UQAR) en 2016. Cette étude, qui avait les mêmes objectifs que le présent projet, a facilité grandement le développement de la méthodologie pour l'intégrité du tronçon fluvial.

4.3.2 Ateliers d'identification de sites d'intérêt

Les ateliers interactifs réalisés à de l'automne 2018 avec les quatre TCR se sont déroulés avec succès et ont pu fournir des indications précieuses pour l'équipe du volet Érosion. Pour le volet érosion, la préparation de ces journées a consisté à faire un montage de plusieurs cartes en format papier et d'un protocole d'utilisation de *Google Earth Pro* pour les animateurs, afin d'y inscrire les renseignements énoncés par les acteurs locaux (Figure 18). Un partage des documents cartographiques générés par l'équipe de l'Université Laval avec les équipes du projet ainsi que les coordonnateurs TCR a permis d'offrir une cohérence dans le découpage administratif utilisé pour les ateliers.

Afin de poursuivre cette approche collaborative, les participants ont été invités à identifier, sur des cartes interactives et papiers, des sites du territoire de leur TCR ayant des enjeux d'érosion. Préalablement à l'atelier, une brève présentation explicative a été fournie afin d'éclairer les participants sur les différents processus géomorphologiques pouvant être présents dans leur région, ce qui leur a permis d'exposer des informations davantage complètes. Avec la participation d'un animateur et d'une fiche informative, ils ont ainsi pu fournir, au meilleur de leurs connaissances, des éléments descriptifs de sites d'intérêt ayant une problématique d'érosion, comme les processus érosifs dominants, les éléments vulnérables (p. ex.: route, habitation, terrain agricole, terrain privé, milieu humide, etc.) et la présence de structures de protection (Tableau B).

Tableau B. Fiche descriptive pour l'identification des sites d'intérêt.

Éléments descriptifs des sites d'intérêt pour l'érosion des berges							
1- Type de substrat	Argile	Limon	Sable	Gravier	Till	Roc	Autre (à préciser)
2- Cause dominante de l'érosion (naturel et anthropique) (2 max.)	Vitesse d'écoulement du fleuve	Action des vagues	Action des glaces	Dessiccation des argiles (étiage)	Inondation	Gel/dégel	
	Glissement de terrain	Ruissellement	Batillage	Gestion des niveaux d'eau (barrages)	Aménagement humain (ex : effet de bout)	Autre (à préciser)	
3- Taux de recul approximatif	< 1 m/an	1-5 m/an	5-10 m/an	> 10 m/an			
4- Intensité de l'érosion	Constante (p. ex. : courant, vagues)			Périodique (p. ex. : tempêtes, gestion des niveaux d'eau)			
5- Changement de la vitesse du taux de recul au fil des années	Ralentissement			Accélération			
6- Aménagement de protection en place	Type	Année ou période de construction	Constructeur	État de dégradation (% de la longueur endommagée) :	Bon (< 25 %)	Endommagé (50 - 75 %)	
					Partiellement endommagé (25 - 50 %)	Complètement endommagé (> 75 %)	
7- Élément vulnérable	Écosystème à haute valeur écologique (ex : marais)	Infrastructure (ex : route, bâtiment, etc.)	Terrain privé	Terre agricole	Autre (à préciser)		

4.3.3 Présentations et discussions autour des résultats finaux

Les dernières rencontres ont eu lieu au cours de l'hiver 2020. Elles avaient comme objectif de présenter les résultats finaux de la caractérisation des berges et des processus hydrogéomorphologiques de l'érosion. Les résultats ont été présentés sous la forme de cartes, de diagrammes et de fiches afin d'illustrer les principales tendances pour chaque TCR. Par la suite, des discussions en plénière ont eu lieu, lesquelles ont porté sur la compréhension du projet, mais également sur la validité des résultats, c'est-à-dire si les données présentées correspondaient à une image fidèle de ce que les intervenants locaux connaissaient de leur territoire.

Dans une deuxième étape de la rencontre, des réflexions par table ont été proposées pour répondre à des interrogations venant de l'équipe de recherche et présentées à l'auditoire, soit 1) manque-t-il des informations pertinentes sur les fiches des sites sensibles à l'érosion ? ; 2) sous quels types de formats les données du projet devraient être diffusées ? ; et 3) quels sites ou plateformes web utilisez-vous habituellement pour aller acquérir ce type de documents. Les réponses ont été prises en note par l'équipe. Ces éléments d'information ont contribué à mieux répondre aux besoins des communautés locales dans la finalité du projet (Figure 18). En bref, une approche participative a été mise de l'avant pendant l'entièreté du projet, ce qui a permis de bonifier et, ainsi, mieux adapter les livrables aux exigences et aux besoins des usagers.



Figure 18. Participants réunis pendant un atelier sur l'érosion.

4.4 IDENTIFICATION DES SECTEURS VULNÉRABLES À L'ÉROSION

La dernière étape du projet a été d'identifier les principaux sites où des problématiques liées à l'aléa de l'érosion ont été observées à partir des travaux de cartographie et de caractérisation. Dans le cadre de l'étude, les termes *vulnérable* et *sensible* sont utilisés pour définir une portion de la rive dont le cadre bâti ou un milieu naturel à haute valeur écologique semble faire face à l'aléa de l'érosion des berges. C'est en combinant les intrants provenant des ateliers d'identification des sites d'intérêt et l'analyse globale de la caractérisation des berges du tronçon fluvial qu'un répertoire de secteurs vulnérables à l'érosion a pu être produit.

L'étape principale de la sélection des sites a été d'identifier, pour chacune des TCR, des agglomérations homogènes où l'état de la berge était de semi-végétalisé à actif et où l'état des artificialisations était de partiellement à complètement dégradé (Figure 19A et 19B). Par la suite, les segments contigus qui présentaient ces caractéristiques ont été combinés pour former un site sensible (Figure 19C). Cette étape a été répétée pour chacun des regroupements identifiés au préalable. Ce type d'approche privilégiait donc une étude du contexte global d'un secteur plutôt qu'une analyse terrain par terrain afin de permettre une gestion intégrée d'une problématique partagée entre les diverses parties prenantes. Généralement, les sites devaient faire plus de 100 m de longueur afin d'être considérés dans l'inventaire; ce critère a permis d'éviter d'ajouter, par exemple, des ouvrages isolés ayant simplement manqué d'entretien depuis leur mise en place. Tel que mentionné antérieurement, plusieurs sites ont pu être ajoutés ou bonifiés en information grâce aux commentaires transmis à l'équipe de recherche par les intervenants locaux lors des ateliers.



Figure 19. Exemple de l'identification du site sensible QC-11 dans la TCR de Québec. La combinaison de l'état de la berge (A) et des artificialités (B) a été intégrée dans le processus de sélection des sites (C). Voir la section 5.1.1 pour la symbolique des cartes.

Les secteurs ont ensuite été subdivisés par type de berge afin de mieux isoler les processus d'érosion en cause. À titre d'exemple, les processus dominants sur une berge naturelle ne sont pas les mêmes que sur une berge aménagée. C'est pour cette raison que certains sites possèdent une lettre voisine à leur identifiant quand plusieurs géosystèmes ont été relevés dans un même secteur problématique (Figure 19C). Enfin, l'ensemble des éléments propres aux sites, soit les données de caractérisation et les processus dominants locaux, ont été notés dans un fichier géolocalisé à l'intérieur de la base de données intégrée du projet.

Plusieurs fiches imagées ont été générées afin de compléter et de faciliter la visualisation des secteurs sensibles (Figure 20). Ce support visuel contient majoritairement les données issues de la caractérisation, mais aussi, comme ajout et selon les connaissances actuelles, des informations sur les processus terrestres ou hydrologiques qui semblent influencer l'érosion à ces endroits. L'ensemble des fiches a été trié selon trois grandes classes, soit : 1) les berges artificialisées ; 2) les écosystèmes à haute valeur écologique ; et 3) toute autre berge naturelle ne correspondant pas aux deux autres classes (Figure 20). Il est important de préciser que ces fiches constituent un outil visuel et d'accès rapide à l'information qui n'a aucune portée légale. À l'instar de l'ensemble des données de caractérisation, les fiches ont pu être intégrées dans un fichier KMZ afin de les consulter de façon simple et interactive dans l'interface *Google Earth Pro*. Somme toute, ces fiches qualitatives constituent un premier pas vers une cartographie détaillée des zones à risque pour cet aléa et pour l'amélioration des connaissances des spécificités locales des processus responsables de l'érosion dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent.

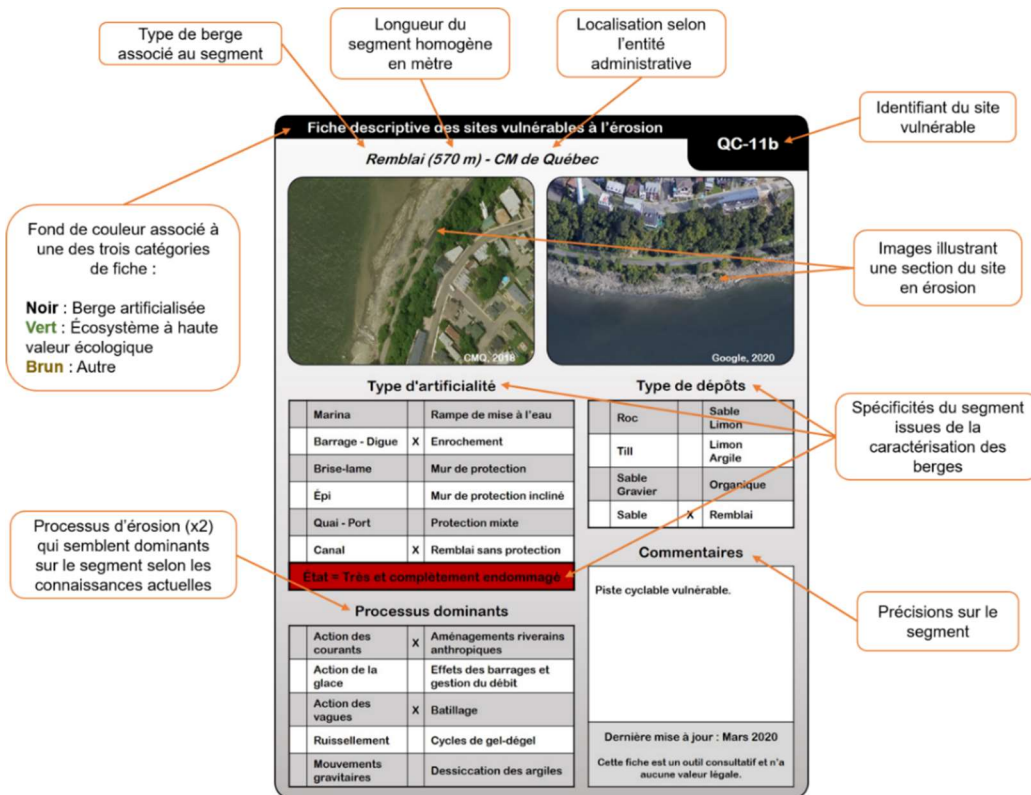


Figure 20. Exemple de la fiche imagée du site QC-11b avec légende explicative.

4.5 LIMITES ET CONTRAINTES DE L'ÉTUDE

Malgré la méthodologie méticuleuse et rigoureuse employée par l'équipe de recherche pour la caractérisation des berges, il est nécessaire de souligner les contraintes et les limites de l'étude. Tout d'abord, la fiabilité de l'analyse des données dépend de plusieurs facteurs, tels que : 1) leur résolution et leur précision géodésique ; 2) la possibilité d'occlusions comme les ombrages, la densité du couvert végétal et les niveaux d'eau ; et 3) l'expérience du photo-interprète.

Dépendamment de la magnitude de ces éléments sur les données géospatiales, la position des traits géomorphologiques peut avoir des écarts allant jusqu'à quelques mètres par rapport à la réalité. Si l'un de ces facteurs rendait la numérisation difficile, les photos obliques ou celles prises sur le terrain suffisaient habituellement pour réduire les sources d'erreurs au maximum. Cependant, pour certains secteurs, ces photos étaient parfois soit de mauvaise qualité, soit absentes, ce qui pouvait nuire à une caractérisation précise des berges. Dans ces cas, la valeur inscrite dans la table attributaire a été assignée comme « Non déterminé ». Des visites de validation auraient pu permettre d'éviter ces incertitudes, mais elles n'étaient pas toujours réalisables puisque l'accessibilité à la rive pouvait être difficile, soit en raison d'une topographie accidentée ou d'un lieu non sécuritaire au passage, soit due à la forte densité de terrains privés bordant le fleuve Saint-Laurent. D'autre part, il a été possible d'observer sur quelques orthomosaïques plus récentes des niveaux d'eau très élevés. L'utilisation des données topographiques a permis d'atténuer les effets de cet obstacle pour la plupart des zones, mais dans les situations où les secteurs possédaient de très faibles pentes (p. ex. : milieux humides), le positionnement du trait devenait vite imprécis (Figure 21). Des orthomosaïques plus anciennes ont alors été consultées pour limiter les effets de cette contrainte à la numérisation. Cette étude, qui s'appuie surtout sur une approche qualitative, peut également engendrer quelques variations dans le positionnement et la caractérisation, selon l'expérience de l'interprète qui l'a réalisé. Toutefois, une grande majorité de l'aire d'étude a fait part de suivi et de révision tout au long du projet par un interprète expérimenté. Malgré cela, des erreurs sont encore envisageables dans la base de données en raison de la grande superficie couverte par l'étude. Les cartes produites par cette étude sont évolutives ; des corrections pourront y être apportées au besoin.

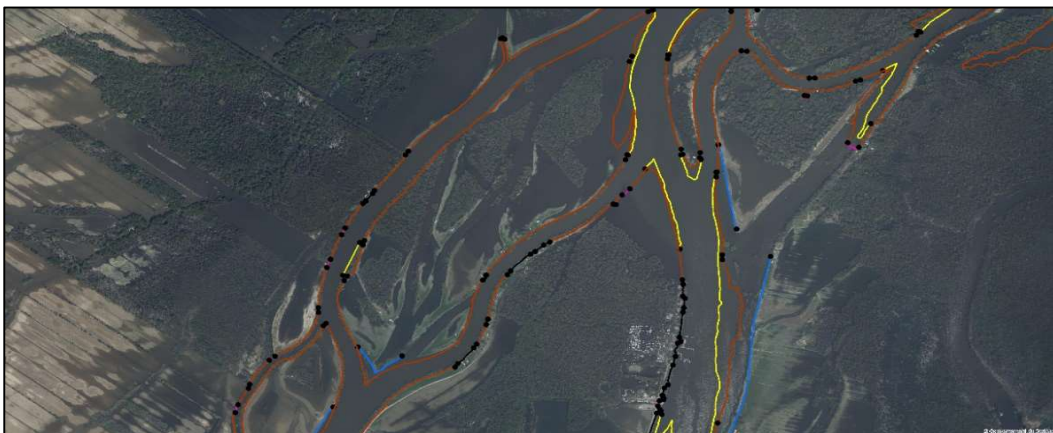


Figure 21. Niveau d'eau élevé sur une orthomosaïque de 2017 dans l'archipel du lac Saint-Pierre.

5 RÉSULTATS ET ANALYSES

Les résultats de la caractérisation sont présentés pour chacune des TCR en suivant un gradient d'est en ouest, soit quatre sous-sections distinctes (5.1 à 5.4), tandis qu'une cinquième (5.5) sous-section présente une synthèse des résultats pour toute la zone d'étude. Pour chaque sous-section, un portrait des différentes caractéristiques analysées est présenté, sous forme de statistiques, comme l'état de la berge/côte, la présence d'artificialités au niveau de la rive, les types ainsi que leur niveau de dégradation. Les résultats issus de la caractérisation des segments de berge sont présentés sous forme de tableaux ; ils sont aussi illustrés sous la forme de diagrammes en beignet à taille variable sur les différentes cartes. Les termes complets associés aux abréviations dans les tableaux sont définis dans les légendes en Annexe A. Le diagramme ajouté utilise le même code de couleur que la légende de la carte pour une plus grande uniformité. De plus, la description des résultats est faite en indiquant les proportions présentes sur les diagrammes et le kilométrage associé est ajouté entre parenthèses. Une description générale des sites vulnérables est de plus ajoutée pour chaque TCR à la suite des cartes et des tableaux statistiques. Les fiches des sites sensibles pour chacune des TCR sont présentées en Annexe C.

5.1 TCR DE QUÉBEC

5.1.1 Statistiques sur la caractérisation

La TCR de Québec (TCRQC) présente une ligne de côte sur 315 km linéaires qui a été segmentée en 2 642 traits. Huit types de côtes ont été identifiés dans ce secteur (Figure 22). L'analyse des segments a permis de soulever la prévalence des côtes de types remblai et marais maritime avec une proportion semblable de 36% (113 km). Deux autres types de côtes ont des proportions similaires avec 12% (37 km) pour les terrasses de plage » et 10% (33 km) pour les falaises rocheuses. Finalement, les proportions des quatre autres types de côtes ne représentent que 3% (rocheuse sans falaise, 10 km), 2% (falaise meuble, 6 km), 1% (terrasse fluviale, 3 km) et moins de 1% (meuble sans falaise, < 1 km). Un total de 40% (127 km) des côtes de la TCRQC sont artificialisées, alors que 60% (189 km) sont naturelles (Figure 23). Une variété de six classes d'artificialités a été observée, dont les trois plus importantes sont les enrochements avec 39% (50 km), les murs de protection avec 29% (37 km) et les structures portuaires (soit les marinas, les quais, épis, etc.) avec 17% (22 km) (Figure 24). Le type de côte remblai sans protection suit avec 9% (12 km), suivi par les types rampes de mise à l'eau (4 km) et protections mixtes (3 km) qui totalisent 3% des segments artificialisés. L'état des artificialités au sein de la TCRQC est illustré sur la Figure 25. Les artificialités sont généralement en bon état dans une proportion de 72% (91 km). Pour le reste, 20% (25 km) des artificialités sont partiellement endommagées, 6% (8 km) sont très endommagées et 2% (2 km) sont complètement endommagées.

Un total de 15% (47 km) de la côte dans la TCRQC présente des signes de vulnérabilité à l'érosion (côte active ou vive) (Figures 14 et 26). Plusieurs de ces sites sont décrits dans les fiches en Annexe C. Ensuite, 20% (62 km) des côtes commencent à présenter des

signes d'érosion, liés à une perte du couvert végétal (côte semi-végétalisée) (Figures 14 et 26). Enfin, 66% (207 km) des côtes ont été identifiées sans signe de dégradation du couvert végétal, soit en bon état (Figures 14 et 26). D'une façon plus spécifique, les résultats présentés dans le Tableau C mettent en évidence que les types de côtes falaise meuble, terrasse fluviale et marais maritime sont plus impactés par l'aléa de l'érosion. Quoique les falaises meubles ne représentent que 2% de la TCRQC, un total de 50% des côtes de ce type, soit environ 2 km, montre des signes d'érosion. Avec une couverture semblable au type précédent, le type terrasse fluviale (3 km de la distance totale de la TCRQC) a une proportion de segments actifs à 20% (1 km). Pour ce qui est du type marais maritime, c'est une proportion de 30% (34 km) d'un total de 113 km qui présente des signes d'érosion. Ainsi, 15% des côtes de la TCRQC montrent des signes d'érosion et apparaissent comme actives ou vives.

Tableau C. Proportion relative d'érosion par types de côte.

Type de côte	Distance totale (km)	Active (km)	Proportion relative (%)
FM	6	3	50
FR	33	1	4
MM	113	34	30
REM	113	5	4
RSF	10	0	0
TF	3	1	20
TP	37	3	7
MSF	0	0	0
Total	315	47	15

Les résultats exposés dans le Tableau D soulignent que les enrochements et les remblais sans protection constituent les artificialités les plus touchées par les aléas d'érosion pour la TCRQC. D'ailleurs, les remblais sans protection présentent des signes de dégradation dans une proportion de 71% (8 km). Pour les enrochements, cette proportion atteint 31% (16 km). Les structures portuaires et les protections mixtes suivent avec des valeurs respectives de 23% (5 km) et 24% (1 km). En tout, 28% des artificialités de cette TCR apparaissent comme endommagées. Contrairement aux autres TCR, la TCRQC n'a pas fait l'objet d'une caractérisation des types de dépôt présents le long du tronçon analysé. En fait, seulement une mise à jour de la caractérisation de Quintin et al. (2016) a été réalisée pour cette TCR, dans laquelle les types de dépôt n'avaient pas été caractérisés.

Tableau D. Proportion relative d'érosion par types d'artificialité.

Type d'artificialité	Distance totale (km)	Portion endommagée (km)	Proportion relative (%)
SP	22	5	23
ENR	50	16	31
MP	37	6	15
PROM	3	1	24
REM	12	8	71
RME	4	0	0
Total	127	36	28

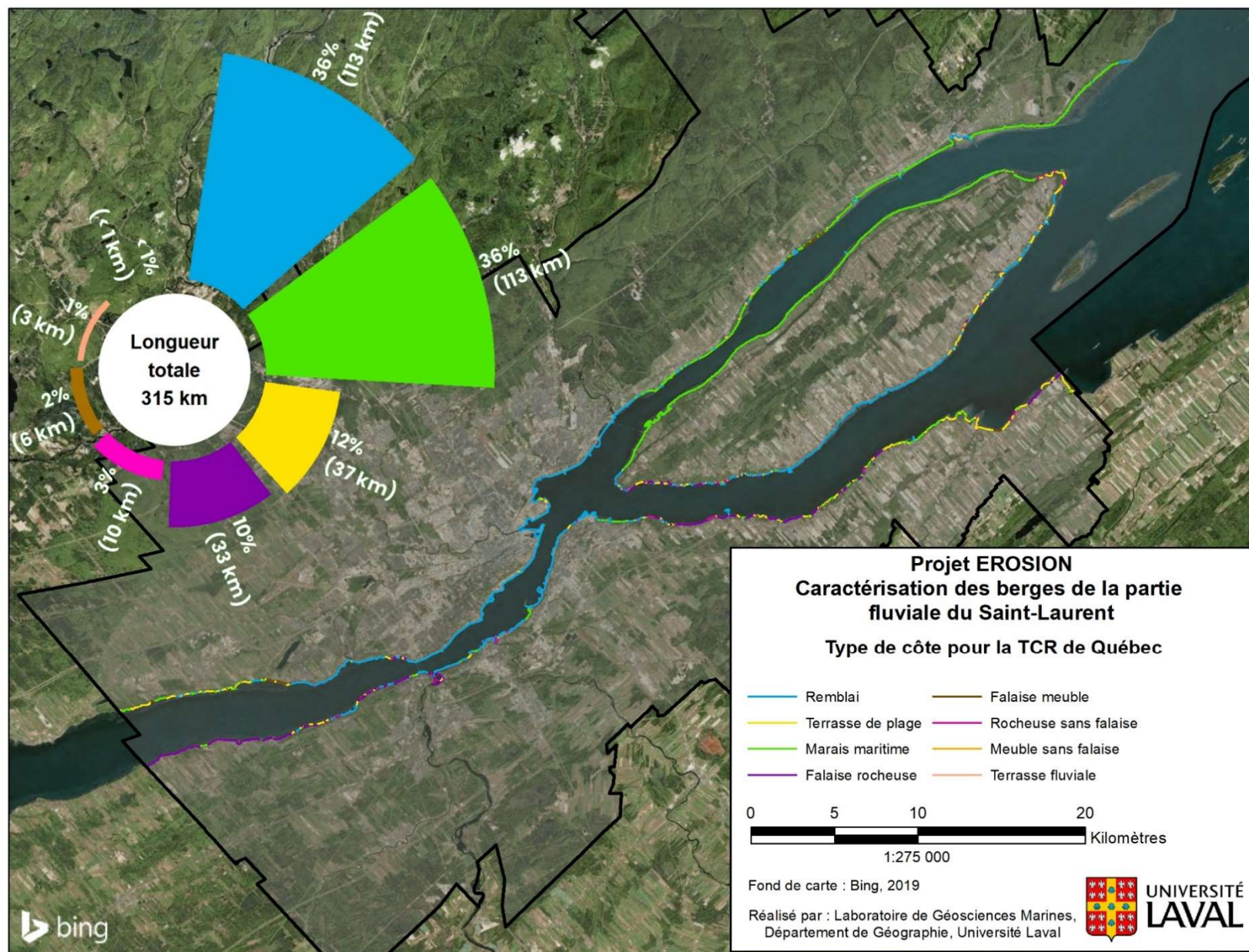


Figure 22. Carte et diagramme des types de côtes pour la TCR de Québec.

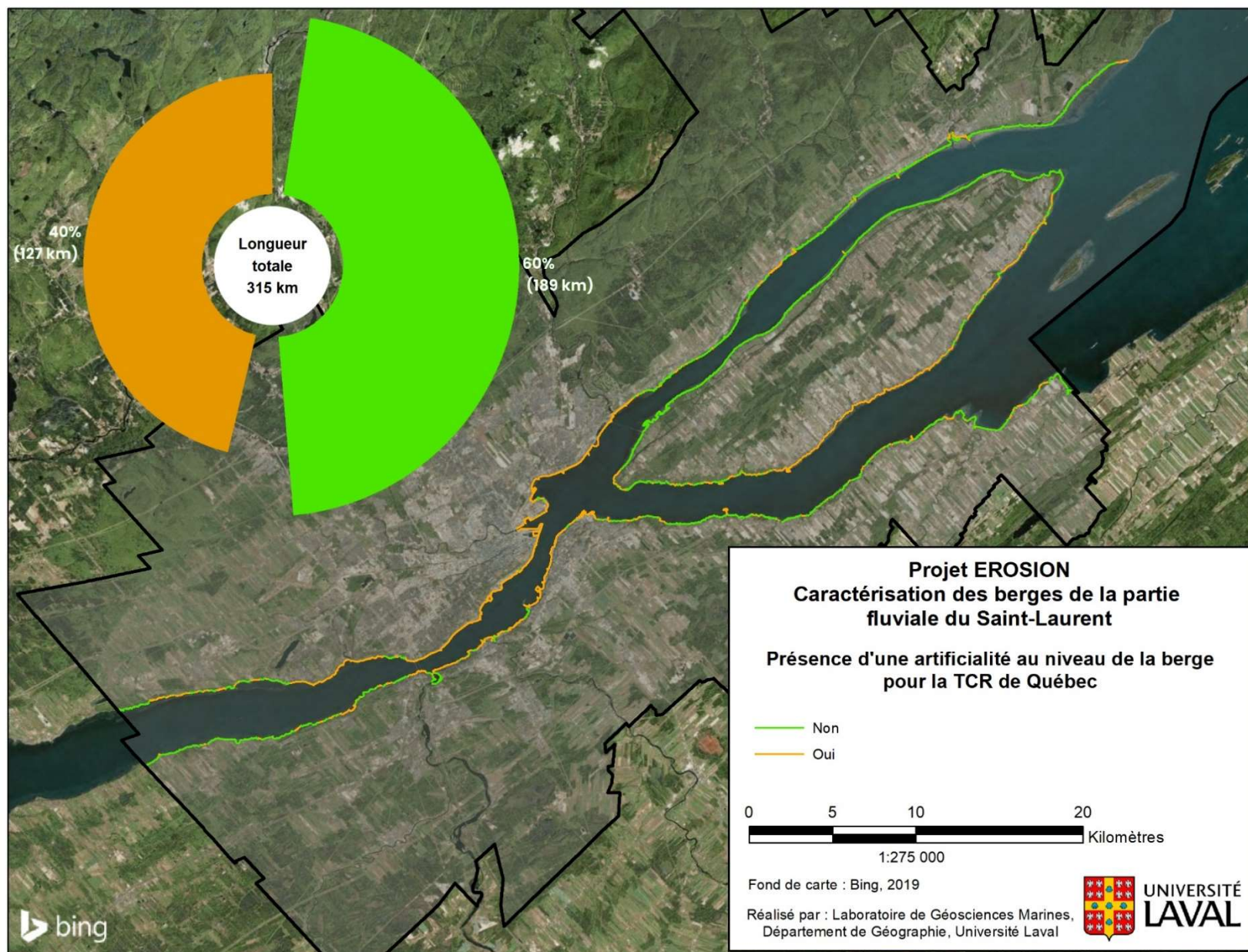


Figure 23. Carte et diagramme indiquant la présence d'une artificialité au niveau de la berge pour la TCR de Québec.

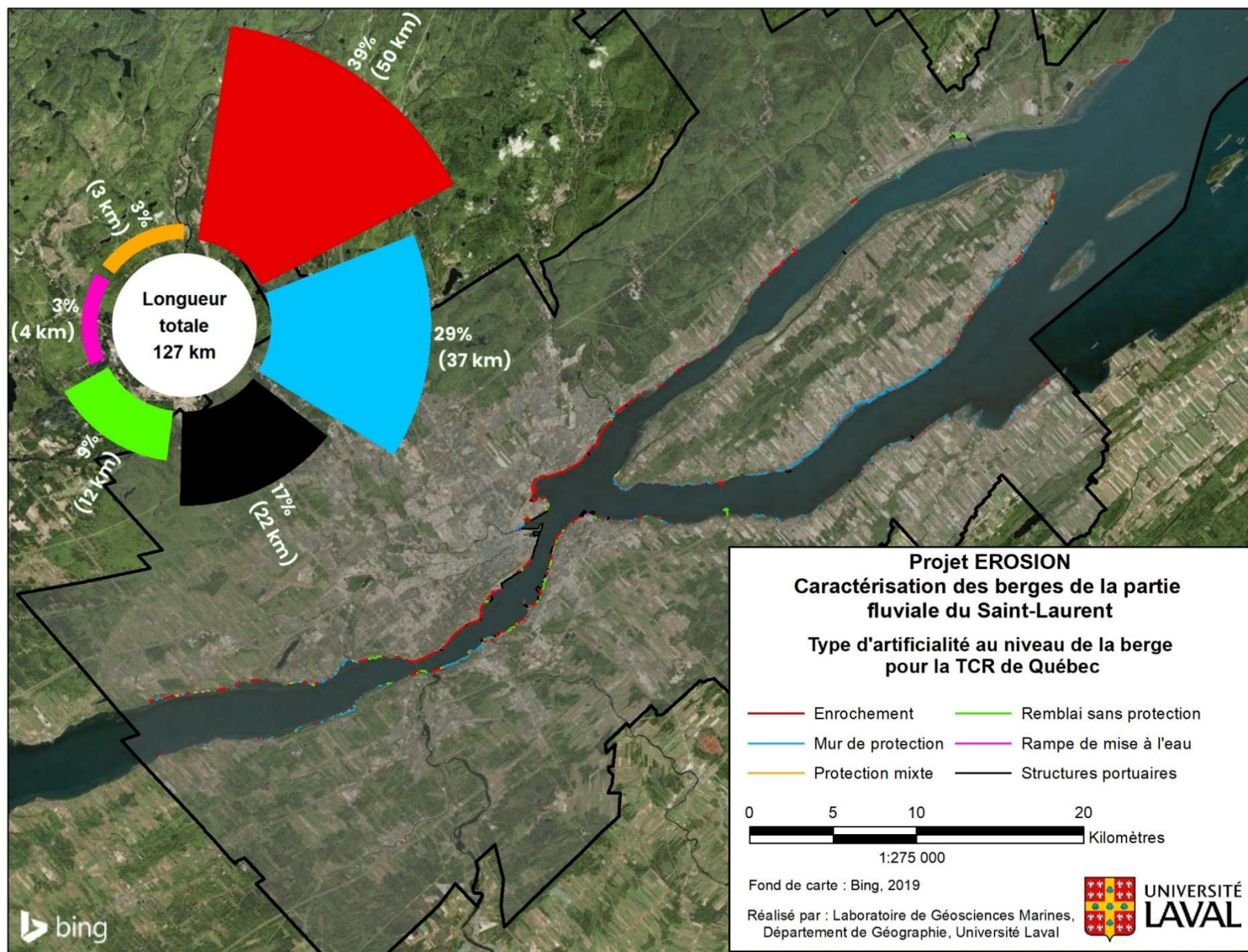


Figure 24. Carte et diagramme des types d'artificialité au niveau de la berge pour la TCR de Québec.

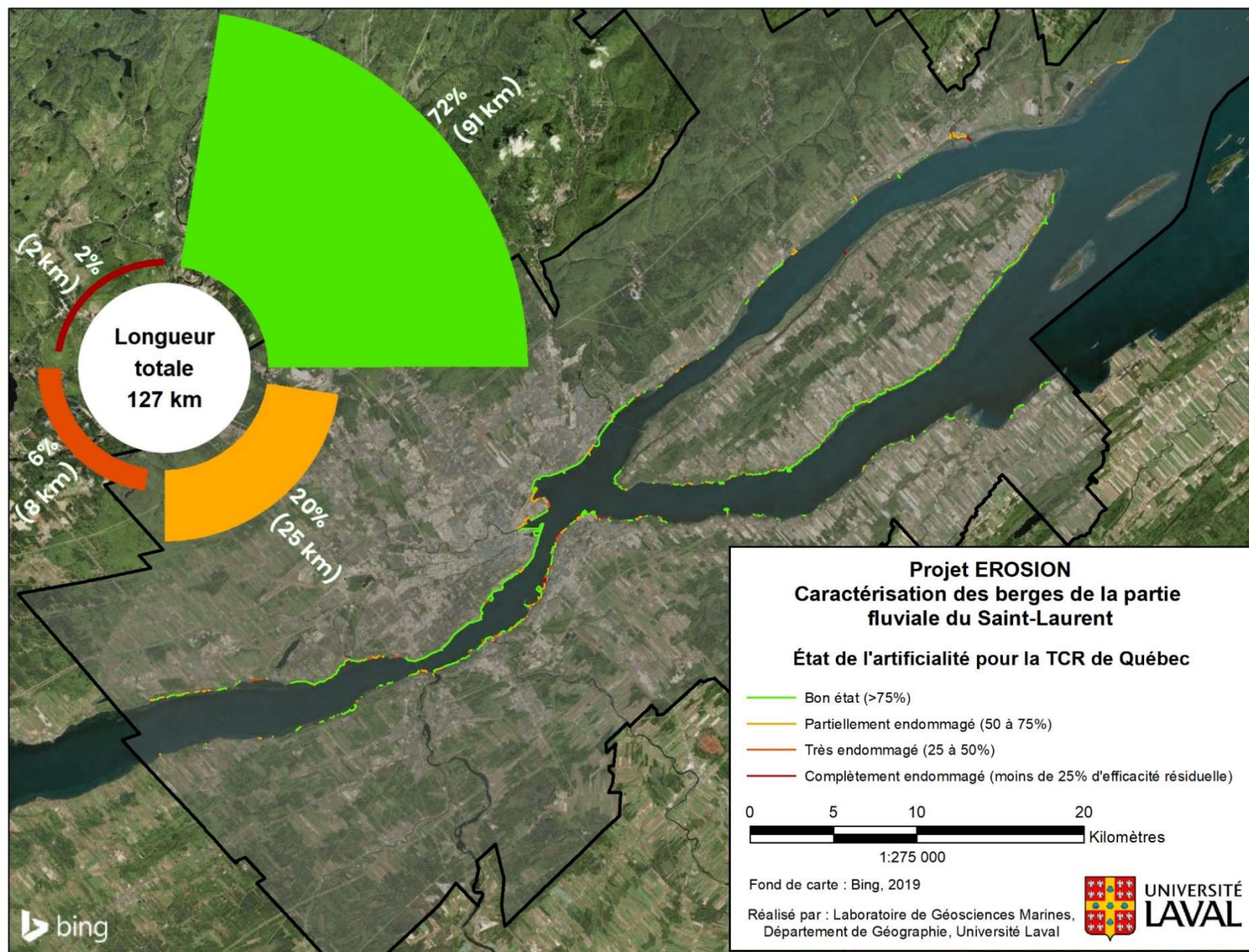


Figure 25. Carte et diagramme de l'état de l'artificialité pour la TCR de Québec.

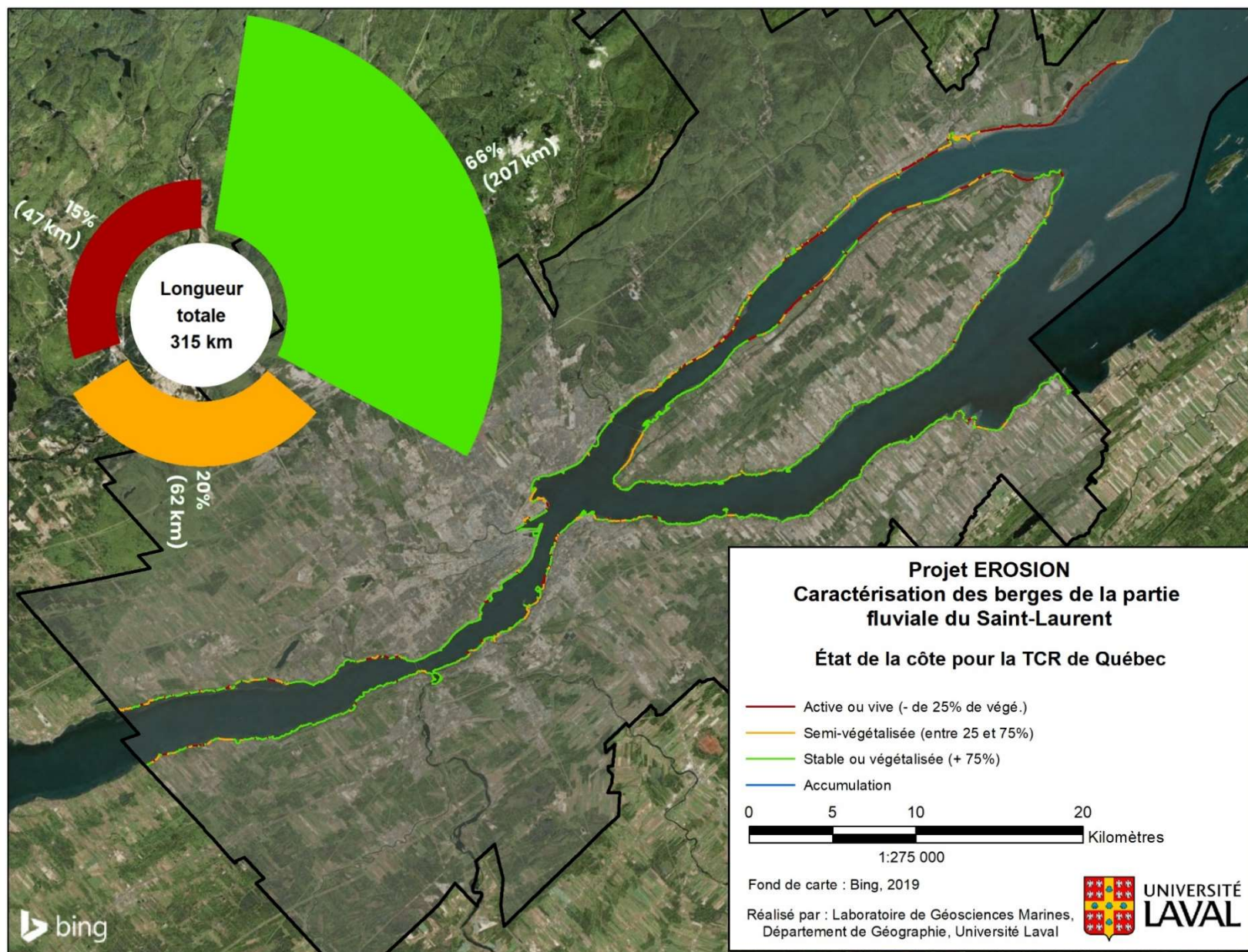


Figure 26. Carte et diagramme de l'état de la côte pour la TCR de Québec.

5.1.2 Inventaire des sites vulnérables à l'aléa de l'érosion des berges

Un total de 24 sites vulnérables à l'aléa de l'érosion des berges de la TCR de Québec a été identifié au cours de la caractérisation sur une distance linéaire totale de 80 km (Figures 27 et 28 ; Annexe C). De ces sites, 44 fiches ont été produites pour représenter leurs particularités spécifiques. Tel que décrit à la section 3.4, la division des sites s'est faite selon trois catégories, soit les berges artificialisées, les écosystèmes à haute valeur écologique et les autres types de berges naturelles.

Les fiches sont également réparties en nombre selon les trois catégories indiquées précédemment (Tableau E). En revanche, cette répartition quasi égale n'est pas représentative de la couverture linéaire. En effet, les 17 fiches regroupant des berges artificialisées ne couvrent que 15% (12 km) du tracé total couvert par l'ensemble des fiches (80 km). De même, les 12 fiches appartenant à la catégorie autre berge naturelle ne couvrent que 17% (13 km) du tracé total. À l'inverse, ce sont les écosystèmes à haute valeur écologique (15 fiches) qui couvrent 68% (55 km). Enfin, les informations contenues dans les fiches présentées à l'Annexe C offrent un portrait synthétique des données de caractérisation unique au site ainsi que les processus d'érosion affectant spécifiquement cette zone.

Tableau E. Inventaire des fiches de la TCR de Québec.

Type de fiche	Nombre	Distance (km)	Proportion (%)
Toute autre berge naturelle	12	13	16%
Berge artificialisée	17	12	15%
Haute valeur écologique	15	55	69%
Total	44	80	100%

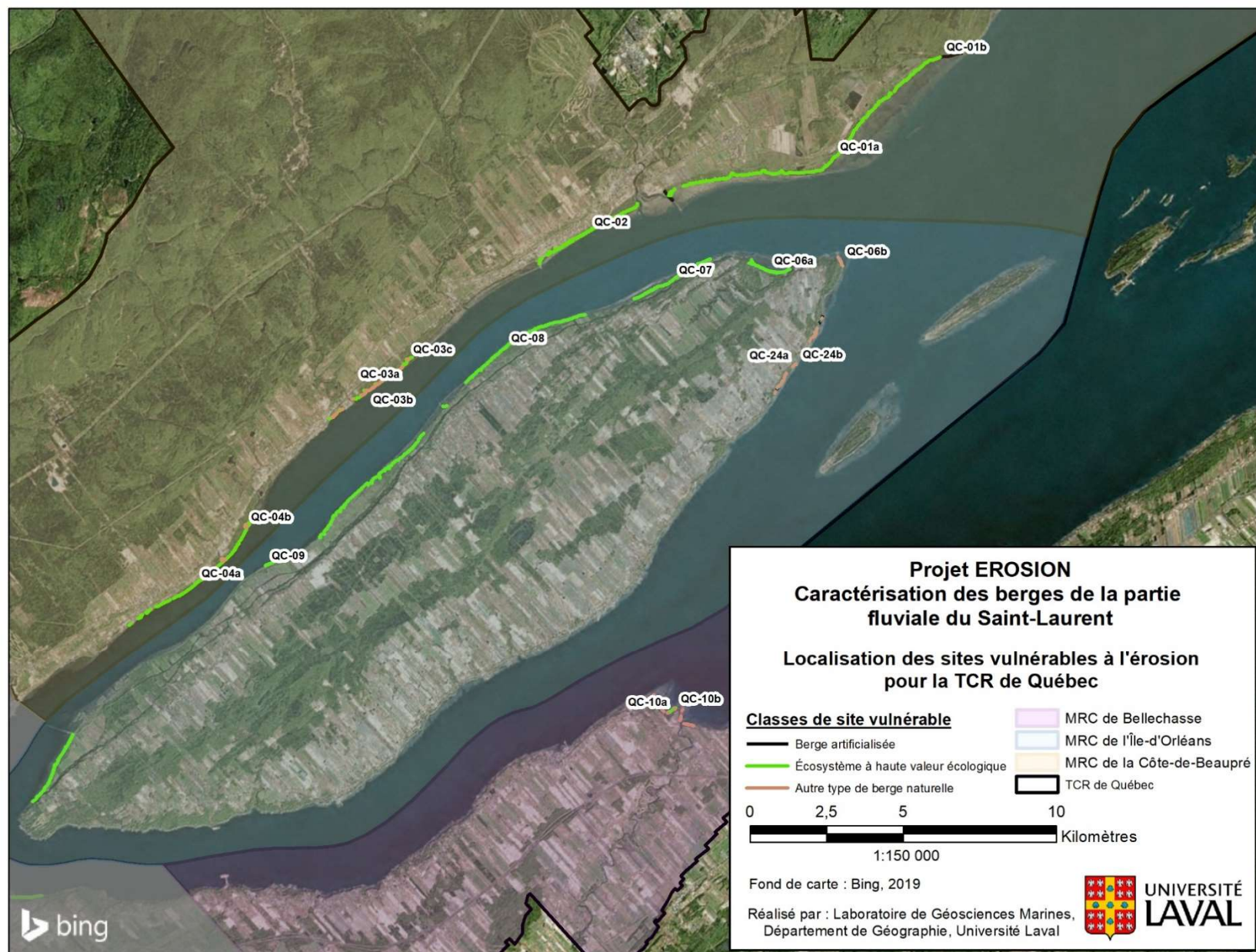


Figure 27. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR de Québec (secteur aval).

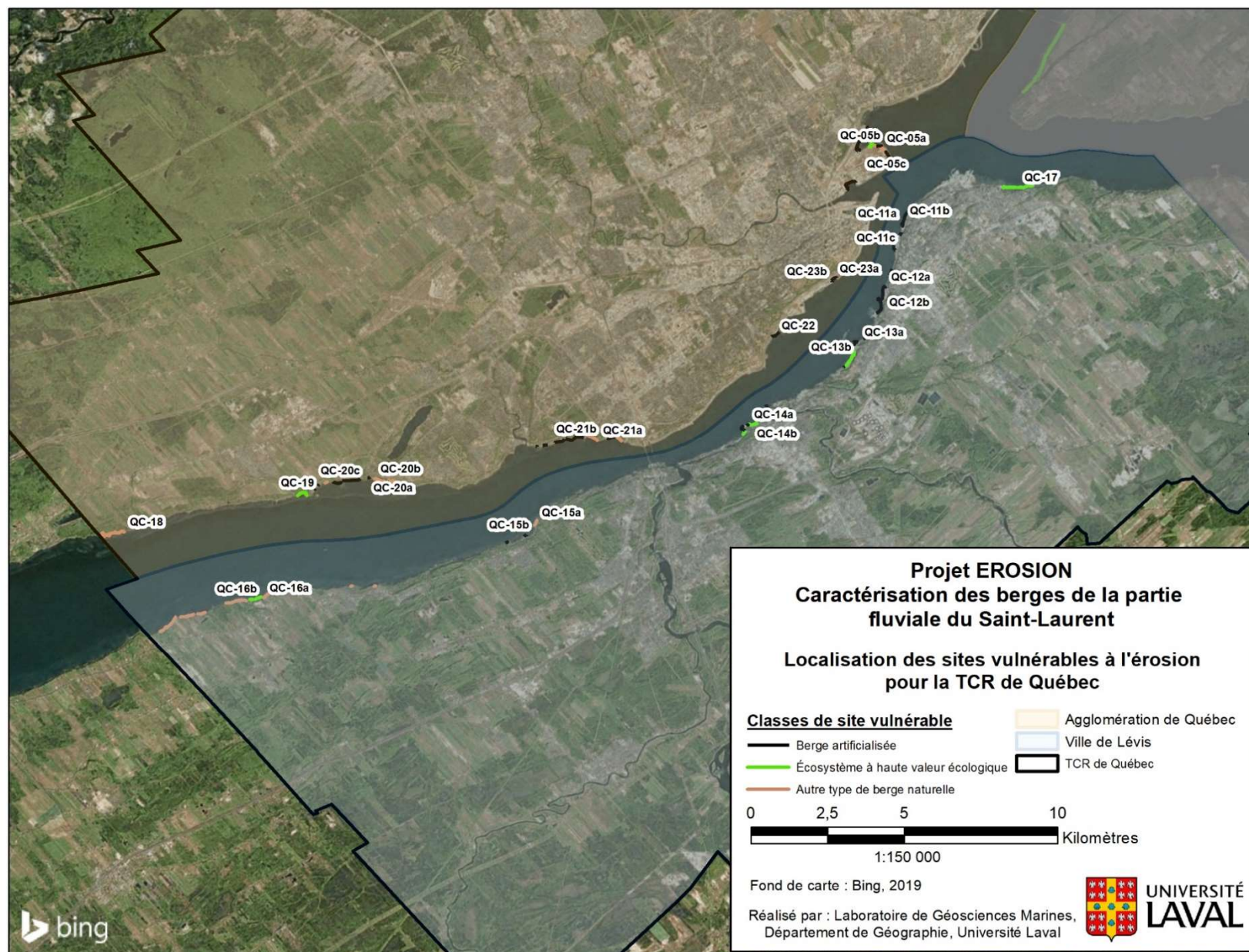


Figure 28. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR de Québec (secteur amont).

5.2 TCR DE L'ESTUAIRE FLUVIAL

5.2.1 Statistiques sur la caractérisation

Le territoire de la TCR de l'Estuaire fluvial (TCREF) s'étend sur une distance de 346 km linéaires le long des berges du Saint-Laurent. Cette distance linéaire est divisée en 1 708 segments, permettant ainsi de distinguer la diversité des types de côtes qui y sont présents (Figure 29).

La caractérisation de la TCREF a permis d'identifier 10 types de côtes. Afin de simplifier la Figure 29, quatre types de côtes ont été regroupés sous deux codes de couleurs. Il s'agit des types falaise meuble et falaise meuble basse ainsi que des types falaise rocheuse et falaise rocheuse basse, pour lesquelles les différences étaient basées sur la hauteur de la berge. Les côtes de la TCREF sont caractérisées par une prédominance du type remblai avec une proportion de 30% (104 km), suivie du type marais maritime avec 28% (94 km), pour une longueur totale de 198 km. Les falaises meubles (hautes et basses) s'étendent quant à elles sur une proportion de 18% (64 km) ; suivies des falaises rocheuses (hautes et basses), avec 9% (32 km), des terrasses de plage, avec 10% (33 km) et le type de côte meuble sans falaise, avec 5% (17 km). Les types de côtes rocheuse sans falaise et canal ne constituent pour leur part que 1% (2 km) et 0,4% (1 km), respectivement, de la longueur de côte de la TCREF.

La caractérisation a révélé une distinction majeure entre la présence ou non d'artificialités. Les artificialisations sont présentes dans une proportion de 40% (140 km) des berges de la TCREF (Figure 30), avec 13 types d'artificialités (Figure 31). L'enrochement est l'artificialité prédominante avec une proportion de 42% (59 km), alors que les remblais sans protection suivent avec 20% (28 km). Les différentes structures portuaires ont été regroupées sous le même code de couleur; elles représentent 14% (19 km) du total des berges artificialisées. Il s'agit des quais/ports, des épis, des marinas, des brise-lames et des barrages/digues (Figure 31). Dans une moindre mesure, les murs de protection et les murs de protection inclinés atteignent des proportions de 11% (15 km) et 6% (9 km) ; les protections mixtes, 5% (8 km) ; les rampes de mise à l'eau et les canaux sont présents sur 3% (2 km) et 1% (1 km). La caractérisation de l'état des types d'artificialités a permis de déterminer que les artificialités se sont révélées en bon état dans une proportion de 76% (106 km). Par ailleurs, 18% (26 km) de ces structures sont partiellement endommagées, alors que des artificialités très et complètement endommagées atteignent des proportions respectives de 5% (7 km) et 1% (1 km) (Figure 32).

Le croisement des données sur le type et l'état de la côte (Figure 33) a permis d'établir que 25% (88 km) d'entre elles se retrouvent dans la catégorie semi-végétalisée, alors que 20% (67 km) montrent des problématiques d'érosion, c'est-à-dire qu'elles sont actives ou vives. Cette analyse permet donc d'observer que plus de la moitié de la TCREF (55%, soit 190 km) est caractérisée par des côtes en bon état et que 0,2% (1 km) est en accumulation. Les terrasses de plages (45%, soit 15 km) et les berges meubles sans falaise (44%, soit 7 km) sont les types de côtes les plus touchées par l'érosion sur le territoire de la TCREF (Tableau F). De plus, les falaises rocheuses et les marais maritimes

sont affectés par l'érosion dans une proportion de 38% (11 km) et 21% (20 km), respectivement.

Tableau F. Proportion relative d'érosion par types de côte.

Type de côte	Distance totale (km)	Active (km)	Proportion relative (%)
CAN	1	0	0
FM	35	4	13
FM-B	28	5	16
FR	28	11	38
FR-B	3	1	19
MM	94	20	21
MSF	16	7	44
REM	104	5	5
RSF	2	0	0
TP	33	15	45
Total	346	67	20

Les enrochements et les remblais sans protection sont les artificialités les plus fréquentes, avec des proportions de 42% (59 km) et de 20% (28 km) (Figure 31). Ce sont également ces deux types d'artificialités qui présentent le plus de signes de dégradation, avec 30% (18 km) pour les enrochements et 46% (13 km) pour les remblais sans protection (Tableau G). Au total, 24% des artificialités de la TCREF présentent des signes de dégradation.

Tableau G. Proportion relative d'érosion par types d'artificialité.

Type d'artificialité	Distance totale (km)	Portion endommagée (km)	Proportion relative (%)
SP	19	1	4
CAN	1	0	0
ENR	59	18	30
MP	15	1	7
MPI	9	1	10
PROM	8	1	13
REMSP	28	13	46
RME	2	0	7
Total	140	34	24

L'identification de sept types de dépôts au sein de la TCREF a permis d'apporter des précisions sur l'état des côtes. Les dépôts de type remblai (104 km), till (11 km) et argile (26 km) totalisent 40% (140 km) de la TCREF, mais ne représentent que 24% (33 km) des dépôts vulnérables à l'érosion (Tableau H). Le manque de cohésion dans les types de dépôts comme les sables (64 km), les sables et graviers (10 km) et les sables limoneux (98 km) les prédispose à une plus grande sensibilité face à l'érosion. Ce sont d'ailleurs

ces dépôts qui présentent les plus grandes proportions de côtes actives, avec 35% (22 km), 42% (4 km), et 20% (19 km).

Tableau H. Proportion relative d'érosion par types de dépôt.

Type de dépôt	Distance totale (km)	Active (km)	Proportion relative (%)
CM	26	4	16
R	33	11	35
REM	104	5	5
S	64	22	35
SG	10	4	42
SM	98	19	20
T	11	1	8
Total	346	67	20

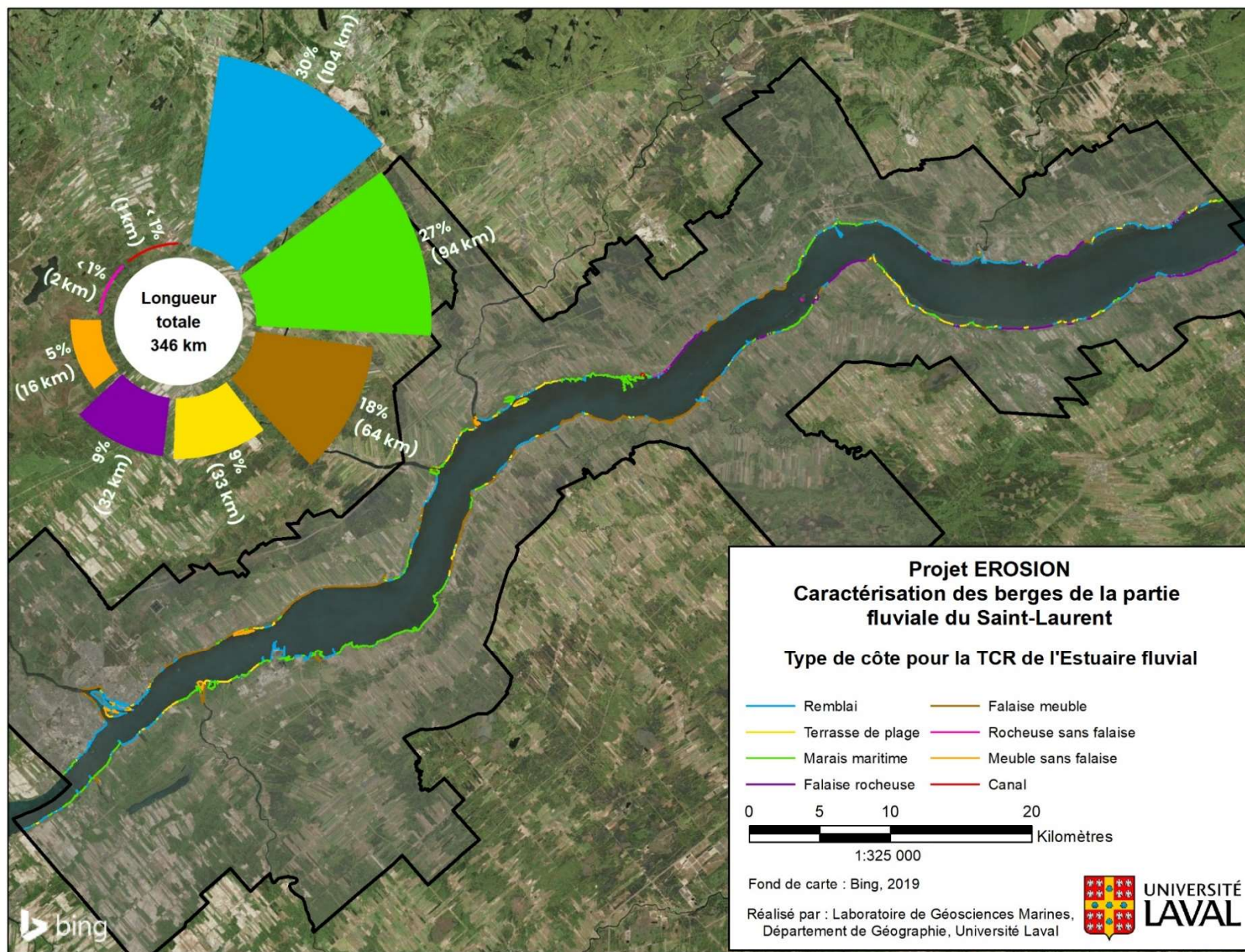


Figure 29. Carte et diagramme des types de côtes pour la TCR de l'Estuaire fluvial.

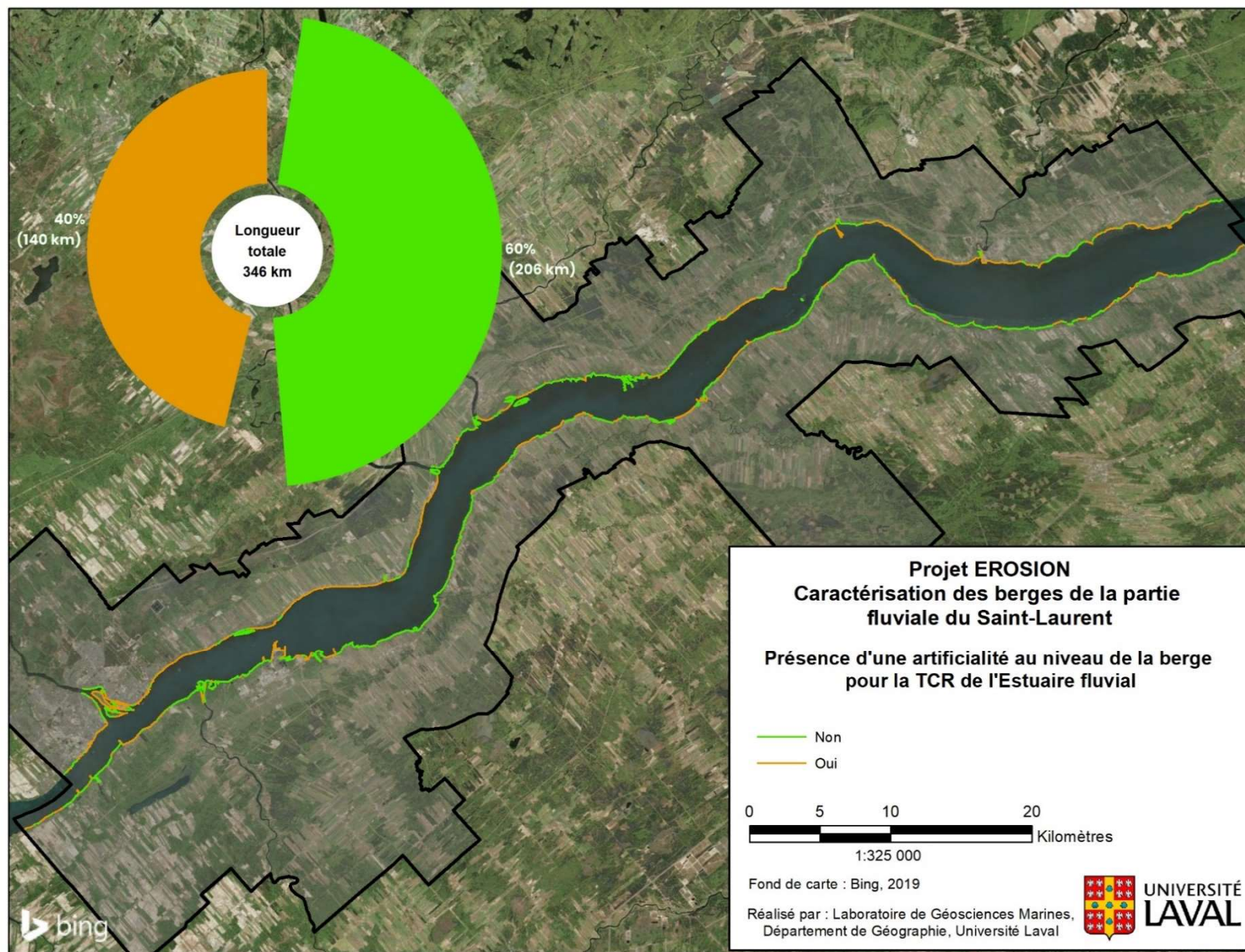


Figure 30. Carte et diagramme de la présence d'une artificialité au niveau de la côte pour la TCR de l'Estuaire fluvial.

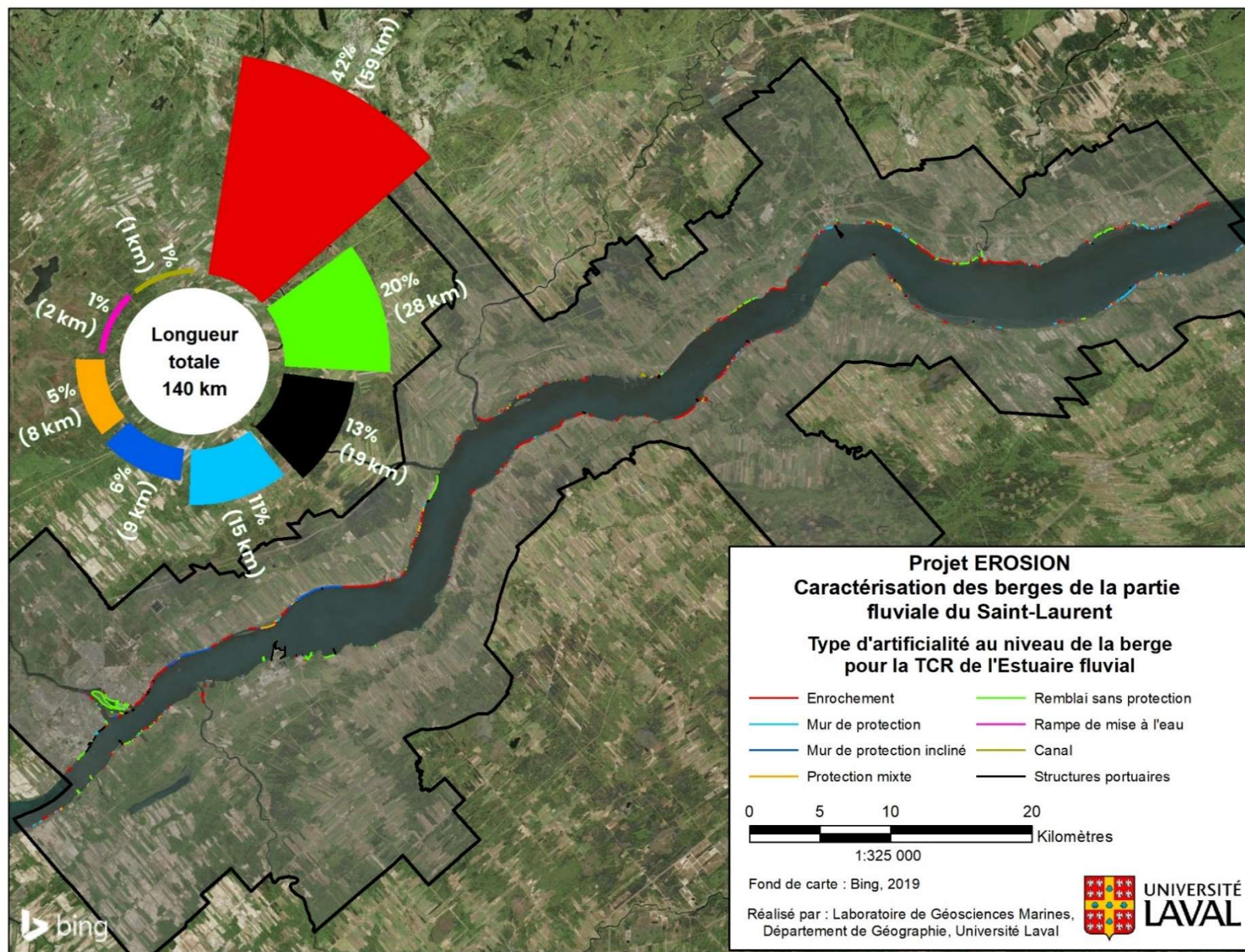


Figure 31. Carte et diagramme des types d'artificialité pour la TCR de l'Estuaire fluvial.

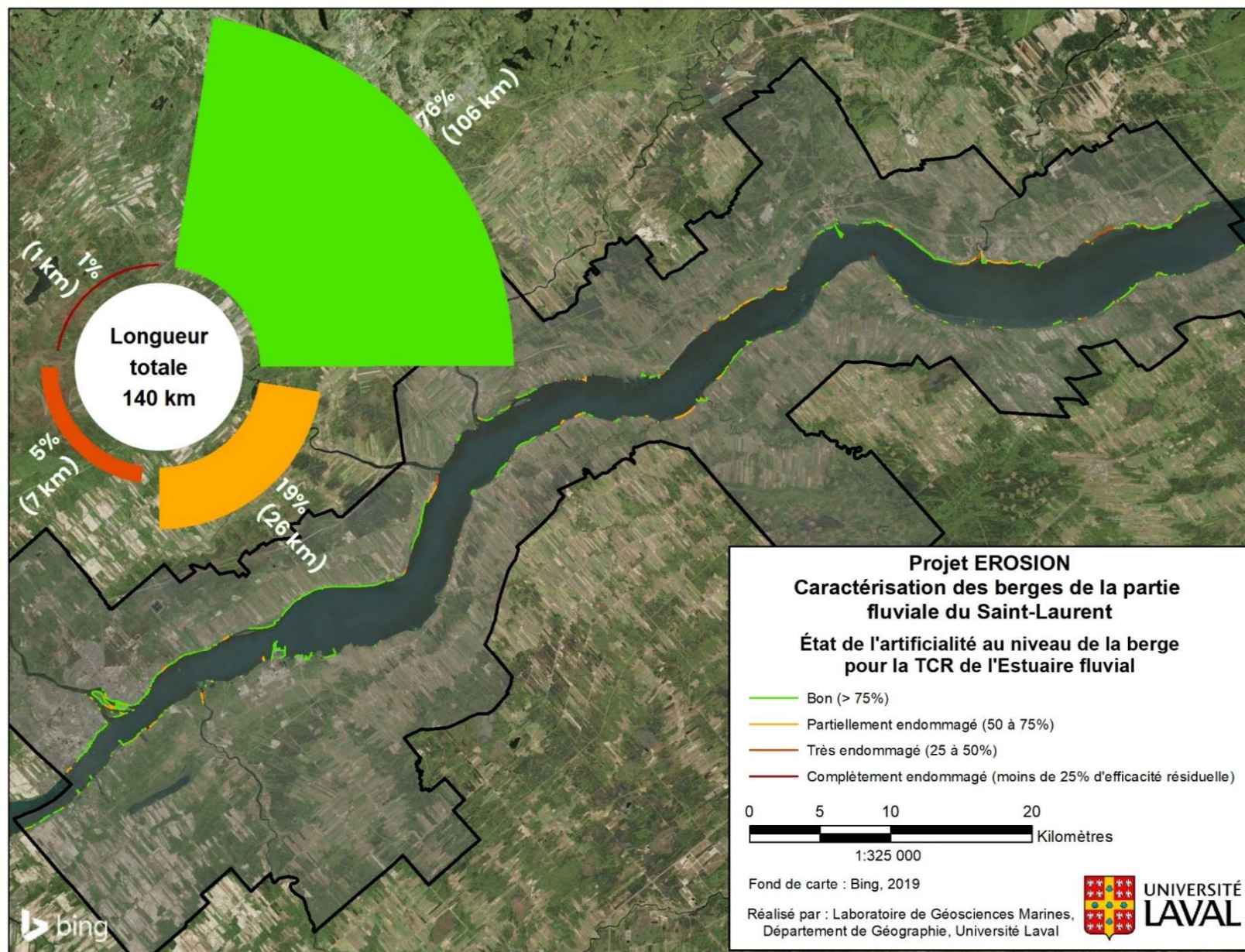


Figure 32. Carte et diagramme de l'état de l'artificialité au niveau de la côte pour la TCR de l'Estuaire fluvial.

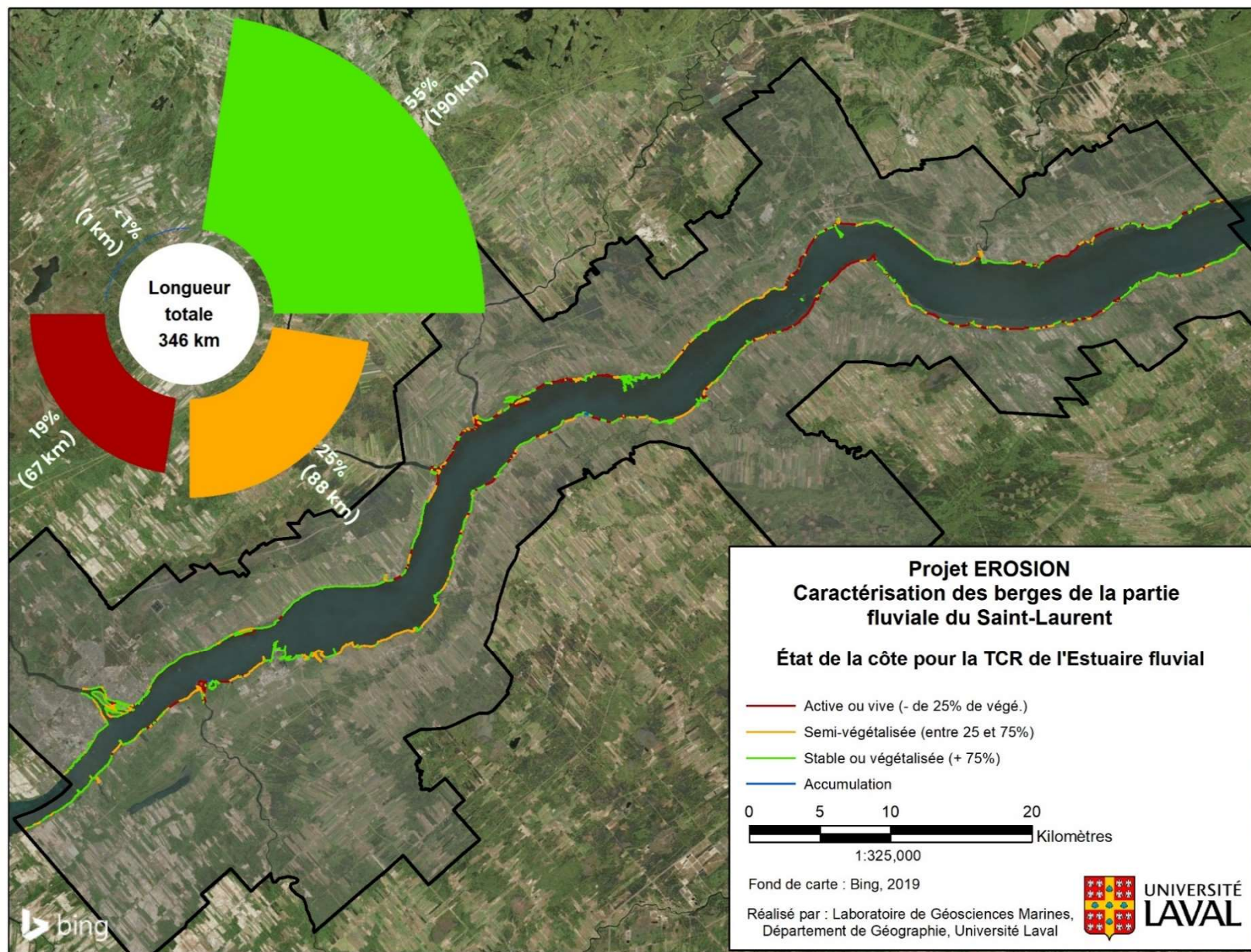


Figure 33. Carte et diagramme de l'état de la côte pour la TCR de l'Estuaire fluvial.

5.2.2 Inventaire des sites vulnérables à l'aléa de l'érosion des berges

Un total de 41 sites sensibles a été répertorié dans 82 fiches sur le territoire de la TCR de l'Estuaire fluvial (Figures 34 et 35 ; Annexe C). Afin de tenir compte de la diversité des environnements présents dans la TCR (Tableau I), 18 sites vulnérables ont été divisés en plusieurs fiches selon les trois classes de fiches mentionnées à la section 3.4. Les sites sensibles identifiés totalisent une distance linéaire de 135 km, soit 40% de la TCREF.

D'abord, la classe des autres berges naturelles est la plus nombreuse avec 40 fiches pour une proportion de 41% (56 km) des berges vulnérables. Ensuite, la classe de fiches des écosystèmes à haute valeur écologique totalise 23 fiches pour une proportion de 46% (62 km). Enfin, la classe des berges artificialisées est la moins nombreuse dans l'inventaire des fiches, avec seulement 19 fiches pour une proportion 13% (17 km). Cet inventaire est disponible dans l'Annexe C ; les renseignements spécifiques pour chacun des sites identifiés y sont fournis, en plus d'images ainsi que d'informations sur le type d'artificialité et les processus érosifs dominants.

Tableau I. Inventaire des fiches de la TCR de l'Estuaire fluviale.

Type de fiche	Nombre	Distance (km)	Proportion (%)
Toute autre berge naturelle	40	56	41%
Berge artificialisée	19	17	13%
Haute valeur écologique	23	62	46%
Total	82	135	100%

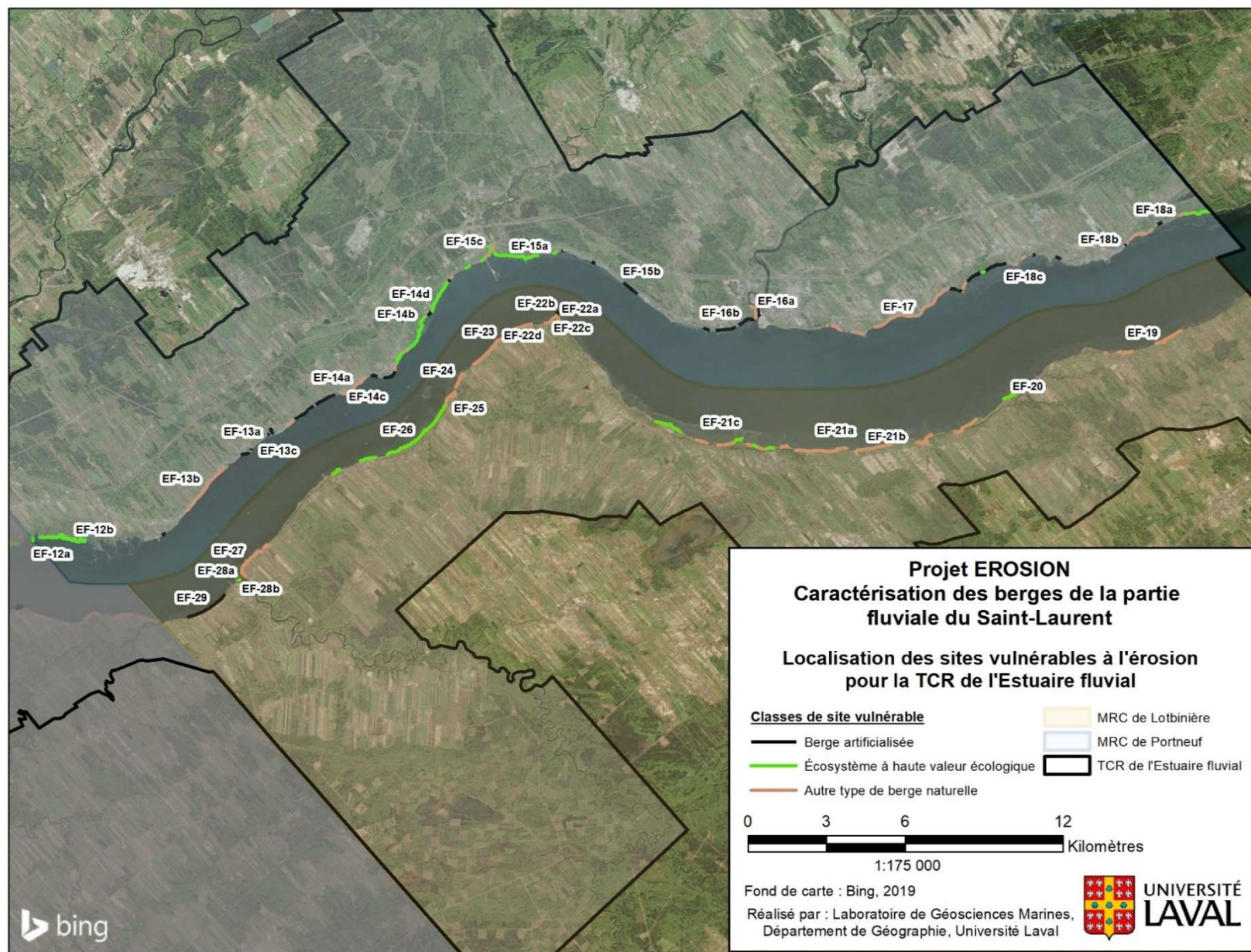


Figure 34. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR de l'Estuaire fluvial (secteur aval).

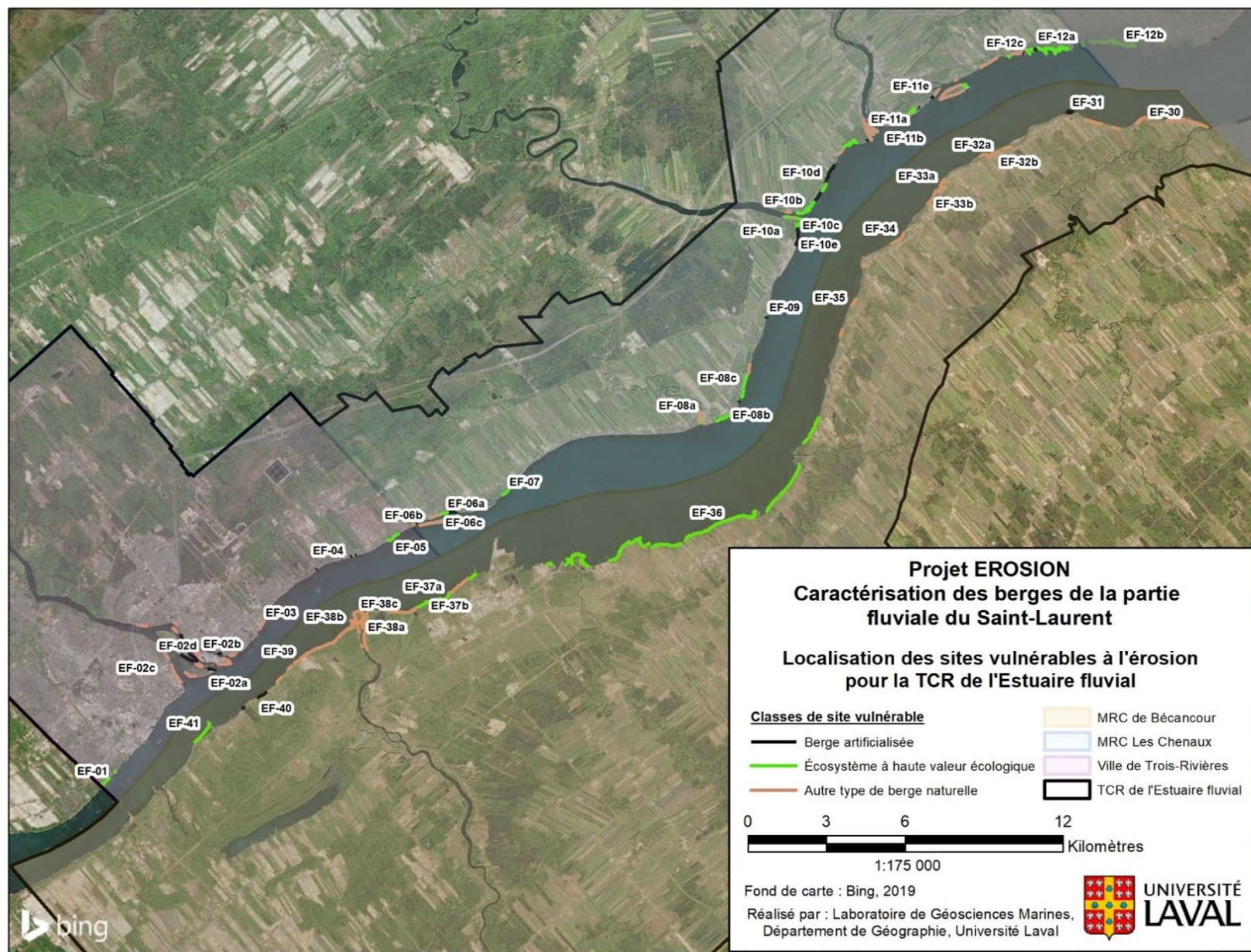


Figure 35. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR de l'Estuaire fluvial (secteur amont).

5.3 TCR DU LAC SAINT-PIERRE

5.3.1 Statistiques sur la caractérisation

La TCR du lac Saint-Pierre (TCRLSP) présente un total de 653 km de berges divisé en 1 434 segments. Ce territoire présente six types de berges (Figure 36). Après une révision des résultats de la caractérisation, il est apparu que la distinction faite au départ entre les types de berge meuble et meuble haute n'apportait pas d'information supplémentaire, car la proportion de cette dernière dans le secteur était négligeable. Ainsi, cinq types de berges sont considérés dans le territoire de la TCRLSP. Les milieux humides riverains prédominent dans ce secteur avec une proportion de 54% (351 km). Viennent ensuite les berges meubles, avec 28% (185 km) ; les remblais, avec 17% (109 km) ; les canaux et les berges rocheuses sans escarpement, avec 1% (8 km) et < 1% (< 1 km).

La détermination de la présence ou non d'artificialité sur les berges de la TCRLSP montre que la majorité (81%, soit 526 km) des berges sont naturelles et que seulement 19% (127 km) sont artificialisées (Figure 37). Par ailleurs, un total de 123 km de berges réparti sur toute la TCR est représenté par huit types d'artificialités (Figure 38). Ce sont les remblais sans protection et les enrochements qui sont les plus représentés, avec une proportion de 34% (42 km) et 32% (40 km) ; suivis par les murs de protection, avec 9% (11 km), les canaux, avec 6% (8 km), et les protections mixtes, avec 4% (5 km). Les rampes de mise à l'eau et des murs de protection inclinés atteignent ensemble une proportion de 1% (1 km). Une proportion de 76% (106 km) de ces artificialités apparaît comme étant en bon état (Figure 39). L'état des autres artificialités varie entre partiellement endommagé, avec 19% (26 km), très endommagé, avec 5% (7 km) et complètement endommagé, avec 1% (1 km).

Enfin, l'état des berges de la TCRLSP apparaît comme stable pour 68% du trait de berge (441 km) (Figure 40). Les berges semi-végétalisées présentant les premiers signes de vulnérabilité à l'érosion atteignent une proportion de 19% (122 km), alors que les berges actives n'atteignent que 11% (73 km). Deux secteurs au nord-est du lac Saint-Pierre sont caractérisés par une accumulation de sédiments, pour une proportion de 3% du trait de berge total de la TCRLSP (17 km).

Le croisement des données sur le type et l'état des berges montre que 20% (24 km) des berges meubles sont actives (Tableau J) et que les milieux humides riverains, qui sont les types de berges les plus représentés au sein de cette TCR, sont affectés par l'érosion dans une proportion de 10% (47 km). Sur l'ensemble de la TCR, seulement 11% (73 km) des berges sont actives.

Tableau J. Proportion relative d'érosion par types de berge.

Type de berge	Distance totale (km)	Active (km)	Proportion relative (%)
CAN	8	0	0
M	117	24	20
MHR	419	47	11
REM	109	2	2
RSE	0	0	0
Total	653	73	11

En ce qui concerne les types d'artificialité dans la TCRLSP, les remblais sans protection apparaissent comme étant vulnérables aux processus d'érosion (Tableau K). Bien que la proportion relative ne soit que de 26%, c'est l'artificialité qui possède la plus grande distance endommagée (11 km) comparativement aux structures portuaires et aux protections mixtes, avec 28% (4 km) et 44% (2 km). En somme, 21% des artificialités tous types confondus présentent des signes de dégradation.

Tableau K. Proportion relative d'érosion par types d'artificialité.

Type d'artificialité	Distance totale (km)	Portion endommagée (km)	Proportion relative (%)
SP	15	4	28
CAN	7	0	0
ENR	40	6	15
MP	11	2	17
MPI	1	0	11
PROM	5	2	44
REMSP	42	11	26
RME	1	0	0
Total	123	26	21

Enfin, l'étude des types de dépôt (Tableau L) révèle que les segments de berges les plus impactés par l'érosion sont les dépôts de sables limoneux/limons sableux avec 19% (68 km). Pour les autres types de dépôts, seule une faible proportion est impactée par l'érosion, soit 6% (3 km) pour les dépôts sableux et 2 % (2 km) pour les dépôts de type remblai.

Tableau L. Proportion relative d'érosion par types de dépôt.

Type de dépôt	Distance totale (km)	Active (km)	Proportion relative (%)
CM	2	0	0
MO	131	0	0
REM	110	2	2
S	50	3	6
SM	360	68	19
Total	653	73	11

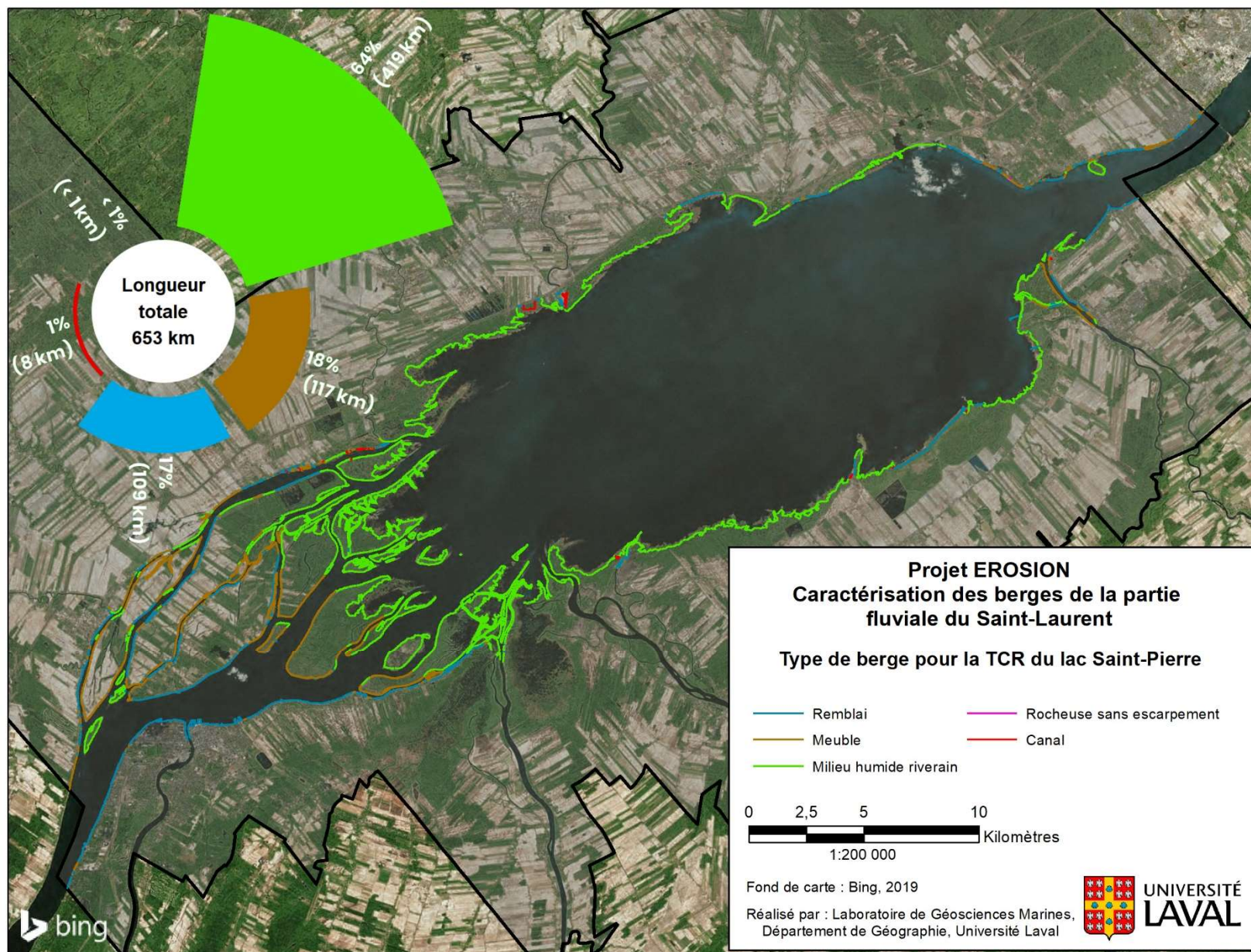


Figure 36. Carte et diagramme du type de berge pour la TCR du lac Saint-Pierre.

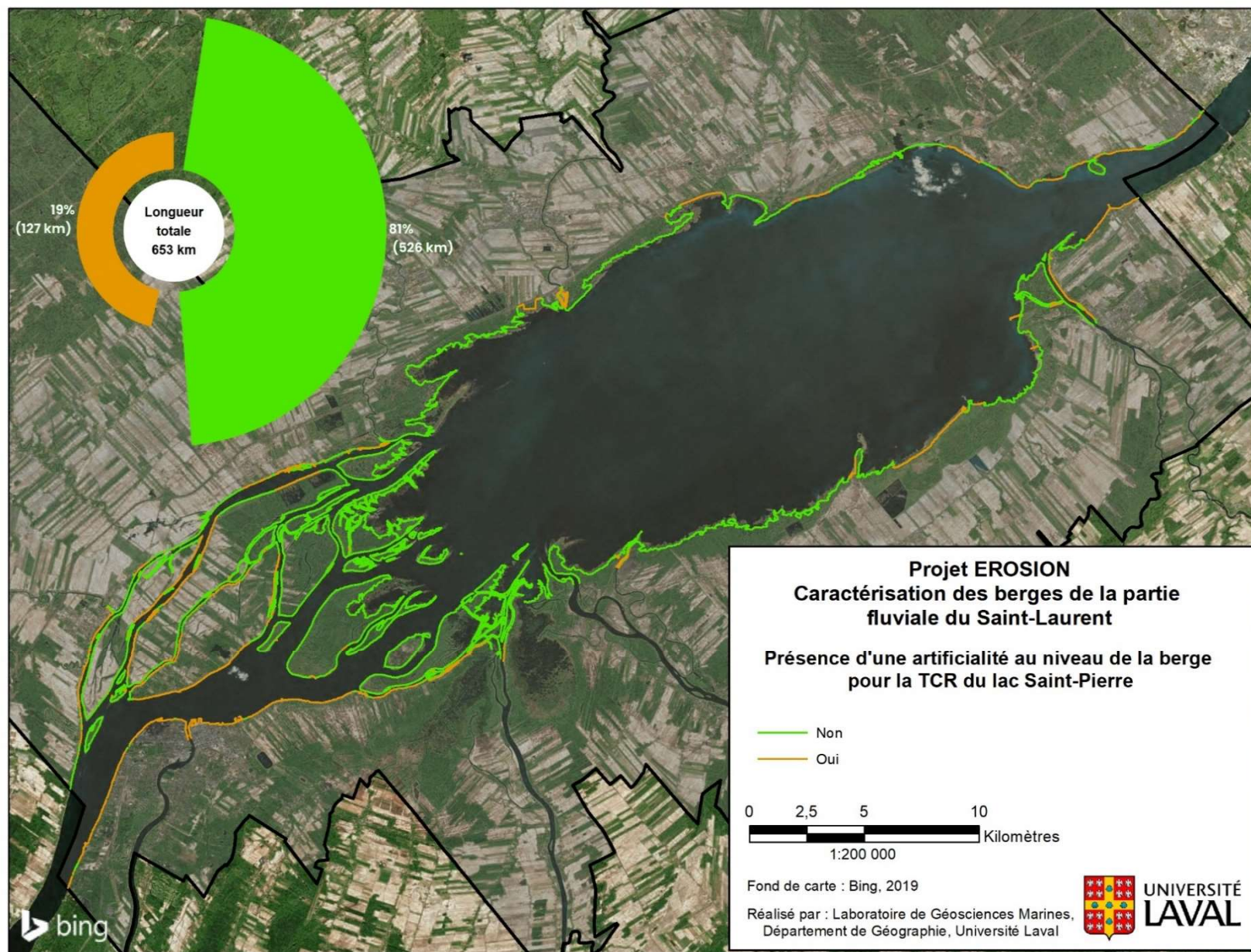


Figure 37. Carte et diagramme de la présence d'une artificialité au niveau de la berge pour la TCR du lac Saint-Pierre.

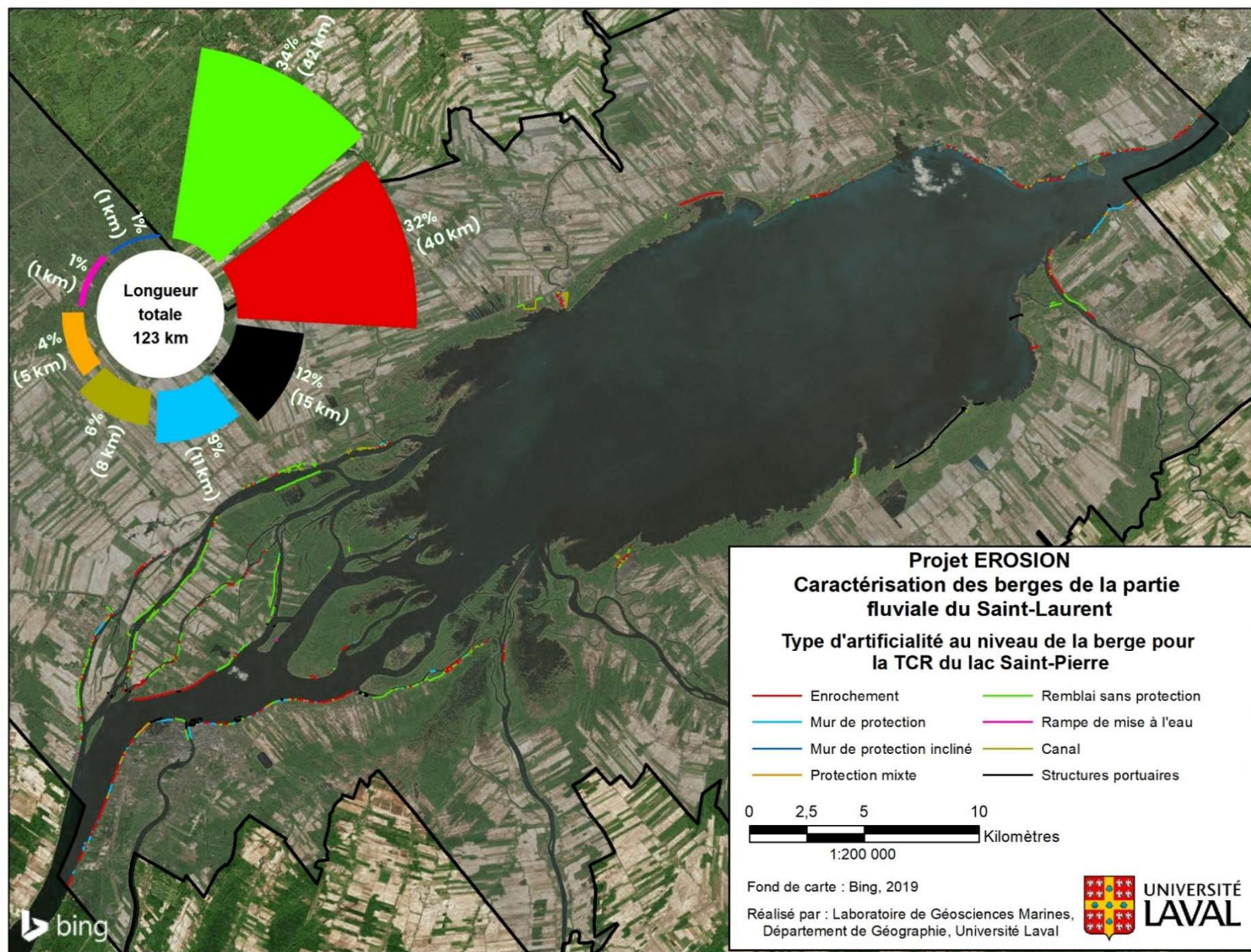


Figure 38. Carte et diagramme du type d'artificialité au niveau de la berge pour la TCR du lac Saint-Pierre.

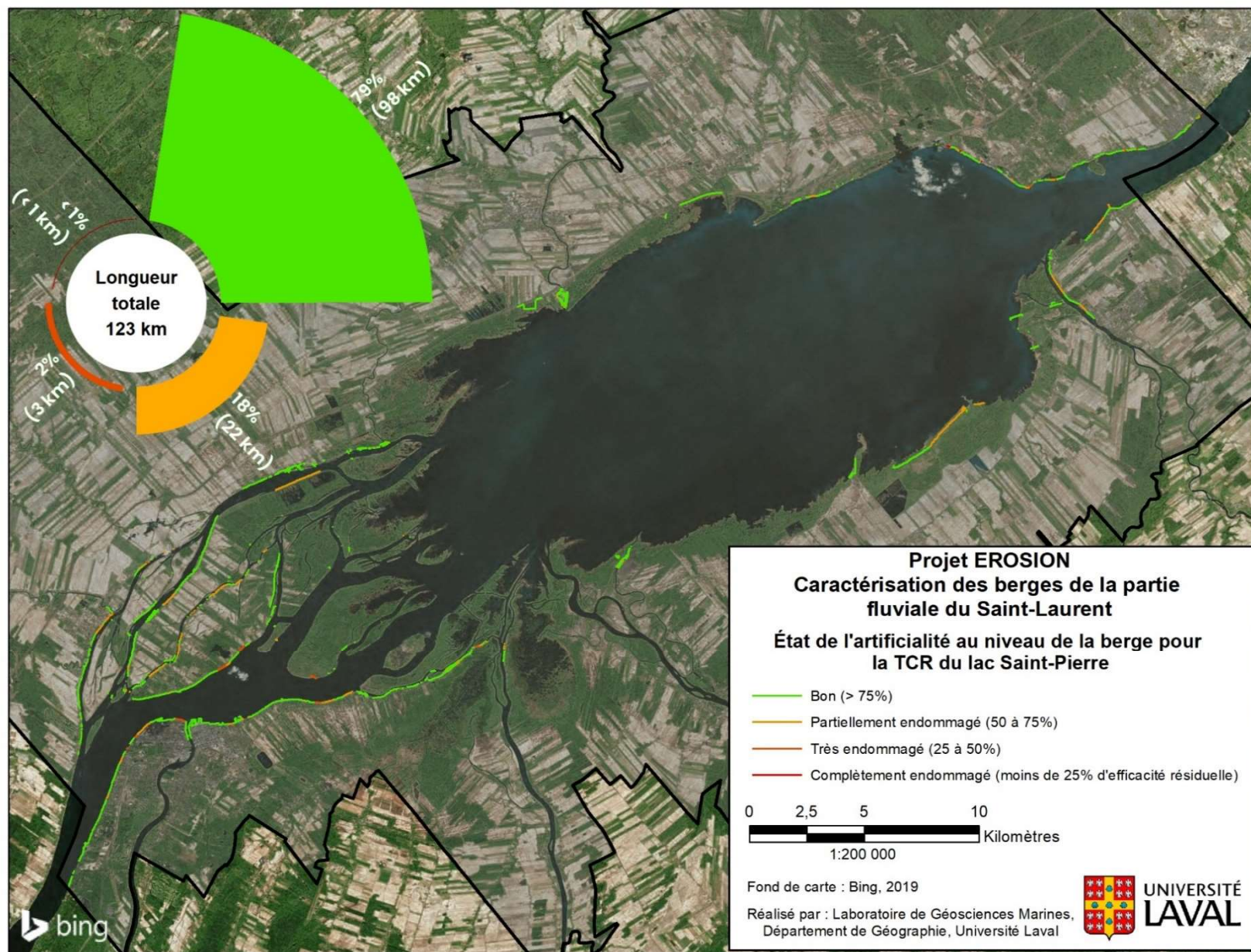


Figure 39. Carte et diagramme de l'état de l'artificialité au niveau de la berge pour la TCR du lac Saint-Pierre.

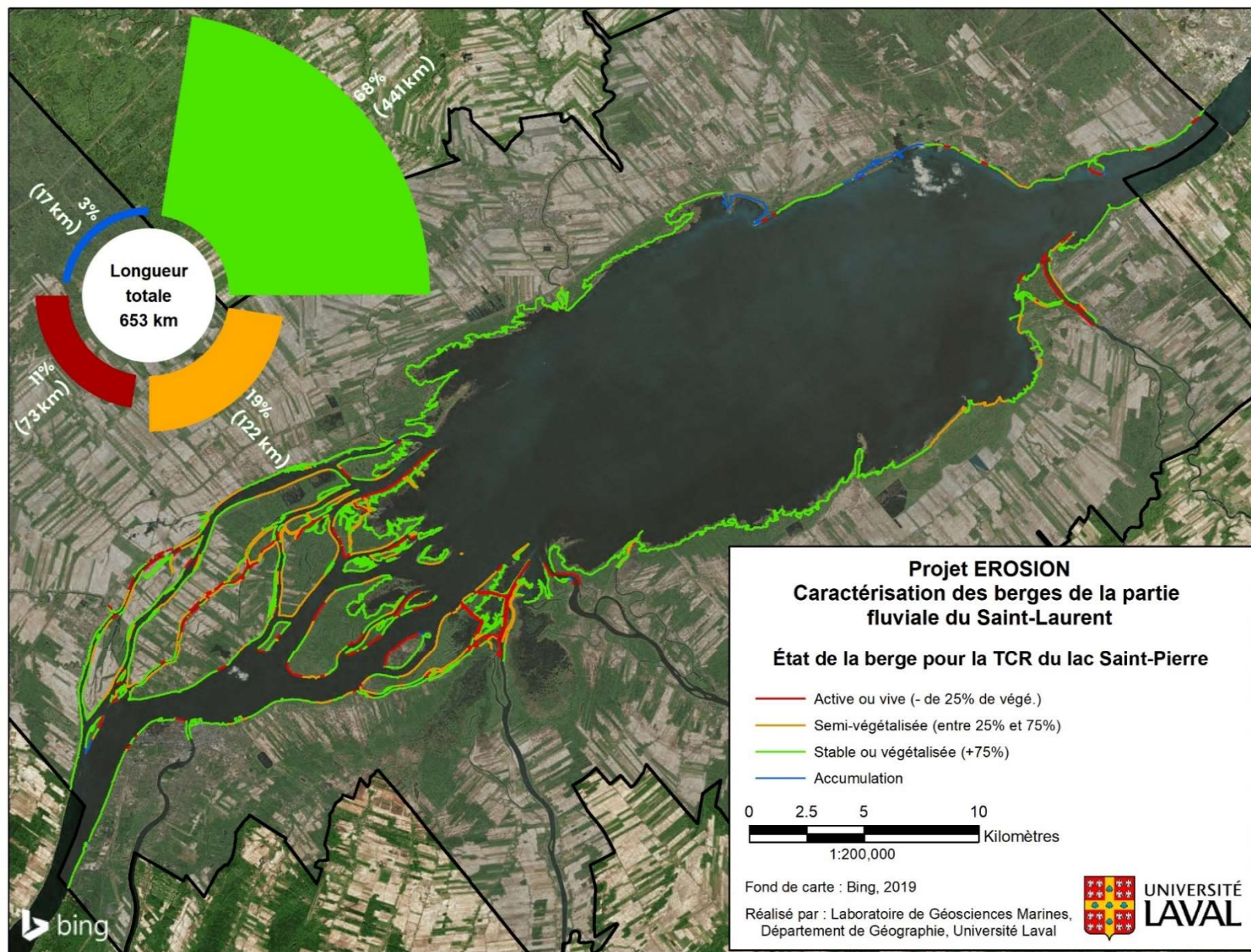


Figure 40. Carte et diagramme de l'état de la berge pour la TCR du lac Saint-Pierre.

5.3.2 Inventaire des sites vulnérables à l'aléa de l'érosion des berges

À la suite de l'identification des sites vulnérables de la TCRLSP, un total de 44 sites a été recensé, couvrant une distance linéaire totale de 188 km ; ces sites sont présentés sous la forme de 73 fiches à l'Annexe C (Tableau M ; Figures 41 et 42). Parmi ces fiches, 26 appartiennent à la catégorie des autres berges naturelles et couvrent 32% (60 km) des berges sensibles à l'érosion. Pour la catégorie des berges artificialisées, il s'agit plutôt de 17 fiches pour 10% (18 km) des sites vulnérables de la TCRLSP. En dernier lieu, les fiches de la catégorie des écosystèmes à haute valeur écologique se retrouvent au nombre de 30 et représentent 58% (110 km) de la distance identifiée comme sensible.

Tableau M. Inventaire des fiches de la TCR du lac Saint-Pierre.

Type de fiche	Nombre	Distance (km)	Proportion (%)
Toute autre berge naturelle	26	60	32
Berge artificialisée	17	18	10
Haute valeur écologique	30	110	58
Total	73	188	100

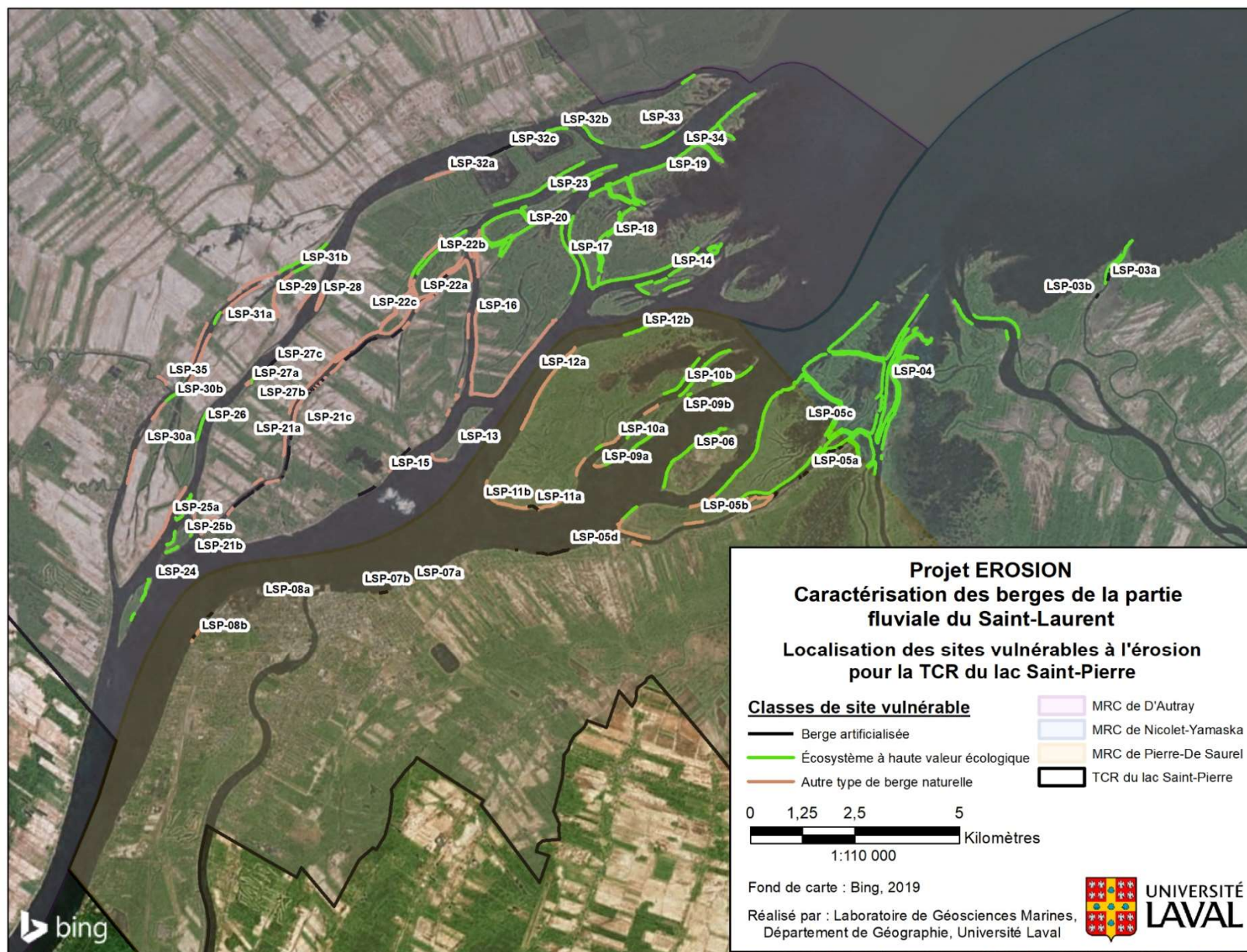


Figure 41. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR du lac Saint-Pierre (secteur aval).

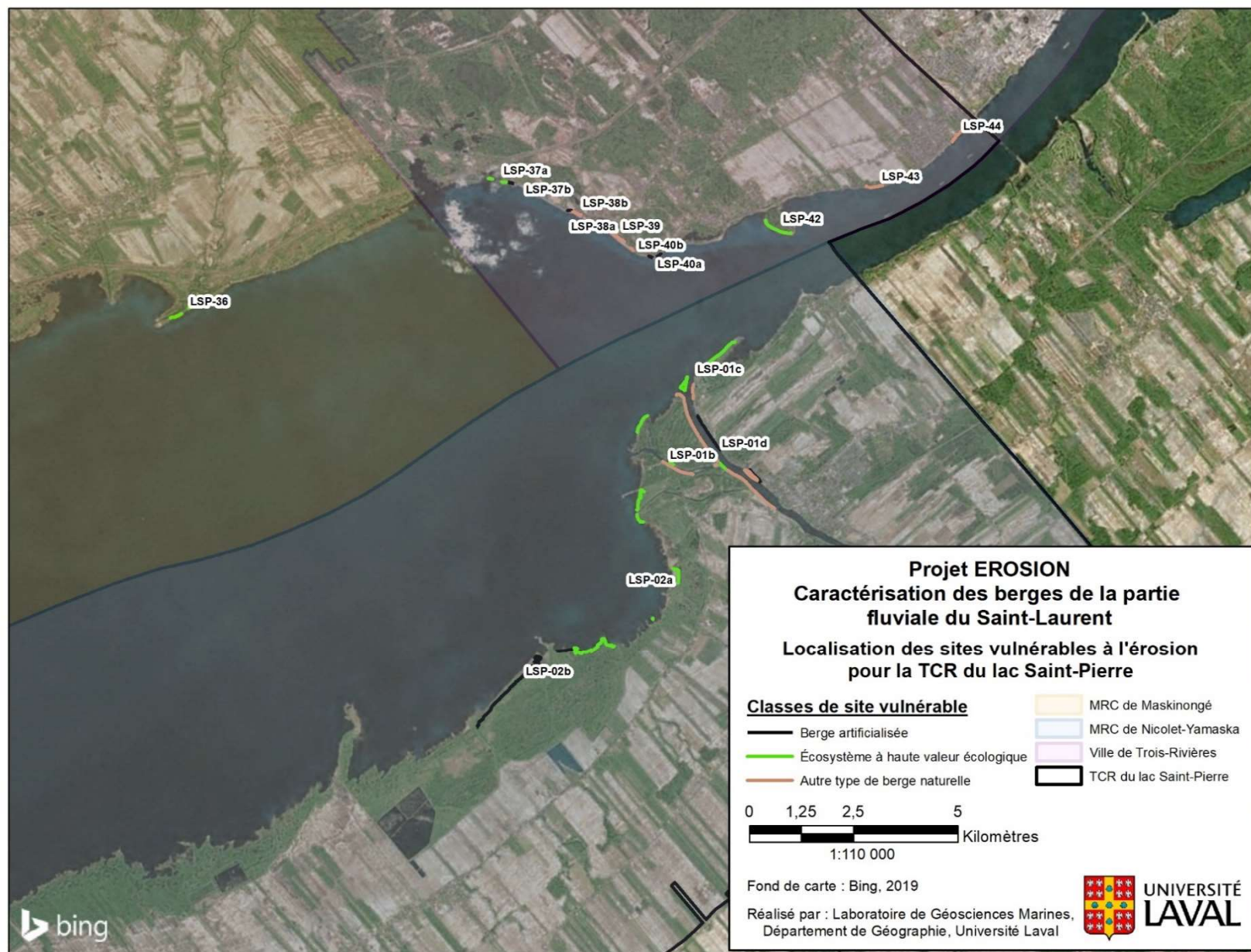


Figure 42. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR du lac Saint-Pierre (secteur amont).

5.4 TCR DU HAUT-SAINT-LAURENT ET GRAND-MONTRÉAL

5.4.1 Statistiques sur la caractérisation

La TCR du Haut-Saint-Laurent et Grand-Montréal (TCRHSLGM) constitue le territoire ayant le trait de la berge le plus long, avec une distance linéaire de 1 879 km divisée en 13 098 segments de berge. Afin que la cartographie soit optimale, la TCRHSLGM a été divisée en deux, avec d'une part le secteur amont (ouest) et d'autre part le secteur aval (est).

De la même manière que pour la TCRLSP et la TCREF, deux types de berges ont été combinées sous le même code de couleur sur la carte (Figures 43 et 44), soit les berges meubles et meubles hautes. Plus de la moitié de la segmentation de la TCRHSLGM concerne des berges de type remblai, soit 53% (998 km). Les berges meubles et les milieux humides riverains suivent avec 22% (411 km) et 17% (325 km). Les escarpements rocheux atteignent 7% (135 km). Les deux derniers types de berges, soit les rocheuses sans escarpement et les canaux, atteignent 1% (10 km) et < 1% (1 km), respectivement.

Par ailleurs, 61% (1 146 km) des berges sont artificialisées et 39% (732 km) sont naturelles (Figures 45 et 46). Les différentes artificialités ont été catégorisées en 13 types (Figures 47 et 48). Certains types d'artificialités ont été regroupées sous le même code de couleur, afin de simplifier la lecture et l'analyse des cartes. Les remblais sans protection et les enrochements sont prédominants, avec 31% (349 km) et 28% (323 km). Quant aux autres types, les murs de protection représentent 17% (200 km), les canaux, 11% (128 km) et les structures portuaires, 8% (95 km). Les protections mixtes, les rampes de mise à l'eau et les murs de protection inclinés sont peu présents, avec 2% (26 km), 2% (19 km) et 1% (6 km). Une proportion de 74% (849 km) des artificialités est en bon état ; de 21% (242 km) présente une dégradation partielle et de moins de 5% (51 km) est très ou complètement endommagée (Figures 49 et 50).

La caractérisation a permis d'observer qu'une proportion de 7% (126 km) des berges est active. Une proportion de 19% (358 km) est semi-végétalisée, alors que 74% (1 387 km) est stable (Figures 51 et 52). Un groupe de segment totalisant < de 1% (4 km) montre des signes d'accumulation de sédiments. Du point de vue de l'aléa de l'érosion, les berges meubles et rocheuses sans escarpement apparaissent plus vulnérables avec 14% (59 km) et 11% (1 km) (Tableau N), respectivement.

Tableau N. Proportion relative d'érosion par types de berge.

Type de berge	Distance totale (km)	Active (km)	Proportion relative (%)
CAN	135	1	1
M	411	59	14
MHR	325	24	7
REM	998	40	4
RSE	10	1	11
Total	1879	126	7

L'impact des processus d'érosion sur les types d'artificialité est présenté dans le Tableau O. Ce tableau montre que les enrochements et les remblais sans protection sont endommagés dans des proportions de 41% (131 km) et 32% (113 km). Quant aux autres types d'artificialité, la somme de leurs segments dégradés ne dépasse pas les 20%. Sur l'ensemble de la TCR, 26% des artificialités apparaissent donc comme endommagées.

Tableau O. Proportion relative d'érosion par types d'artificialité.

Type d'artificialité	Distance totale (km)	Portion endommagée (km)	Proportion relative (%)
SP	95	6	7
CAN	129	23	18
ENR	323	131	41
MP	200	12	6
MPI	6	1	14
PROM	26	4	15
REMSP	349	113	32
RME	19	3	15
Total	1145	293	26

Les types de dépôts présentant une vulnérabilité à l'érosion sont les limons argileux/argiles limoneuses dans une proportion de 24% (5 km), suivis des dépôts de sables dans une proportion de 20% (8 km) (Tableau P). Les dépôts de sables limoneux/limons sableux et les tills sont impactés par l'érosion dans une proportion de 12% (43 km) et 15% (25 km), respectivement.

Tableau P. Proportion relative d'érosion par types de dépôt.

Type de dépôt	Distance totale (km)	Active (km)	Proportion relative (%)
CM	22	5	24
MO	124	1	1
R	18	2	9
REM	1128	41	4
S	42	8	20
SG	2	0	0
SM	366	43	12
T	170	25	15
Total	1879	126	100

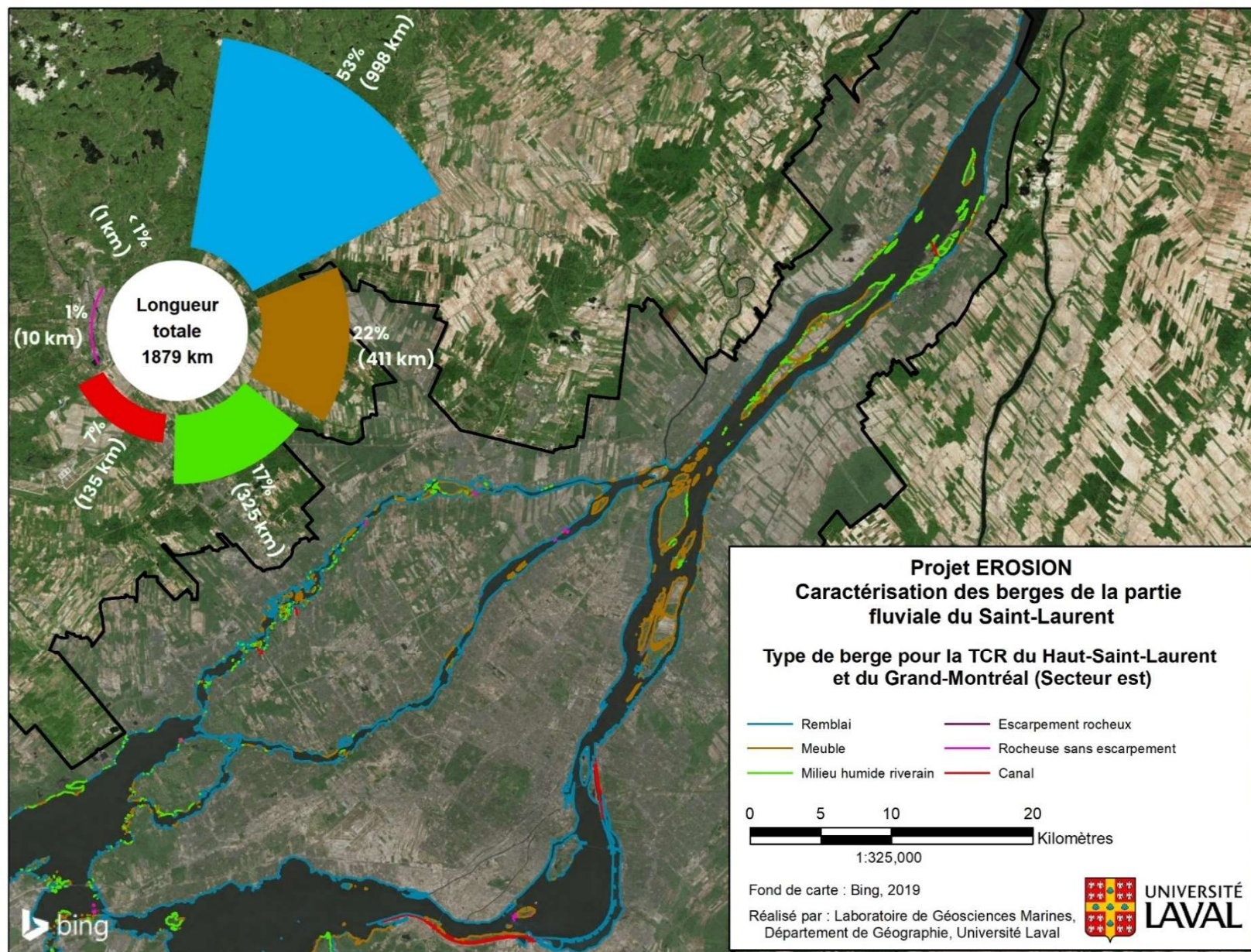


Figure 43. Carte et diagramme des types de berges pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval).

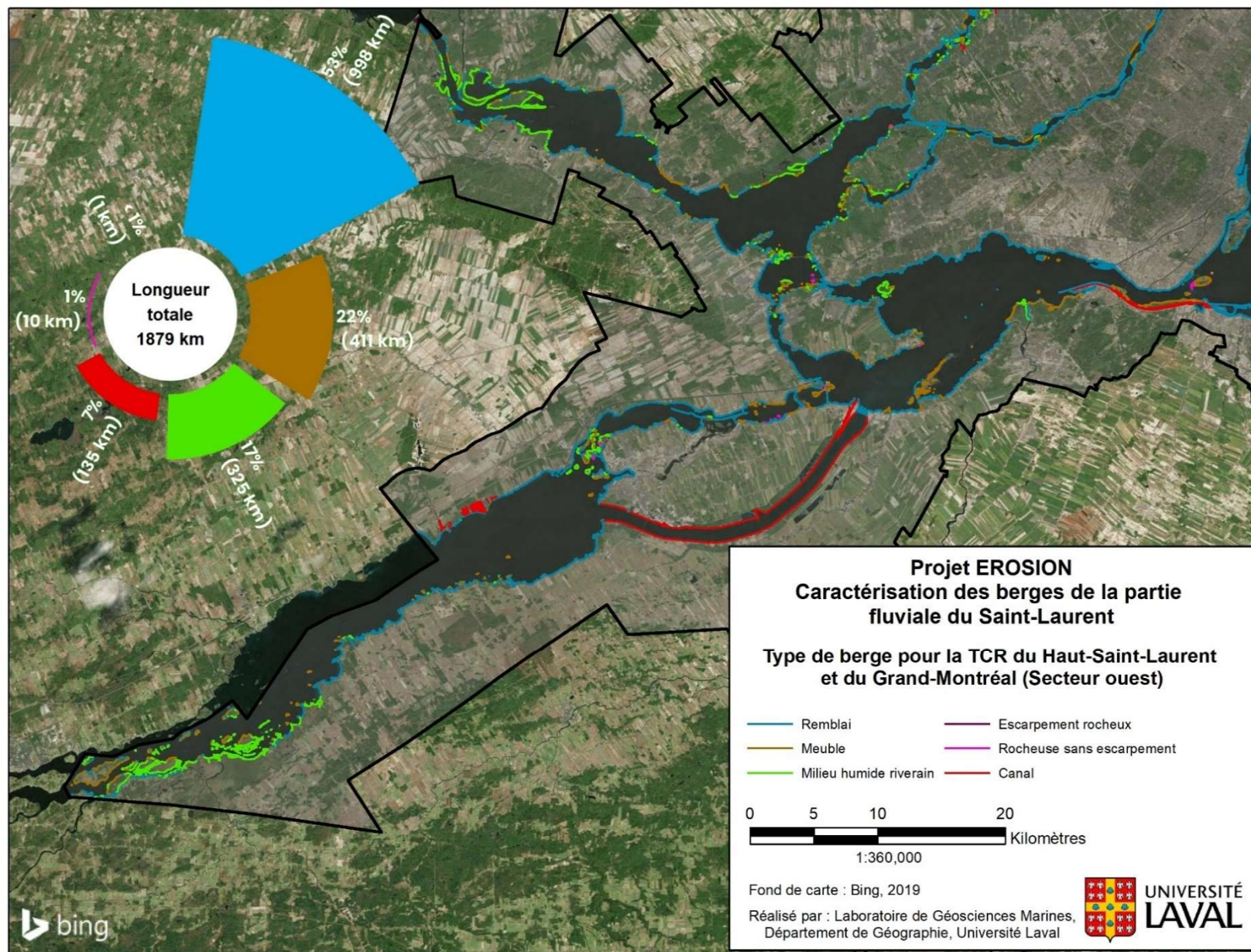


Figure 44. Carte et diagramme des types de berges pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur amont).

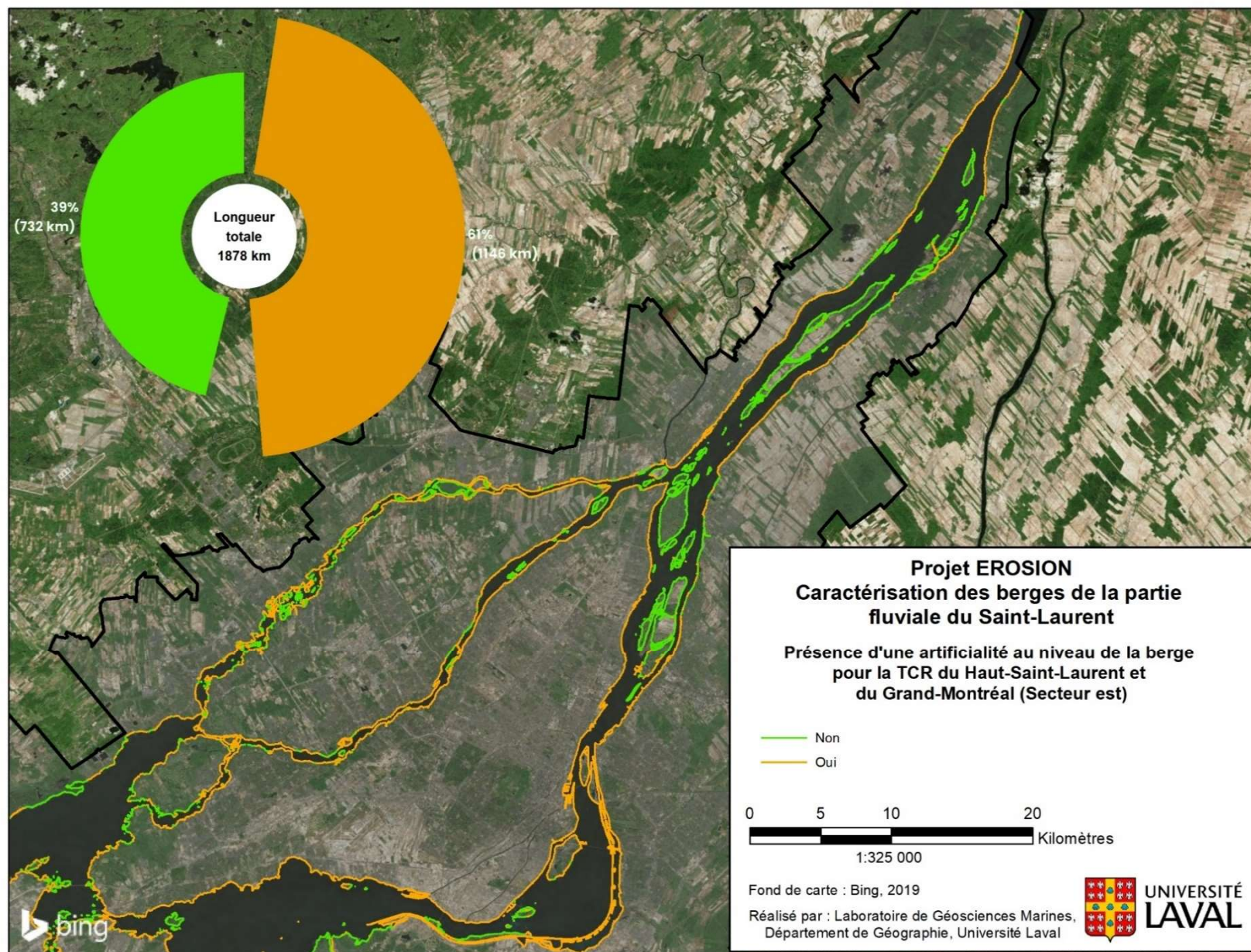


Figure 45. Carte et diagramme de la présence d'une artificialité au niveau de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval).

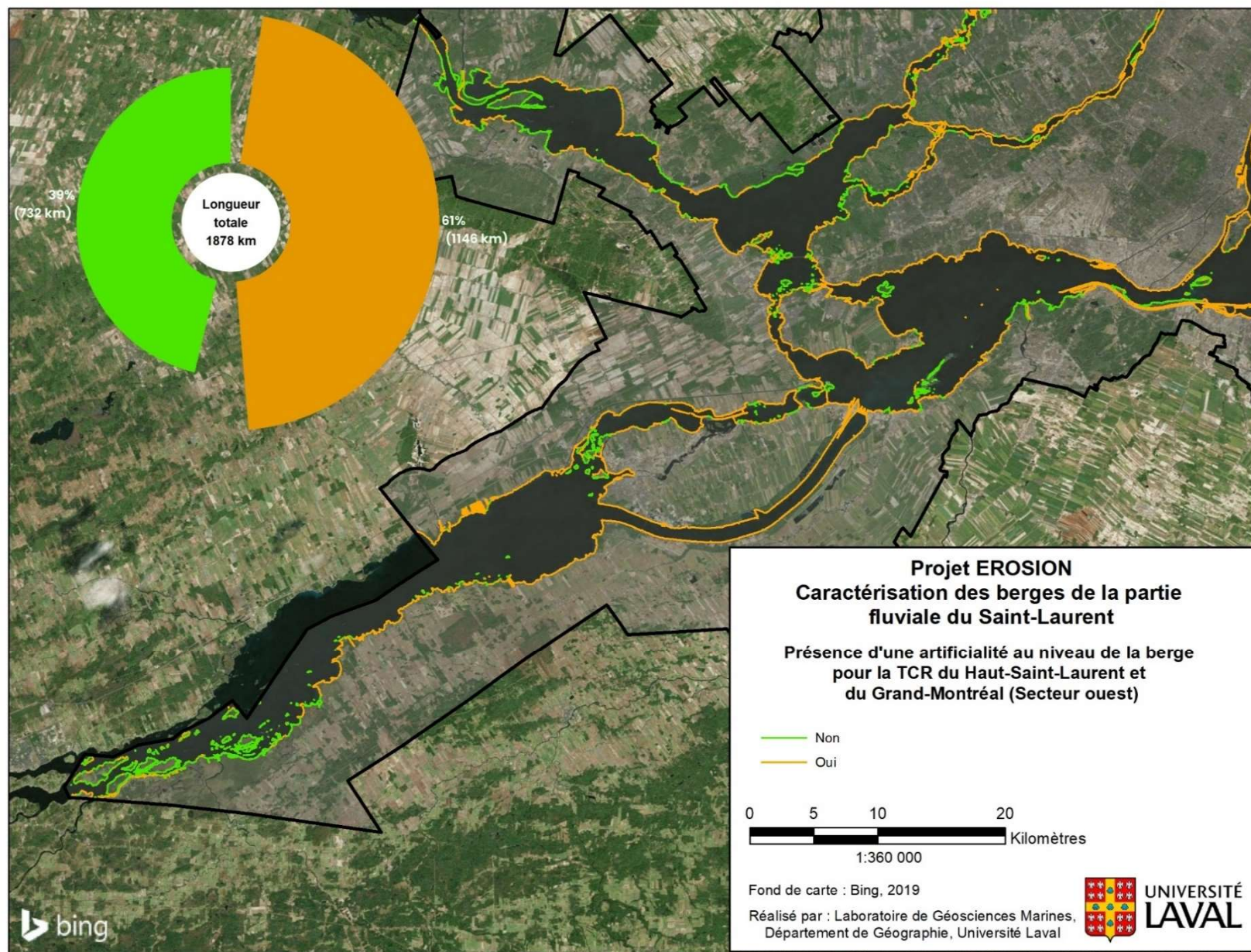


Figure 46. Carte et diagramme de la présence d'une artificialité au niveau de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur amont).

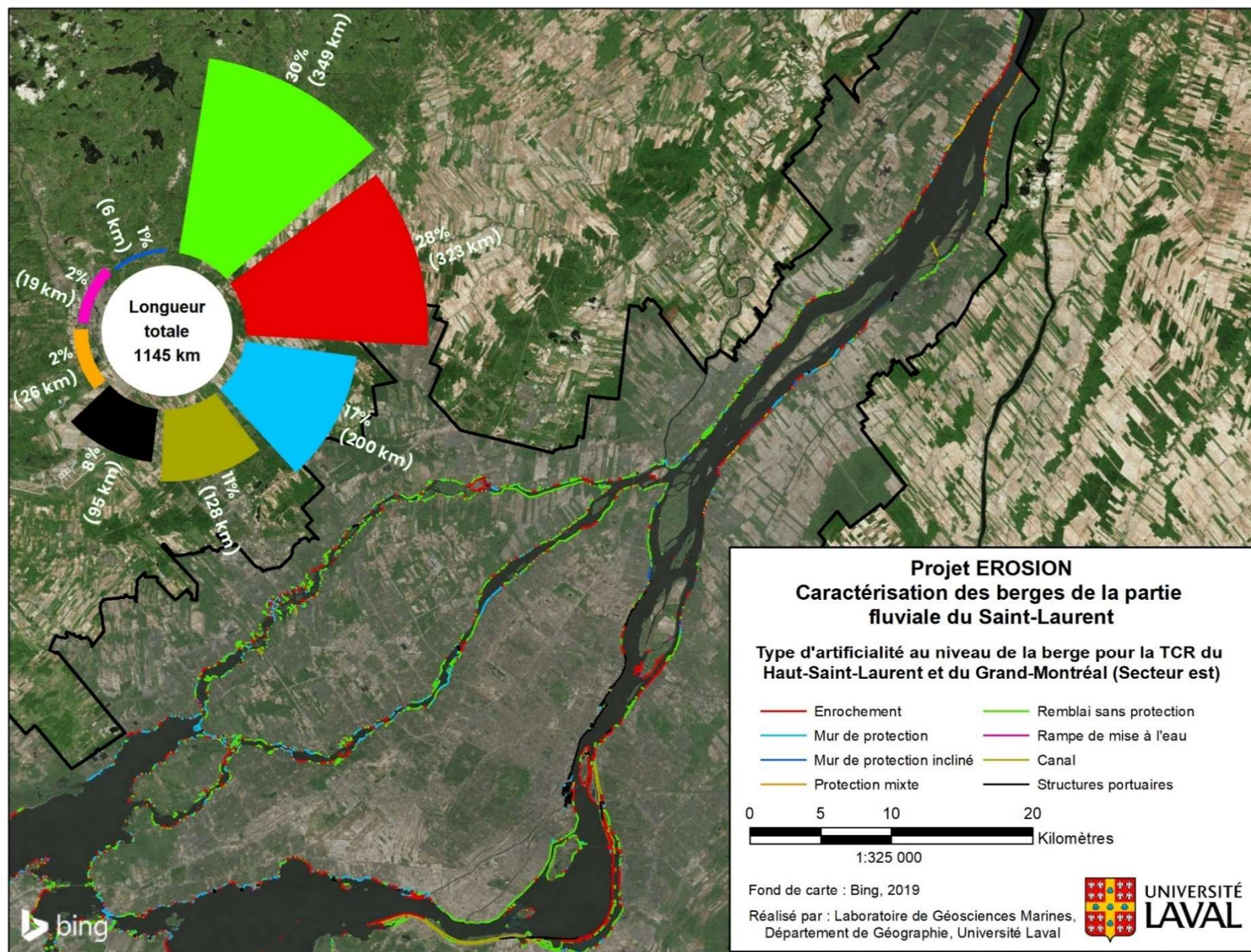


Figure 47. Carte et diagramme du type d'artificialité au niveau de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval).

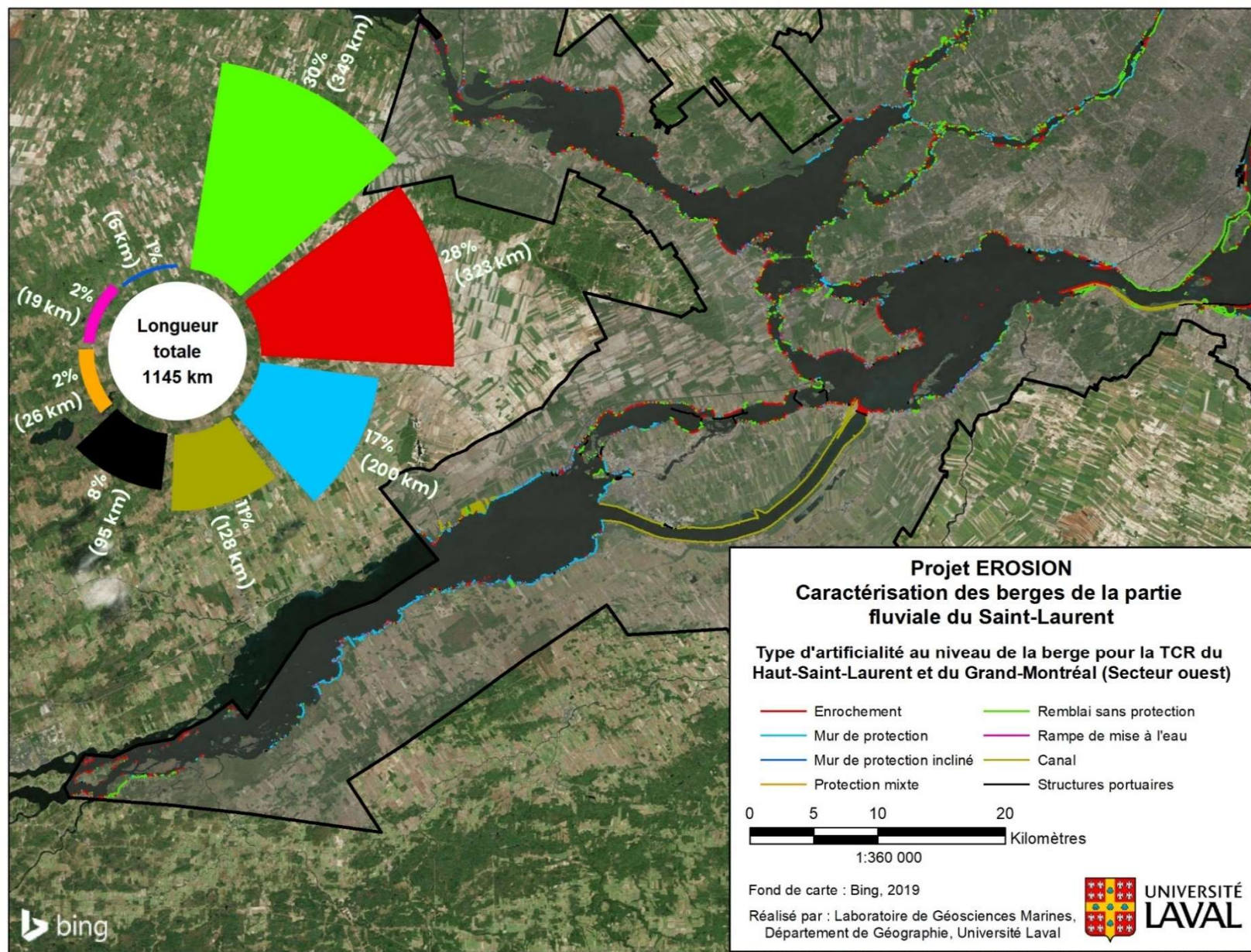


Figure 48. Carte et diagramme du type d'artificialité au niveau de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur amont).

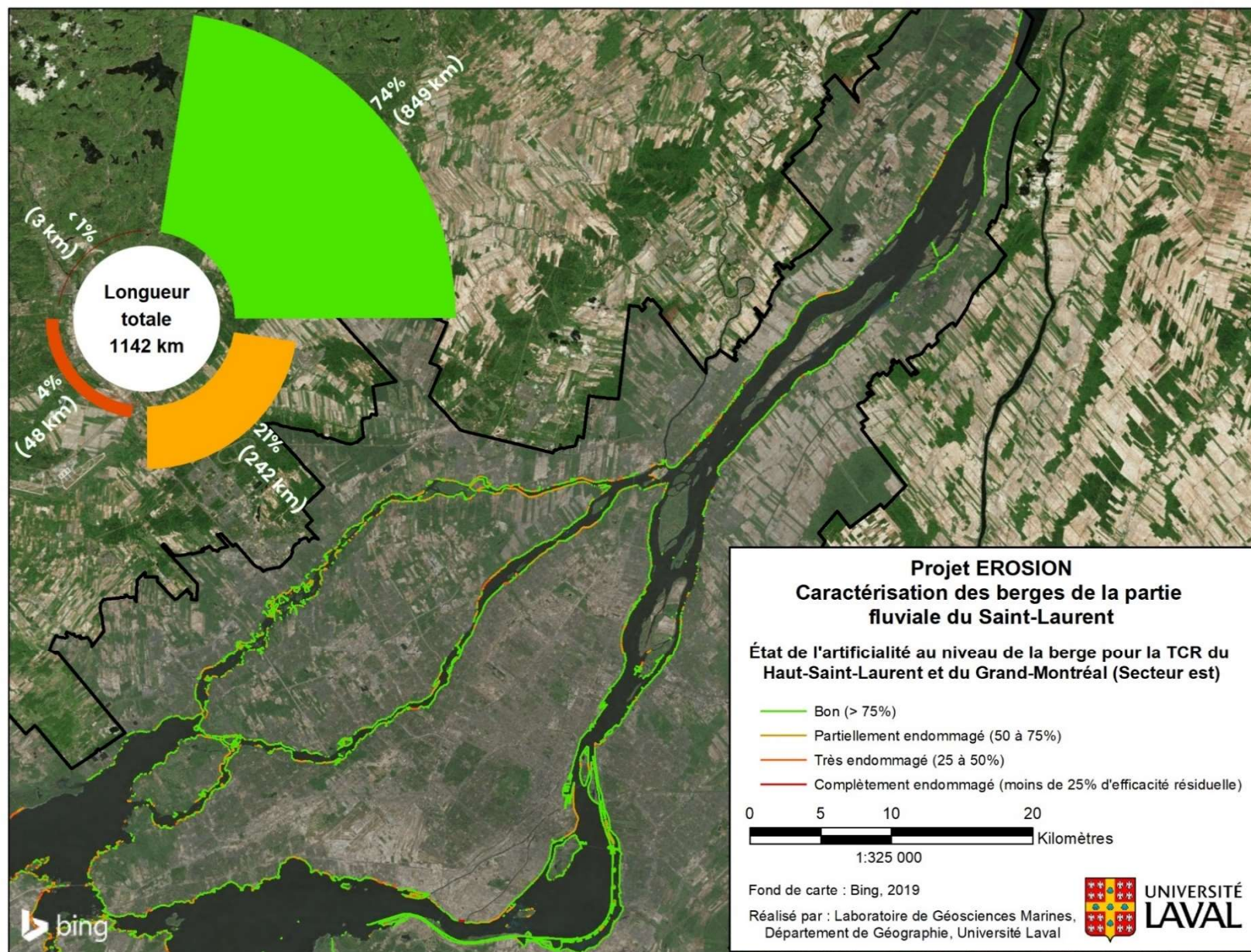


Figure 49. Carte et diagramme de l'état de l'artificialité au niveau de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval).

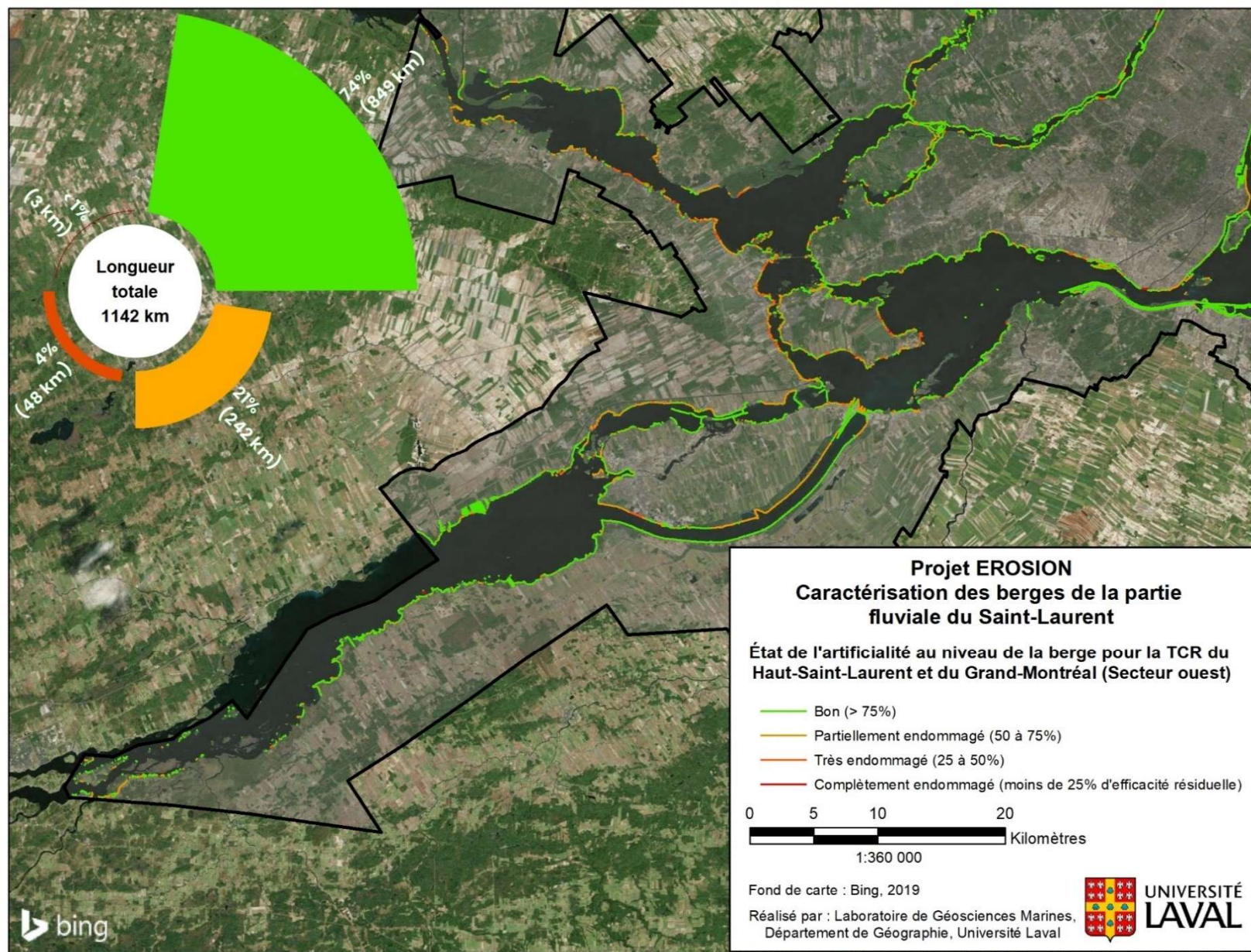


Figure 50. Carte et diagramme de l'état de l'artificialité au niveau de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur amont).

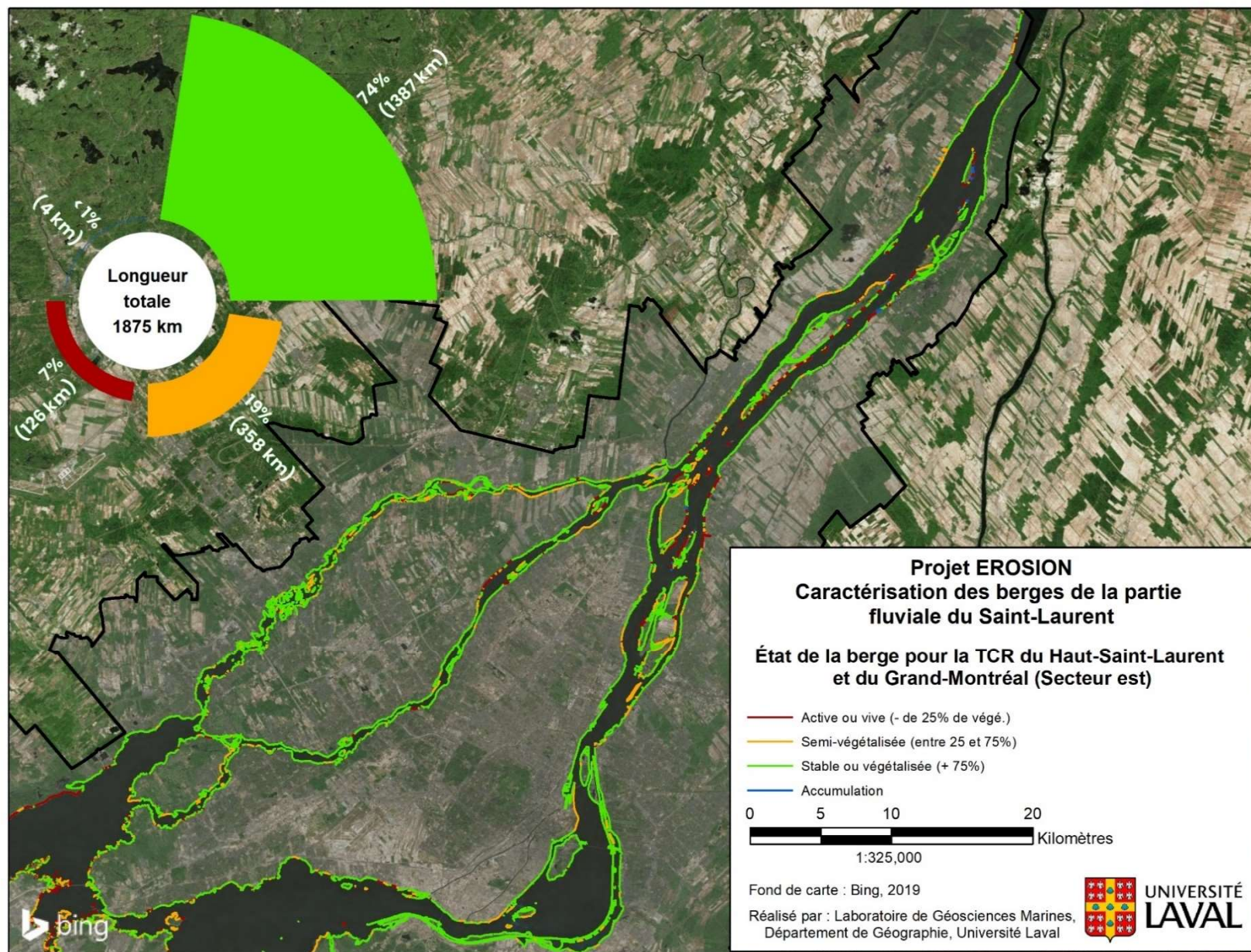


Figure 51. Carte et diagramme de l'état de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval).

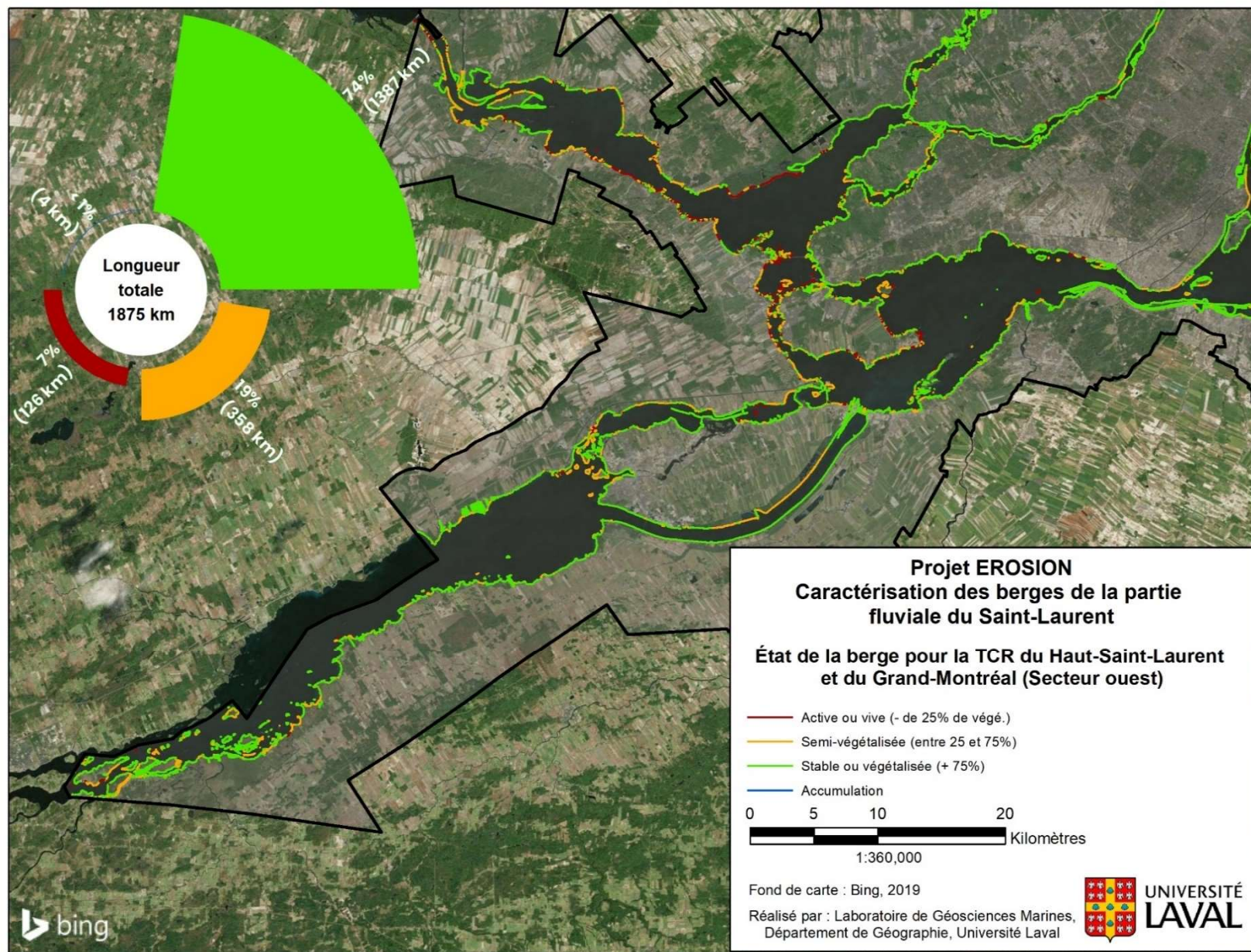


Figure 52. Carte et diagramme de l'état de la berge pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur amont).

5.4.2 Inventaire des sites vulnérables à l'aléa de l'érosion des berges

L'analyse de la caractérisation de la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal a permis l'identification de 142 sites sensibles, lesquels totalisent une distance linéaire de 274 km (Tableau Q). Comme pour les autres TCR, les sites sensibles identifiés dans la TCRHSLGM sont parfois subdivisés en plusieurs fiches, et ce, afin de respecter les catégories préétablies à la section 3.4. Au total, 201 fiches ont été produites pour la TCRHSLGM (Figures 53, 54, 55 et 56 ; Annexe C). De ces fiches, 84 sont de la catégorie des berges artificialisées et représentent 43% du trait linéaire de berge (117 km) ; 77 sont des berges naturelles et représentent 39% (106 km) ; 40 sont des écosystèmes à haute valeur écologique, pour environ 18% (51 km).

Tableau Q. Inventaire des fiches de la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal.

Type de fiche	Nombre	Distance (km)	Proportion (%)
Toute autre berge naturelle	77	106	39
Berge artificialisée	84	117	43
Haute valeur écologique	40	51	18
Total	201	274	100

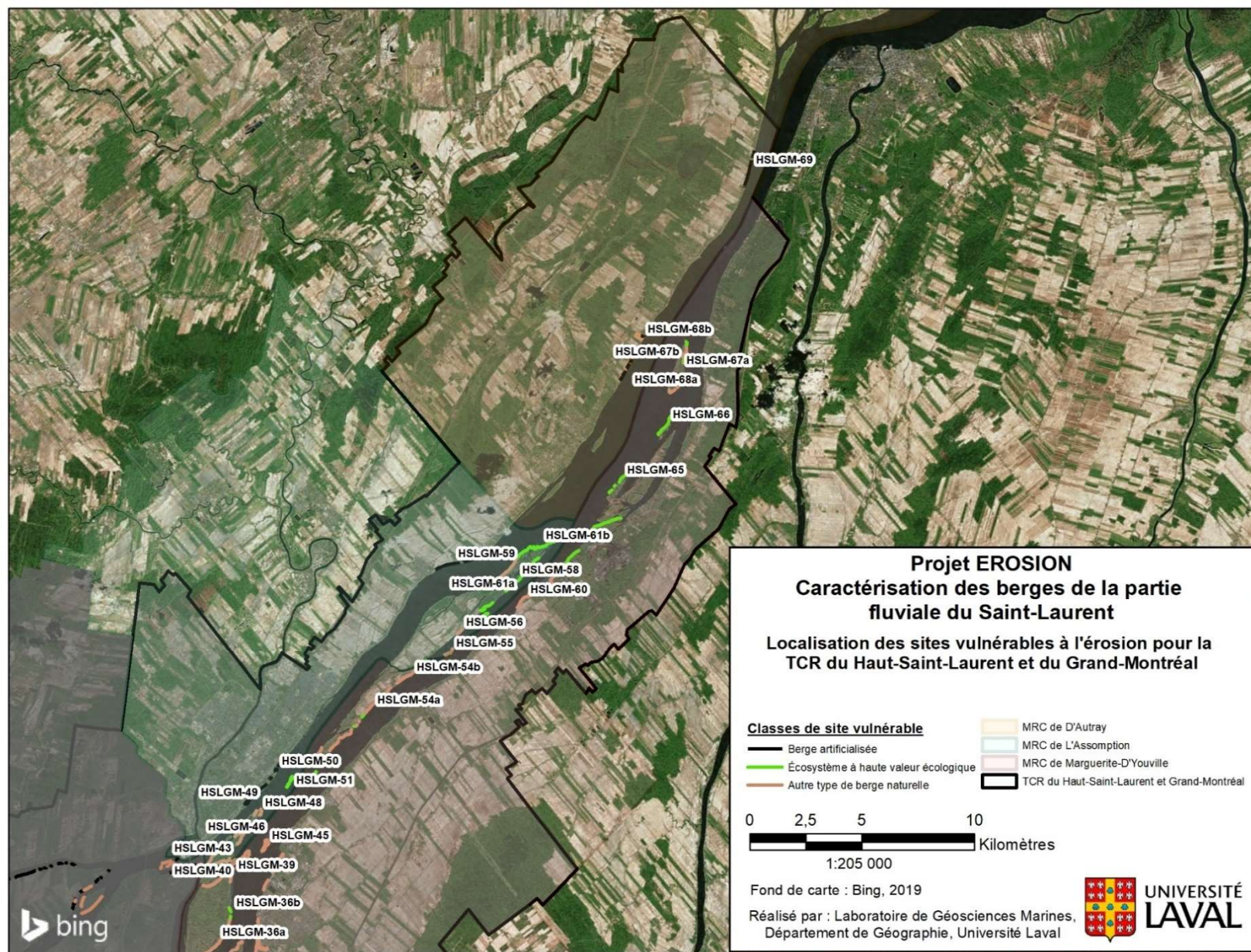


Figure 53. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval).

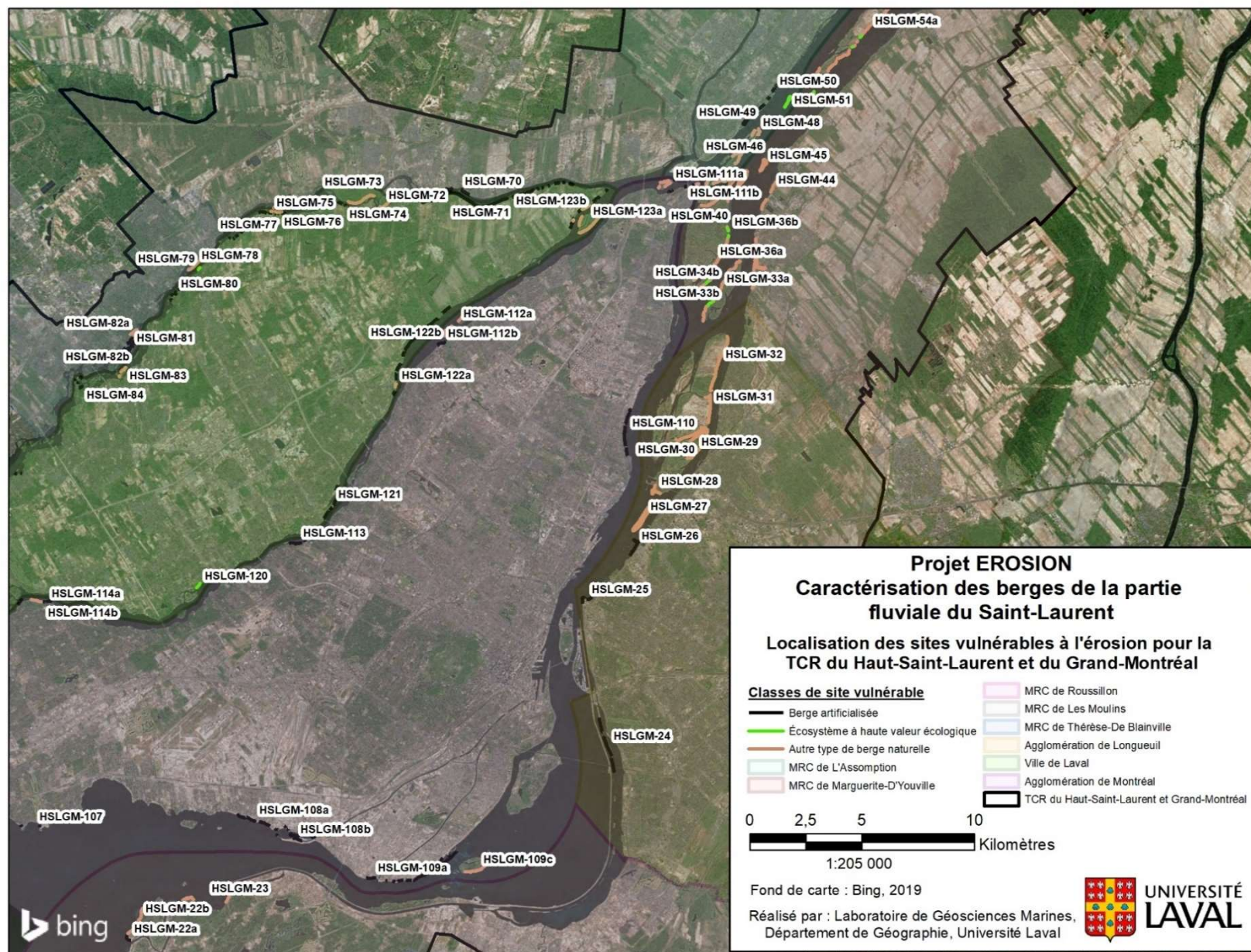
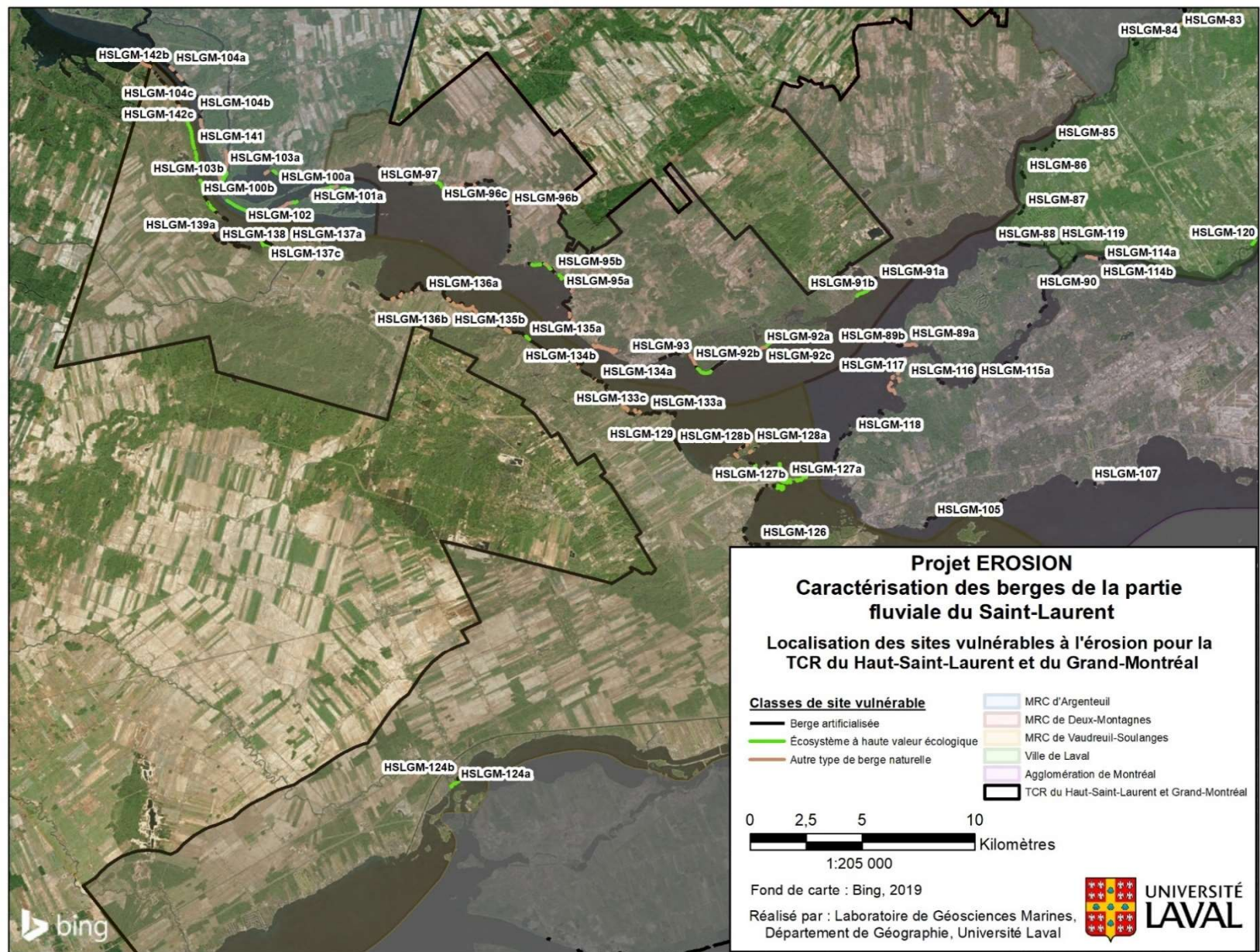


Figure 54. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur aval-central).



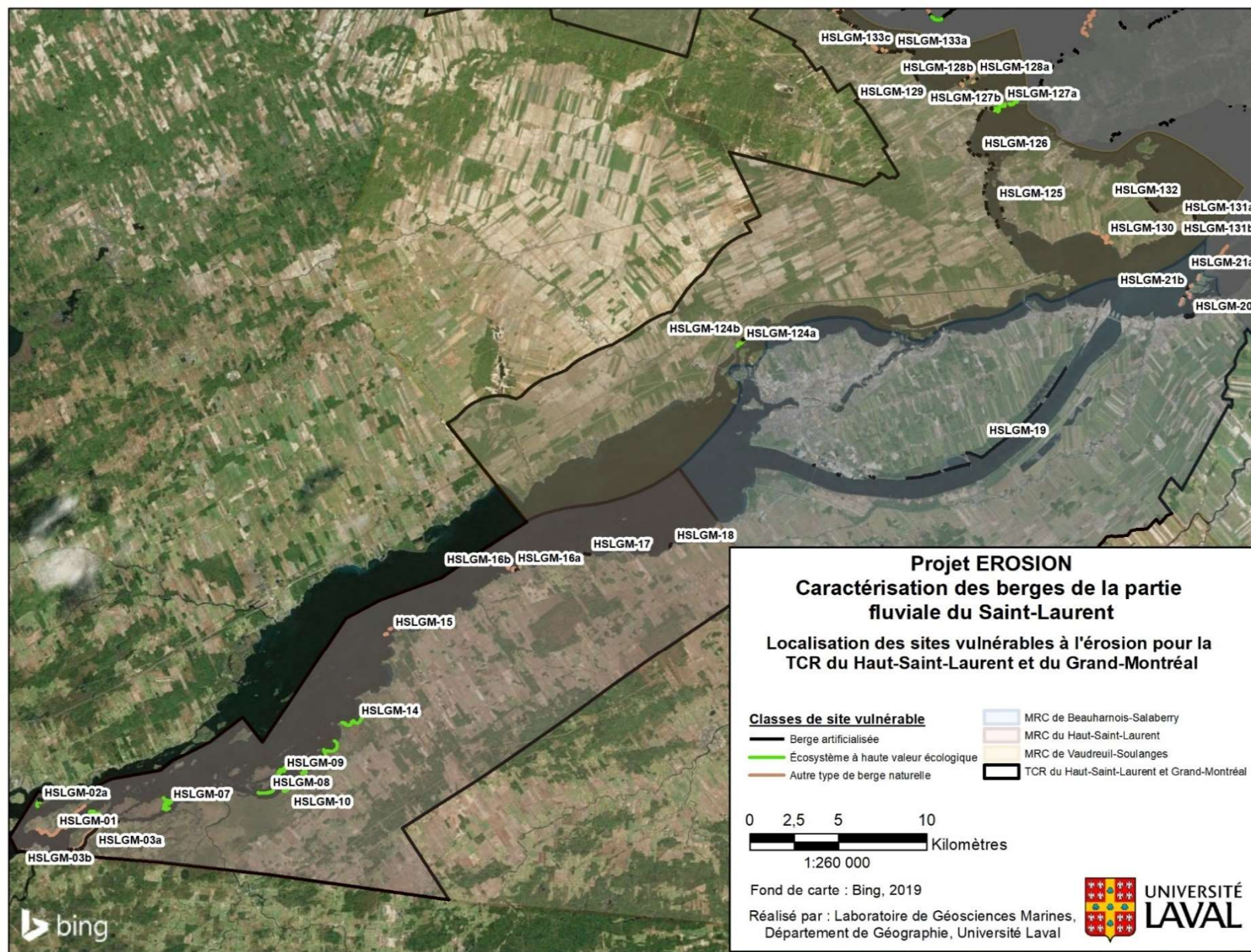


Figure 56. Carte de localisation des sites vulnérables à l'érosion pour la TCR du Haut-Saint-Laurent et du Grand-Montréal (secteur amont).

5.5 SYNTHÈSE

Le portrait général de l'aléa d'érosion est présenté dans les sections suivantes pour l'ensemble de la zone à l'étude, soit pour les quatre TCR. Un total de 3 190 km de berges/côtes a été analysé dans le cadre de ce projet. Les types de berges n'ont pas fait l'objet d'une synthèse, étant donné leurs différences géomorphologiques entre le segment fluvial et le segment de l'estuaire fluvial du Saint-Laurent.

5.5.1 Statistiques sur la caractérisation

Les diagrammes A et B de la Figure 57 illustrent l'état de la berge pour la partie fluviale et l'état de la côte pour l'estuaire fluvial du Saint-Laurent. La section estuarienne est la plus impactée par l'aléa d'érosion, avec une proportion de 17% (soit 114 km), alors que la proportion de la partie fluviale est de 8% (soit 199 km). En bref, le portrait global de l'état des berges/côtes de la zone d'étude montre que sur le total de 3 190 km de berges/côtes analysées, 10% (313 km) sont actives (Figure 57E). Ces résultats montrent également que 20% (631 km) des berges/côtes sont regroupés dans la classe semi-végétalisée, car elles commencent à présenter des signes d'érosion liés à une perte du couvert végétal ou à la dégradation sévère d'une artificialité.

Par ailleurs, les berges sont naturelles dans une proportion de 48% (1 540 km) et artificialisées dans une proportion de 52% (1 651 km) (Tableau R). De cette portion de berges/côtes artificialisées, ce sont les enrochements et les remblais sans protection qui sont les plus présents sur le territoire, avec 31% (472 km) et 28% (431 km) (Figure 57C). De ces proportions, 36% (170 km) des enrochements sont endommagés et 34% (145 km) des remblais sans protection présentent une détérioration (Figure 57D ; Tableau S). Tel que démontré dans le Tableau S, 25% (388 km) des artificialités de la zone d'étude montrent une dégradation.

Tableau R. Proportion relative de la présence d'artificialité dans le tronçon fluvial.

Présence d'artificialité	Distance totale (km)	Proportion (%)
Oui	1 650	52
Non	1 540	48
Total	3 190	100

Tableau S. Proportion relative d'érosion par types d'artificialité pour toute la zone d'étude.

Type d'artificialité	Distance totale (km)	Portion endommagée (km)	Proportion (%)
SP	150	16	11
CAN	137	23	17
ENR	472	170	36
MP	263	21	8
MPI	15	2	12
PROM	41	8	19
REMSP	431	145	34
RME	25	4	15
Total	1535	388	25

5.5.2 Inventaire des sites vulnérables à l'aléa de l'érosion des berges

Au cours des ateliers tenus pendant l'automne 2019 en collaboration avec les quatre TCR, 170 sites d'intérêt ont été identifiés par les participants (Tableau T). Ces sites ont été utilisés lors de la phase finale de la caractérisation des berges, afin d'orienter l'équipe de travail sur les secteurs où l'érosion est active ou non. Les résultats de ces ateliers, joints à ceux de la caractérisation des berges, ont permis d'identifier 251 sites vulnérables. Ces sites sont comptabilisés par TCR dans le Tableau T et présentés sous la forme de fiches descriptives en Annexe C. De plus, cet exercice a également permis d'identifier et de localiser les principaux processus érosifs le long du tronçon fluvial du Saint-Laurent discutés dans la section 3 et 6.

Tableau T. Nombre de sites d'intérêt et identifiés par TCR.

Tables de concertation régionales	Nombre de sites d'intérêt (Atelier)	Nombre de sites vulnérables identifiés
Québec	40	24
Estuaire fluvial	30	41
Lac Saint-Pierre	30	44
Haut-Saint-Laurent et Grand-Montréal	70	142
Total	170	251

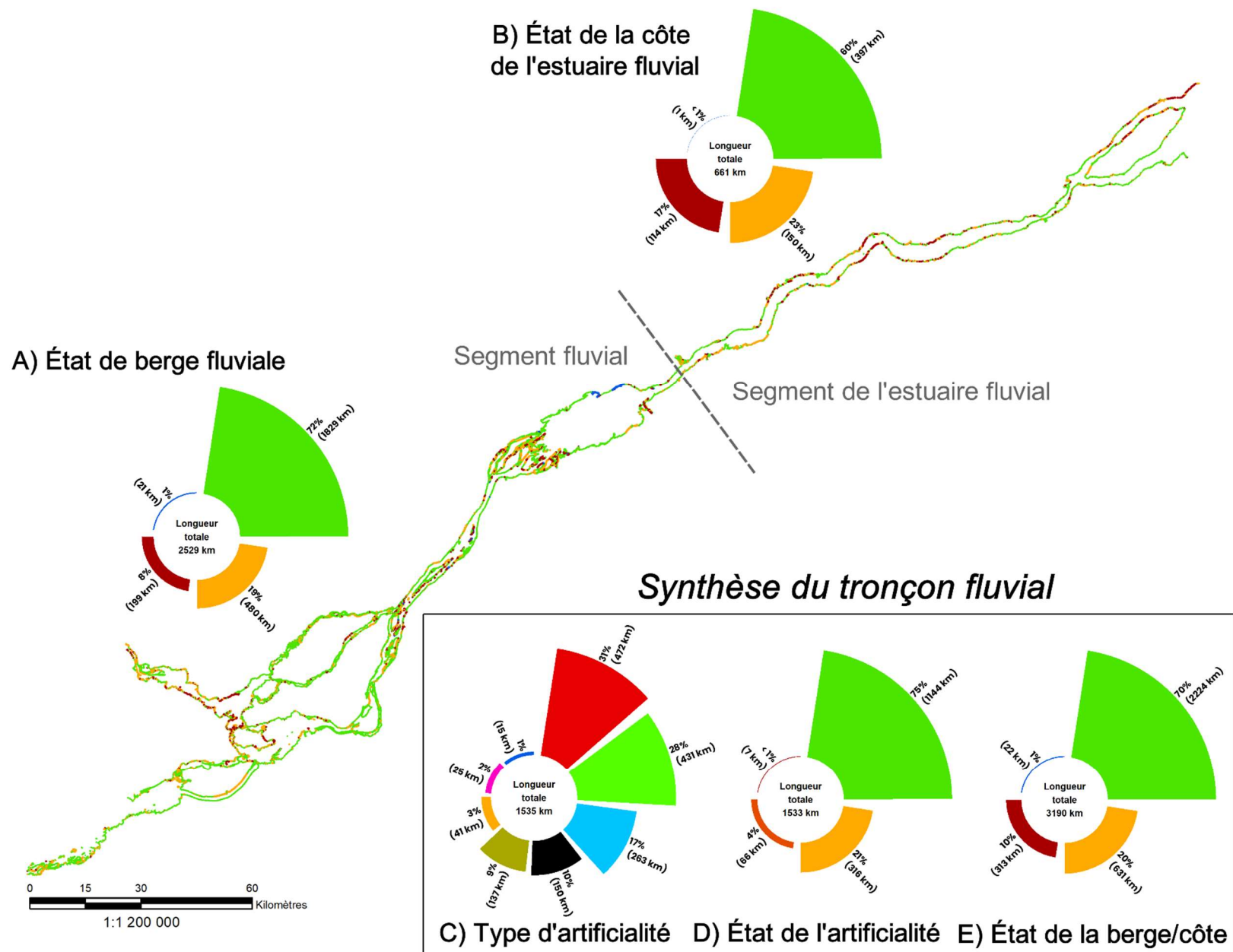


Figure 57. Synthèse globale du tronçon fluvial. A) État de la berge fluviale. B) État de la côte de l'estuaire fluvial. C) Type d'artificialité du tronçon fluvial. D) L'état de l'artificialité du tronçon fluvial. E) État de la berge/côte du tronçon fluvial (Se référer à la section 5 pour l'identification du code de couleur utilisé dans cette figure).

6 DISCUSSION

6.1 CARACTÉRISATION DES BERGES ET RÉPARTITION SPATIALE DE L'ÉROSION DANS LE TRONÇON FLUVIAL

6.1.1 Caractérisation des berges : une actualisation du tracé et des enjeux

6.1.1.1 *Études passées*

Les premières études de caractérisation des berges réalisées dans le tronçon fluvial ont commencé au début des années 1990, sous la direction du Service canadien de la Faune d'Environnement Canada (Argus Groupe-Conseil, 1991 ; Argus Groupe-Conseil, 1996). Contrairement à la présente étude, le territoire de l'analyse n'incluait pas les berges du lac des Deux Montagnes, des îles du lac Saint-François, des rivières Mille-Îles et Prairies ainsi que l'embouchure de l'Outaouais. Afin de produire une caractérisation des berges, ces auteurs avaient également opté pour une méthodologie qualitative basée sur des fiches d'inventaire sur le terrain contenant des croquis, des photos et des caractéristiques riveraines, telles que la hauteur de la cicatrice d'érosion et du talus, sa distance par rapport à la voie maritime, le type et la densité de la végétation, la nature des dépôts meubles ainsi que les agents érosifs en cause (Argus Groupe-Conseil, 1996). Cette saisie d'observations biophysiques et anthropiques sur l'ensemble du tronçon fluvial a mené à l'établissement d'une typologie des berges composée de 70 profils de talus naturels ou artificialisés ainsi que stables ou instables (Figure 58). Une segmentation des rives a ensuite été réalisée selon ces profils et les types de problématique d'érosion rencontrés lors de ces analyses. Enfin, les segments homogènes ont été tracés sur les plans cadastraux au 1:20 000 du gouvernement du Québec de 1978 ; les tracés de cette segmentation ne semblent pas être disponibles en format numérique.

Ces travaux constituent les fondations pour d'autres études majeures réalisées ultérieurement sur l'érosion et sur la mise en place de plans de restauration des écosystèmes riverains dans le Saint-Laurent dulcicole (Dauphin, 2000 ; Écogénie Inc, 2003 ; Sabourin, 2002 ; Service canadien de la faune, 2003a, 2003b ; Dauphin et Lehoux, 2004). Par ailleurs, les résultats de ces études ont permis l'établissement d'un atlas cartographique de restauration des rives du Saint-Laurent produit par Environnement Canada et consultable sur l'Observatoire global du Saint-Laurent (OGSL). Il est intéressant de constater que seulement 8% des sites ciblés dans le tronçon fluvial ont depuis été restaurés (Environnement Canada, 2020). La principale raison expliquant cette faible valeur serait principalement reliée aux coûts élevés des méthodes de restauration proposées par les firmes spécialisées en restauration environnementale. D'autre part, Environnement Canada a aussi développé en 2008 une classification des rivages dans le tronçon fluvial afin de connaître les secteurs les plus sensibles à l'accumulation d'hydrocarbures en cas de déversement, et ce, à des fins de protection environnementale (Sergy, 2008). Cet outil semble être la première caractérisation biophysique complète incluant la position d'un tracé intégrable dans un SIG, mais n'abordant évidemment pas

la thématique de l'érosion (Figure 59). En bref, l'objectif général de ces études était principalement de développer les connaissances de la qualité de l'environnement, afin de mettre en action des plans de restauration des berges. Ces plans présentent des lacunes en connaissances hydrogéomorphologiques ; ils n'abordent pas l'ensemble des stratégies d'aménagement exposées dans la section 6.3.

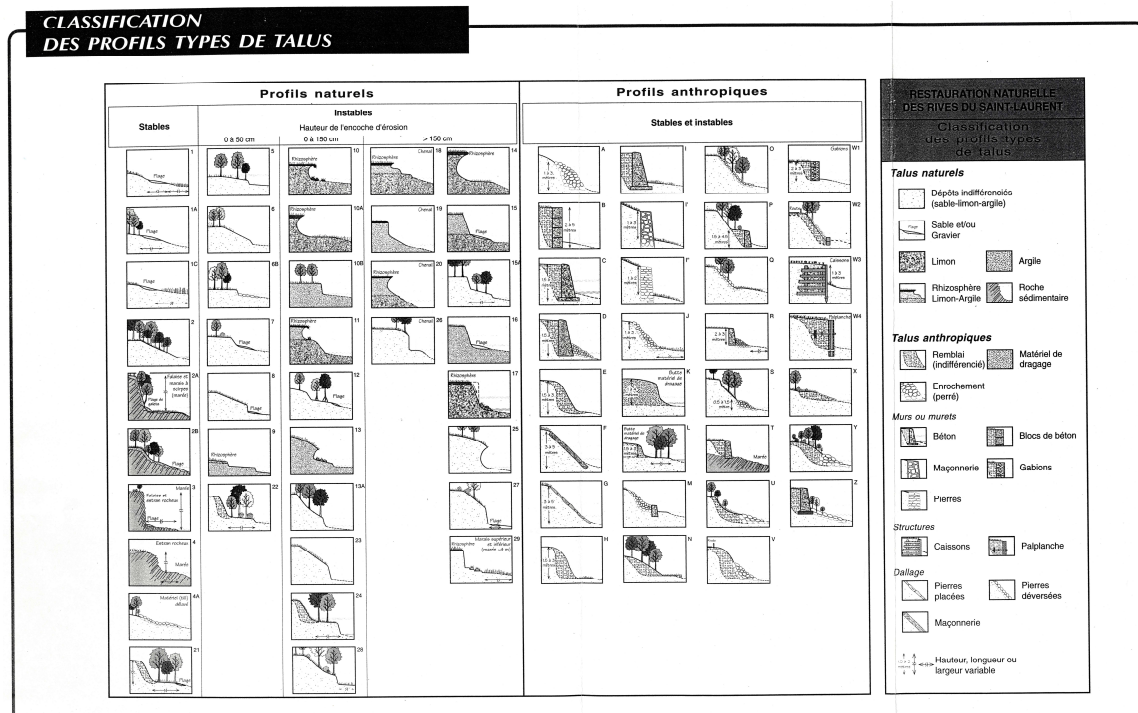


Figure 58. Classification des profils types de talus pour le tronçon fluvial (Tirée d'Argus Groupe-Conseil, 1996).

6.1.1.2 Amélioration des méthodes

Basé en partie sur les principaux enjeux et constats des études précédentes, le présent projet apporte les contributions majeures suivantes à la compréhension de l'érosion sur le tronçon fluvial du Saint-Laurent : (i) une plus haute précision et résolution géospatiale pour le positionnement du talus riverain ; (ii) un raffinement et un plus grand détail de la caractérisation du trait de berge (p. ex. : état de dégradation des artificialités, segmentation à haute résolution) ; et (3) en abordant un thème n'ayant pas encore été documenté dans ce type d'analyse, à savoir la vulnérabilité des populations riveraines à l'érosion dans le tronçon fluvial. Ces lacunes en termes de connaissances avaient d'ailleurs été soulevées par Morneau et al. (2014) à la suite d'une revue complète de l'exposition des rives et des zones côtières du Saint-Laurent aux aléas hydroclimatiques.

Cet état de la situation de l'érosion en terme géospatial produit dans le cadre du présent projet offre une opportunité pour mieux suivre et comprendre l'évolution des côtes et berges dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent. Une reproduction de ce type d'étude à tous les 10 ou 15 ans avec de nouvelles orthomosaïques et données LiDAR offrirait donc une base de comparaison afin de continuer d'observer les grandes tendances dans l'érosion et l'aménagement des berges sur le tronçon fluvial. En revanche, un intervalle de temps trop court (< 5 ans) entre chaque caractérisation pourrait amener un biais dans

l'évolution de la position de la berge pour certains secteurs puisque le recul observé pourrait être inférieur à la marge d'erreur de la méthode. De ce fait, pour l'étude de sites vulnérables, une haute précision et un court intervalle de temps entre chaque levé (saisonnier) sont souvent nécessaires pour déterminer les meilleures solutions d'aménagement. Pour ce faire, il serait plus approprié d'utiliser des méthodes avec une grande précision géodésique et facilement reproductibles (p. ex. : GNSS, drone RTK, LiDAR terrestre, etc.). Ainsi, par exemple, des levés topo-bathymétriques intra-annuels permettraient d'isoler les impacts des événements extrêmes des reculs plus lents et progressifs et ainsi fournir des taux de recul à haute précision et résolution. De plus, l'utilisation de stations de suivi qui intègrent différents capteurs (pression, turbidimètre, ADCP, caméra, etc.) permettrait également de documenter le continuum sédimentaire ainsi que le rôle des processus érosifs et des facteurs de contrôle au niveau des sites problématiques (Zaggia et al., 2017 ; Scarpa et al., 2019).

La précision du positionnement du trait de berge est donc un besoin primordial dans les études portant sur l'érosion. En effet, dans l'optique de produire une cartographie du risque reliée à cet aléa, il est essentiel de connaître les taux de recul au niveau de la berge et de produire des données pouvant être facilement intégrées dans un SIG. Un positionnement et une segmentation riveraine à une échelle cartographique de basse résolution engendreront inévitablement des valeurs non viables dans le cadre d'analyses de suivi de l'érosion. En d'autres termes, l'exactitude de ces valeurs est indispensable afin d'éviter une sur- ou une sous-évaluation des valeurs de recul des berges lorsqu'il est temps de produire des modèles futurs pour mieux comprendre la vulnérabilité des riverains, mais également des écosystèmes (Figure 59, Tableau U).

Dans cette perspective, l'étude accomplie par Argus Groupe-Conseil (1996) ne peut être intégrée dans une analyse spatio-temporelle de l'érosion, car les données de localisation sont disponibles uniquement sur des cartes en format papier au 1:20 000, soit à un faible niveau de précision et de résolution. À titre d'exemple, en utilisant la méthode décrite dans ce rapport, la TCREF –seule TCR ayant une délimitation identique avec un tronçon de l'étude d'Argus Groupe-Conseil, 1996– possède un tracé de 346 km avec 1 708 segments homogènes ; le tronçon équivalent dans cette étude précédente possède un tracé de 257 km avec 424 segments homogènes, soit une différence de 26% et 75%, respectivement (Tableau U). Cependant, au niveau de la caractérisation des berges pour l'ensemble du tronçon fluvial, les résultats qualitatifs sont sensiblement similaires et pourraient être comparés afin d'observer l'évolution temporelle du milieu riverain (Tableau U).

En somme, l'outil précis et flexible que la présente étude suggère pourra, à la fois (i) servir comme cadre de référence pour les futures analyses de l'érosion et (ii) être intégré aux projets de cartographie reliés à l'étude du risque et de la qualité de l'environnement. Plus généralement, la comparaison des résultats de ce projet avec les études antérieures souligne le besoin d'utiliser des méthodes équivalentes pour évaluer avec précision l'évolution des caractéristiques du trait de berge.

Tableau U. Comparaison d'attributs entre la présente étude et les précédentes pour l'ensemble de l'aire d'étude. Les valeurs de la TCREF sont en italiques.

Attribut	Argus Groupe-Conseil, 1996	Sergy, 2008	Cette étude, 2020
Distance couverte	1 532 (257) km	2 648 (293) km	3 190 (346) km
Segments riverains homogènes	2 378 (424)	2 237 (196)	18 882 (1 708)
État de la berge	28 (16) %	N/A	30 (44) % (berges semi-végétalisées incluses)
Artificialisation de la berge	45 (38) %	N/A	48 (40) %

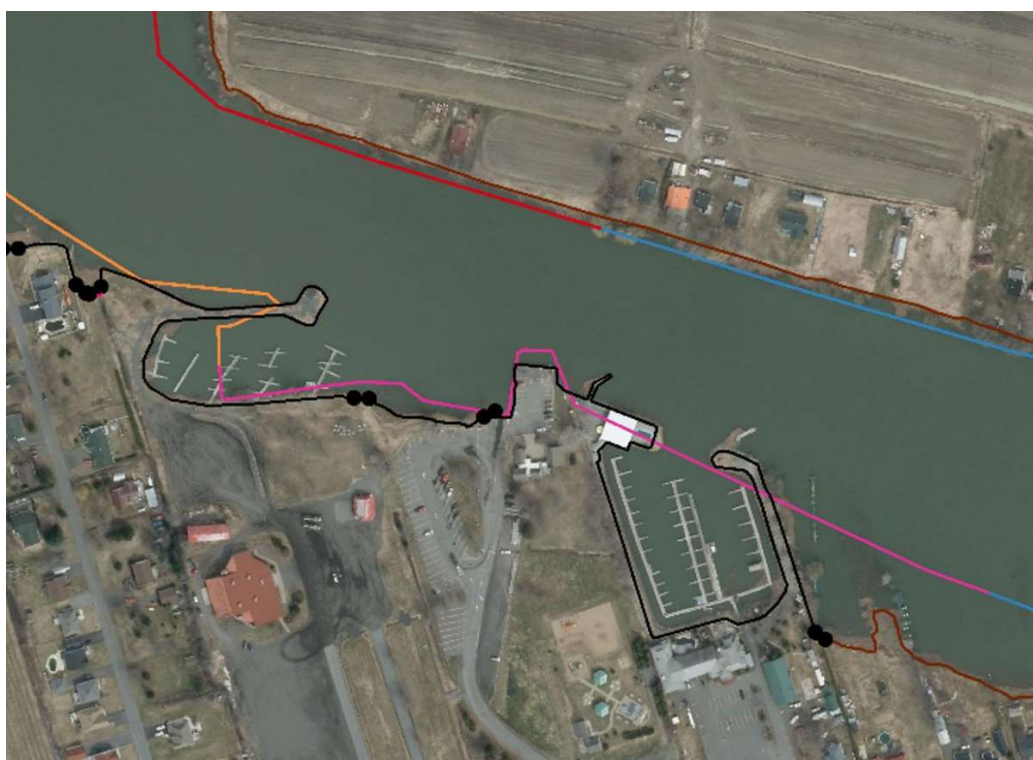


Figure 59. Différence de précision de l'emplacement et de la segmentation des berges entre la présente étude (trait brun et noir) et celle de Sergy (2008).

6.1.2 Répartition spatiale de l'érosion au sein du Saint-Laurent dulcicole

Cette section divisée selon les deux grands secteurs de l'aire d'étude, soit le segment de l'estuaire fluvial et le segment fluvial, aborde seulement les grandes tendances sur la localisation des sites d'érosion et des processus dominants impliqués. Pour plus de précisions, l'ensemble des secteurs vulnérables est présenté sous la forme de fiches dans l'Annexe C et localisé dans les cartes de la section 5.

6.1.2.1 Segment de l'estuaire fluvial

La caractérisation des berges de l'estuaire fluvial (TCRQC et TCREF) montre que les marais maritimes constituent les types de côtes les plus sensibles, avec 54 km sur 207 km qui seraient en érosion, soit 26%. L'instabilité de ces rives naturelles serait causée par un effet combiné des vagues de tempêtes (Figure 60) ainsi que des processus tidaux et glaciels (Argus Groupe-Conseil, 1996 ; Bhiry et al., 2013). Des auteurs ayant monitoré des marais de l'estuaire d'eau douce ont également observé que la hauteur de la microfalaise d'un marais, soit le talus qui marque généralement la limite entre le schorre inférieur et le schorre supérieur, serait l'un des facteurs les plus déterminants dans la vitesse de recul (Bhiry et al., 2013). En d'autres termes, plus le talus est haut, plus la vitesse de recul sera importante.

Une forte proportion de marais en érosion avec des microfalaises supérieures à 1 mètre est localisée dans le chenal nord de l'île d'Orléans et un taux de recul moyen de -0,79 m/an y a été observé entre 2007 et 2014 (Quintin et al., 2016). Le phénomène des marées engendrant la mise en suspension des sédiments fins érodés fait de l'aval du bras de l'île d'Orléans, en particulier la batture du Cap-Tourmente, la région la plus dynamique de l'estuaire fluvial (Sérodès, 1980). D'autres sites de taille inférieure vers l'amont de l'estuaire sont également en érosion, tels qu'à Saint-Augustin-de-Desmaures, Deschambault-Grondines et Lotbinière. Bien que les mêmes processus naturels y soient actifs, plusieurs de ces sites rencontrent davantage une problématique de coincement côtier (Figure 7C). En fait, la hausse du niveau marin global anticipée à cause des changements climatiques mettra à l'épreuve la résilience des marais maritimes. Les conséquences de cette hausse seront grandement influencées par la présence d'obstacles (p. ex. : falaises, ouvrages rigides de protection côtière, etc.) susceptibles de freiner leur migration vers l'intérieur des terres (Quintin et al., 2016). Ce phénomène de coincement peut causer la dégradation, voire la disparition de ces écosystèmes côtiers, lesquels constituent tant un enjeu écologique que socio-économique, puisqu'ils fournissent une grande diversité de services écosystémiques (Quintin et al., 2016).

Par leur constitution peu cohésive (sable et/ou gravier) et leur exposition aux épisodes de submersion, les côtes basses (< 5 m), c'est-à-dire, les terrasses de plage, les falaises meubles basses et celles meubles sans falaise, correspondent aussi à des sites vulnérables à l'érosion (Figure 4B, 4D et 4E). Les marées de vives-eaux font du printemps et de l'automne deux périodes où l'érosion est à son maximum sur ces géosystèmes côtiers. L'impact de l'érosion y est de plus renforcé par les vagues de vent, particulièrement propices dans l'axe NE-SO du fleuve (Figure 60). De plus, les embouchures de cours d'eau comme celles des rivières Batiscau, Saint-Anne et Bécancour sont également des secteurs où plusieurs sites en érosion ont été identifiés. Les processus reliés aux courants (crues) et aux embâcles prendraient une place

prépondérante dans ces environnements hautement dynamiques, particulièrement au printemps.

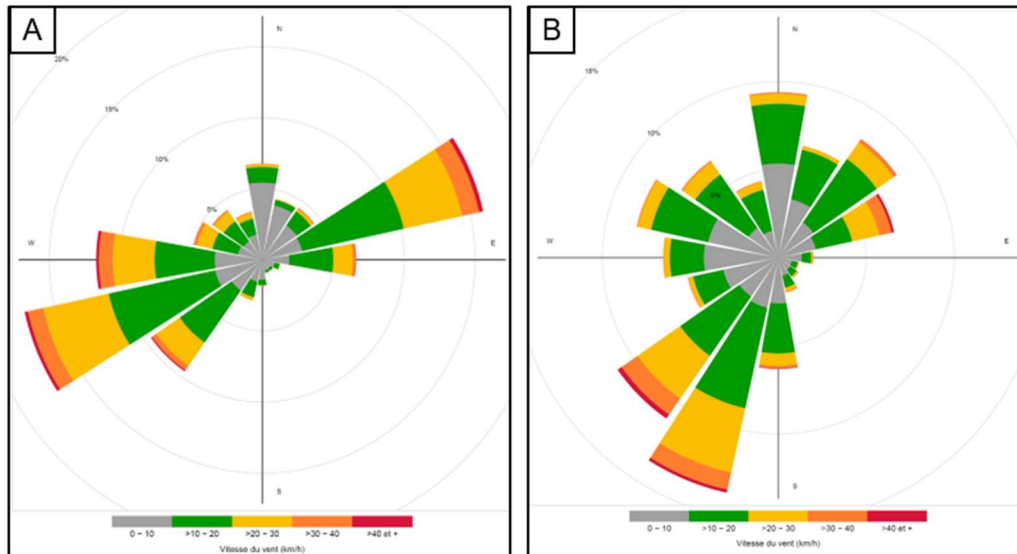


Figure 60. (A) Rose des vents pour le secteur de Québec représentant des données horaires entre 1996 et 2019. (B) Rose des vents pour le secteur de Trois-Rivières représentant des données horaires entre 1996 et 2019.

Les côtes basses sont actuellement beaucoup moins présentes que les marais maritimes dans l'estuaire fluvial, puisque la majorité semble avoir été aménagée à des fins, par exemple, de villégiatures ou de résidence permanente. En d'autres termes, une forte proportion est maintenant associée à une côte de type remblai. Par conséquent, ces environnements sont pour la plupart protégés par des ouvrages ; ils sont aujourd'hui partiellement à complètement dégradés en raison de l'augmentation de la réflexion des vagues liée à leur artificialisation. De surcroît, les populations se sont exposées malgré elles aux épisodes de submersion en s'installant au pied de falaises, plus particulièrement sur des terrasses étroites et parfois même sur des talus complètement artificiels (Figure 7D). Malgré la présence d'ouvrages de protection, les épisodes de hauts niveaux d'eau peuvent, par le phénomène de surverse, éroder les terrains à l'arrière. Ces épisodes peuvent parfois même, combinés à des radeaux de glace, dégrader sévèrement le cadre bâti riverain. Dans certains cas, les berges de remblai, composées habituellement d'un matériau hétérogène et lâche, ne sont pas protégées et sont beaucoup plus sensibles à ces processus érosifs. L'estuaire fluvial est également caractérisé par la présence de falaises meubles hautes (> 5 m), principalement entre Gentilly et Leclercville ainsi qu'à Deschambault (Figure 4C). Même si seulement 17% (soit 7 sur 41 km) de ces falaises meubles montre des signes d'érosion, elles peuvent rapidement devenir instables. Elles correspondent donc à des secteurs propices aux mouvements de masse, et ce, même pour des secteurs végétalisés. Malgré cela, peu d'études ont été réalisées sur ces falaises (Occhietti, 1990) et aucune ne semble les aborder dans une perspective d'analyse de risque. En effet, plusieurs cicatrices de décrochements, dont certaines sont maintenant végétalisées, sont visibles sur les données topographiques LiDAR pour ce type de côte. Par exemple, le glissement de terrain en zone végétalisée ayant détruit une partie de la marina de Deschaillons-sur-Saint-Laurent au printemps 2019 démontre la vulnérabilité du

cadre bâti et des populations installées près de ces berges (Figure 61A). Plusieurs falaises rocheuses (> 5 m) sont également observées sur une bonne partie du tracé aval de l'estuaire fluvial. Ces escarpements sont, pour la majorité, composés de roches sédimentaires friables où les processus de gel-dégel sont très actifs, particulièrement sur environ 20% (soit 12 sur 61 km) de ces côtes où une absence de végétation (falaise vive) est observée. Quoique leurs taux de recul soient habituellement lents, les éboulis rocheux et les glissements pelliculaires ne sont pas impossibles (Figure 61B).

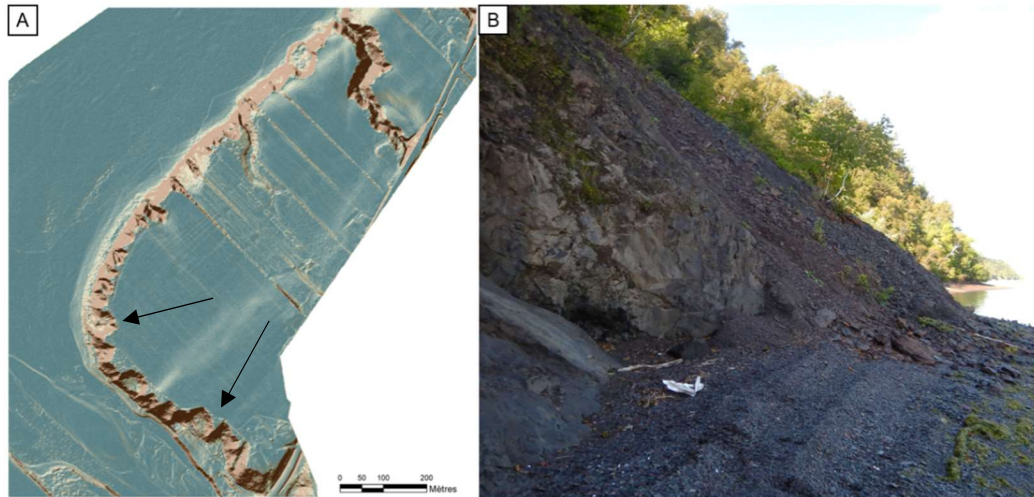


Figure 61. (A) Cicatrices de glissement de terrain (flèches noires) au niveau de Leclercville. (B) Talus d'éboulis au pied d'une falaise rocheuse près de Saint-Antoine-de-Tilly.

6.1.2.2 Segment fluvial

Le segment fluvial (TCRLSP et TCRHSLGM), tel que décrit dans la section 2, est caractérisé par un contexte combinant des paramètres physiques et une pression anthropique qui est distinct de l'estuaire fluvial. À un point tel que l'accroissement des activités humaines au courant du dernier siècle a causé une préséance des forces érosives anthropiques sur celle d'origine naturelle au sein du segment fluvial (Morneau et al., 2014). À titre d'exemple, en amont du Saint-Laurent, l'établissement de la voie navigable (Figure 62A), la mise en place d'ouvrages de régularisation des niveaux d'eau, l'augmentation de la popularité de la navigation de plaisance et le déboisement massif des rives sont des éléments qui exacerbent significativement l'érosion naturelle des berges (Department of Public Works, 1968 ; Panasuk, 1987 ; Argus Groupe-Conseil, 1991, 1996 ; Lehoux et al., 1997 ; Dauphin, 2000 ; Dauphin et Lehoux, 2004). De ce fait, davantage d'études semblent avoir été réalisées dans cette portion du Saint-Laurent afin de mieux comprendre les conséquences de ces aménagements. Plusieurs des auteurs y ont soulevé une problématique d'érosion concentrée dans les multiples archipels entre Montréal et Sorel (Argus Groupe-Conseil, 1991, 1996 ; Lehoux et al., 1997 ; Dauphin, 2000 ; Dauphin et Lehoux, 2004).

Selon Argus Groupe-Conseil (1996), 66% des berges naturelles des îles fluviales seraient en érosion, contre 25% pour la rive sud et nord du fleuve. Cette différence notable serait principalement reliée à la proximité des îles au chenal maritime ainsi qu'à une stabilisation des rives sud et nord, lesquelles sont plus densément peuplées que les archipels (Argus

Groupe-Conseil, 1996 ; Dauphin, 2000). Aucune comparaison de valeur ne sera faite avec la présente étude en raison de la différence entre les aires d'étude (Tableau U). Cependant, cette tendance est aussi observée dans les résultats de la caractérisation des berges du segment fluvial, où une forte proportion des berges des îles a été caractérisée comme active (section 5) (Figure 62B). Selon l'étude de Dauphin (2000), des moyennes élevées de taux de recul pour l'ensemble des archipels, soit de 1,6 m/an entre 1964 et 1983 et 0,4 m/an entre 1983 et 1997 sont observées, et ce, à travers une analyse multidate de photographies aériennes historiques.

À la suite de ces travaux, les taux de recul ne semblent pas avoir arrêtés, malgré des recommandations de réduction de vitesse des navires de type cargo dans ces secteurs. En effet, en effectuant une soustraction d'altitude entre les couvertures LiDAR de 2001 et 2018, un recul maximal pouvant atteindre jusqu'à 90 m, ou 5 m/an, est observé sur l'île des Barques, laquelle est adjacente à la voie maritime et a été découpée en partie lors de l'établissement du chenal (Figures 62 et 63).

Tel que mentionné plus haut, ces reculs majeurs seraient principalement causés par les effets du batillage et les aménagements apportés pour l'établissement de la voie maritime. Toujours selon Dauphin (2000), le batillage généré par les navires commerciaux circulant dans la voie navigable impacterait les rives jusqu'à des distances de l'ordre de 800 m et davantage à une distance inférieure à 400 m par rapport à la berge (Figure 62B). Pour l'ensemble du tronçon fluvial, environ 250 km ou 8% des berges se retrouvent dans cette zone d'influence des navires. Toutefois, il a été établi que le batillage n'est jamais l'unique facteur d'érosion, et ce, même pour les navires circulant sur des distances inférieures à 100 m des berges. Plusieurs facteurs, comme la dessiccation des matériaux fins, s'exercent en combinaison avec le batillage. L'influence des navires commerciaux serait responsable, au maximum, que de 60% de l'érosion observée sur une rive, en particulier pendant l'intervalle de 1964 et 1983 (Dauphin, 2000). En somme, l'influence du batillage est principalement concentrée dans le secteur Montréal-Sorel, où se produit 85% de l'érosion totale imputable aux navires commerciaux entre Cornwall et Montmagny (Dauphin, 2000). Les navires n'auraient ainsi qu'une influence minimale dans les autres secteurs de l'aire d'étude.

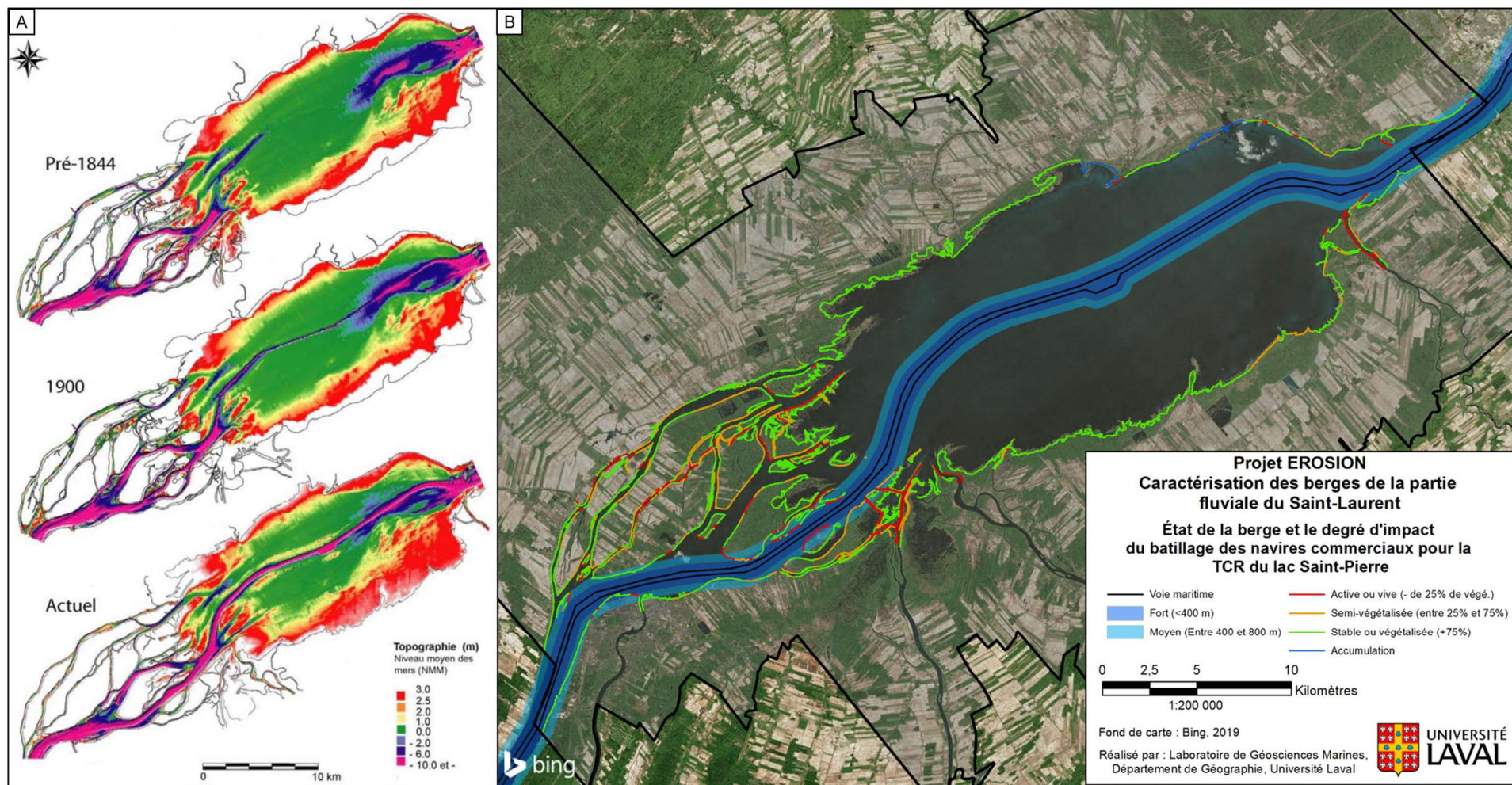


Figure 62. (A) Évolution de la bathymétrie du lac Saint-Pierre avec la mise en place de la voie maritime (Tirée de Morin et Côté, 2003). (B) État de la berge et le degré d'impact du batillage des navires commerciaux.

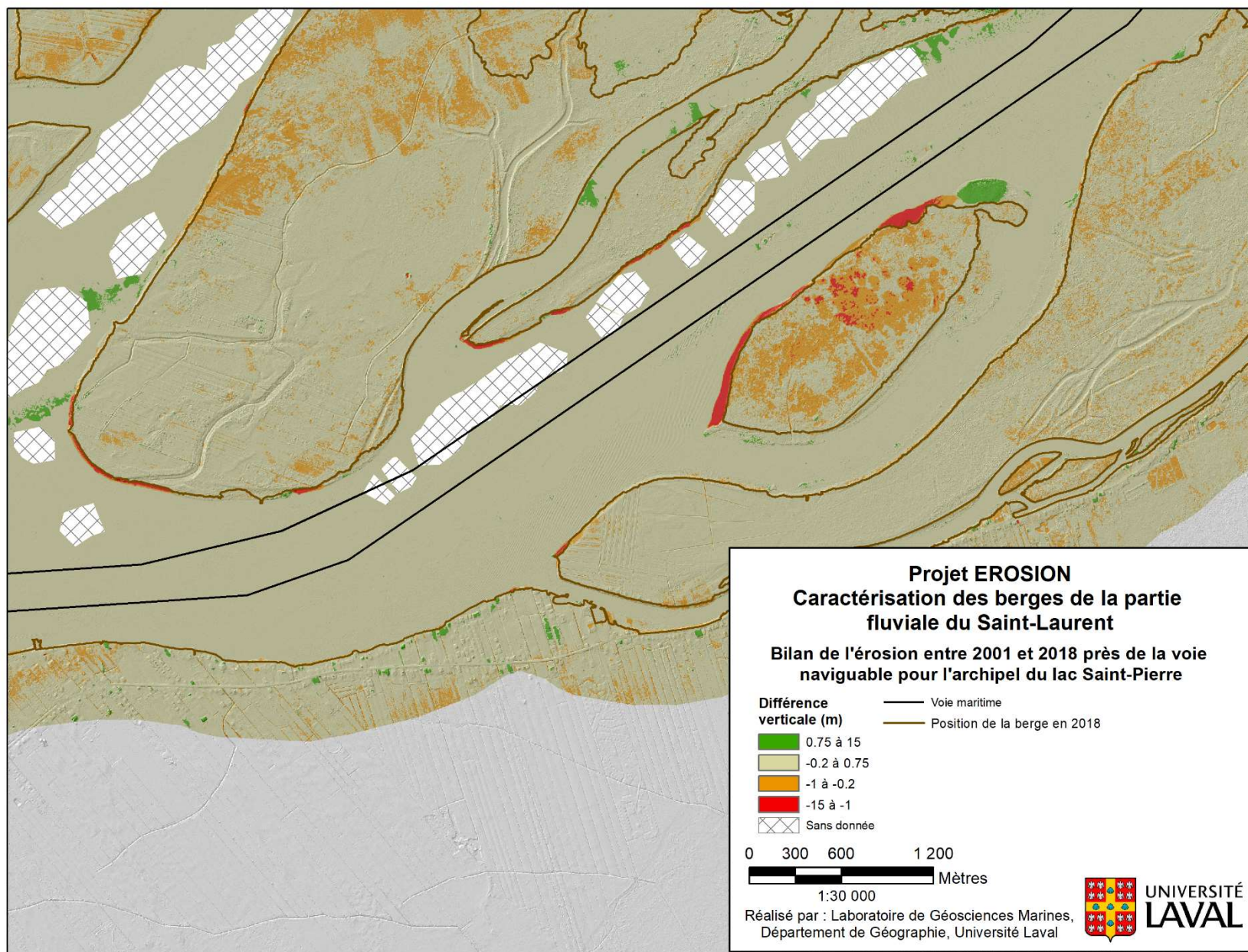


Figure 63. Bilan de l'érosion entre 2001 et 2018 près de la voie navigable pour l'archipel du lac Saint-Pierre.

À l'instar des archipels, les embouchures de rivières du segment fluvial semblent être très dynamiques. Par exemple, l'exutoire de l'Outaouais, la Yamaska, la Saint-François et la Nicolet montrent plusieurs segments exposant des signes d'érosion des berges et des artificialités dégradées. D'ailleurs, les embouchures de rivières du lac Saint-Pierre font aussi face à plusieurs problématiques d'ensablement. Les changements dans l'occupation du sol depuis le début des activités anthropiques dans ces bassins versants, tels que le déboisement et l'agriculture ont contribué à l'accroissement de l'érosion des sols (Dauphin et Jobin, 2016). En fait, la faible profondeur du lac Saint-Pierre, atteignant 2,7 m en moyenne, favoriserait la sédimentation aux embouchures. En fait, cet apport sédimentaire accru, combiné aux eaux peu profondes, participeraient même à la progradation de deltas comme celui de la Yamachiche (Figure 64) (Bondue et al., 2006) et à la dégradation de l'habitat de certaines espèces de poissons (Dauphin et Jobin, 2016).

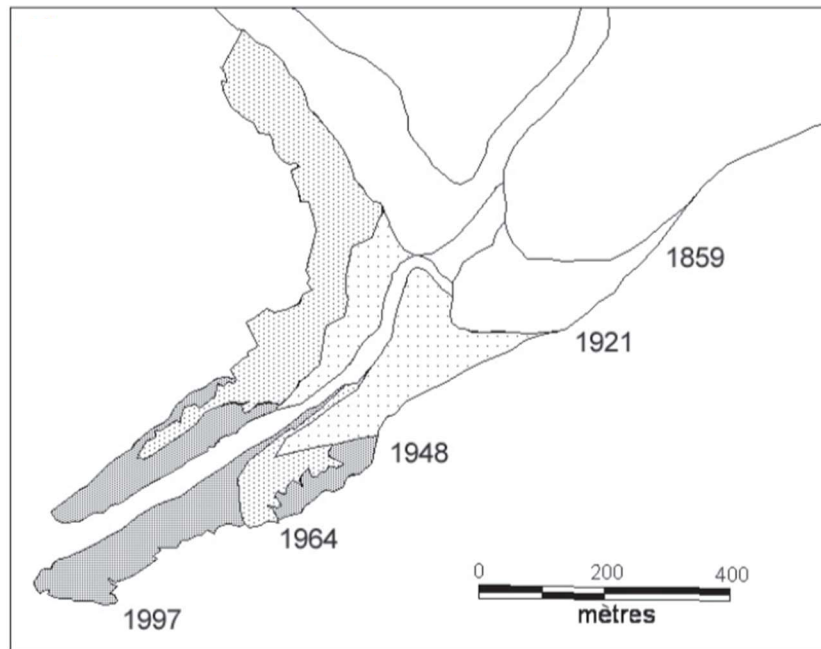


Figure 64. Progradation moderne du delta de la rivière Yamachiche (Tirée de Bondue et al., 2006).

Quant aux systèmes fluviolacustres des lacs Saint-Pierre, Saint-Louis, Saint-François et Deux Montagnes, lesquels sont spécifiques au segment fluvial, ils peuvent être fortement exposés à l'érosion par des vagues liées aux vents. Ces grands plans d'eau favorisent la formation de vagues en raison de l'augmentation de la longueur du *fetch*. Des sites localisés en périphérie de ces lacs, plus précisément ceux orientés dans la direction des vents dominants venant de l'ouest ou du sud-ouest, sont davantage exposés à l'aléa (Figure 65). Des segments situés notamment en bordure du lac des Deux-Montagnes et du lac Saint-Louis présentent des signes d'érosion et des structures de protection endommagées, dont la plupart correspondent à des enrochements ou des remblais non protégés. En fait, tel qu'observé dans les résultats, ces types de structures semblent moins durables que les murets de béton et les protections mixtes de l'ensemble du tronçon fluvial.

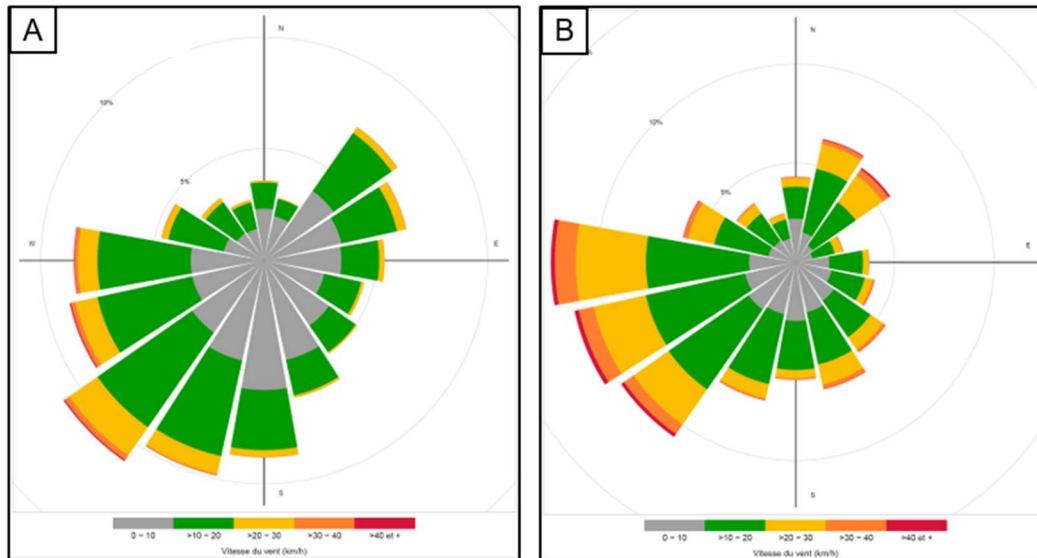


Figure 65. (A) Rose des vents pour le secteur de Nicolet représentant des données horaires entre 1996 et 2019. (B) Rose des vents pour le secteur de Montréal représentant des données horaires entre 1996 et 2019.

L'impact récurrent des inondations printanières dans le segment fluvial joue un rôle déterminant sur l'évolution de ses berges, mais cette relation de cause à effet conserve un rôle naturel dans le concept d'espace de liberté d'un cours d'eau (Biron et al., 2014). Il est clair que l'augmentation des courants et des niveaux d'eau au printemps accroît l'érosion autant sur les berges naturelles que sur les berges artificialisées, mais dans des proportions différentes. Les conséquences seront toutefois d'autant plus désastreuses que l'inondation sera intense. Dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent, les événements météorologiques de 2017 et 2019 ont démontré que, malgré la présence d'infrastructures de gestion des débits et des niveaux d'eau, l'aléa d'une inondation majeure demeure, faisant ainsi peser un risque pour les populations riveraines et le cadre bâti. L'addition des vagues générées par le batillage à ces eaux turbulentes ne fera que faire augmenter les impacts hydrogéomorphologiques des inondations.

En outre, même certaines structures de protection n'ont pas suffi à empêcher l'action combinée de ces aléas. De l'érosion par surverse sur les terrains pseudo-protégés peut être observée de façon occasionnelle selon (i) la sévérité de l'aléa hydrométéorologique ; et (ii) la hauteur et la solidité des ouvrages de protection en place. À l'inverse, de l'érosion par affouillement au pied des structures peut se produire lors de bas niveaux d'eau. Par ailleurs, plusieurs opérations de remblayage ont été réalisées sur les berges depuis le début du XIX^e siècle ; ces remblais sont aujourd'hui exposés et vulnérables à l'érosion. Dans certains cas, cette artificialisation de la berge a ajouté une emprise horizontale sur le cours d'eau qui peut varier entre quelques mètres et plusieurs dizaines de mètres de longueur. Ces remblais sont généralement composés d'un matériau lâche de granulométrie variée, allant des limons jusqu'aux pierres, qui est protégé, dans la plupart des cas, par un muret de béton ou un enrochement. Par conséquent, ces surfaces d'emprise sur le fleuve, lesquelles sont aujourd'hui habitées et exposées aux processus d'érosion, peuvent vraisemblablement agir comme un obstacle au libre mouvement d'un cours d'eau, engendrant donc un déséquilibre dans l'évolution naturelle de la berge. De

plus, le matériau peu cohésif dont le remblai est constitué vient augmenter la sensibilité de la berge à l'érosion et, par le fait même, la vulnérabilité du cadre bâti à proximité.

Quant aux berges naturelles, la présence de milieux humides, tels que les marais herbacés et les herbiers aquatiques, semble limiter l'impact de la variation des niveaux d'eau et des vagues d'origine naturelle ou anthropique. Selon Currin et al. (2015), les rivages constitués de marais ou de forêts marécageuses présentent des taux d'érosion plus faibles que les rivages non végétalisés, en particulier dans des contextes de vagues de grande force. Même les berges meubles bordées par une bande de végétation, particulièrement étroite, présentent des taux d'érosion plus faibles que les berges meubles non végétalisées (Murgatroyd et Ternan, 1983 ; Thorne, 1990 ; Simon et Collison, 2002 ; Currin et al., 2015). En revanche, l'implantation d'artificialités dans ces milieux parfois fragiles vient rompre leur intégrité écologique, engendrant dans la plupart des cas leur dégradation ou leur disparition complète. Le rôle d'atténuation des vagues des milieux humides a également été observé dans la caractérisation réalisée dans le segment fluvial et montre que le type de berge associé à un milieu humide riverain (soit 9% de berge active) est moins sensible à l'érosion que les autres berges naturelles (soit 16% de berge active). De plus, lorsqu'un milieu humide de type marais herbacé (trait secondaire nommé milieu humide protecteur dans le cadre de cette étude) se trouve devant la berge, celle-ci semble montrer peu ou pas de signe d'érosion, et ce, pour l'ensemble des types de berges (Figure 66). Ces résultats soulignent l'utilité de la végétation aquatique tels les marais pour le maintien des berges. Plus généralement, ces résultats viennent étayer les conclusions de travaux antérieurs sur le rôle joué par les milieux humides dans la protection et la résilience des berges.

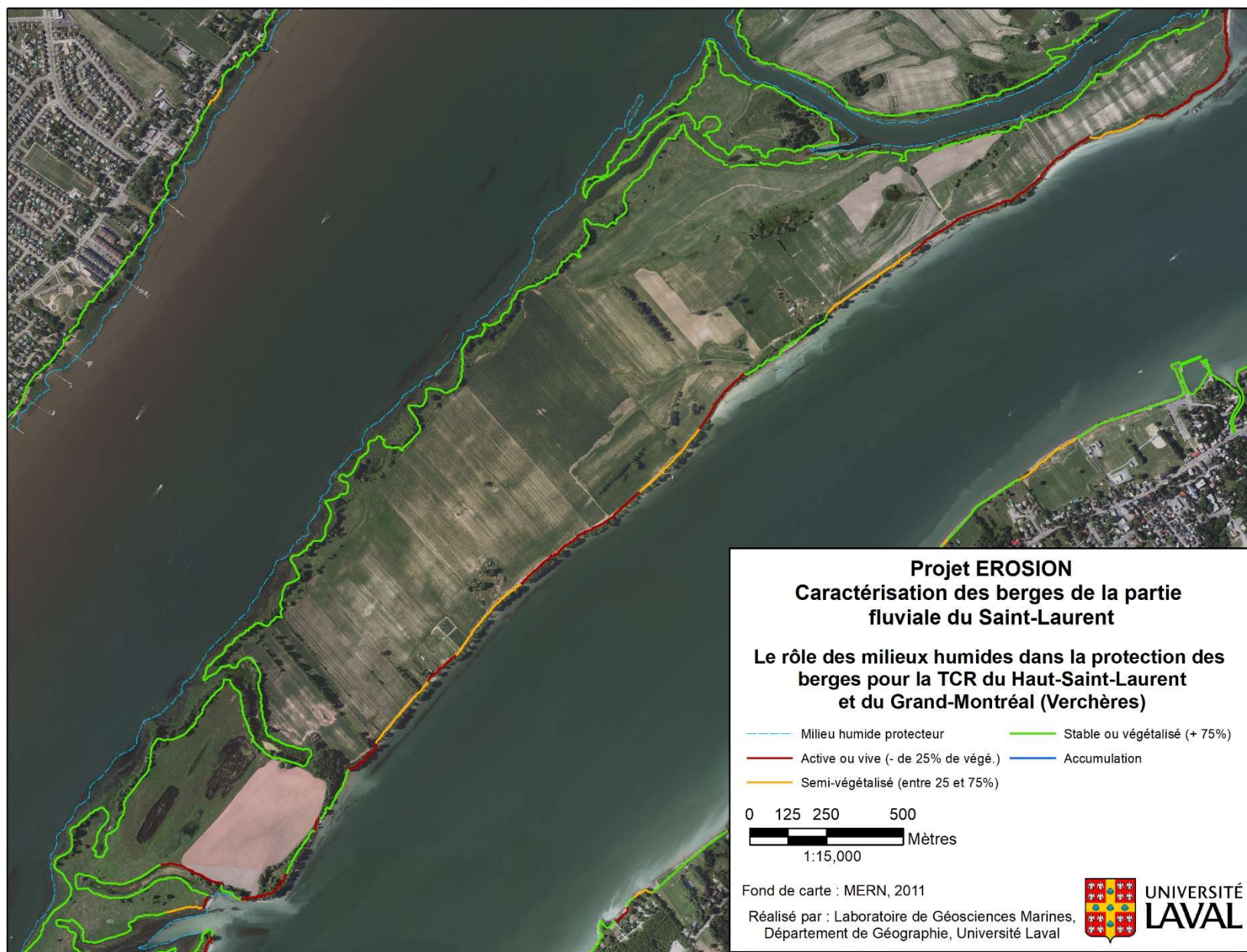


Figure 66. Rôle des milieux humides de type marais (pointillé bleu) dans la protection des berges près de Verchères.

6.2 RÔLE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DE L'ANTHROPISATION

L'hydraulicité du fleuve, sujette à des variations inter- et intra-annuelles de fortes amplitudes, est régulée par le climat régional et les installations anthropiques établies depuis la fin des années 1950 afin de limiter l'impact des crues et de favoriser le transport maritime. Une étude récente réalisée par Rondeau-Genesse (2020) a permis de dresser un portrait de l'impact de la variation de divers facteurs de contrôle hydroclimatiques sur l'aléa d'érosion. Cette étude retrace à la fois les évolutions depuis le passé récent et prédit également le rôle des différents facteurs selon une série de scénarios hydroclimatiques régionaux. Ces scénarios et leur impact sur les processus érosifs demeurent cependant difficiles à anticiper tant les contrôles anthropiques sont forts sur le fleuve. En effet, les variations naturelles et les régulations anthropiques induisent une forte variabilité dans les niveaux d'eau au sein du tronçon fluvial, ce qui aura également dans le futur des incidences sur l'érosion des berges. Les projections récentes prévoient, en moyenne, une augmentation des apports en eaux provenant des Grands Lacs pour le fleuve Saint-Laurent (Rondeau-Genesse, 2020), mais les possibles impacts sur l'érosion des berges pourraient être contrebalancés par les régulations des débits aux barrages.

Les changements climatiques se traduisent par une hausse des températures hivernales, ce qui influence la dynamique de formation et de fonte de la glace sur le fleuve. Les prévisions climatiques prévoient une diminution du couvert de glace (Rondeau-Genesse, 2020), ce qui limiterait la protection qu'elle assure aux berges. Cependant, là encore, les obstacles à l'écoulement, les digues, les opérations de brise-glace et tous les autres types d'interventions anthropiques ont des impacts cumulatifs sur la répartition et la dynamique des glaces dans le fleuve. Les modifications de température induites par les changements climatiques détermineront également la fréquence, l'intensité et l'occurrence des cycles de gel-dégel au Québec. Actuellement prédominants pendant le début du printemps, ces cycles pourraient se produire plus tôt dans l'année.

Plus généralement, c'est l'ensemble des facteurs liés au cycle hydrologique –à savoir les cycles de gel-dégel, la dessiccation des argiles, les cycles d'humidification, les débits et niveaux d'eau du fleuve, les ondes de tempêtes et les cycles des marées– qui pourrait être impacté par les changements climatiques. Toutefois, il demeure difficile (i) de quantifier les réponses de ces changements à cause de l'absence de suivi sur les sites, et (ii) d'estimer si les modifications attendues dans les dynamiques d'érosion des berges résultent soit des changements climatiques tels qu'actuellement projetés par les différents modèles, soit des pressions anthropiques qui s'exercent sur le fleuve et ses affluents. Par le passé, des déséquilibres sédimentaires importants ont été engendrés lors de l'établissement de la voie maritime du Saint-Laurent (Figure 67). Le dragage, le creusement de nouveaux chenaux, le découpage d'îles, la déviation de courants dominants, le contrôle des niveaux d'eau réalisé pour permettre la navigation de cargos qui, à leur tour, causent du battillage, ont certainement leur lot de conséquences. Cependant, leur degré de responsabilité respectif une fois combiné et la période nécessaire au fleuve pour s'équilibrer face à ces aménagements majeurs demeurent inconnus.

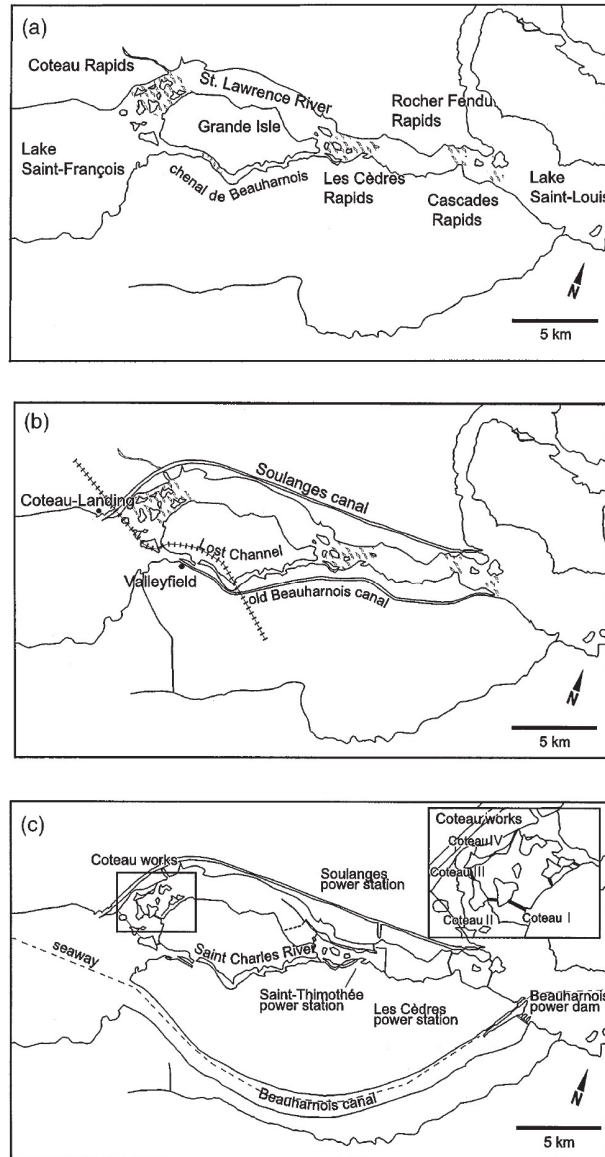


Figure 67. Évolution du paysage de la section des rapides de Soulanges : (a) Pré-1800, (b) vers 1900 et (c) vers 1960 (Tirée de Morin et Leclerc, 1998).

Au cours des 50 dernières années, l'artificialisation des terres dans le bassin versant du fleuve Saint-Laurent s'est traduite en une expansion du bâti urbain en zones inondables et par la transformation des terres agricoles. La disparition des fermes traditionnelles et des paysages agricoles diversifiés (bocages, boisés et pâturages) s'est accélérée depuis les années 1960. Ces espaces ont été remplacés par une agriculture intensive caractérisée par des monocultures céréalières et oléagineuses (Dauphin et Jobin, 2016). Ces changements dans l'utilisation du sol altèrent ses propriétés mécaniques et physico-chimiques, ce qui peut, dans le cas des terres situées en bordure du fleuve, favoriser l'érosion des berges par ruissellement. En général, l'érosion induite par le remembrement modifie les écoulements en surface et la charge sédimentaire au sein des rivières alimentant le fleuve. Ces apports contribuent à la modification du trait de berge, en

particulier au niveau des embouchures, où la sédimentation accrue favorise la construction de deltas et de bandes littorales. Ces effets sont bien documentés à la hauteur du lac Saint-Pierre, qui reçoit les eaux de rivière drainant de grandes superficies agricoles (Bondue et al., 2006 ; Boyer et al., 2010) (Figure 64).

Dans le secteur amont, la multiplication des obstacles à l'inondabilité du fleuve, c'est-à-dire la présence de segments de berge protégés ou de remblais construits sur d'anciennes zones de milieux humides, rend ce secteur plus sensible aux impacts des variations de niveau d'eau et/ou de débits. À titre d'exemple, environ 80% des zones inondables de la CMM sont habitées. De surcroît, les apports en eau de la rivière des Outaouais, laquelle est régularisée à seulement 40%, constituent également un facteur déterminant sur les risques d'inondations dans ce secteur densément peuplé, tel qu'observé en 2017 et 2019. Les hauts niveaux d'eau observés lors des récentes inondations ont eu un impact significatif sur les berges non artificialisées, mais également sur celles avec des structures rigides en amont de Trois-Rivières. En effet, plusieurs cas d'érosion par surverse ou par affouillement ont été observés sur des segments protégés (Figure 68).



Figure 68. (A) Érosion par surverse pendant les inondations de 2019 derrière un enrochement mis en place à la suite des événements de 2017, lequel protège un terrain de remblai dans la municipalité de Pointe-Fortune. (B) Érosion par affouillement d'un remblai au printemps 2019 sur une route de l'île Saint-Ignace.

À l'opposé, les changements dans la dynamique des glaces et la submersion des berges associée à la montée relative du niveau marin global auront à long terme des impacts plus importants dans les secteurs situés en aval, soit entre Trois-Rivières et Québec (Figure 69). Dans le cadre des changements climatiques, la multiplication des événements de tempête est encore incertaine, mais une augmentation du nombre d'épisodes estivaux d'orage et de précipitations intenses est à prévoir (Rondeau-Genesse, 2020). Malgré l'incertitude entourant la tendance des ondes de tempêtes dans l'estuaire fluvial, une

étude du consortium Ouranos a démontré que la durée écourtée du pied de glace augmentera l'impact des tempêtes au niveau des berges (Savard et Roy, 2014). Il en sera possiblement de même pour les berges à proximité du chenal, lesquelles sont exposées au batillage commercial ou de plaisance.

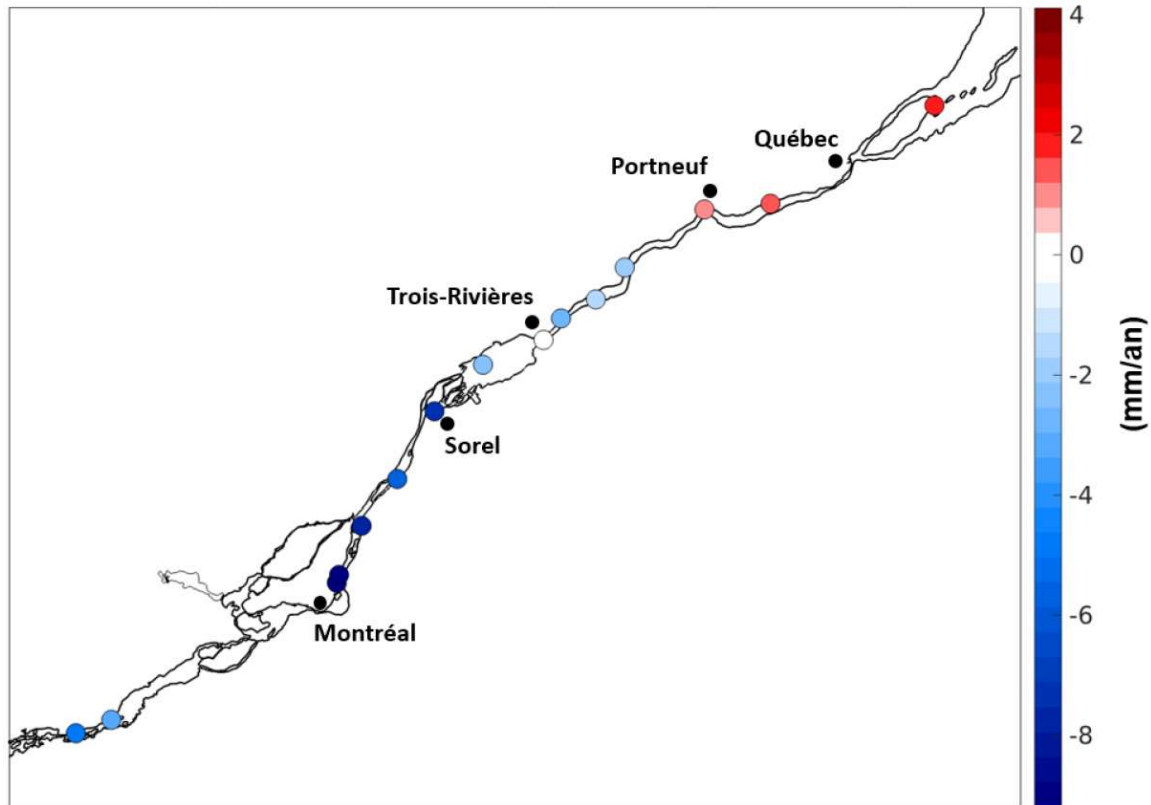


Figure 69. Tendances de niveau statistiquement significatives (p value < 0.05) calculées aux bouées et aux marégraphes de Pêches et Océans Canada entre les années 1990 et 2017 (Tirée de Rondeau-Genesse, 2020).

En modulant les dynamiques hydrosédimentaires ainsi que les différents facteurs de contrôle environnementaux, le climat et les activités anthropiques sont susceptibles de modifier les processus d'érosion des berges. Avec les futurs changements climatiques et une pression anthropique grandissante autour du Saint-Laurent, les berges pourraient alors devenir plus sensibles à l'érosion et subir une intensification dans leur taux de recul. Les projections demeurent toutefois difficiles à estimer. À défaut, les connaissances acquises sur les causes de l'érosion des berges permettent une spatialisation des processus sur le tronçon fluvial, entre l'amont, plus exposé aux pressions anthropiques, et l'aval, plus sensible aux changements naturels. Cependant, ces connaissances n'excluent pas les besoins de cartographier et de caractériser les berges au sein du tronçon fluvial. Certains types de berges étant naturellement plus sensibles à l'érosion que d'autres en raison de leur granulométrie et/ou de leur morphologie ainsi que plusieurs secteurs moins exposés a priori aux changements climatiques et/ou aux pressions anthropiques pourraient se dégrader rapidement dans un futur proche.

6.3 GESTION INTÉGRÉE ET STRATÉGIES D'AMÉNAGEMENT FACE AUX DÉFIS ACTUELS ET FUTURS

Face à l'ampleur des changements climatiques prévus pour le Québec, il faut anticiper leurs conséquences sur la vulnérabilité des berges pour ainsi limiter les risques pour les communautés riveraines. Cependant, la gestion des débits au niveau des barrages, en l'état actuel, ne peut régler tous les problèmes d'érosion reliés à l'hydraulicité du fleuve Saint-Laurent. Les facteurs hydrauliques et morphologiques qui conditionnent les processus et l'intensité de l'érosion des berges sont difficilement contrôlables, tel que démontré par les événements récents de 2017 et 2019. À l'inverse, il est possible de limiter les impacts sur les riverains en repensant l'aménagement du territoire et l'utilisation du fleuve afin de limiter les pressions anthropiques.

Parce que les cours d'eau sont des environnements dynamiques qui changent dans le temps et dans l'espace, l'érosion des berges pourrait être atténuée dans certains secteurs si un espace de liberté était accordé au fleuve (Biron et al., 2014, 2018 ; Buffin-Bélanger et al., 2015). Les aménagements anthropiques qui se sont développés en bordure du fleuve au cours des dernières décennies ont beaucoup limité cette zone tampon et l'intégrité écologique, laquelle est essentielle à la résilience des géo-écosystèmes riverains. Une solution pour le futur serait de modérer, voire éliminer, ces aménagements souvent obsolètes, en particulier dans les zones humides et sur certains terrains adjacents au trait de berge qui sont naturellement exposés aux aléas d'érosion.

Selon les travaux de Williams et al. (2018), cinq stratégies d'intervention sont disponibles aux décideurs afin de gérer les aléas affectant les berges (Figure 70) :

- **Protection** : préservation des zones urbaines, des activités économiques et des ressources naturelles (zones vulnérables) en utilisant des structures rigides et/ou douces comme mesures de protection ;
- **Adaptation** : occupation de régions vulnérables, mais acceptation d'un degré d'exposition plus élevé en modifiant l'utilisation des terres, les méthodes de construction et en améliorant la réaction à l'aléa ;
- **Retrait planifié** : destruction des structures dans les zones développées, déplacement des citoyens avec l'exigence que les nouveaux développements soient en retrait et en respect avec l'espace de liberté du cours d'eau ;
- **Mise en place d'écosystèmes** : mitigation des aléas (p. ex. : capture des sédiments et atténuation de l'énergie des vagues) par la création et/ou la restauration des écosystèmes riverains, tels que les zones humides, les herbiers marins et les bandes riveraines ;
- **Sacrifice** (ne rien faire) : acceptation de l'abandon du cadre bâti lorsque la protection proposée n'est pas viable ou que l'option d'adaptation et de retrait n'existe pas.

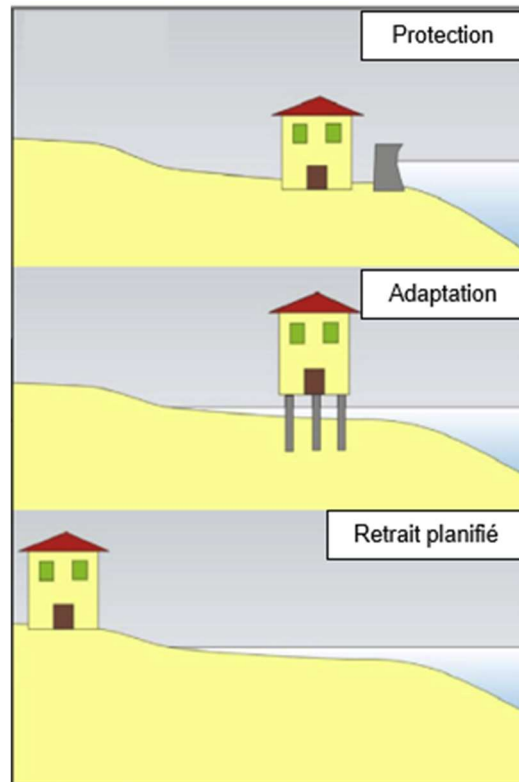


Figure 70. Schématisation des interventions les plus fréquentes dans la gestion des berges (Modifiée de Williams et al., 2018).

Cependant, Rangel-Buitrago et al. (2018b) propose une stratégie supplémentaire qui limite les actions au niveau de la berge, soit celle d'une **intervention sur les causes de l'érosion** (Figure 71). En d'autres termes, aucune action n'est nécessaire sur le secteur vulnérable si l'aléa est atténué. L'exemple le plus évident pour ce type d'intervention dans le tronçon fluvial est celui des vagues engendrées par la navigation commerciale et de plaisance. L'impact du batillage pourrait, par exemple, être réduit si la fréquence et la vitesse des navires marchands et des embarcations de plaisance étaient diminuées au moment de l'année où les berges sont les plus sensibles.

Chaque type d'intervention doit correspondre aux spécificités du segment affecté par une problématique d'érosion. Les solutions envisagées pour le tronçon maritime ne sont donc pas nécessairement applicables pour le segment fluvial. En effet, le choix de la meilleure stratégie devra se fonder sur les connaissances historiques et scientifiques par région pour parvenir à une solution qui doit s'adapter aux cadres de gestion en place et être réalisée selon les meilleures techniques disponibles (Rangel-Buitrago et al., 2018b). D'ailleurs, une telle méthode ne fonctionnera que si les deux approches économiques communes actuelles ne sont pas considérées comme essentielles au modèle de gestion, soit 1) une approche coûts-avantages rigide (Cooper et McKenna, 2008), et 2) une base d'action-réaction (Rangel-Buitrago et al., 2015, 2018a, 2018c).

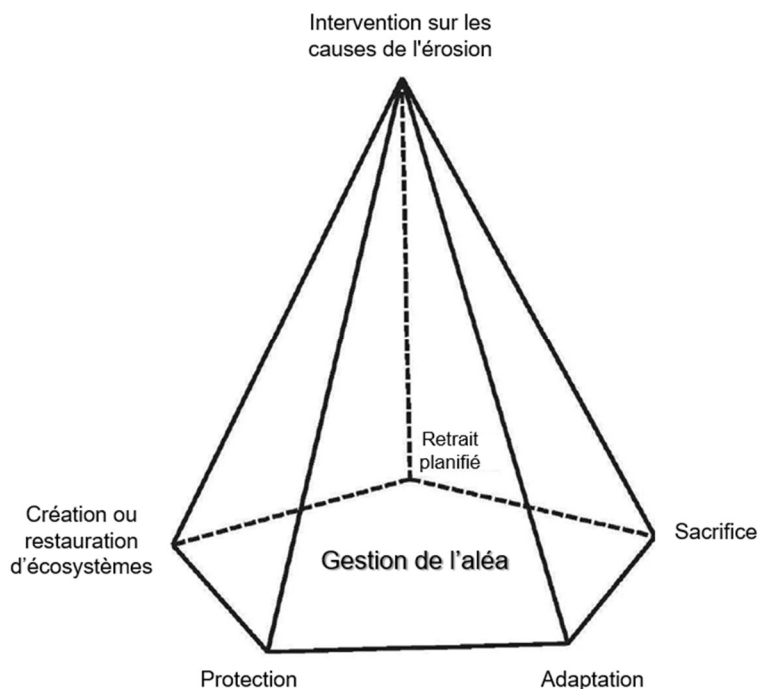


Figure 71. Stratégies d'intervention envisageables pour la gestion des problématiques d'érosion, en ajoutant la dimension intervention sur les causes (Traduite de Rangel-Buitrago et al., 2018b).

La reconnaissance des processus hydrosédimentaires dans les politiques de gestion et de restauration des cours d'eau est un concept relativement récent. Ce concept commence seulement à faire consensus parmi la communauté scientifique, les intervenants locaux et les décideurs politiques. Il semble donc souhaitable de formaliser un cadre d'étude des cours d'eau en incluant l'hydrogéomorphologie au même titre que l'écologie ou la biologie. La présente étude fournit donc les assises et les connaissances scientifiques de base nécessaires pour intégrer cette discipline pertinente à la prise de décision au sein du tronçon fluvial.

La mise en œuvre d'une gestion intégrée de l'érosion des berges peut être un processus lent, de sorte que les résultats attendus sont susceptibles d'être atteints à moyen ou long terme. En ce sens, il est essentiel d'être proactif dans la création de discussions entre les parties prenantes et dans l'innovation de nouveaux projets. La mise en place des différentes TCR, lesquelles ont permis d'accélérer les initiatives depuis 2011, est un exemple de réussite. Des stratégies préventives et flexibles, plutôt que des mesures réactives à des événements extrêmes, devraient être adoptées pour mieux soutenir la gestion de l'érosion et, ainsi, améliorer la qualité de l'environnement riverain qui profitera directement aux municipalités concernées. Enfin, les futures stratégies de gestion devront (i) incorporer l'ensemble du contexte dans lequel les impacts des changements climatiques se produisent ; et (ii) inclure la prise en compte des questions pertinentes liées ou non au climat (Tol et al., 2008). En effet, ce mode de gestion ne se limite pas à résoudre un problème au moyen de l'ingénierie conventionnelle, mais concerne également l'habitabilité et la qualité future de notre environnement (Rangel-Buitrago et al., 2018b).

7 LACUNES, BESOINS ET RECOMMANDATIONS POUR LE TRONÇON FLUVIAL

Dans un rapport récent, Morneau et al. (2014) a soulevé l'enjeu du manque flagrant de connaissances sur les risques reliés aux aléas hydroclimatiques, tels que l'érosion dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent. À cause de manque de connaissances scientifiques, plusieurs incertitudes persistent pour les décideurs du niveau municipal au fédéral au moment du choix de la bonne stratégie à adopter pour l'aménagement du territoire en milieu riverain. En revanche, dans le tronçon maritime du Saint-Laurent, le développement des connaissances sur les divers aléas naturels et le rôle des changements climatiques s'est amorcé il y a environ 15 ans par l'équipe de Pascal Bernatchez à l'UQAR. À titre d'exemple, à la suite de leurs travaux, plusieurs municipalités de la Gaspésie et de la Côte-Nord ont apporté des modifications dans leurs règles d'urbanisme afin d'augmenter la résilience de leurs riverains face aux aléas côtiers. Il est important de préciser que l'ensemble des actions opérées dans le secteur maritime n'est pas forcément exportable pour le tronçon fluvial, étant donnée une disparité notable dans les paramètres physiques (différence dans le type, la fréquence et la magnitude des aléas) du fleuve, mais également par rapport au degré de l'influence des aménagements humains, qui sont beaucoup plus présents dans le tronçon fluvial.

Les dernières grandes avancées scientifiques dans le tronçon fluvial concernant l'érosion et la dynamique sédimentaire datent d'une vingtaine d'années. Elles découlent principalement des études exécutées ou financées par le gouvernement fédéral du Canada (Lehoux, 1996 ; Rondeau et al., 2000 ; Carignan et Lorrain, 2000 ; Dauphin, 2000 ; Lepage et al., 2000 ; Dauphin et Lehoux, 2004, LeBlanc et al., 2002 ; Morin et al., 2004). Par contre, ce développement intensif de connaissances n'était pas orienté vers le soutien aux riverains pour faire face aux aléas hydroclimatiques, mais plutôt vers l'amélioration de la compréhension des différents paramètres de la qualité environnementale (p. ex. : critère de la qualité de l'eau, suivi des habitats fauniques, etc.). Suite à cette vague de travaux, plusieurs études ponctuelles et bases de données sont apparues, mais qui avaient, dans la plupart des cas, des objectifs différents et des conclusions rarement applicables à la prise de décision. De plus, tel qu'évoqué par Chassiot et al. (sous presse), les connaissances scientifiques sont encore plus anémiques pour les grands systèmes fluviaux en milieu froid, en particulier ceux qui sont, comme le Saint-Laurent, fortement influencés par les activités anthropiques. C'est précisément en s'appuyant sur ces lacunes que la présente étude de caractérisation des berges et des processus d'érosion est venue mettre en place une base de connaissance scientifique adaptée aux spécificités du tronçon fluvial, et ce, dans l'intérêt et l'objectif d'augmenter la résilience des communautés riveraines face à cet aléa. Au cours de ce projet, plusieurs besoins exprimés par les acteurs locaux ont été notés afin (i) d'améliorer la prise de décision dans l'aménagement en milieu riverain ; et (ii) d'augmenter le niveau de connaissance du territoire afin de mieux vivre avec les effets de l'érosion. Grâce aux ateliers réalisés avec les TCR, les équipes de l'Université Laval et du consortium Ouranos ont pu sonder les participants, ce qui leur a permis de colliger les différents enjeux soulevés lors des discussions. Le Tableau V résume les constats relatifs à l'aléa d'érosion des berges. Il expose également des actions concrètes proposées pour y répondre.

Tableau V. Liste de besoins émis par les acteurs locaux et les recommandations leur étant associées.

Thème	Besoin	Recommandation
Adaptation physique et structurelle	1. Un portfolio de solutions ou d'interventions adaptées aux spécificités locales et selon les processus d'érosion en cause.	❖ Avec le manque de connaissance dans le tronçon fluvial, beaucoup d'efforts de recherche et de concertation sont nécessaires pour en arriver à ce produit souhaité. Encore plusieurs années sont à prévoir avant d'en arriver à un tel document résumant les meilleures pratiques à adopter pour l'aménagement riverain. En effet, <u>l'amélioration des connaissances</u> devra passer par d'autres projets portant sur les liens entre l'érosion, les changements climatiques et les aménagements/activités humaines dans le tronçon fluvial. Par exemple, très peu d'information est disponible dans la littérature scientifique sur les impacts des activités humaines sur les structures anthropiques, situation observable dans le tronçon fluvial dont 48 % des berges sont artificialisées. ❖ Il sera essentiel de produire des études innovatrices et multidisciplinaires touchant l'hydrogéomorphologie, la biologie, l'ingénierie et les sciences économiques dans le but de <u>développer des aménagements durables adaptés au Saint-Laurent</u> qui respecteront son espace de liberté et l'intégrité des écosystèmes riverains tout en facilitant l'adaptation des municipalités riveraines aux changements environnementaux.
	2. Inventaire du type et de l'état des artificialités en place au niveau de la berge.	❖ Ce besoin a été répondu avec la présente étude (Voir section 4).
Outils d'aide à la décision	3. Produire des études géomorphologiques et hydrodynamiques pour acquérir des connaissances pour des secteurs régionaux, et non par propriété.	❖ Peu de données quantitatives sont disponibles dans le tronçon fluvial pour permettre l'implantation de stratégie d'aménagement en lien avec les problématiques d'érosion. Le manque de <u>station de suivi de l'érosion sur les secteurs les plus critiques</u> constitue un obstacle majeur à une prise de décision éclairée et dans la compréhension du rôle des changements climatiques sur cet aléa. Par exemple, un programme de suivi rigoureux sur ces sites permettrait de 1) connaître les taux de recul saisonniers ; 2) mesurer les impacts des événements extrêmes ; et 3) améliorer les connaissances associées aux processus érosifs en cause en installant des mouillages avec différents types de capteurs. Bref, un ensemble d'éléments fondamentaux à connaître avant la mise de place d'un aménagement. ❖ Ce type d'étude combiné à une <u>acquisition de données topobathymétriques et hydrodynamiques</u> pour l'ensemble du fleuve permettrait de limiter la prise de décision par propriété en rendant possible des analyses précises par modélisation et à une échelle pertinente dans l'optique d'évaluer les conséquences locales et régionales de l'implantation de structures rigides sur la dynamique sédimentaire ainsi que sur les écosystèmes sensibles du fleuve.
	4. Développer une cartographie exhaustive des zones à risque d'érosion.	❖ Dans le but de produire une cartographie exhaustive des zones de risque à l'érosion, il est essentiel de <u>connaître convenablement l'aléa et les enjeux de vulnérabilité</u>, soit du cadre bâti ou des écosystèmes. En fait, ce besoin ne peut être répondu qu'en ayant les informations issues des recommandations du besoin #3. Par exemple, sans aucune donnée de recul ou sur les processus, il est difficile d'évaluer avec précision l'évolution de la berge actuelle et future, ce qui rend ardue la prise de décision pour le développement de plans d'aménagement et d'adaptation aux changements climatiques. ❖ Une fois que les sites seront bien documentés, le <u>développement de fiches ou de livrets diagnostiques</u> résumant l'ensemble des observations et des enjeux permettra des choix éclairés pour répondre au besoin #1 et #4. Une première étape a été franchie avec le présent projet avec la production de plus de 400 fiches qualitatives sur des sites sensibles à l'érosion dans le tronçon fluvial.
Sensibilisation sur les enjeux liés à l'érosion et leur évolution face aux changements environnementaux	5. Auprès des élus et professionnels municipaux.	❖ Il est primordial de <u>synthétiser, diffuser, et valoriser l'information existante</u> pertinente pour la gestion des risques auprès des municipalités et autres acteurs locaux afin de favoriser l'intégration des nouvelles connaissances dans la planification et la prise de décision. La diffusion des données la plus efficace passe par la compréhension des habitudes des usagers afin de garantir un accès facile et connu aux nouveautés.
	6. Auprès des citoyens en milieu riverain.	❖ Comme pour les acteurs municipaux, la sensibilisation auprès des citoyens est essentielle afin d'encourager les bonnes pratiques en milieu riverain. Il est clair que cela nécessite une <u>approche vulgarisée et par des moyens interactifs</u> afin que les médias choisis soient consultés et partagés. De plus, des applications considérant une approche participative citoyenne sont un moyen collectif qui pourrait également être mis en place pour rassembler des informations locales.
Formation sur les processus d'érosion et le rôle des changements climatiques	7. Envers les professionnels municipaux (directeurs généraux, urbanistes, aménagistes, techniciens en environnement, inspecteurs, etc.).	❖ Plusieurs petites municipalités ne possèdent pas ou que très peu d'expertise en gestion du risque liée à l'érosion des berges. La formation du personnel en place doit commencer par le <u>développement de protocoles et de guides complets et clairs sur l'érosion</u> adaptés au tronçon fluvial. Par la suite, des séances de formation auprès des professionnels municipaux pourront être organisées afin de mettre en application les bonnes pratiques. Ces documents permettront d'augmenter l'autonomie des municipalités par rapport aux différentes sphères gouvernementales.

8 SOMMAIRE ET CONCLUSIONS

En étant exposées à des aléas d'origines naturelle et anthropique variant au rythme des changements et des événements climatiques, les municipalités riveraines du fleuve Saint-Laurent ont besoin, afin d'augmenter leur résilience, de soutien dans le développement d'outils d'aide à la décision. En revanche, un manque de connaissances sur l'état de l'érosion et sur les processus érosifs dans le tronçon fluvial limite actuellement la prise de décisions éclairées dans les interventions à réaliser en milieu riverain. Cette étude vise donc à établir un portrait actuel et détaillé de l'aléa de l'érosion des berges dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent, et ce, dans le but d'évaluer et de réduire la vulnérabilité des communautés riveraines. Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet permettent de développer une base d'information géospatiale combinée à une analyse qualitative des processus érosifs et des facteurs environnementaux qui les contrôlent.

Les principaux résultats de cette analyse sont les suivants :

- La caractérisation des berges a permis de mettre en place un outil géospatial précis et détaillé ainsi que d'établir les fondations pour l'appréciation du risque sur l'aléa de l'érosion pour le tronçon fluvial du fleuve Saint-Laurent, et ce, afin de soutenir les communautés riveraines concernées ;
- Un bilan des connaissances avec une contribution d'observations collectées pendant la réalisation du projet a permis de produire une classification exhaustive des processus d'érosion et des facteurs environnementaux qui les contrôlent. Marquant l'ère de l'Anthropocène, les facteurs de contrôle issus de la pression humaine (p. ex. : batillage, gestion des débits, aménagements de la voie navigable, etc.) ayant cours dans l'axe le plus densément peuplé du Québec semblent dominer sur ceux d'origine naturelle et ceux reliés aux changements climatiques. Ce contexte anthropique, qui est particulièrement marqué dans le secteur amont du fleuve, s'atténue graduellement en se dirigeant vers le tronçon maritime ;
- En modulant les dynamiques hydrosédimentaires et les différents facteurs environnementaux, le climat et les activités anthropiques sont susceptibles de modifier les processus d'érosion des berges. Avec les futurs changements climatiques et une pression anthropique grandissante anticipée le long du fleuve Saint-Laurent, les berges pourraient devenir plus sensibles à l'érosion, en voyant les taux de recul s'intensifier ;
- Le développement d'une nouvelle méthodologie qualitative adaptée aux spécificités du tronçon fluvial du Saint-Laurent a permis l'établissement d'une cartographie précise et détaillée de la position du talus riverain sur 3 190 km. Les caractéristiques intrinsèques des berges ont été documentées sur la base des données géospatiales numériques à haute résolution (LiDAR et orthomosaïques) et près de 18 000 photos géolocalisées prises sur le territoire ;

- Un total de 30% (940 km) des berges démontre des signes d'érosion. En particulier, 10% (313 km) des berges semblent présenter un degré d'activité plus important, soit dans les secteurs : 1) des îles fluviales entre Montréal et le lac Saint-Pierre ; 2) des embouchures des tributaires du Saint-Laurent ; 3) des marais maritimes du chenal entre la côte de Beaupré et l'île d'Orléans ; et 4) des falaises meubles et rocheuses de l'estuaire fluvial ;
- Entre Québec et Cornwall, les berges sont artificialisées à 48% (1 540 km), soit par une majorité d'enrochement (31%, 472 km) et de remblais non protégés (28%, 431 km). La TCR du HSLGM représente à elle seule 74% (1 146 km) des berges aménagées. Pour l'ensemble des TCR, les structures sont généralement en bon état, soit pour 75% (1 144 km) du tracé ;
- En combinant les résultats des ateliers participatifs auprès des TCR avec ceux provenant de la caractérisation des berges, 251 sites vulnérables à l'érosion ont été identifiés et illustrés sous la forme de 400 fiches descriptives. Cet atlas cartographique a permis de soulever les secteurs prioritaires, où des études de suivi à moyen et long termes pourraient être réalisées dans l'avenir ;
- Des programmes préventifs et flexibles, plutôt que des mesures réactives à la suite d'événements extrêmes, devraient être adoptées afin de soutenir une gestion intégrée de l'érosion qui profiterait directement aux municipalités concernées. Les futures stratégies de gestion devraient donc (i) incorporer l'ensemble du contexte dans lequel les impacts des changements climatiques se produisent ; et (ii) inclure la prise en compte des questions pertinentes liées ou non au climat. Le mode de gestion souhaitable ne se limite pas à résoudre un problème au moyen de l'ingénierie conventionnelle, mais devrait également prendre en compte l'habitabilité et la qualité future du milieu riverain/fluvial ;
- Un manque manifeste d'outils d'aide à la décision dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent engendre plusieurs incertitudes pour les acteurs locaux et limite l'adoption de choix éclairés dans les stratégies d'intervention. Plusieurs besoins exprimés par les acteurs locaux au cours de ce projet ont été recueillis par les participants afin d'améliorer la prise de décisions dans l'aménagement en milieu riverain, mais aussi sur la compréhension du territoire afin de permettre aux résidents de mieux cohabiter avec les effets de l'érosion.

Afin de mieux prédire la vulnérabilité des berges face à l'érosion, notamment aux événements extrêmes et aux variations climatiques, il est nécessaire d'approfondir les connaissances actuelles, tout en améliorant et en mettant en place des techniques appropriées. Cette approche passerait, entre autres, par des suivis du talus riverain à plus haute résolution (intra-annuels et inter-annuels) et des études de l'hydrodynamique sur les secteurs sensibles. Les futurs projets de développement des connaissances sur la dynamique géomorphologique et les processus affectant l'évolution de ces milieux riverains dans le tronçon fluvial devront ainsi être orientés afin : 1) d'apporter une meilleure compréhension et une évaluation plus précise des risques associés aux processus d'érosion, tels que les vagues de battillage et l'impact de l'artificialisation des

berges ; 2) d'établir une base d'informations géospatiales et de connaissances scientifiques nécessaire aux choix d'aménagement du territoire (p. ex. : artificialisation, phytotechnologies, conservation, etc.) ; 3) de contribuer à l'élaboration de stratégies d'adaptation des populations riveraines face à ces environnements dynamiques dans un contexte de changements climatiques ; et 4) d'identifier des sites d'intérêt pour la conservation des milieux hydriques et humides, comme, par exemple, la restauration de rives artificialisées dont les ouvrages de protection sont inadéquats ou en fin de vie.

9 RÉFÉRENCES

Argus Groupe-Conseil, 1991. Érosion des îles du Saint-Laurent : tronçon Montréal – lac Saint-Pierre.

Argus Groupe-Conseil, 1996. Restauration naturelle des rives du Saint-Laurent entre Cornwall et l'île d'Orléans. Rapport présenté au Service canadien de la Faune, Environnement Canada.

Bégin, Y., Langlais, D., Cournoyer, L., 1991. A Dendrogeomorphic Estimate of Shore Erosion, Upper St. Lawrence Estuary, Québec. *Journal of Coastal Research* 7, 607-615.

Bernatchez, P., Dubois, J.-M.M., 2004. Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie physique et Quaternaire* 58, 45-71.

Bernatchez, P., Dubois, J.-M.M., 2008. Seasonal quantification of coastal processes and cliff erosion on fine sediment shoreline in cold temperate climate, north shore of the St. Lawrence maritime estuary, Québec. *Journal of Coastal Research* 24, 169-180.

Bhiry, N., Cloutier, D., Couillard, L., Gervais, A., Lamarre, P., Normandeau, M., Ousmane Dia, A., 2013. Évolution des hauts marais de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent et stratégies de protection des espèces en situation précaire dans une perspective de changements climatiques. Université Laval, Rapport remis au consortium Ouranos.

Biron, P.M., Choné, G., Buffin-Bélanger, T., Demers, S., Olsen, T., 2013. Improvement of streams hydro-geomorphological assessment using LiDAR DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms* 38, 1808-1821.

Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Choné, G., Cloutier, C.A., Ouellet, M.A., Demers, S., Olsen, T., Desjarlais, C., Eyquem, J., 2014. Freedom Space for Rivers: A sustainable Management Approach to Enhance River Resilience. *Environmental Management* 54, 1056-1073.

Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Massé, S., 2018. The need for river management and stream restoration practices to integrate hydrogeomorphology. *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, 62, 288-295.

Bizzi, S., Lerner, D.N., 2012. Characterizing physical habitats in rivers using map-derived drivers of fluvial geomorphic processes. *Geomorphology* 169-170, 64-73.

Bondue, V., Boyer, C., Lamothe, M., Roy, A.G. et Ghaleb, B., 2006. Évolution récente du delta de la Yamachiche (Québec) : processus naturels et impacts anthropiques. *Géographie physique et Quaternaire* 60, 289-306.

Boucher, E., Bégin, Y., Arseneault, D., 2009. Impacts of recurring ice jams on channel geometry and geomorphology in a small high-boreal watershed. *Geomorphology* 108, 273-281.

Boyer, C., Verhaar, P.M., Roy, A.G., Biron, P.M., Morin, J., 2010. Impacts of environmental changes on the hydrology and sedimentary processes at the confluence of St. Lawrence tributaries: potential effects on fluvial ecosystems. *Hydrobiologia* 647, 163-183.

Buffin-Bélanger, T., Biron, P.M., Larocque, M., Demers, S., Olsen, T., Choné, G., Ouellet, M.A., Cloutier, C.A., Desjarlais, C., Eyquem, J., 2015. Freedom space for rivers: An economically viable river management concept in a changing climate. *Geomorphology* 251, 137-148.

Carignan, R. Lorrain, S., 2000. Sediment dynamics in the fluvial lakes of the St. Lawrence River: accumulation rates and characterization of the mixed sediment layer. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57, 63-77.

Chassiot, L., Lajeunesse, P., Bernier, J.-F., Sous presse. Riverbank erosion in cold environments: review and outlooks. *Earth-Science Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103231>

Cooper, J.A.G., McKenna, J., 2008. Working with natural processes: the challenge for coastal protection strategies. *The Geographical Journal* 174, 315-331.

Cooper J.A.G., Jackson, D.W.T., 2019. Coast in Peril? A Shoreline Health Perspective. *Frontiers in Earth Science* 7, 260.

Corporation de gestion de la voie maritime du Saint-Laurent, 2019. Rapport sur le trafic de la saison de navigation de 2018. Réseau Grands Lacs – Voie maritime du Saint-Laurent, Canada.

Currin, C., Davis, J., Cowart Baron, L., Malhotra, A., 2015. Shoreline Change in the New River Estuary, North Carolina: Rates and Consequences. *Journal of Coastal Research* 31, 1069-1077.

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. Rapport final. Ministère des Transports du Québec, Service du transport maritime, Québec, QC.

Dauphin, D., Lehoux, D., 2004. Bilan de la sévérité de l'érosion dans le Saint-Laurent dulcicole (Montréal – archipel de Berthier-Sorel, incluant les Îles de la Paix) et stratégies de protection recommandées pour les rives à plus grande valeur biologique. Environnement Canada, Service canadien de la faune.

Dauphin, D., Jobin, B., 2016. Changements de l'occupation du sol dans la plaine inondable du lac Saint-Pierre entre les années 1950 et 1997. *Le Naturaliste canadien* 140, 42-52.

De Koninck, R., 2000. Les Cent-îles du lac Saint-Pierre : retour aux sources et nouveaux enjeux. Les Presses de l'Université Laval, Québec.

Department of Public Works, 1968. Shore erosion along waterways, navigation versus natural phenomena.

Desrosiers, M., Bégin, Y., 1992. Étude dendrochronologique de l'érosion associée aux crues du Saint-Laurent, Saint-Antoine-de-Tilly, Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 46, 173-180.

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, 221-250.

Dyke, A.S., 2004. An outline of the deglaciation of North America with emphasis on central and northern Canada. Dans : Ehlers J., Gibbard P.L., (Ed.), Quaternary Glaciations-Extent and Chronology, Part II: North America. Developments in Quaternary Science, Vol. 2b. Elsevier, Amsterdam, 373-424.

Écogénie inc., 2003. Projet de stabilisation de rives d'intérêt écologique sur les îles du Saint-Laurent. Tronçon entre le lac Saint-Louis et le lac Saint-Pierre. Mesures d'interventions recommandées. Rapport présenté à Environnement et Changement climatique Canada, Service canadien de la faune.

Environnement Canada, Plan d'action Saint-Laurent 2011-2026. Atlas de restauration des rives du Saint-Laurent. Observatoire global du Saint-Laurent [<https://ogsl.ca>]. Consulté le 2020-03-05.

Fei, S., Phillips, J., Shouse, M., 2014. Biogeomorphic Impacts of Invasive Species. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 45, 69-87.

Fortin, G., 2010. Variabilité et fréquence des cycles de gel-dégel dans la région de Québec, 1977-2006. The Canadian Geographer / Le Géographe canadien 54, 196-208.

Fox, G.A., Wilson, G.V., Simon, A., Langendoen, E.J., Akay, O., Fuchs, J.W., 2007. Measuring streambank erosion due to ground water seepage: correlation to bank pore water pressure, precipitation and stream stage. Earth Surface Processes and Landforms 32, 1558-1573.

Fraser, C., Bernatchez, P., 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, 1103-1125.

Frenette, M., Barbeau, C., Verrette, J.L., 1989. Aspects quantitatifs, dynamiques et qualitatifs des sédiments du Saint-Laurent. Rapport technique remis à Environnement Canada et au Gouvernement du Québec.

Gaskin, S.J., Pieterse, J., Shafie, A.A., Lepage, S., 2003. Erosion of undisturbed clay samples from the banks of the St. Lawrence River. Canadian Journal of Civil Engineering 30, 585-595.

Gatto, L.W., 1984. Reservoir bank erosion caused by ice. Cold Regions Science and Technology 9, 203-214.

Gobeil, C., Rondeau, B., Beaudin, L., 2005. Contribution of Municipal Effluents to Metal Fluxes in the St. Lawrence River. Environmental Science and Technology 39, 456-464.

Goudie A.S., Viles, H.A. 2016. Geomorphology in the Anthropocene. Cambridge University Press, Cambridge.

Hamel, V.B., Buffin-Bélanger, T., Hétu, B., 2013. Contribution à l'étude de l'érosion des berges : analyse à haute résolution spatio-temporelle des mouvements subaériens sur une berge de la rivière Ouelle, Québec, Canada. Géomorphologie : relief, processus, environnement 19, 119-132.

Heitmuller, F.T., Hudson, P.F., Asquith, W.H., 2015. Lithologic and hydrologic controls of mixed alluvial-bedrock channels in flood-prone fluvial systems: Bankfull and macrochannels in the Llano River watershed, central Texas, USA. *Geomorphology* 232, 1-19.

Henshaw, A.J., Thorne, C.R., Clifford, N.J., 2013. Identifying causes and controls of riverbank erosion in a British upland catchment. *CATENA* 100, 107-119.

Hydrotech Consultants Inc., 1985. État de connaissance et perspectives sédimentologiques des eaux douces du Québec. Hydrotech Consultants Inc., Remis à Environnement Canada et le Gouvernement du Québec.

Jugie, M., Gob, F., Virmoux, C., Brunstein, D., Tamisier, V., Le Coeur, C., Grancher, D., 2018. Characterizing and quantifying the discontinuous bank erosion of a small low energy river using Structure-from-Motion Photogrammetry and erosion pins. *Journal of Hydrology* 563, 418-434.

Lasserre, J. C., 1983. Le Saint-Laurent grande porte de l'Amérique, Cahiers du Québec, Collection Géographie, Hurtubise HMH.

Lawler, D.M., 1992. Process dominance in bank erosion systems. Dans : Carling, P., Petts, G.E. (Ed.): *Lowland Floodplain Rivers*. Wiley, Chichester, 117-159.

Lawler, D.M., 1993b. Needle ice processes and sediment mobilization on riverbanks: the River Ilston, West Glamorgan, UK. *Journal of Hydrology* 150, 81-114.

Leblanc, B., Morin, A., Roy, N., Champoux, O., Morin, J., Cantin, J.-F., 2002. Estimation du taux de recul des berges du Fleuve Saint-Laurent entre Montréal et Trois-Rivières. Rapport technique SMC Québec – Section Hydrologie RT-115, Environnement Canada, Sainte-Foy, préparé pour le Groupe de travail technique sur les processus littoraux du Groupe d'étude international sur le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent (Commission Mixte Internationale).

Lehoux, D., D. Dauphin, C. Grenier, M. Melançon et L. Lapointe 1997. Plan directeur pour la stabilisation des îles fédérales en érosion dans le tronçon Montréal-Sorel. Rapport présenté à la Garde côtière canadienne par Environnement Canada, Service canadien de la faune.

Lepage, S., Biberhofer, J., Lorrain, S., 2000. Sediment dynamics and the transport of suspended matter in the upstream area of Lake St. Francis. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57, 52-62.

Michaud, C., Bussières, E., Sarrasin, P., Lepage, S., 2015. Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Gouvernement du Québec.

Montiel-León, J. Manuel, Munoz, G., Vo Duy, S., Do, D. Tien, Vaudreuil, M., Goeury, K., Guillemette, F., Amyot, M., Sauvé, S., 2019. Widespread occurrence and spatial distribution of glyphosate, atrazine, and neonicotinoids pesticides in the St. Lawrence and tributary rivers. *Environmental pollution*, 250, 29-39.

- Morneau, F., Bourque, A., Larrivée, C., Audet, N., 2014. L'exposition des rives et des zones côtières du Saint-Laurent aux aléas hydroclimatiques. Consortium Ouranos, Rapport soumis à la Communauté métropolitaine de Québec.
- Morin, J., Leclerc, M., 1998. From pristine to present state: hydrology evolution of Lake Saint-François, St. Lawrence River. *Canadian Journal of Civil Engineering* 25, 864-879.
- Morin, J., Côté, J.P., 2003. Modifications anthropiques sur 150 ans au lac Saint-Pierre : une fenêtre sur les transformations de l'écosystème du Saint-Laurent. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* 4, 3.
- Morin, A., Roy, N., Doyon, B., Dallaire, E., 2004. Berges du fleuve Saint-Laurent de Cornwall à Trois-Rivières : profils actuels et reculs historiques des talus. Rapport technique SMC Québec – Section Hydrologie RT-131, Environnement Canada.
- Morin, S., Boucher, E., Buffin-Belanger, T., 2015. The spatial variability of ice-jam bank morphologies along the Mistassini River (Quebec, Canada): an indicator of the ice-jam regime? *Natural Hazards* 77, 2117–2138.
- Morse, B., Hessami, M., Bourel, C., 2003. Characteristics of ice in the St. Lawrence River. *Canadian Journal of Civil Engineering* 30, 766-774.
- Murgatroyd, A.L., Ternan, J.L., 1983. The impact of afforestation on stream bank erosion and channel form. *Earth Surface Processes and Landforms* 8, 357-369.
- Occhietti, S., 1990. Lithostratigraphie du Quaternaire de la vallée du Saint-Laurent : méthode, cadre conceptuel et séquences sédimentaires. *Géographie physique et Quaternaire* 44, 137-145.
- Occhietti, S., Parent, M., Lajeunesse, P., Govare, R.E., 2011. Late Pleistocene-Early Holocene decay of the Laurentide Ice Sheet in Québec-Labrador, Dans : Ehlers, J., Gibbard, P.L., Hugues, P.D. (Ed.) *Quaternary Glaciations - Extent and Chronology: A Closer Look. Development in Quaternary Science* 15, 601-630.
- Ouellet, Y., Baird, W., 1978. L'érosion des rives dans le Saint-Laurent. *Canadian Journal of Civil Engineering* 5, 311-323.
- Panasuk, S., 1987. L'érosion actuelle et récente des îles de Varennes dans la région de Montréal. Rapport présenté à l'Université du Québec à Montréal.
- Piegay, H., 2020. Learning to live with rivers, a matter of geomorphology, *Encyclopedia of the Environment* [<https://www.encycopedie-environnement.org/en/water/learning-live-with-rivers-a-matter-of-geomorphology/>]. Consulté le 2020-02-10.
- Pelletier, M., El-Fityani, T., Graham, A., Rutter, A., Michelutti, N., Zeng, D.M., Sivarajah, B., Smol, J.P., Hodson, P.V., 2016. Tracking pesticide use in the Saint Lawrence River and its ecological impacts during the World Exposition of 1967 in Montreal, Canada. *Science of The Total Environment* 572, 498-507.
- Quintin, C., Arsenault, E., 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).

Rangel-Buitrago, N., Anfuso, G., Williams, A.T., 2015. Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: magnitudes, causes and management. *Ocean and Coastal Management* 114, 129-144.

Rangel-Buitrago, N., Williams, A.T., Pranzini, E., Anfuso, G., 2018a. Preface to the special issue: Management strategies for coastal erosion processes. *Ocean and Coastal Management* 156, 1-3.

Rangel-Buitrago, N., de Jonge, V.N., Neal, W., 2018b. How to make Integrated Coastal Erosion Management a reality. *Ocean and Coastal Management* 156, 290-299.

Rangel-Buitrago, N., Williams, A.T., Anfuso, G., 2018c. Hard protection structures as a principal coastal erosion management strategy along the Caribbean coast of Colombia. A chronicle of pitfalls. *Ocean and Coastal Management* 156, 58-75.

Relevé de photographies héliportées obliques de la côte, septembre 2017 [jours 10 & 11], Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières - Université du Québec à Rimouski.

Rogers, K., Woodroffe, C.D., 2016. Geomorphology as an indicator of biophysical vulnerability of estuaries to coastal and flood hazards in a changing climate. *Journal of Coastal Conservation* 20, 127-144.

Rondeau, B., Cossa, D., Gagnon, P., Bilodeau, L., 2000. Budget and sources of suspended sediment transported in the St. Lawrence River, Canada. *Hydrological Processes* 14, 21-36.

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 présenté par Ouranos. Montréal.

Rousseau Y.Y., Biron, P.M., Van de Wiel, M.J., 2018. Comparing the Sensitivity of Bank Retreat to Changes in Biophysical Conditions between Two Contrasting River Reaches Using a Coupled Morphodynamic Model. *Water* 10, 518.

Sabourin, A., 2002. Inventaire des plantes menacées ou vulnérables des segments érodés des îles du secteur Montréal-Sorel. Rapport présenté au Service canadien de la faune, région du Québec.

Savard, J.P., Roy, P., 2014. Analyse des récurrences conjointes niveaux extrêmes et vagues pour la région de Maria. Étude complémentaire partielle dans le cadre du projet d'Analyse coût-avantage de l'adaptation des zones côtières aux changements climatiques dans le secteur Maria-Carleton. Ouranos.

Scarpa, G.M., Zaggia, L., Manfe, G., Lorenzetti, G., Parnell, K., Soomere, T., Rapaglia, J., Molinaroli, E., 2019. The effects of ship wakes in the Venice Lagoon and implications for the sustainability of shipping in coastal waters. *Scientific Reports, Nature Research* 9, 19014.

Sergy, G., 2008. The Shoreline Classification Scheme for SCAT and Oil Spill Response in Canada. Proceedings of the 31st Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar. Environment Canada, Ottawa, ON, 811-819.

Sérodès, J.B., 1980. Étude de la sédimentation intertidale de l'estuaire moyen du Saint-Laurent. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures.

Service canadien de la faune, 2003a. Plan de conservation de la Réserve nationale de faune des îles de la Paix. Environnement Canada, Service canadien de la faune, région du Québec.

Service canadien de la faune, 2003b. Plan de conservation de la Réserve nationale de faune des îles de Contrecoeur. Environnement Canada, Service canadien de la faune, région du Québec.

Simon, A., Collison, A.J.C., 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 527-546.

Schmitt, R., Bizzi, S., Castelletti, A., 2014. Characterizing fluvial systems at basin scale by fuzzy signatures of hydromorphological drivers in data scarce environments. *Geomorphology* 214, 69-83.

Thorne, C.R., 1990. Effects of vegetation on river bank erosion and stability. Dans : Thorne, J. B. (Ed.), *Vegetation and Erosion: Processes and Environments*. Wiley, New York, 125-144.

Thorne, C.R. Tovey, N.K., 1981. Stability of composite riverbanks. *Earth Surface Processes and Landforms* 6, 469-484.

Tol, R.S.J., Klein, R.J.T., Nicholls, R.J., 2008. Towards successful adaptation to sea level rise along Europe's coasts. *Journal of Coastal Research* 24, 432-442.

Turcotte, B., Morse, B., 2013. A global river ice classification model. *Journal of Hydrology* 507, 134-148.

Turcotte, B., Morse, B., Bergeron, N.E., Roy, A.G., 2011. Sediment transport in ice-affected rivers. *Journal of Hydrology* 409, 561-577.

Wallemacq, V., Petit, F., Van Campenhout, J., Houbrechts, G., 2011. Impact de la glace de ségrégation sur l'érosion des berges d'un ruisseau ardennais (la Chavanne, Belgique). *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 17, 65-82.

Williams, A.T. Rangel-Buitrago, N. Pranzini, E., Anfuso, G., 2018. The management of coastal erosion. *Ocean and Coastal Management* 156, 4-20.

Yumoto, M., Ogata, T., Matsuoka, N., Matsumoto, E., 2006. Riverbank freeze-thaw erosion along a small mountain stream, Nikko volcanic area, central Japan. *Permafrost and Periglacial Processes* 17, 325-339.

Zaggia, L., Lorenzetti, G., Manfe, G., Scarpa, G.M., Molinaroli, E., Parnell, K.E., Rapaglia, J.P., Gionta, M., Soomere, T., 2017. Fast shoreline erosion induced by ship wakes in a coastal lagoon: Field evidence and remote sensing analysis. *PLoS ONE* 12, e0187210.

10 ABRÉVIATIONS

ADCP	<i>Acoustic Doppler current profiler</i> /Profileur acoustique de vitesse par effet Doppler
CGVMSL	Corporation de Gestion de la Voie Maritime du Saint-Laurent
CMQ	Communauté métropolitaine de Québec
CMM	Communauté métropolitaine de Montréal
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
GNSS	Global Navigation Satellite System
LDGIZC	Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
MRC	Municipalité régionale de comté
MSP	Ministère de la sécurité publique
OGSL	Observatoire global du Saint-Laurent
PACC	Plan d'action sur les changements climatiques
PACES	Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines
TCR	Table de concertation régionale
TCRQC	Table de concertation régionale de Québec
TCRLSP	Table de concertation régionale du lac Saint-Pierre
TCRHSLGM	Table de concertation régionale du Haut-Saint-Laurent – Grand Montréal
TCREF	Table de concertation régionale de l'Estuaire fluvial
RTK	<i>Real-time kinematic</i> /Cinématique en temps réel
SIG	Système d'information géographique
SIGEOM	Système d'information géominière du Québec
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
UQAR	Université du Québec à Rimouski
ZIP	Zone d'intervention prioritaire

11 ANNEXE A : LÉGENDES POUR LA CARACTÉRISATION DES BERGES DU TRONÇON FLUVIAL

Tableau W : Description des champs attributaires du fichier de caractérisation des berges (remplacer le terme « berge » par le terme « côte » pour la segmentation maritime)

Champs	Description	Valeurs
Shape	Type d'entité géographique.	Polyligne
ID	Numéro unique du segment dans la base de données.	Numérique
Type_berge	Type de berge.	Voir tableau X ou EE
Etat_berge	État de la berge.	Voir tableau Y ou FF
Artificiel	Présence ou absence de structure artificielle au niveau de la berge.	Voir tableau Z ou GG
Type_artif	Type de structure artificielle au niveau de la berge.	Voir tableau AA ou HH
Etat_artif	État de la structure artificielle.	Voir tableau BB ou II
Type_depot	Type de dépôt meuble constituant le talus de la berge.	Voir tableau CC ou JJ
Type_ligne	Type de ligne numérisée.	Voir tableau DD ou KK
Longueur	Longueur du segment (en mètre).	Numérique
Commentaire	Commentaire sur le segment (au besoin).	
MRC	MRC dans laquelle se situe le segment.	
Echelle	Échelle cartographique utilisée pour la numérisation des segments.	
Source	Auteur des données.	
Imagerie	Source et date des orthophotographies ayant servi à la numérisation des segments.	
LiDAR	Source et date des données LiDAR ayant servi à la numérisation et caractérisation des segments.	
Reference	Rapport associé à la méthode du fichier numérique.	

11.1 SEGMENTATION MARITIME

11.1.1 Légende pour la TCR de Québec et de l'Estuaire fluvial (modifiée de Quintin et al., 2016)

Tableau X : Type de côte

Type_cote et description	Représentation sur le terrain
Falaise meuble (FM) Sommet d'un escarpement de dépôts non consolidés (argile, limon, sable, gravier, galet, blocs) de plus de 5 mètres de hauteur.	
Falaise meuble basse (FM-b) Sommet d'un escarpement de dépôts non consolidés (argile, limon, sable, gravier, galet, blocs) de moins de 5 mètres de hauteur.	

Falaise rocheuse (FR)

Sommet d'un escarpement de roche consolidée de plus de 5 mètres de hauteur.



Falaise rocheuse basse (FR-b)

Sommet d'un escarpement de roche consolidée de moins de 5 mètres de hauteur.



Marais maritime (MM)

Zone d'accumulation de sédiments fins colonisée par de la végétation herbacée inondée lors de la pleine mer supérieure de grande marée (limite entre schorre inférieur et supérieur).



Remblai (REM)

Sommet de talus d'un dépôt non consolidé mis en place par une intervention anthropique. L'ouvrage peut empiéter de façon horizontale sur la rive et/ou résulter en une aggradation verticale du talus naturel (protection contre les hauts niveaux d'eau).



Rocheuse sans falaise (RSF)

Roche consolidée sans falaise.



Meuble sans falaise (MSF)

Dépôt non consolidé sans falaise.



Terrasse de plage (TP)

Zone d'accumulation de dépôts non consolidés (sable et/ou de gravier littoral) formée d'un replat colonisé par de la végétation herbacée parfois inondée que lors de surcote pendant la pleine mer supérieure de grande marée. Le replat est parfois bordé sur sa partie inférieure par un talus d'érosion (microfalaise) de moins de 2 m de hauteur et sur sa partie supérieure par une falaise morte ou d'un terrain plat.



Terrasse fluviale (TF)

Banc d'accumulation situé à l'embouchure d'une rivière composé de dépôts non consolidés colonisé par de la végétation.



Canal (CAN)

Sommet d'un talus en bordure d'un cours d'eau artificiel ayant nécessité une excavation dans un dépôt non consolidé.



Type de côte associé au type de ligne « Autre »

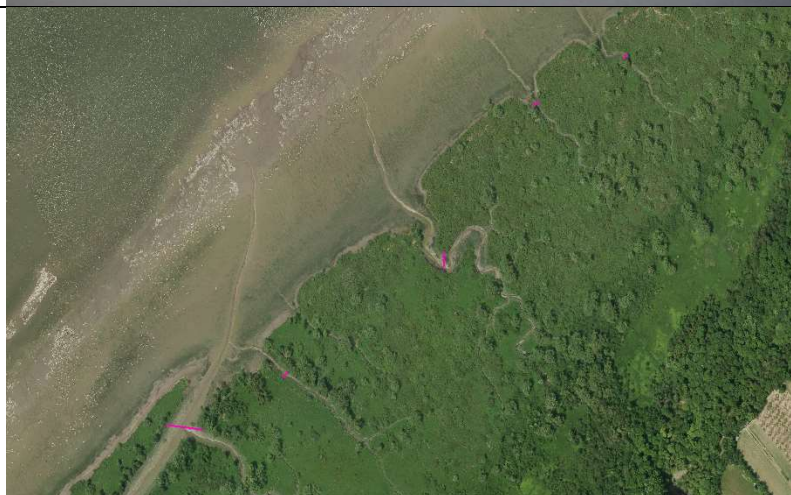
Exutoire de cours d'eau (ECE)

Segment tracé de part et d'autre des affluents du fleuve ou des drainages agricoles.



Chenal de marée (CHE)

Segment tracé de part et d'autre d'un chenal formé par le phénomène des marées (Trait rose sur l'image).



Raccordement (RAC)

Segment tracé entre les types de ligne « Sommet de l'ouvrage », « Ligne de rivage » et/ou « Sommet du talus » dont un décalage important en altitude peut avoir lieu (Trait rose sur l'image).



Tableau Y : État de la côte

Etat_cote et description	Représentation sur le terrain
Active ou vive (VIVE) Signe d'érosion apparent et/ou pour lequel le couvert végétal représente moins de 25%.	
Semi-végétalisée (SV) Signe d'érosion apparent et/ou pour lequel le couvert végétal représente 25 à 75%.	
Stable ou végétalisée (VEGE) Pas de signe d'érosion apparent, le couvert végétal représente plus de 75% ou présence d'une structure de protection.	

Accumulation (ACC)

Au niveau de la côte, signe d'accumulation sédimentaire.

Visible seulement avec des méthodes multirates (p. ex. : LiDAR) ou observations transmises par les intervenants locaux.

Non déterminée (ND)

État de la côte non déterminé.

Tableau Z : Présence d'artificialité

Artificiel	Description
Oui (O)	Segment pour lequel il y a présence d'un aménagement au niveau de la côte.
Non (N)	Segment pour lequel il y a absence d'un aménagement au niveau de la côte.
Non déterminée (ND)	Segment pour lequel la présence ou l'absence d'un aménagement au niveau de la côte est non déterminée.

Tableau AA : Type d'artificialité

Type_artif et description	Représentation sur le terrain
Rampe de mise à l'eau (RME) Segment pour lequel il y a présence d'un accès au fleuve.	

Marina (MAR)

Segment pour lequel il y a présence d'une marina.



Quai/port (QU-PO)

Segment pour lequel il y a présence d'une infrastructure portuaire avec un quai commercial ou de plaisance.



Barrage/digue (BAR-DI)

Segment pour lequel il y a présence d'un ouvrage d'art destiné à contrôler le débit d'un cours d'eau.

Non observé dans le segment de l'estuaire fluvial.

Remblai sans protection (REMSP)

Segment pour lequel il y a présence de dépôts non consolidés provenant d'une intervention anthropique sur la rive et ne comportant aucune protection supplémentaire au pied du talus artificiel.



Enrochement (ENR)

Segment pour lequel il y a un amas de blocs de pierre perméable et parallèle à la côte.



Mur de protection (MP)

Segment pour lequel il y a présence d'un mur de protection imperméable, vertical ou pseudo-vertical, parallèle à la berge et composé soit de béton, pierres, bois ou métal.



Mur de protection incliné (MPI)

Segment pour lequel il y a présence d'un mur de protection incliné et imperméable avec un angle $< 60^\circ$, parallèle à la berge et composé soit de béton, pierres, bois ou métal.



Protection mixte (PROM)

Segment pour lequel il y a une structure de protection composée de plusieurs matériaux (p. ex. : Mur de protection et enrochement à sa base).



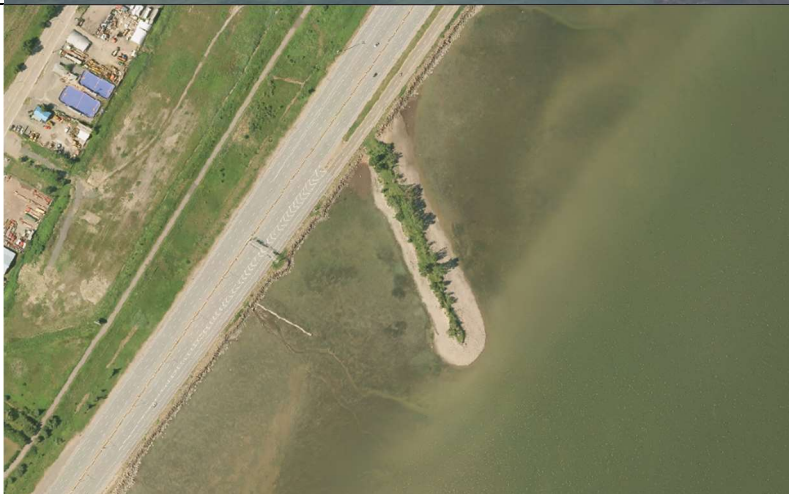
Brise-lames (BLAM)

Segment pour lequel un assemblage de pierre ou une digue de béton est érigé au large afin de réduire l'impact des vagues sur la côte.



Épi (EP)

Segment pour lequel un assemblage de pierre ou une digue de béton est érigé au large afin de freiner le transit sédimentaire de l'un côté de la structure.



Etat_artif et description	Représentation sur le terrain
Bon (B) Segment pour lequel la structure de protection ne présente aucun signe d'endommagement sur 75 % et plus de sa longueur.	
Partiellement endommagé (PE) Segment pour lequel la structure de protection est ponctuellement altérée (affaissement) sur 25 à 50 % de sa longueur.	
Très endommagé (TE) Segment pour lequel la structure de protection est altérée sur 50 à 75 % de sa longueur et ne protège plus la côte.	

Complètement endommagé (CE)

Segment pour lequel la structure de protection est altérée sur plus de 75 % de sa longueur et ne protège plus la côte.



Non déterminé (ND)

Segment pour lequel il y a présence d'une artificialité, mais dont l'état est indéterminé.

-

Non applicable (NA)

Segment pour lequel il y a absence d'une artificialité.

-

Tableau CC : Type de dépôt de surface

Type_depot et description	Représentation sur le terrain
Till (T) Dépôt hétérogranulométrique (allant des argiles aux gros blocs) et de cohésion variable mis en place par le passage de glaciers.	

Sable et gravier (SG)

Dépôt peu cohésif dont la proportion de gravier est supérieure à 25 %. Le terme gravier est pris au sens large et inclut également les éléments plus gros que 7,5 cm (ex. : grève).



Sable (S)

Dépôt peu cohésif dont la classe granulométrique est comprise entre 63 et 2000 microns (ex. : plage).



Sable limoneux ou limon sableux (SM)

Dépôt cohésif dont la composition granulométrique peut varier entre 4 et 2000 microns (ex. : alluvions)



Limon argileux ou argile limoneuse (CM)

Dépôt cohésif dont la composition granulométrique peut varier entre 0,25 et 63 microns (ex. : argile marine).



Remblai (REM)

Dépôt hétérogranulométrique (allant des argiles aux gros blocs) et peu cohésif mis en place par une intervention anthropique. L'origine du dépôt peut être autochtone ou allochtone.



Roc (R)

Absence de dépôt meuble avec une épaisseur supérieure à 50 cm.



Tableau DD : Description des types de ligne

Type_ligne	Description
Traits primaires : Traits numérisés au 1:600 comportant les caractéristiques incluses dans les tableaux B à G qui sont essentielles pour comprendre l'évolution spatio-temporelle de la côte.	
Sommet du talus (SMT)	Cette limite géomorphologique correspond au sommet du talus côtier. C'est la limite de la zone d'influence des processus côtiers, la limite entre la côte et l'arrière-côte. Dans les marais maritimes, il s'agit de l'arrière du schorre supérieur, soit lorsque la végétation devient terrestre. Pour les besoins des mesures d'évolution et pour la caractérisation des côtes, cela correspond également au sommet d'un ouvrage de protection rigide, bien que dans ce dernier cas, les processus côtiers puissent affecter les terrains situés en arrière de l'ouvrage anthropique lors des tempêtes.
Ligne de rivage (LR)	Cette limite géomorphologique correspond à la limite de végétation herbacée dense, à la base d'un ouvrage de protection rigide ou à la base d'une falaise. Elle correspond approximativement à la limite des hautes mers maximales/pleines mers supérieures de grandes marées. Pour les marais maritimes, la ligne de rivage correspond à la limite entre le schorre supérieur et inférieur, soit approximativement le niveau moyen des hautes mers/pleines mers supérieures de marées moyennes.
Sommet de l'ouvrage (SO)	Trait correspondant au sommet d'une structure ou d'un aménagement riverain.
Traits complémentaires : Traits d'utilisation secondaire numérisés au 1:2000 contenant qu'une caractérisation partielle indiquée dans le champ « Type de côte » et non compris dans le calcul des statistiques sur l'érosion.	
Base du talus à l'arrière (BT)	Trait correspondant à un bas de talus à moins de 200 mètres du trait primaire.
Sommet du talus à l'arrière (ST)	Trait correspondant à un haut de talus à moins de 200 mètres du trait primaire.
Sommet de l'ouvrage à l'arrière (SOA)	Trait correspondant à un sommet d'ouvrage à moins de 200 mètres du trait primaire.
Autre (AU)	Trait correspondant à un raccord entre des segments éloignés qui ne comportent pas de berge entre les deux entités.

11.2 SEGMENTATION FLUVIALE

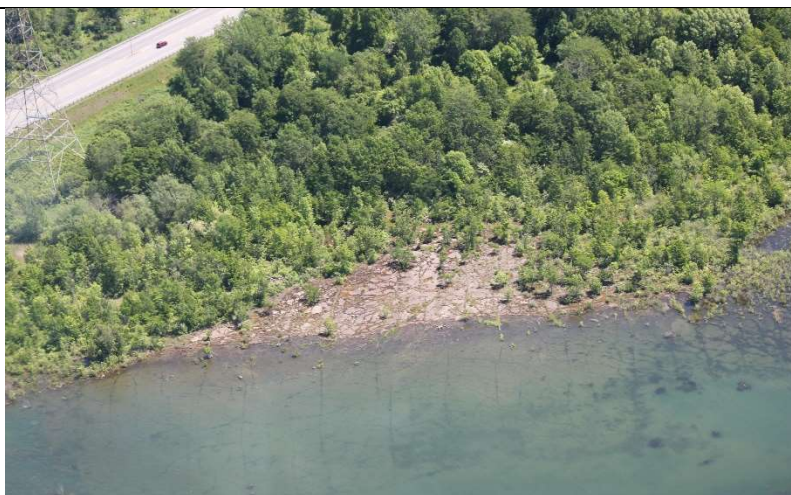
11.2.1 Légende pour la TCR du lac Saint-Pierre et du Haut-Saint-Laurent et Grand-Montréal

Tableau EE : Type de berge

Type_berge et description	Représentation sur le terrain
Meuble (M) Sommet de talus d'une terrasse alluviale composé de dépôts non consolidés de moins de 5 mètres de hauteur.	
Meuble haute (M-h) Sommet de talus d'une terrasse alluviale composé de dépôts non consolidés de plus de 5 mètres de hauteur.	

Rocheuse sans escarpement (RSE)

Berge de roc sans escarpement.



Meuble sans escarpement (MSE)

Berge meuble sans escarpement.

Non observé dans le segment fluvial.

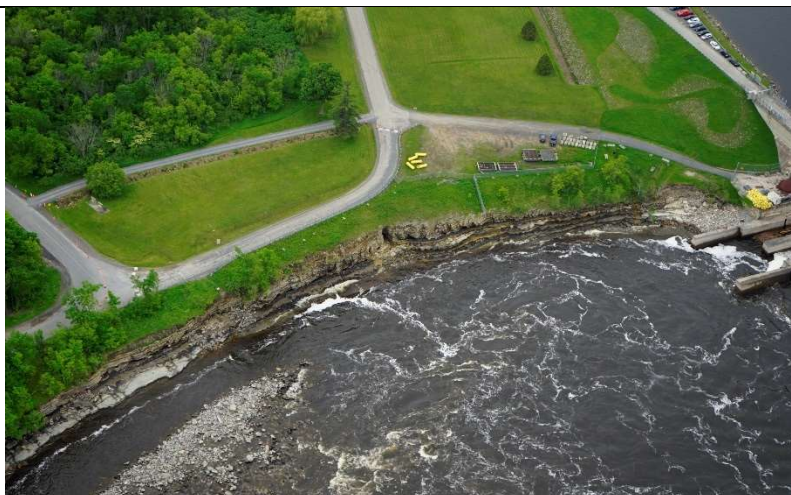
Escarpement rocheux (ER)

Sommet d'un versant de roc consolidé de moins de 5 mètres de hauteur.

Non observé dans le segment fluvial.

Escarpement rocheux haut (ER-h)

Sommet d'un versant de roc consolidé de plus de 5 mètres de hauteur.



Milieu humide riverain (MHR)

Zone de transition écologique (écotone) à faible pente colonisée par de la végétation arborescente ou arbustive ainsi qu'inondée lors de certains épisodes de crues. Le milieu humide a généralement une limite morphologique diffuse, mais est parfois bordé d'un talus d'érosion de moins de 2 m de hauteur.



Remblai (REM)

Sommet de talus d'un dépôt non consolidé mis en place par une intervention anthropique. L'ouvrage peut empiéter de façon horizontale sur la rive et/ou résulter en une aggradation verticale de la berge naturelle (protection contre les hauts niveaux d'eau).



Canal (CAN)

Sommet d'un talus en bordure d'un cours d'eau artificiel ayant nécessité une excavation dans un dépôt non consolidé.



Type de berge associé au type de ligne « Autre »

Exutoire de cours d'eau (ECE)

Segment tracé de part et d'autre des affluents du fleuve ou des drainages agricoles (Trait rose sur l'image).



Raccordement (RAC)

Segment tracé entre les types de ligne « Sommet de l'artificialité » et/ou « Trait de berge » dont un décalage important en altitude peut avoir lieu (Trait rose sur l'image).



Tableau FF : État de la berge

Etat_berge et description	Représentation sur le terrain
Active ou vive (VIVE) Signe d'érosion apparent et/ou pour lequel le couvert végétal représente moins de 25%.	
Semi-végétalisée (SV) Signe d'érosion apparent et/ou pour lequel le couvert végétal représente 25 à 75%.	
Stable ou végétalisée (VEGE) Pas de signe d'érosion apparent, le couvert végétal représente plus de 75% ou présence d'une structure de protection.	

Accumulation (ACC)

Au niveau de la berge, signe d'accumulation sédimentaire.

Visible seulement avec des méthodes multirates (p. ex. : LiDAR) ou observations transmises par les intervenants locaux.

Non déterminée (ND)

État de la berge non déterminé.

Tableau GG : Présence d'artificialité

Artificiel	Description
Oui (O)	Segment pour lequel il y a présence d'un aménagement au niveau de la berge.
Non (N)	Segment pour lequel il y a absence d'un aménagement au niveau de la berge.
Non déterminée (ND)	Segment pour lequel la présence ou l'absence d'un aménagement au niveau de la berge est non déterminée.

Tableau HH : Type d'artificialité

Type_artif et description	Représentation sur le terrain
Rampe de mise à l'eau (RME) Segment pour lequel il y a présence d'un accès au fleuve.	

Marina (MAR)

Segment pour lequel il y a présence d'une marina.



Quai/port (QU-PO)

Segment pour lequel il y a présence d'une infrastructure portuaire avec un quai commercial ou de plaisance.



Barrage/digue (BAR-DI)

Segment pour lequel il y a présence d'un ouvrage d'art destiné à contrôler le débit d'un cours d'eau.



Remblai sans protection (REMS)

Segment pour lequel il y a présence de dépôts non consolidés provenant d'une intervention anthropique sur la rive et ne comportant aucune protection supplémentaire au pied du talus artificiel.



Enrochement (ENR)

Segment pour lequel il y a un amas de blocs de pierre perméable et parallèle à la berge.



Mur de protection (MP)

Segment pour lequel il y a présence d'un mur de protection imperméable, vertical ou pseudo-vertical, parallèle à la berge et composé soit de béton, pierres, bois ou métal.



Mur de protection incliné (MPI)

Segment pour lequel il y a présence d'un mur de protection incliné et imperméable avec un angle $< 60^\circ$, parallèle à la berge et composé soit de béton, pierres, bois ou métal.



Protection mixte (PROM)

Segment pour lequel il y a une structure de protection composée de plusieurs matériaux (p. ex. : Mur de protection et enrochement à sa base).



Brise-lames (BLAM)

Segment pour lequel un assemblage de pierre ou une digue de béton est érigé au large afin de réduire l'impact des vagues sur la berge.



Épi (EP)

Segment pour lequel un assemblage de pierre ou une digue de béton est érigé au large afin de freiner le transit sédimentaire de l'un côté de la structure.



Canal à berges meubles (CBM)

Segment pour lequel il y a présence d'un canal dont la berge non protégée correspond encore au dépôt meuble local.



Canal à protection rigide (CPR)

Segment pour lequel il y a présence d'un canal dont la berge a été protégée par une structure rigide (L'artificialité est définie dans les commentaires).



Non déterminé (ND)

Segment pour lequel il y a présence d'une structure de protection, mais dont le type est indéterminé.

Non applicable (NA)

Segment pour lequel il y a absence d'une structure de protection.

Tableau II : État de l'artificialité

Etat_artif et description	Représentation sur le terrain
Bon (B) Segment pour lequel la structure de protection ne présente aucun signe d'endommagement sur 75 % et plus de sa longueur.	
Partiellement endommagé (PE) Segment pour lequel la structure de protection est ponctuellement altérée (affaissement) sur 25 à 50 % de sa longueur.	

Très endommagé (TE)

Segment pour lequel la structure de protection est altérée sur 50 à 75 % de sa longueur et ne protège plus la berge.

**Complètement endommagé (CE)**

Segment pour lequel la structure de protection est altérée sur plus de 75 % de sa longueur et ne protège plus la berge.

**Non déterminé (ND)**

Segment pour lequel il y a présence d'une artificialité, mais dont le l'état est indéterminé.

-

Non applicable (NA)

Segment pour lequel il y a absence d'une artificialité.

-

Tableau JJ : Type de dépôt de surface

Type_depot et description	Représentation sur le terrain
Till (T) Dépôt hétérogranulométrique (allant des argiles aux gros blocs) et de cohésion variable mis en place par le passage de glaciers.	
Sable et gravier (SG) Dépôt peu cohésif dont la proportion de gravier est supérieure à 25 %. Le terme gravier est pris au sens large et inclut également les éléments plus gros que 7,5 cm (ex. : grève).	
Sable (S) Dépôt peu cohésif dont la classe granulométrique est comprise entre 63 et 2000 microns (ex. : plage).	

Sable limoneux ou limon sableux (SM)

Dépôt cohésif dont la composition granulométrique peut varier entre 4 et 2000 microns (ex. : alluvions).



Limon argileux ou argile limoneuse (CM)

Dépôt cohésif dont la composition granulométrique peut varier entre 0,25 et 63 microns (ex. : argile marine).



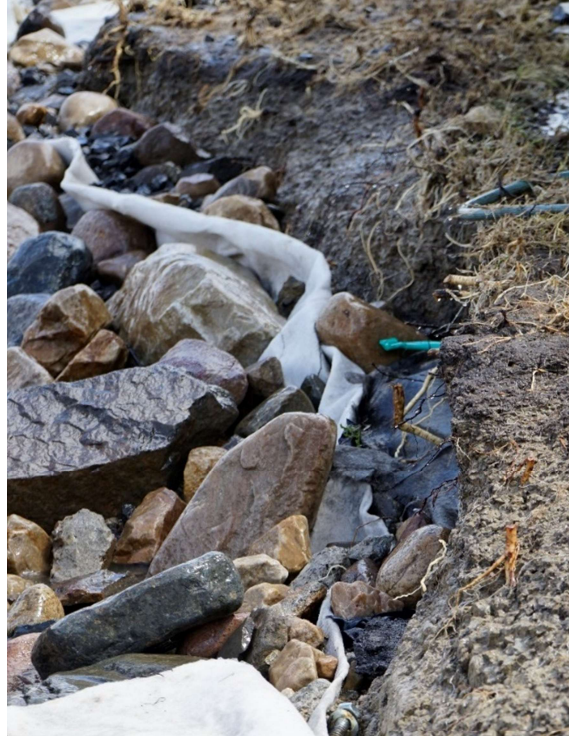
Matière organique (MO)

Dépôt dont l'origine est majoritairement organique (p. ex. : tourbière).



Remblai (REM)

Dépôt hétérogranulométrique (allant des argiles aux gros blocs) et peu cohésif mis en place par une intervention anthropique. L'origine du dépôt peut être autochtone ou allochtone.



Roc (R)

Absence de dépôt meuble avec une épaisseur supérieure à 50 cm.



Tableau KK : Description des types de ligne

Type_ligne	Description
Traits primaires : Traits numérisés au 1:600 comportant les caractéristiques incluses dans les tableaux B à G qui sont essentielles pour comprendre l'évolution spatio-temporelle de la berge.	
Trait de berge (TB)	Cette limite géomorphologique correspond au sommet du talus du lit mineur d'un cours d'eau, soit la limite avant que l'eau déborde dans la plaine d'inondation. D'ailleurs, cette morphologie fluviale résulte en grande partie des successions d'épisodes de débit plein bord (récurrence moyenne de 2 ans), c'est-à-dire, le débit que peut supporter le lit mineur. Par contre, en raison de pentes très faibles (< 1 %), l'identification d'un haut de talus pour certains segments riverains (p. ex. : milieux humides) n'est pas toujours possible. Pour ces exceptions, le trait de berge correspond à la limite entre la végétation à prédominance aquatique et à prédominance terrestre (Ligne des hautes eaux ou devant les zones marécageuses) également associée à une récurrence 2 ans.
Sommet de l'ouvrage (SO)	Trait correspondant au sommet d'une structure ou d'un aménagement riverain.
Traits complémentaires : Traits d'utilisation secondaire numérisés au 1:2000 contenant qu'une caractérisation partielle indiquée dans le champ « Type de berge » et non compris dans le calcul des statistiques sur l'érosion.	
Milieu humide protecteur (MH)	Ce trait est associé à un milieu humide riverain au pied d'un talus servant de protection naturelle (atténuateur de vagues) à la berge. Cependant, l'identification de cette limite, souvent associée à un marais herbacé, peut être très variable selon le niveau de l'eau sur l'orthophotographie utilisée pour la numérisation.
Base du talus à l'arrière (BT)	Trait correspondant à un bas de talus à moins de 200 mètres du trait primaire.
Sommet du talus à l'arrière (ST)	Trait correspondant à un haut de talus à moins de 200 mètres du trait primaire.
Sommet de l'ouvrage à l'arrière (SOA)	Trait correspondant à un sommet d'ouvrage à moins de 200 mètres du trait primaire.
Autre (AU)	Trait correspondant à un raccord entre des segments éloignés qui ne comportent pas de berge entre les deux entités.

12 ANNEXE B : BASE DE DONNÉES GÉOSPATIALES

La base de données géospatiales est transmise en pièce jointe au présent rapport.

Voici la liste des différents documents y prenant part :

- Un projet MXD regroupant une géodatabase fichier (GDB) pour chaque TCR nommée « CaractBerges_TCRXX_UL_Mars2020.gdb » et pouvant être intégrée dans un SIG (p. ex. : ArcGIS). À titre d'exemple, la GDB de la TCREF contient les fichiers SHP suivants :
 - Seg_cote_TCREF_UL_Mars2020 : contient la caractérisation des traits primaires de la TCREF ;
 - Seg_comp_TCREF_UL_Mars2020 : contient la caractérisation des traits complémentaires de la TCREF ;
 - Sites_sensibles_TCREF_UL_Mars2020 : contient la caractérisation des sites sensibles de la TCREF ;
 - Limite_TCREF : Limites administratives de la TCREF.
- Un total de 18 000 photos prises sur le terrain, dont la majorité est géolocalisée ;
- Un fichier KMZ (CaractBerges_TCRXX_UL_Mars2020) pour chaque TCR utilisable dans *Google Earth* afin d'avoir un accès rapide et interactif aux données de caractérisation des berges ainsi qu'aux fiches des sites vulnérables ;
- Un index Access exposant les rapports publics et les données géospatiales ayant été rendus disponibles pour le présent projet.

13 ANNEXE C : FICHES QUALITATIVES IMAGÉES DES SITES VULNÉRABLES À L'ÉROSION

L'ensemble des fiches est transmis en pièce jointe au présent rapport.

Glossaire pour les termes apparaissant sur les fiches et à joindre à celles-ci.

Terme	Définition
Type de berge associé au segment	
Pour les définitions des types de berges, consultez le rapport de Bernier et al., 2020.	
Type d'artificialité	
Marina	Segment pour lequel il y a présence d'une marina.
Barrage - Digue	Segment pour lequel il y a présence d'un ouvrage d'art destiné à contrôler le débit d'un cours d'eau.
Brise-lame	Segment pour lequel un assemblage de pierre ou une digue de béton est érigé au large afin de réduire l'impact des vagues sur la côte.
Épi	Segment pour lequel un assemblage de pierre ou une digue de béton est érigé au large afin de freiner le transit sédimentaire de l'un côté de la structure.
Quai - Port	Segment pour lequel il y a présence d'une infrastructure portuaire avec un quai commercial ou de plaisance.
Canal	Segment pour lequel il y a présence d'un canal dont la côte non protégée correspond encore au dépôt meuble local ou la berge a été protégée par une structure rigide (L'artificialité est définie dans les commentaires).
Rampe de mise à l'eau	Segment pour lequel il y a présence d'un accès au fleuve.
Enrochement	Segment pour lequel il y a un amas de blocs de pierre perméable et parallèle à la côte.
Mur de protection	Segment pour lequel il y a présence d'un mur de protection imperméable, vertical ou pseudo-vertical, parallèle à la berge et composé soit de béton, pierres, bois ou métal.
Mur de protection incliné	Segment pour lequel il y a présence d'un mur de protection incliné et imperméable avec un angle $< 60^\circ$, parallèle à la berge et composé soit de béton, pierres, bois ou métal.
Protection mixte	Segment pour lequel il y a une structure de protection composée de plusieurs matériaux (p. ex. : Mur de protection et enrochement à sa base)
Remblai sans protection	Segment pour lequel il y a présence de dépôts non consolidés provenant d'une intervention anthropique sur la rive et ne comportant aucune protection supplémentaire au pied du talus artificiel.

État de l'artificialité	
Bon	Segment pour lequel la structure de protection ne présente aucun signe d'endommagement sur 75 % et plus de sa longueur.
Partiellement endommagé	Segment pour lequel la structure de protection est ponctuellement altérée (affaissement) sur 25 à 50 % de sa longueur.
Très endommagé	Segment pour lequel la structure de protection est altérée sur 50 à 75 % de sa longueur et ne protège plus la côte.
Complètement endommagé	Segment pour lequel la structure de protection est altérée sur plus de 75 % de sa longueur et ne protège plus la côte.
N/A	Segment pour lequel il y a absence d'une artificialité.
Processus dominants	
Action des courants	Processus se référant aux variations des niveaux d'eau (p. ex. : période de crue ou d'étiage).
Action des glaces	Processus se référant aux mouvements des glaces lors d'un embâcle ou d'une débâcle (p. ex. : arrachement de sédiments ou dégradation du cadre bâti par la glace).
Action des vagues	Processus se référant aux vagues liées à de forts vents de tempêtes ou d'orages (p. ex. : effet de surverse ou submersion).
Ruissellement	Processus se référant au ravinement créé par l'eau sur le talus riverain.
Mouvements gravitaires	Processus se référant aux déplacements de matériaux induits par la gravité (p. ex. : glissement de terrain).
Aménagements riverains anthropiques	Processus se référant aux aménagements causant des effets de bout ou du coincement côtier (p. ex. : murs, enrochements, etc.).
Effets des barrages et gestion du débit	Processus se référant aux changements hydrodynamiques engendrés par un ouvrage d'art (p. ex. : ouverture de vannes d'un barrage).
Batillage	Processus se référant à la création de vagues due aux passages des navires commerciaux ou des embarcations de plaisance.
Cycles de gel-dégel	Processus se référant aux variations de température qui affectent les infiltrations d'eau dans le sol (p. ex. : l'expansion lors du gel affaiblit les dépôts).
Dessiccation des argiles	Processus se référant aux cycles d'humidification des argiles causant des fissures.
Type de dépôts	
Roc	Absence de dépôt meuble avec une épaisseur supérieure à 50 cm.
Till	Dépôt hétérogranulométrique (allant des argiles aux gros blocs) et de cohésion variable mis en place par le passage de glaciers.

Sable et gravier	Dépôt peu cohésif dont la proportion de gravier est supérieure à 25 %. Le terme gravier est pris au sens large et inclut également les éléments plus gros que 7,5 cm (p. ex. : grève).
Sable	Dépôt peu cohésif dont la classe granulométrique est comprise entre 63 et 2000 microns (p. ex. : plage).
Sable limoneux	Dépôt cohésif dont la composition granulométrique peut varier entre 4 et 2000 microns (p. ex. : alluvions)
Argile limoneuse	Dépôt cohésif dont la composition granulométrique peut varier entre 0,25 et 63 microns (p. ex. : argile marine).
Organique	Dépôt dont l'origine est majoritairement organique (p. ex. : tourbière).
Remblai	Dépôt hétérogranulométrique (allant des argiles aux gros blocs) et peu cohésif mis en place par une intervention anthropique. L'origine du dépôt peut être autochtone ou allochtone.