



Analyse de la dynamique du bois mort en rivière dans le contexte d'un démantèlement
majeur de 1,5 km sur la rivière Saint-Jean, Gaspé

Par Antoine Carpentier

Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.) en ressources renouvelables

Québec, Canada

© Antoine Carpentier, 2023

RÉSUMÉ

Sur la rivière Saint-Jean, les volumes de bois mort en rivière sont importants, la quantité de bois transportée annuellement semble être en hausse depuis les premières observations terrain. À l'hiver 2015, un embâcle de 1,5 km est démantelé dans le chenal principal du delta, ce qui amène un retour à l'écoulement normal dans le chenal principal. Ce démantèlement est l'un des plus imposants dans le monde et les impacts d'un tel démantèlement ne sont pas encore connus.

L'objectif général de ce projet de maîtrise est d'analyser la dynamique du bois mort en rivière sur la rivière Saint-Jean avant et après un démantèlement majeur. Cet objectif permettra aux gestionnaires de cours d'eau de gérer les embâcles d'une manière durable et d'appliquer le juste milieu entre la sécurité publique et la santé des écosystèmes. Ce projet aura aussi comme objectif de caractériser les changements hydrogéomorphologiques (HGM) et de quantifier les impacts d'un démantèlement.

Sur les 121 kilomètres de la rivière Saint-Jean, 60 kilomètres où une dynamique du bois en rivière est présente ont été étudiés en recensant et mesurant l'ensemble des embâcles et bois morts individuels se trouvant dans la zone du lit mineur. Deux campagnes de terrain ont été réalisées à l'été 2019 et 2020 pour décrire la distribution spatiale du bois mort et sa mobilité interannuelle. Aussi, la dynamique hydrogéomorphologique du corridor fluvial de la rivière Saint-Jean a été analysée (trajectoire hydrologique et hydrogéomorphologique : débits, largeur active du chenal, secteurs en érosion, superficie des bancs d'accumulation, relevés DGPS, profil en long) à l'aide d'images aériennes, d'orthophotographies et des données de projets de recherche antérieurs (2010 à 2016). La comparaison des trajectoires HGM a permis de quantifier les modifications morphologiques sur l'ensemble de la rivière pour la période 1960 à aujourd'hui.

L'étude montre le rôle de la composition et de la localisation des embâcles sur les paramètres hydrogéomorphologiques du chenal. Avec des périodes de crues soudaines plus importantes d'années en année le volume de bois transporté sur la rivière est important et joue un rôle

dans la formation de nouveaux embâcles dans l'embouchure malgré le démantèlement majeur de l'hiver 2015. La distribution des embâcles est fortement influencée par le style fluvial du cours d'eau, puisque la majorité des embâcles sont situés dans les zones semi-alluviales et à méandres du corridor fluvial. Finalement, depuis le démantèlement de l'embâcle majeur dans l'embouchure, des changements morphologiques ont été mesurés sur la rivière Saint-Jean, surtout dans le delta et sur la portion de deux kilomètres en amont de ce secteur. Ces changements incluent une avulsion au kilomètre 1,5 de l'embouchure, d'une uniformisation du lit de la rivière et d'une hausse des superficies de bancs d'accumulation. On peut constater que l'embâcle démantelé de 2015 est en train de se recréer depuis 2017 en raison des crues importantes de 2017, 2018, et de décembre 2020.

Mots clés : Dynamique du bois mort en rivière, hydrogéomorphologie, embâcles de bois mort, démantèlement, trajectoire hydrogéomorphologique, dynamique estuarienne

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
REMERCIEMENTS	ii
1. INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 L'émergence et l'importance des études sur le bois mort en rivière.....	1
1.2 Problématique propre à la rivière Saint-Jean	5
1.3 OBJECTIFS.....	10
2. NOTIONS D'HYDROGÉOMORPHOLOGIE.....	11
2.1 La dynamique hydrogéomorphologique	11
2.2 Dynamique des rivières graveleuses	16
2.2.1 Mobilité sédimentaire.....	18
2.3 Dynamique estuarienne et deltaïque	19
2.4 Dynamique du bois en rivière et hydrogéomorphologie	21
2.4.1 Les types d'embâcles sur un cours d'eau	21
2.4.2 Impact d'un embâcle sur la morphologie du cours d'eau	22
2.5 Le bilan ligneux	28
2.5.1 Recrutement du bois en rivière	30
2.5.2 Transport du bois de rivière	31
2.5.3 Accumulation de bois en rivière	33
2.6 L'impact d'un démantèlement	35
3. MÉTHODOLOGIE.....	39
3.1 Site à l'étude	39
3.2 Les données sur la dynamique spatio-temporelle du bois en rivière.....	44
3.2.1 Localisation et progression de l'embâcle du delta dans le chenal principal sud.....	46
3.3 L'analyse hydrogéomorphologique	49
3.3.1 Analyse de débits	49
3.3.2 Géoréférencement des photographies aériennes	51

3.3.3 Trajectoire hydrogéomorphologique.....	53
3.4 Changements morphologiques dans l’embouchure.....	58
4. RÉSULTATS	62
4.1 La dynamique du bois mort sur la rivière Saint-Jean.....	62
4.1.1 La distribution des embâcles dans le chenal sud du delta selon les années	71
4.2 Les changements hydrogéomorphologiques avant et après le démantèlement	74
4.2.1 Évolution des débits	74
4.2.2 La trajectoire hydrogéomorphologique.....	77
4.3 Changements morphologiques dans l’embouchure après le démantèlement	82
5. DISCUSSION	88
5.1 La dynamique du bois mort dans la rivière Saint-Jean	88
5.1.1 Évolution des volumes de bois accumulés par tronçons	89
5.1.2 L’Évolution interannuelle du bois mort sur le profil en long de la rivière Saint-Jean	95
5.1.3 La distribution et la progression de l’embâcle dans le chenal principal sud du delta selon les années	97
5.2 Les changements hydromorphologiques avant et après le démantèlement sur l’ensemble de la rivière	102
5.3 Les impacts du démantèlement avant et après dans le delta de la rivière Saint-Jean.....	109
6. CONCLUSION GÉNÉRALE.....	114
7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	117
ANNEXE 1	128
ANNEXE 2	129

LISTE DES FIGURES

Figure 1. a) Image satellite de l’embouchure de la rivière Saint-Jean avec l’embâcle en 2013 et; b) Image satellite de l’embouchure après le démantèlement de 2015 (©Antoine Carpentier, 2021).....	9
Figure 2. L’interaction entre les composantes de la dynamique fluviale et les échelles d’analyse, inspirée par les travaux de Leeder (adapté de Leeder, 1983).....	12
Figure 3. Classification des différents styles fluviaux selon Church (adapté de Church, 2006).....	14
Figure 4. a) Substrat rocheux d’une berge de la rivière Saint-Jean, b) Exemple d’un banc d’accumulation (©Antoine Carpentier, 2021)	17
Figure 5. Typologie des embâcles de bois en rivière (adapté de Abbe et Montgomery, 2003).....	22
Figure 6. Représentation d’un embâcle situé dans le chenal avec un morceau clé. a) Vue en plan de l’embâcle, b) vue en coupe de l’embâcle (adaptée de Abbe et Montgomery, 2003)	24
Figure 7. a) Schéma d’un embâcle situé dans un méandre, vue de haut, b) coupe longitudinale de l’embâcle dans un méandre, c) exemple d’un embâcle de la rivière Saint-Jean situé sur la berge concave d’un méandre (adaptée de Abbe et Montgomery, 2003).....	25
Figure 8. Profondeur des fosses liées aux embâcles et les fosses créées naturellement (traduite de Abbe et Montgomery, 1996).....	26
Figure 9. a) L’érosion de la berge opposée due à une hausse de la vitesse du courant en raison de la présence d’un embâcle perpendiculaire au courant b) Réduction du courant près d’un embâcle parallèle au cours d’eau qui protège la berge de l’érosion (©Antoine Carpentier).....	27
Figure 10. Représentation des composantes de la dynamique du bois en rivière sur l’ensemble d’un bassin versant. Vp : volume produit, Vt: volume transporté, Va : volume accumulé, Ve : Volume exporté (adapté de Boivin et Buffin-Bélanger, 2010)	29
Figure 11. Exemple de l’érosion des berges et du manque de support de la berge sur l’arbre qui tombe vers le chenal (©Antoine Carpentier, 2021)	31
Figure 12. Embâcle total sur le chenal principal de la rivière Saint-Jean en 2013 (adaptée de Google Earth, 2021).....	34
Figure 13. La biomasse totale des saumons selon le volume des fosses sur la rivière Musqueam et Cuthroat en 1990 (traduit de Fausch et Northcote, 1992)	36
Figure 14. Localisation du bassin versant de la rivière Saint-Jean et du corridor fluvial étudié de 60 kilomètres de long (©Antoine Carpentier, 2021).....	41
Figure 15. Localisation des trois styles fluviaux : a) Secteur amont (60-30) avec un style alluvial avec méandres, b) Secteur médian (30-10) avec un style linéaire semi-alluvial, c) Secteur aval avec style semi-alluvial avec méandres; Secteur du delta avec style anastomosé (©Antoine Carpentier, 2021)	42
Figure 16. Exemples d’embâcles majeurs bloquant un chenal sur la rivière Saint-Jean (©Antoine Carpentier, 2021)	43
Figure 17. Représentation de la mesure d’un embâcle sur le terrain (©Antoine Carpentier, 2020) ..	46

Figure 18. a) L'embâcle qui obstrue le chenal principal sud dans le delta, b) La jonction entre les deux chenaux qui accueille le bois mort qui sera transporté lors des crues, c) Localisation des embâcles a et b sur l'ensemble du delta de la rivière Saint-Jean (©Antoine Carpentier, 2021)	48
Figure 19. Relation entre les débits de la York et de la Saint-Jean (adapté de Boivin, 2016).....	50
Figure 20. Projection des débits spécifiques de la rivière Saint-Jean (©Antoine Carpentier, 2021)	50
Figure 21. Localisation du tronçon géoréférencé de 2017 à 2019, a) l'orthophotographie de 2016 qui a servi de référence, b) géoréférencement de 2017, c) géoréférencement de 2019 (©Antoine Carpentier, 2021)	53
Figure 22. Représentation du tracé selon le niveau plein bord (©Antoine Carpentier, 2021)	54
Figure 23. Quantification des superficies érodées a) superposition des tracés de 2004 et 2013, b) identification des surfaces érodées (©Antoine Carpentier, 2021)	56
Figure 24. Différence entre les surfaces des bancs d'accumulation de la rivière Saint-Jean entre 2013 et 2016 (©Antoine Carpentier, 2021)	58
Figure 25. Exemple des relevés topographiques au DGPS de 2020 sur un secteur de la rivière Saint-Jean (©Antoine Carpentier, 2021)	60
Figure 26. Exemple du LiDAR de 2016 utilisé pour le Digital Elevation Model of Difference (DoD) (©Antoine Carpentier, 2021)	61
Figure 27. Volume d'embâcles de bois selon le secteur et au total. (©Antoine Carpentier, 2021) ..	63
Figure 28. Évolution longitudinale cumulée du volume de bois (m ³) dans les embâcles sur l'ensemble de la rivière étudiée (©Antoine Carpentier, 2021).....	63
Figure 29. Évolution longitudinale cumulée du volume de bois (%) dans les embâcles sur l'ensemble de la rivière étudiée (©Antoine Carpentier, 2021).....	64
Figure 30. Dimension des embâcles de bois selon le secteur, a) 2019, b) 2020 (©Antoine Carpentier, 2021)	66
Figure 31. Distribution des embâcles en 2019 selon leur volume en m ³ (©Antoine Carpentier, 2021)	69
Figure 32. Distribution des embâcles en 2020 selon leur volume en m ³ (©Antoine Carpentier, 2021)	70
Figure 33. Évolution de l'embâcle principal dans le chenal sud, a) croisement des deux chenaux, b) embâcle majeur (©Antoine Carpentier, 2021).....	72
Figure 34. Démantèlement manuel de 2017 et le secteur démantelé en 2018 (©Antoine Carpentier, 2021)	73
Figure 35. Superficie cumulée (m ³) de l'embâcle dans le delta (©Antoine Carpentier, 2021)	74
Figure 36. Débit standardisé sur la rivière Saint-Jean (©Antoine Carpentier, 2021)	75
Figure 37. Les précipitations en pluie (mm) sur la rivière Saint-Jean (©Antoine Carpentier, 2021)	76
Figure 38. Largeur moyenne du chenal (en m) selon les années pour chaque tronçon de 10 kilomètres (©Antoine Carpentier, 2021).....	78
Figure 39. Médiane de la largeur selon les années et pour chaque tronçon de 10 kilomètres (©Antoine Carpentier, 2021).....	78
Figure 40. Somme des superficies des bancs d'accumulation par secteur (©Antoine Carpentier, 2021)	79
Figure 41. a) Taux d'érosion en m ² par année pour les trois secteurs, b) Taux d'érosion en m ² par année par kilomètre de rivière (©Antoine Carpentier, 2021).....	80
Figure 42. L'indice de sinuosité selon les secteurs (©Antoine Carpentier, 2021)	82

Figure 43. Profil de la rivière en 2016 et 2020 (©Antoine Carpentier, 2021)	84
Figure 44. Différences d'altitude de la surface de l'eau sur la rivière entre 2012 et 2016 (©Antoine Carpentier, 2021)	85
Figure 45. a) nombre de bancs d'accumulation sur les 10 derniers kilomètres, b) superficie totale des bancs d'accumulation sur les 10 derniers kilomètres (©Antoine Carpentier, 2021).....	86
Figure 46. Aire érodée en mètre carré par année pour chaque kilomètre du delta (©Antoine Carpentier, 2021)	87
Figure 47. Exemple d'embâcle majeur situé à l'amont du chenal secondaire et situé sur un banc d'accumulation (©Antoine Carpentier, 2021)	91
Figure 48. Exemple d'embâcle qui dévie l'écoulement vers la berge opposée (à droite sur l'image) (©Antoine Carpentier, 2021)	92
Figure 49. Exemple d'érosion qui peut subvenir à proximité d'un banc d'accumulation (©Antoine Carpentier, 2021)	93
Figure 50. Embâcle accumulé sur un affleurement rocheux dans le secteur médian (©Antoine Carpentier, 2021)	94
Figure 51. Embâcle se situant à l'entrée d'un bras mort situé dans le delta au kilomètre 1,4 (©Antoine Carpentier, 2021)	95
Figure 52. Les volumes de bois cumulé (5) en lien avec la superficie des bancs d'accumulation (%) (Antoine Carpentier, 2021)	96
Figure 53. Bois mort qui n'a pas été évacué lors de crues dans les chenaux secondaires (©Antoine Carpentier, 2021)	99
Figure 54. a) Embâcle accumulé à l'entrée d'un chenal, b) Embâcle accumulé à l'intersection de deux chenaux (©Antoine Carpentier, 2021).....	100
Figure 55. Stockage de l'embâcle démantelé en 2015 entre le kilomètre 1 et 0 (position aval maximale) (©Antoine Carpentier, 2021)	101
Figure 56. L'embâcle total dans le chenal principal sud, a) 2019, b) 2020 (©Antoine Carpentier, 2021)	102
Figure 57. Débits maximaux standardisés sur la rivière Saint-Jean (©Antoine Carpentier, 2021). 103	
Figure 58. Impact projeté des changements climatiques sur le débit moyen de la rivière Saint-Jean (adapté de MELCC, 2022).....	103
Figure 59. Les indicateurs de mobilité de la rivière Saint-Jean, sur les 60 kilomètres, calculés à partir de 1963 jusqu'en 2020 (©Antoine Carpentier, 2021)	104
Figure 60. La trajectoire de la rivière Saint-Jean selon les années, a) secteur amont, b) secteur aval, c) secteur amont superposé, d) secteur aval superposé. E) secteur médian (©Antoine Carpentier, 2021)	108
Figure 61. Profil de la rivière Saint-Jean en 2016 et 2020 avec la bathymétrie (©Antoine Carpentier, 2021)	111
Figure 62. L'avulsion au kilomètre 1,5 en 2016 et 2020 (©Antoine Carpentier, 2021).....	112

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. L'erreur en mètre des points pour le géoréférencement	51
Tableau 2. Bilan ligneux de la rivière Saint-Jean de 1963 à 2020. 1Données de Boivin et al., 2017b; 2Estimation du volume exporté vers la baie de Gaspé ou retiré manuellement avant la formation du nouveau raft; *Volumes estimés de Boivin et al., 2017b.	67
Tableau 3. Volume de bois (m ³) dans les embâcles selon l'année	89

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, Maxime Boivin. Tout a débuté durant le cours de terrain lorsque tu m'as proposé un projet en canot pour étudier une rivière. Merci d'avoir pensé à moi et merci pour tout le temps que tu as passé à m'aider pour les terrains et la rédaction. Malgré ton temps bien occupé avec le labo, ta famille et les cours, tu as su prendre le temps nécessaire pour obtenir le meilleur projet possible. Tes nombreux conseils et connaissances sur la rivière Saint-Jean ont été grandement appréciés pour le bon déroulement des terrains. Ton parcours a permis d'améliorer le projet avec tes nombreux conseils et ta vision du projet. En espérant pouvoir continuer de travailler avec toi et de continuer à apprendre sur le domaine.

Merci aussi à mon codirecteur, Thomas Buffin-Bélanger. Notre première rencontre autour d'une bière pour discuter de la rivière et de nos parcours a été bien appréciée. Tes nombreux conseils et ton expertise dans le milieu géomorphologique m'ont énormément aidé dans la rédaction et dans l'analyse du projet. Tes questions et réflexions m'ont aidé à vouloir constamment améliorer le mémoire et à montrer des résultats les plus complets. Merci d'avoir pris ce projet en tant que co-directeur malgré ton calendrier très chargé, tu as pris le temps de m'éclaircir sur des composantes et concepts du mémoire.

Un gros merci à mes parents, Josée et François qui ont été un énorme support durant ces années d'études. Vos questionnements sur le projet et votre curiosité ont été bien appréciés. Je peux finalement vous dire que cette maîtrise est vraiment finie et que d'autres projets m'attendent.

Je tiens aussi à remercier Maxime Maltais et Baptiste Jeanney pour l'initiation à la mesure du volume du bois mort. Vous avez réussi à répondre à mes nombreuses questions puisque je ne connaissais rien au sujet et que j'ai commencé le projet de recherche avec le terrain assez rapidement.

Merci à mes trois assistants de terrain qui m'ont aidé durant les trois terrains sur la rivière Saint-Jean. Merci Marianne pour le premier terrain où tous les deux ne savaient pas dans quoi on s'était embarqué et qui ne connaissaient aucunement la rivière. Ton aide a été très appréciée durant les trois semaines à Gaspé. Merci aussi à Olivier pour le deuxième terrain qui a été tout un terrain en raison des nombreuses journées de pluie. On a passé trois belles semaines sur la rivière. Finalement, merci à Frank pour le terrain de l'automne 2021. Pour quelqu'un qui n'a jamais fait de terrain, tu as été bien utile, malgré tes quelques oublis sur la rivière.

Un merci aussi à Johan qui m'a aidé durant le deuxième terrain pour la prise de données avec le DGPS et qui a aussi manié la scie à chaîne comme un expert pour la récolte des rondins de bois qui flottaient sur la rivière. Merci aussi pour les réponses à mes questions durant le projet et à tes nombreux conseils.

Un merci à tous les membres du laboratoire, le LERGA, pour votre aide de près ou de loin à ce projet. Cette petite équipe s'agrandit d'année en année et en espérant pouvoir se revoir dans un futur proche sur d'autres projets ou autour d'une bière.

Un gros merci à Claude Poirier de la SGRG à Gaspé pour ses nombreuses navettes en camion pour faciliter les déplacements sur la rivière. Tu as été un bon conseiller sur la situation de la rivière Saint-Jean. Je vais me rappeler des nombreuses discussions sur les embâcles de bois, le saumon de la rivière.

Merci aussi à Frank, Julien, Manu qui m'ont laissé travailler quelques jours durant l'hiver et qui m'ont encouragé à terminer la rédaction au lieu d'aller skier de la belle poudreuse. Vous avez réussi à me faire décrocher de la rédaction quelques fois, peut-être un peu trop souvent, mais ces moments vont rester marquants. Merci aussi à Nadia, qui a essayé de me laisser travailler quelques jours dans l'été au lieu de toujours être en canot. Je t'aime et merci pour ton support.

Finalement, le projet de recherche n'aurait pas pu avoir lieu sans de l'aide financière. Merci au Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT), l'Établissement de la relève professorale ainsi que la société de gestion des rivières de Gaspé (SGRG).

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 L'émergence et l'importance des études sur le bois mort en rivière

Depuis les dernières décennies, les chercheurs québécois se sont de plus en plus intéressés à la dynamique des rivières, en raison des impacts potentiels sur les infrastructures (routes, ponts, maisons) et de l'importance pour la santé des écosystèmes. Avec les importantes inondations de 2017 et de 2019 au Québec, certaines rivières ont débordé de leur lit pour envahir des secteurs résidentiels, ce qui engendre des pertes économiques importantes et des mécontentements importants de la population. Parmi les phénomènes potentiels applicables sur une rivière, on retrouve la dynamique du bois en rivière. Le bois mort en rivière est une thématique dont l'étude remonte aux premiers travaux scientifiques dans les années 1970, particulièrement dans l'Ouest américain (Piégay et Gurnell 1997; Wohl 2014). Au départ, les scientifiques se sont attardés à comprendre les relations entre la présence de bois mort en rivière avec l'abondance et la diversité d'espèces de poissons et d'écosystèmes (Gurnell *et al.* 2002; Montgomery et Piégay 2003). Les premières études montrent l'importance des liens entre la présence de bois mort en rivière et la création d'habitats pour les poissons en raison de l'impact du bois sur la géodiversité des processus et des formes fluviales (Gurnell *et al.* 2002). Ces recherches sur la présence de bois mort en rivière ont mis en lumière les effets sur l'écoulement, la dynamique sédimentaire ainsi que sur l'influence morphologique des embâcles (Gurnell *et al.* 2002). De nos jours, l'analyse de la dynamique du bois en rivière s'est propagée partout dans le monde : en Europe (Piégay et Gurnell 1997; Le Lay et Piégay 2007; Ravazzolo *et al.* 2015), au Japon (Nagayama *et al.* 2012), en Amérique du Sud (Martín-Vide *et al.* 2014) et dans le Nord canadien (Kramer et Wohl 2014) par exemple. De multiples études ont été menées concernant l'effet du bois en rivière sur l'érosion, le transit sédimentaire, la modification de la trajectoire hydrogéomorphologique (HGM), la superficie de bancs d'accumulation ou la présence accrue de fosses (Kail 2003; Webb et Erskine 2003; Moulin *et al.* 2011; Nagayama *et al.* 2012; Ravazzolo *et al.* 2015). Dans certains pays, les connaissances acquises ont permis d'intégrer le bois en rivière dans la gestion des cours d'eau en introduisant le bois mort dans la dynamique fluviale. Dans certains cas, l'intégration se manifeste la réalisation d'aménagements à partir du bois pour favoriser les écosystèmes,

l'aménagement d'habitats du poisson et la réduction des impacts sur la morphologie des cours d'eau ([Anonyme] 1999; Biron *et al.* 2018b).

Pour ce qui est des études au Québec, avant les années 2010, on retrouve peu ou pas de recherches qui abordent les questions de la dynamique du bois mort en rivière et des impacts d'un embâcle de bois sur un plan d'eau, encore moins pour les rivières situées dans un contexte de climat tempéré froid (Boivin *et al.* 2015). Ce manque d'études est explicable par la présence de la drave durant le 20^e siècle et des études qui se penchaient seulement sur les relations entre le bois mort en rivière et les écosystèmes fluviaux. C'est à la suite de la première étude afin de développer une méthode d'analyse par bilan ligneux sur la rivière Saint-Jean en 2010 (Boivin et Buffin-Belanger 2010), que les projets de recherches sur différentes rivières québécoises ont eu lieu, surtout dans la région l'Est-du-Québec. Le bilan ligneux est le résultat de trois composantes calculées soit la production, le transport et l'accumulation du bois mort sur la rivière. Les rivières Neigette (Massé 2014), Mont-Louis (Maltais 2019), Port-Daniel (Bérubé et Boivin 2020), Petite-Cascapédia (Jeanney, 2002), et Saint-Jean (Boivin et Buffin-Belanger 2010; Boivin *et al.* 2015; Boivin *et al.* 2017b; Boivin *et al.* 2018) sont des rivières qui ont été ou qui sont présentement étudiées en lien avec la dynamique du bois en rivière. La région de la Gaspésie possède de nombreuses rivières avec une dynamique importante des bois morts en rivière étant donné la mobilité latérale importante de ces rivières et la présence de plaines alluviales fortement forestières qui génèrent des volumes de bois (Boivin *et al.* 2015). Ces nombreux projets de recherche se sont attardés à mieux comprendre la dynamique du bois selon les différentes rivières et ensuite utiliser cette expertise pour des rivières situées dans d'autres régions du Québec.

La dynamique du bois en rivière est un phénomène de plus en plus connu par les scientifiques en raison des nombreuses études sur différentes rivières à travers le monde. Cependant, le bois en rivière est généralement perçu négativement par les gestionnaires et la population en générale et cela entraîne dans plusieurs cas le démantèlement et le retrait du bois de nos cours d'eau (Chin *et al.* 2014; Boivin *et al.* 2019). Historiquement, les embâcles de bois étaient démantelés pour la libre circulation des bateaux et pour l'exploitation des ressources sur un plus vaste territoire (Montgomery et Piégay 2003). Ce retrait du bois mort a été et est encore

parfois la méthode préconisée par les gestionnaires de cours d'eau et le gouvernement du Québec dans une optique de sécurité civile et de *nettoyage* pour l'habitat du poisson (Biron *et al.* 2018b). Ce retrait résulte généralement des nombreux défis auxquels les gestionnaires font face puisqu'ils doivent trouver un équilibre entre les risques naturels et les services écosystémiques associés à la présence du bois en rivière. Ainsi, les recherches scientifiques sont primordiales pour la compréhension de la dynamique du bois en rivière afin de prendre des décisions éclairées concernant la gestion des bois en rivière (Boivin *et al.* 2019). Ces études permettent aux gestionnaires d'avoir un plus grand bagage de connaissances pour bien gérer les risques naturels comme les inondations causées potentiellement par un embâcle, l'érosion du chenal et la sécurité des personnes et des infrastructures (Chin *et al.* 2008; Wohl 2017; Swanson *et al.* 2020). En ayant connaissance des faits scientifiques, la perception négative de la population joue un moins grand rôle dans des processus décisionnels.

Les cours d'eau sont perçus par plusieurs gestionnaires et organisations comme étant en santé et sans danger lorsque la rivière coule naturellement et qu'il n'y a aucun obstacle pour empêcher l'écoulement. Dans cette perception, il faut écarter les obstructions à l'écoulement comme le bois mort, les barrages de castor, les amas de sédiments, etc. C'est pour cette raison que des lois ont été mises en place pour donner le moins d'obstacles à l'écoulement. Le gouvernement a attribué la responsabilité aux municipalités de gérer les cours d'eau à l'aide de la loi sur les compétences municipales. Selon l'article 105 de cette loi, toute MRC doit « réaliser les travaux requis pour rétablir l'écoulement normal des eaux d'un cours d'eau lorsqu'elle est informée de la présence d'une obstruction qui menace la sécurité des personnes ou des biens. » (L.R.Q, C-47.1.) (MRC De La Côte De Gaspé 2011). La sécurité des personnes et des biens est en lien avec les inondations ou l'érosion causée par l'obstruction de l'écoulement. Cette loi fait en sorte que la présence de bois mort en rivière est peu commune puisqu'ils sont retirés pour obtenir un cours d'eau avec une libre circulation de l'eau sans obstacle potentiel pour la sécurité civile. Cette vision a amené, depuis le retrait des embâcles et bois morts dans les rivières, une perception négative de la présence de bois en rivière. De nombreux articles sur la dynamique du bois et des impacts d'un embâcle sur le cours d'eau montrent qu'il y a davantage d'impacts positifs (habitats naturels, protection contre érosion, création de fosses) que d'impacts négatifs liés à la présence des embâcles de

bois (Abbe et Montgomery 1996; Montgomery et Piégay 2003; Wohl 2015). Cependant, la perception négative d'une majorité de la population et des acteurs de l'eau amène une fausse perception. Ces impacts négatifs sont souvent associés à l'érosion des berges, aux inondations, au creusement des fosses et à la mobilité du chenal (Gregory et Davis 1993; Piégay *et al.* 2005; Le Lay *et al.* 2008; Wohl 2015). Selon un questionnaire de 2017 auprès d'une trentaine d'organisations en lien avec la gestion de l'eau au Québec, 57 % d'entre eux perçoivent de façon négative la présence d'embâcle de bois en rivière (Boivin *et al.* 2019). Cette perception négative engendre des travaux pour enlever ces embâcles par les gestionnaires puisque la sécurité de la population est primordiale comme mentionnés dans la loi sur les compétences municipales en ce qui a trait à la gestion des cours d'eau. Cette perception négative est aussi perceptible aux États-Unis où des chercheurs ont sondé des étudiants de différents programmes, dans des états différents et une majorité avait une perception négative des embâcles de bois en rivière (Chin *et al.* 2008; Chin *et al.* 2014). Cette perception des étudiants américains ainsi que celle des organismes qui gèrent l'eau au Québec contrastent avec la hausse des connaissances sur la dynamique du bois en rivière et de son influence sur la morphologie et la géodiversité d'un cours d'eau. Cependant, ce phénomène est de moins en moins présent avec les mentalités qui changent et la sensibilisation est plus efficace de nos jours, ce qui fait que la perception change positivement (Chin *et al.* 2008).

Ce mémoire explore les interactions entre la dynamique du bois mort en rivière avec la dynamique fluviale de la rivière Saint-Jean. Des données prises sur le terrain permettront de comprendre la dynamique du bois mort en analysant la distribution du bois mort ainsi que son évolution interannuelle. Les effets des embâcles sont étudiés sur une période de plusieurs années (2010 à 2014 ; 2019-2020) ainsi que sur des zones spécifiques. Une relation est aussi étudiée entre la dynamique de bois mort en rivière et la morphologie de cette rivière en particulier. Il sera aussi question de l'impact du démantèlement à l'hiver 2015 et des répercussions de celui-ci sur la morphologie du cours d'eau, mais aussi sur la dynamique et la distribution du bois mort sur la rivière Saint-Jean. Les effets morphologiques et la mobilité de la rivière seront décrits et les changements seront analysés à partir de 1963 jusqu'à 2020. Les résultats permettront de mieux comprendre la dynamique du bois mort sur une longue période et de montrer les différences entre les volumes avant et après le démantèlement pour

ensuite pouvoir estimer les futurs volumes de bois sur l'ensemble de la rivière. Ce mémoire servira surtout à améliorer notre compréhension des conséquences d'un démantèlement majeur sur la zone où l'embâcle se situait. Un démantèlement majeur au Québec n'a jamais été étudié auparavant et ailleurs dans le monde, un nombre très limité de recherches a été fait sur un démantèlement d'embâcle.

Le premier chapitre du mémoire inclut l'introduction, mais surtout explique la problématique du bois mort propre à la rivière Saint-Jean et énumère les objectifs du projet de recherche. Pour le chapitre 2, il y a un état des connaissances qui est divisé en plusieurs sous-chapitres qui influencent ou expliquent la dynamique du bois mort et la morphologie d'un cours d'eau. Le troisième chapitre porte sur le territoire à l'étude et expose les méthodes utilisées pour la récolte et l'analyse des données pour atteindre les objectifs. Ensuite, les résultats des données seront exposés pour bien comprendre la situation actuelle de la rivière et de sa situation passée. Finalement, le chapitre discussion fera des liens entre les données et les connaissances déjà acquises sur la dynamique du bois mort et sur les rivières graveleuses. Des liens seront faits avec d'autres rivières étudiées sur le même sujet dans la région de l'Est-du-Québec, mais aussi sur des rivières ailleurs dans le monde. Il sera aussi question de la progression actuelle du nouvel embâcle qui se crée dans le delta depuis le démantèlement en 2015.

1.2 Problématique propre à la rivière Saint-Jean

Avec plus de 60 rivières à saumon accessibles pour la pêche, le Québec est un territoire prisé par les pêcheurs. Ce loisir rapporte de grandes sommes d'argent aux organismes et municipalités à proximité de ces rivières (Bujold 2011). La rivière Saint-Jean est l'une des rivières prisées pour la pêche au saumon en Gaspésie. Elle permet à la société de gestion des rivières de Gaspé (SGRG) d'offrir aux clients des séjours pour la pêche au saumon. Pour cette rivière, le coût pour la pêche dans le secteur contingenté en amont est autour de 1 000\$ par jour incluant un guide, le logement et la nourriture. Cette pêche permet des retombées de 4 millions par année pour la ville de Gaspé (Bujold 2011). Ces retombées sont donc importantes pour la ville de Gaspé, mais aussi pour la SGRG, car cet argent peut servir à la conservation du saumon et à un bon suivi sur le nombre de saumons dans la rivière

annuellement. La conservation de ces saumons a été mise à rude épreuve à l'été 2009, puisque les gestionnaires de la rivière ont recensé plus de 150 saumons morts localisés sur les quelques derniers kilomètres de la rivière (Wadham-Gagnon et Castilloux 2010). L'année suivante, près de 100 saumons ont été retrouvés sans vie dans la rivière Saint-Jean (Wadham-Gagnon et Castilloux 2010). Une des hypothèses de cette surmortalité est en lien avec la présence d'un complexe majeur d'embâcles de bois dans l'embouchure de la rivière étant donné le potentiel de limiter la migration amont-aval des saumons au printemps et lors de la dévalaison à l'automne (Wadham-Gagnon et Castilloux 2010). Cette surmortalité pour les années 2009 et 2010 a contribué à maintenir une perception négative des embâcles de bois en rivière par les gestionnaires et pêcheurs. L'embâcle dans l'embouchure a commencé à se former dans les années 1960 et a totalisé une longueur de 3,5 kilomètres en 2015 (Boivin *et al.* 2015). Après de multiples études (Boivin et Buffin-Belanger 2010; Wadham-Gagnon et Castilloux 2010; Genivar 2011) et discussions entre les différents acteurs qui gèrent la rivière, la décision est prise de démanteler une portion de l'embâcle lors de l'hiver 2015 pour un retrait total d'une longueur de 1,5 km situé dans le chenal sud, chenal principal de l'embouchure de la rivière. Cette décision avait pour but à l'époque de favoriser la libre circulation du saumon au printemps et à l'automne. Ce démantèlement est l'un des plus imposants au monde en raison de la quantité de bois et de la longueur de l'embâcle. Avec les années, les guides de pêche remarquent que le nombre de saumons qui s'installent dans la Saint-Jean chaque été est en baisse. Plusieurs hypothèses semblent expliquer cette diminution. Certains pensent que le réchauffement de l'eau, l'apparition de maladies sont des causes potentielles bien qu'il soit toujours difficile de cibler le facteur contribuant le plus à cette diminution du nombre de saumons dans la baie (Thibault 2020).

Les embâcles sur la rivière Saint-Jean ont commencé à se construire au début des années 1960 dans le chenal nord de l'embouchure de la rivière Saint-Jean (Boivin *et al.* 2015). Par la suite, le complexe d'embâcle s'est construit graduellement dans le chenal central et sud pour atteindre une longueur linéaire totale de 3,5 km (Boivin *et al.* 2015). Les causes de cette apparition au début des années 1960 sont encore incertaines et difficiles à expliquer, mais l'une des causes probables est l'arrêt de la drave sur les rivières autour de la ville de Gaspé en 1961 par la compagnie Canadian International Paper qui avait une scierie à Douglastown

(Boivin *et al.* 2012). Cette scierie utilisait le bois de la drave provenant de la rivière Saint-Jean et représentait la 4^e scierie en termes de volume produit pour le territoire de la Gaspésie en 1937 (Fortier 2011). La drave servait à transporter le bois entre la zone de coupe et la zone pour stocker le bois dans l'embouchure pour ensuite l'exporter vers les usines de fabrication ou vers d'autres pays comme l'Angleterre. Cette drave impliquait que le bois était sorti de la rivière et qu'aucun embâcle ne pouvait s'accumuler sur la rivière et dans l'embouchure. L'effet de la drave a amené des modifications dans le lit du chenal, mais il est difficile de démontrer quantitativement les effets de la drave sur la RSJ étant donné l'absence de données historiques. De ces effets on retrouve l'érosion des berges, la dégradation des écosystèmes aquatiques ainsi que l'augmentation des matières organiques sur le lit ce qui entravait la régénération du saumon (Lafleur 2001). Ainsi, suite à l'arrêt de la drave, le bois mort produit naturellement par les processus d'érosion des berges a permis l'accumulation d'embâcle sur la rivière puisqu'il n'est plus utilisé comme marchandise (Lafleur 2001). Le retrait des embâcles dans l'embouchure pour permettre le transport du bois de drave s'est arrêté. Une autre cause potentielle est la coupe forestière (1850-1960) survenue dans le bassin versant de la rivière Saint-Jean ainsi que de plusieurs feux de forêt majeurs (1935, 1941, 1960, 1991) (Pinna *et al.* 2009). Les coupes forestières peuvent engendrer un changement dans la réponse hydrologique du cours d'eau, engendrant une augmentation de l'érosion des berges et ainsi, produire une plus grande quantité de bois dans la rivière durant les épisodes de crue (Carlson *et al.* 1990; Magilligan *et al.* 2008). Les coupes forestières ont été effectuées sur l'ensemble de la rivière sauf pour certains secteurs où la protection du saumon est prioritaire face aux coupes forestières. Aussi, les changements hydroclimatiques peuvent avoir un impact sur la production et les volumes de bois mobilisés dans l'embouchure et engendrer la formation de ce complexe d'embâcles (Boivin *et al.* 2017b). Avec les changements climatiques, la température moyenne annuelle est en hausse, ce qui amène des périodes de chaleur plus importantes. Ces périodes de chaleur vont amener une diminution des quantités de précipitations liquides en moyenne, mais va amener des périodes d'intensité de précipitations (Ouranos 2015). Ces périodes de fortes précipitations peuvent engendrer des événements de grandes quantités d'eau, ce qui amène un apport élevé rapidement vers les cours d'eau (Savard *et al.* 2009). Avant le démantèlement de l'hiver 2015 dans l'embâcle du chenal principal (sud) situé à l'embouchure, on pouvait recenser trois importants embâcles soit un

de 400 mètres dans le chenal du centre, un de 900 mètres dans le chenal du nord et celui de 1 500 mètres démantelés à l'hiver 2015 dans le chenal du sud (Figure 1). La figure 1 montre la zone de l'embâcle ainsi qu'une image en 2016, un an après le démantèlement. Au total, depuis 1963, c'est un embâcle de 3,5 km que l'on retrouvait dans le delta de la rivière Saint-Jean en 2015. Le bois mort démantelé a été déposé dans une zone à proximité du chenal sud. Ce dépôt de bois mort a une superficie d'environ 12784 m². Avec une hauteur de deux mètres, ce volume de bois est d'environ 25 568 m³ et est assez compact puisque la montagne de bois a été faite de façon mécanique.

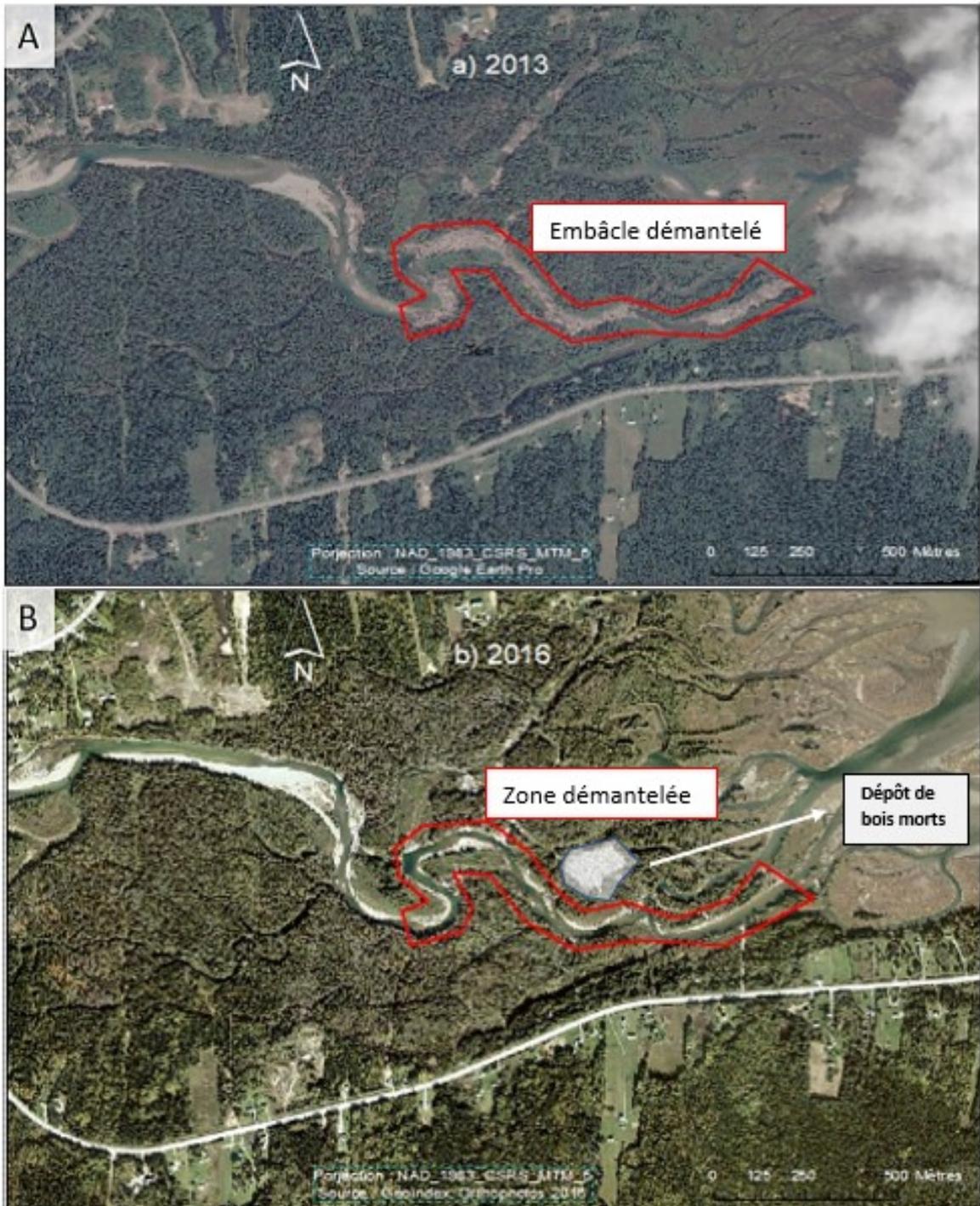


Figure 1. a) Image satellite de l'embouchure de la rivière Saint-Jean avec l'embâcle en 2013 et; b) Image satellite de l'embouchure après le démantèlement de 2015 (©Antoine Carpentier, 2021)

1.3 OBJECTIFS

L'objectif principal du projet est de comprendre la dynamique du bois mort sur la rivière Saint-Jean. L'objectif pourra être réalisé en établissant un bilan ligneux dans un contexte post-démantèlement d'embâcle majeur afin de quantifier les volumes de bois mort en rivière. Ces volumes sont produits par l'érosion des berges, transportés selon les crues, accumulés à l'intérieur du bassin versant et évacués du système fluvial dans l'embouchure de la rivière Saint-Jean. Trois objectifs spécifiques permettront d'atteindre l'objectif principal :

- 1- Quantifier la dynamique spatio-temporelle des bois morts en rivière à l'échelle du corridor fluvial de la rivière Saint-Jean, Gaspé
- 2- Caractériser les changements hydrogéomorphologiques à l'échelle du corridor fluvial de la rivière Saint-Jean
- 3- Quantifier les impacts du démantèlement du chenal principal de 2015 sur la morphologie des différents chenaux dans le delta et quantifier le risque potentiel de formation d'un nouvel embâcle

Ce projet de maîtrise valorisera des données récoltées entre 2010 et 2014 lors de travaux antérieurs sur la rivière Saint-Jean (Boivin 2016), et permettra d'effectuer un suivi temporel sur une période de dix ans (2010-2020) de la dynamique du bois en rivière. De plus, ce projet s'inscrit dans une analyse post-démantèlement d'un embâcle majeur afin d'analyser les impacts sur la dynamique fluviale et sur la dynamique du bois en rivière.

2. NOTIONS D'HYDROGÉOMORPHOLOGIE

2.1 La dynamique hydrogéomorphologique

L'hydrogéomorphologie est une branche de la géographie physique qui s'intéresse à l'évolution spatio-temporelle des formes et des processus présents dans un cours d'eau. Ce domaine d'étude analyse la dynamique des cours d'eau, ainsi que sa morphologie selon l'activation des processus hydro sédimentaires ou des processus d'érosion et d'avulsion, par exemple. Certains cours d'eau peuvent donc enregistrer une mobilité importante durant les épisodes de crue lorsqu'il y a la présence de processus hydrogéomorphologiques ainsi qu'une mobilité sur le long terme. Ces processus naturels peuvent engendrer des risques pour les structures (ponts, ponceaux, etc.) et pour la communauté. Les cours d'eau sont un résultat d'un état d'équilibre entre les caractéristiques géométriques, granulométriques et biogéomorphologiques (Boivin *et al.* 2019). Cet état d'équilibre varie dans le temps selon l'évolution du débit liquide ainsi que des apports en sédiments (Lane 1955). Un cours d'eau peut être en état d'équilibre, mais cet état n'est pas nécessairement le même que celui d'il y a 50 ans. Si un cours d'eau voit son apport en sédiments diminuer par des changements naturels ou des actions humaines, on peut se retrouver dans une situation de déséquilibre sédimentaire et le cours d'eau aura tendance à s'inciser, c'est-à-dire créer de l'érosion verticale (Lane 1955). Si le débit liquide diminue et que l'apport sédimentaire reste le même, on peut se retrouver en état de déséquilibre du débit et le cours d'eau va se retrouver avec un phénomène d'aggradation, c'est-à-dire que le lit de la rivière va se rehausser.

Les trois zones du système fluvial peuvent avoir des impacts sur la compréhension et l'application d'un bilan ligneux et de l'analyse du bois en rivière, puisque ces trois zones influencent autant la dynamique du bois en rivière que la dynamique sédimentaire. La zone de production est le secteur où est produit le bois mort, le secteur médian où il est transporté et stocké temporairement et finalement le secteur aval où le bois est accumulé ou évacué d'un système. L'état d'équilibre provient de la dynamique fluviale qui s'analyse par l'interaction entre trois composantes principales : le transport sédimentaire, l'écoulement et les formes fluviales. Pour ce qui est du débit solide, celui-ci dépend de la structure de l'écoulement ainsi

que de la morphologie du cours d'eau. Cette morphologie va aussi influencer le transport en sédiments (Leeder 1983) Le transport du bois mort n'est pas inclus dans le transport sédimentaire. Les trois composantes sont en interactions constantes pour créer la dynamique fluviale qui peut varier dans le temps et selon l'échelle d'analyse (Figure 2).

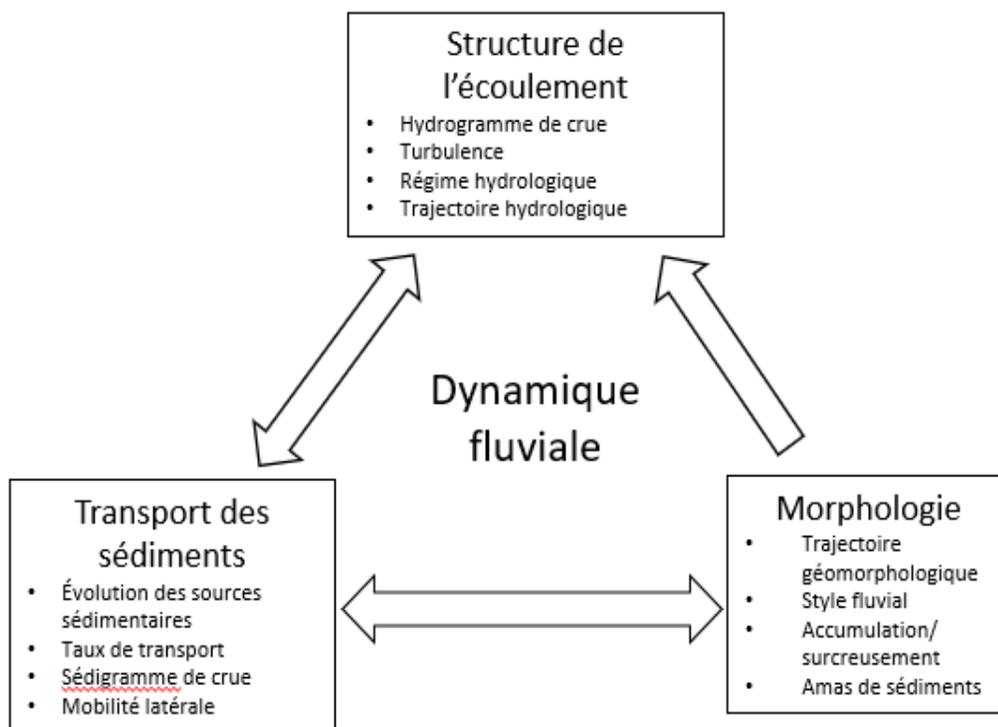


Figure 2. L'interaction entre les composantes de la dynamique fluviale et les échelles d'analyse, inspirée par les travaux de Leeder (adapté de Leeder, 1983)

Cette interaction peut se représenter sur la rivière lorsque la structure d'écoulement influence le transport sédimentaire, par exemple lorsqu'une rivière a un débit élevé, la quantité de sédiments mobilisés est plus élevée qu'une rivière avec un faible débit. Les sédiments vont donc influencer la morphologie de la rivière, comme la présence et la localisation de bancs d'accumulation. Ces bancs vont influencer les vitesses d'écoulement, créer des zones de faible courant et des secteurs avec des vitesses de courant élevées. Ces courants rapides peuvent provoquer des secteurs d'érosion et ces secteurs peuvent apporter une quantité de sédiments dans la rivière, ce qui crée ces interactions et ce cycle de la dynamique fluviale (Leeder 1983; Beechie et Sibley 1997; Wohl 2020)

La structure d'écoulement et le transport des sédiments peuvent différer entre les secteurs d'une même rivière selon la dynamique fluviale présente. Les styles fluviaux ont donc des caractéristiques propres à chacun. Le style fluvial permet de comprendre les différents processus morphodynamiques qui façonnent la dynamique fluviale à un endroit donné sur un cours d'eau (Figure 3). Plusieurs typologies ont été produites afin d'analyser les différents styles fluviaux et leurs caractéristiques, comme celle de Church (Church 2006), reconnue à l'échelle internationale.

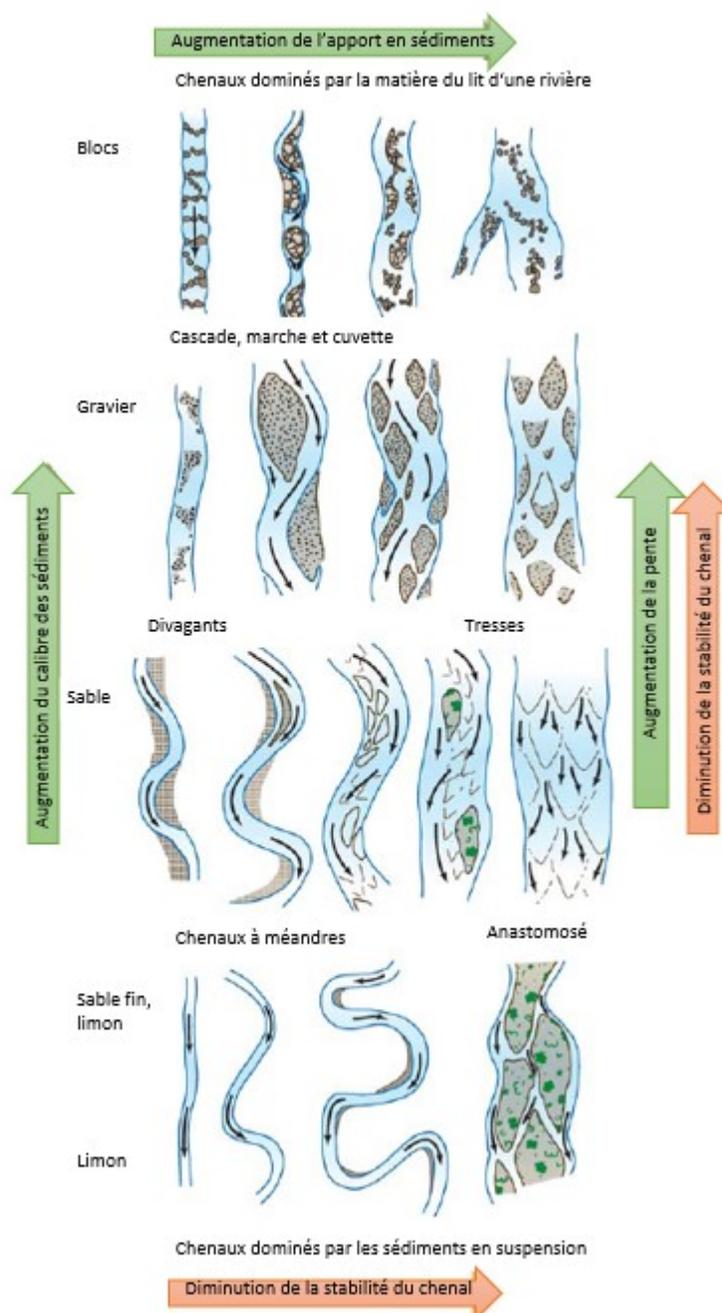


Figure 3. Classification des différents styles fluviaux selon Church (adapté de Church, 2006)

La figure 3 montre les différences entre les styles fluviaux ainsi que les processus rattachés à chacun. Un style plus rectiligne, linéaire va être plus stable, donc il y aura moins de changements dans la largeur du chenal. Il y aura absence ou présence faible de processus

d'érosion, tandis qu'un cours d'eau avec des méandres va avoir une mobilité généralement plus importante. On retrouvera un changement à moyen ou long terme sur la trajectoire de la rivière, engendré par une mobilité latérale plus élevée. Aussi, plus le cours d'eau est linéaire et avec de fortes pentes, plus les sédiments seront grossiers tandis qu'un chenal avec de la sinuosité va se retrouver avec des sédiments plus fins et des degrés de pente généralement plus faible, ce qui amène donc de faibles courants, comparé à un chenal rectiligne avec de fortes pentes. Avec l'identification des styles fluviaux, il est donc plus facile de comprendre la réaction du cours d'eau face à des événements naturels ou des perturbations, comme des crues, l'aménagement anthropique ainsi que la présence d'obstacles (naturels ou anthropiques).

Les sédiments que l'on retrouve dans les cours d'eau se déplacent de l'amont vers l'aval selon un écart de temps différent d'un cours d'eau à l'autre. Ce déplacement se fait comme sur un convoyeur d'un point a vers le point b sur des périodes irrégulières, c'est-à-dire selon l'intensité des crues. Ces sédiments vont se modifier en se déplaçant puisqu'en amont, les sédiments sont généralement plus grossiers (blocs, galets, cailloux) et plus ils vont se déplacer vers l'aval, plus ils seront en processus d'affinage et leur taille va réduire en raison des impacts engendrés par le transport sédimentaire (Church 2006). Le secteur en amont d'un cours d'eau est celui d'où proviennent majoritairement les sédiments selon la théorie du système fluvial de Schumm (1977). La source de ces sédiments est soit le lit du cours d'eau, les berges ou les versants (Schumm 1977). Ce secteur est où le cours d'eau est plus étroit et pentu vu leur localisation dans les têtes de bassins versants. Par la suite, ces sédiments vont se retrouver dans le secteur médian, la zone de transfert, où ces sédiments seront accumulés temporairement sur des bancs d'accumulation, par exemple. Finalement, le secteur aval, la zone d'accumulation est où les sédiments vont être stockés. Cela inclut la zone deltaïque d'un cours d'eau. Dans le delta ou l'embouchure, on retrouve des sédiments plus fins, qui ont été transportés de l'amont vers l'aval et qui avec le transport ont perdu de leur taille granulométrique. Un cours d'eau débute à une altitude supérieure que l'embouchure comme une montagne (tête de bassin versant). Le cours d'eau en amont possède des largeurs étroites avec de fortes pentes, ce qui amène une forte compétence de déplacement pour les sédiments. En allant vers l'aval, le cours d'eau s'élargit avec une baisse de la pente et donc une

compétence plus faible, ce qui amène de plus petits sédiments et des zones d'accumulation sédimentaire. Finalement, en entrant en contact avec un autre plan d'eau, le cours d'eau aura une pente très faible avec des sédiments plus fins, ce qui va créer des formes deltaïques et/ou anastomosées, caractéristiques des embouchures de rivières se jetant dans une étendue d'eau (lac, baie, fleuve, océan).

2.2 Dynamique des rivières graveleuses

Il existe différents styles fluviaux pour les rivières graveleuses. Le style divagant, à méandres dynamiques et en tresses sont des styles souvent associés aux rivières graveleuses. Le style divagant amène une migration latérale avec la présence de chenaux secondaires. Ce style amène donc une production sédimentaire et une production ligneuse en raison de la migration latérale et des avulsions (Church 2006). Le style en tresses est caractérisé par la présence de bancs centraux avec de nombreux chenaux (Church 2006; Boivin *et al.* 2019). On retrouve aussi des rivières graveleuses avec des méandres dynamiques, un style qui amène une migration latérale, une expansion d'un méandre, mais aussi peut mener à un recoupement de méandres (Church 2006). En Gaspésie, on retrouve de nombreuses rivières graveleuses, caractérisées par une forte mobilité latérale et un apport en bois significatif, par exemple dans les rivières Port-Daniel, Matane, Saint-Jean, Mont-Louis et Petite-Cascapédia (Boivin et Buffin-Belanger 2010; Marchand 2013; Maltais 2019; Bérubé et Boivin 2020; Jeanney 2021). Ces rivières ont été ou sont étudiées pour différentes thématiques en lien avec la dynamique du bois en rivière et les dynamiques géomorphologiques. Pour la majorité des rivières gaspésiennes, elles s'écoulent dans des zones de dépôts glaciaires, fluvioglaciaires et/ou fluviales. Ces dépôts varient selon la présence d'un passage des glaciers et selon la dynamique fluviale (Bérubé et Boivin 2020). Les rivières graveleuses sont caractérisées par une granulométrie hétérogène ou tri pauvre, avec la présence de multiples bancs d'accumulation (Bérubé et Boivin 2020). Les bancs d'accumulation sont généralement mobiles donc leur superficie et leur localisation peuvent changer. Ces bancs sont alimentés par des sédiments qui peuvent être issus des processus d'érosion et d'avulsion situés sur différents secteurs de la rivière. Les bancs accumulent des sédiments provenant de l'amont,

ce qui amène des expansions du banc, et ainsi rediriger l'écoulement et créer des processus d'érosion sur la berge opposée.

Les rivières graveleuses du Nord et de l'est de la Gaspésie sont situées dans un climat tempéré froid, où le relief des Appalaches ainsi que la proximité du golfe du Saint-Laurent influencent le régime hydroclimatique des rivières. Le relief montagneux possède généralement des plaines alluviales plus petites donc le confinement du cours d'eau est plus élevé. Cela amène la présence d'un substrat rocheux que l'on retrouve par exemple sur les berges de la rivière Saint-Jean qui sont la source des sédiments de la rivière (Maltais 2019) (Figure 4). Ces sédiments grossiers auront un grand impact sur la morphologie des rivières et sur la présence de fosses pour la présence de saumon. Les rivières graveleuses sont souvent peu profondes en raison du substrat rocheux que l'on retrouve sur le lit de ces rivières. Ce substrat fait en sorte que le lit se modifie peu et les sédiments s'accumulent pour former les rivières graveleuses.

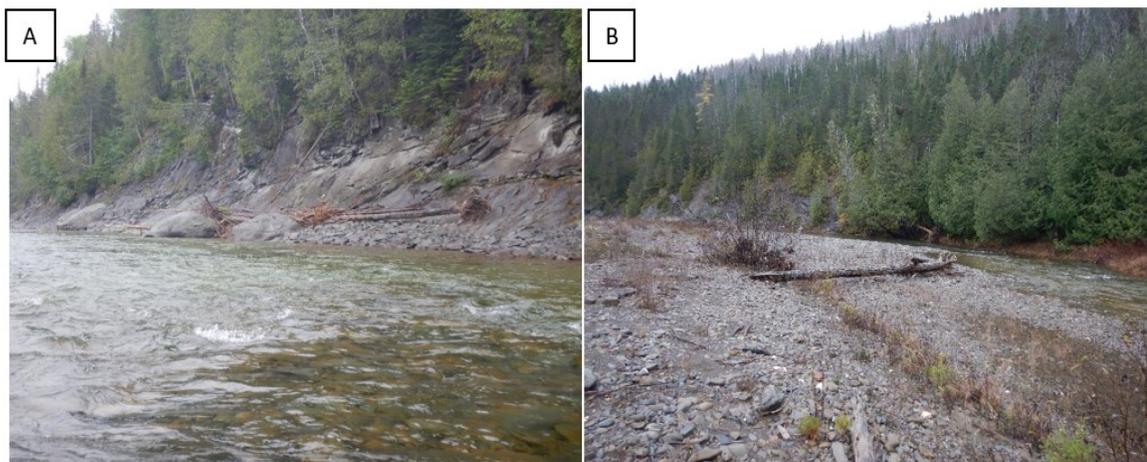


Figure 4. a) Substrat rocheux d'une berge de la rivière Saint-Jean, b) Exemple d'un banc d'accumulation (©Antoine Carpentier, 2021)

La rugosité présente dans les rivières graveleuses est caractérisée par la présence de zones de faible courant et des zones avec des courants plus élevés (Dinehart 1999). Les zones de faible courant sont les lieux idéals pour les saumons adultes, puisqu'ils peuvent se reposer lors de la montaison. Ainsi, Dinehart (1999) a montré l'influence de la forme du lit et de la disposition des graviers vis-à-vis les fluctuations de vitesse du cours d'eau. Certaines structures dans une rivière graveleuse amènent une haute vitesse tandis que certaines

structures réduisent la vitesse comme un banc d'accumulation ou un îlot végétalisé ou un amas de graviers situé dans le cours d'eau (Buffin-Bélanger *et al.* 2000). Ces rivières sont souvent représentées par la présence de seuils-mouilles ou d'un lit ondulé. Un seuil c'est une rupture de pente, une différence d'altitude du lit de la rivière. Le seuil engendre une mouille, ce qui représente une zone où le lit est profond (Roy *et al.* 2004). Une mouille, c'est une fosse où l'on retrouve la majorité du temps les saumons adultes, puisque l'eau est plus froide et où l'on retrouve moins de prédation (Roy *et al.* 2004). C'est aussi une zone où il y a peu de bois mort puisque le lit de la rivière est profond et que le bois mort a moins de surface pour s'accrocher et s'installer.

2.2.1 Mobilité sédimentaire

Les sédiments grossiers dans les rivières graveleuses se déplacent selon la puissance du cours d'eau en roulant, en glissant ou en sautant sur le lit. Ce mouvement varie d'un sédiment à l'autre selon la vitesse d'écoulement du cours d'eau et la taille granulométrique. Plus le sédiment sera grossier, plus la vitesse d'écoulement devra être élevée pour le déplacer. La vitesse élevée d'un cours d'eau est possible lors des périodes de crue en un court laps de temps. Ces crues ou hausses soudaines du débit peuvent créer de nouveaux bancs d'accumulation (Buffington et Montgomery 1999; Massé 2014; Boivin *et al.* 2019). Ce déplacement peut se faire lorsque la contrainte de cisaillement du lit dépasse la contrainte critique (Buffington et Montgomery 1999). Cette contrainte critique représente le seuil maximal de la vitesse d'écoulement avant que le sédiment se déplace sur la surface du lit.

Ces sédiments créeront des bancs d'accumulation qui eux influenceront la morphologie du cours d'eau. Selon les bancs d'accumulation, ils peuvent forcer une migration du cours d'eau puisque le banc repoussera l'écoulement vers la berge extérieure (concave) (Abbe et Montgomery 2003; Piégay *et al.* 2004). Cette berge concave se retrouvera en processus d'érosion puisque les vitesses d'écoulement augmentent lorsqu'il est redirigé sur cette berge. Cette berge en érosion est une source potentielle en sédiments pour les crues ou pour les autres bancs d'accumulation en aval. Ce phénomène d'érosion montre dans de nombreux cas que le cours d'eau est dynamique et que sa morphologie évoluera dans le temps. Dans les

rivières graveleuses comportant des méandres dynamiques, des chenaux secondaires sont actifs lors de périodes de crue et passifs durant le reste de l'année (Massé 2014). Ces chenaux sont propices à modifier la morphologie du cours d'eau et sont des secteurs où l'on retrouve de grandes quantités de bois mort puisqu'ils sont des zones d'accumulation durant des crues occasionnelles. Dans les styles fluviaux divagants qui possèdent des chenaux secondaires, on peut y retrouver de multiples chenaux actifs. Dans ce style fluvial, la migration latérale provient de l'érosion progressive des berges ainsi que des phénomènes d'avulsion, c'est-à-dire la création soudaine d'un nouveau chenal principal (Hooke 2004). Dans les rivières graveleuses, avec le transport de sédiments, on peut y retrouver des bancs d'accumulation latéraux et centraux situés aléatoirement dans des secteurs peu profonds. Les bancs d'accumulation dans les secteurs amont en tête de bassin versant ont moins tendance à se déplacer puisqu'on retrouve moins de zones susceptibles de les accueillir. Ces zones ont tendance à avoir de l'eau peu profonde. D'un autre côté, les bancs d'accumulation situés plus près de l'embouchure possèdent des sédiments limoneux, plus petits que le gravier et qui ont une cohésion plus haute, ce qui fait en sorte que le banc a moins tendance à se déplacer. Ces zones ont tendance à avoir des zones peu profondes, l'idéal pour la présence de bancs d'accumulation. Le courant s'écoule moins à travers le banc comparé aux bancs de gravier où la cohésion est plus faible (Hooke 2004; Massé 2014).

2.3 Dynamique estuarienne et deltaïque

Un estuaire c'est la zone où la vallée rencontre l'océan. C'est une transition entre un système fluvial et le milieu marin (Goujon *et al.* 1999). L'estuaire est une zone de transit et de stockage influencée par les marées (Goujon *et al.* 1999). Cette transition fait en sorte que l'estuaire est très sensible à toutes les modifications qui peuvent survenir en amont tout comme en aval (Goujon *et al.* 1999). C'est un milieu primordial écologiquement puisqu'il est la transition entre les espèces continentales et les espèces marines. C'est la zone d'échange entre ces différentes espèces qui crée un écosystème avec une forte biodiversité et géodiversité.

Un delta n'est pas un style fluvial, mais plutôt une forme fluviale. Les deltas se forment lorsque le cours d'eau se jette dans un plan d'eau comme un lac ou un océan (Phillips 2012; Ritchie *et al.* 2018). Le delta se forme lorsque la compétence et la capacité de transport diminuent, ce qui amène les sédiments à se déposer en forme d'éventail (Doust et Omatsola 1989). En général, avec le dépôt de ces sédiments, un delta est peu profond avec des berges moins élevées que dans les autres secteurs du cours d'eau. Les deltas contiennent souvent de nombreux chenaux d'écoulements en raison de sa morphologie. Le style fluvial qui est le plus souvent présent dans un delta est le style anastomosé, un style avec plusieurs chenaux où l'on retrouve des sédiments plus fins et une pente plus douce. Avec des berges qui possèdent des hauteurs faibles, les phénomènes d'avulsion sont plus fréquents lors de périodes d'inondation puisque la hauteur d'eau peut être plus faible. Pour avoir un phénomène d'avulsion, il faut des facteurs d'aggradation avec des voies d'écoulement plus raides qui font en sorte que l'écoulement est plus rapide (Phillips 2012). Au départ, pour que le phénomène d'avulsion apparaisse il doit y avoir la présence de crevasses (zone de faiblesse de la berge ou zone où l'eau s'infiltrait tranquillement) ou de détournement de flux pour créer le nouveau chenal (Phillips 2012). Les embâcles de bois situés dans un delta sont souvent des embâcles de vallées puisqu'ils prennent la largeur du chenal et dans quelques cas ces embâcles de vallées sont plus larges que le chenal. Ces embâcles vont augmenter la largeur grâce aux processus d'érosion. En amont de ces embâcles, le niveau d'eau du lit augmentera, car l'embâcle obstrue l'écoulement et cela amènera le phénomène d'avulsion (Abbe et Montgomery 2003; Phillips 2012). Le phénomène d'avulsion est aussi possible lorsque d'anciens embâcles ou la présence d'un important volume de bois mort s'installent dans le chenal pour développer des îlots végétalisés (Montgomery et Abbe 2006). Ces îlots vont souvent se retrouver au-dessus de l'élévation du talus situé sur les berges, ce qui peut engendrer des phénomènes d'avulsion et une forme fluviale anastomosée. (Montgomery et Abbe 2006). Les anciens embâcles peuvent aussi lorsqu'ils sont situés sur les berges ou à l'intérieur de la zone forestière créer des zones de résistance face à l'érosion (Montgomery et Abbe 2006). Ces anciens embâcles sont généralement situés dans la plaine inondable et forme d'excellents refuges pour le développement de forêts matures (Montgomery et Abbe 2006).

2.4 Dynamique du bois en rivière et hydrogéomorphologie

2.4.1 Les types d'embâcles sur un cours d'eau

La dynamique du bois mort est perceptible à l'échelle d'un tronçon et elle influence la morphologie d'un cours d'eau différemment selon le secteur et selon le style fluvial (Abbe et Montgomery 2003; Gurnell et Bertoldi 2020). Cette dynamique du bois a plusieurs variables (proportion du chenal obstrué, position, orientation, dimension, porosité et stabilité de l'embâcle) qui ont des répercussions sur la dynamique fluviale d'un cours d'eau (Gippel 1995; Gurnell *et al.* 2002; Manners *et al.* 2007). Abbe et Montgomery (2003) ont proposé une typologie des types d'embâcles de bois dans les cours d'eau selon leur provenance, leur structure et leur organisation (in situ, combinaison et transport) (Figure 5). Le premier est l'embâcle in situ (autochtone) qui est l'embâcle créé sur place. Il faut qu'il y ait au minimum un morceau clé (bois mort) assez volumineux pour rester sur place et accueillir l'accumulation des autres bois morts provenant de l'amont (Abbe et Montgomery 2003). Ces embâcles contiennent souvent des arbres de plus grandes tailles que les autres types d'embâcles, car ils ne se sont pas transportés. Le fait de réduire le transport du bois mort permet de retrouver encore le système racinaire et les branches. Ces embâcles influenceront la vitesse d'écoulement puisqu'ils peuvent la réduire en raison de l'augmentation de la rugosité (Abbe et Montgomery 2003). Le deuxième type est l'embâcle allochtone ou transporté qui lui contient un morceau clé qui provient de l'amont. Les morceaux contenus dans l'embâcle ont été transportés et créent une accumulation qui peut mener au développement d'une île ou d'un banc d'accumulation (Abbe et Montgomery 2003). Finalement, le dernier type est l'embâcle combiné qui est un mélange des deux autres types. Ces embâcles sont généralement de plus grands volumes et peuvent créer des barrières, faire dévier l'écoulement ou même bloquer le chenal (Abbe et Montgomery 2003).

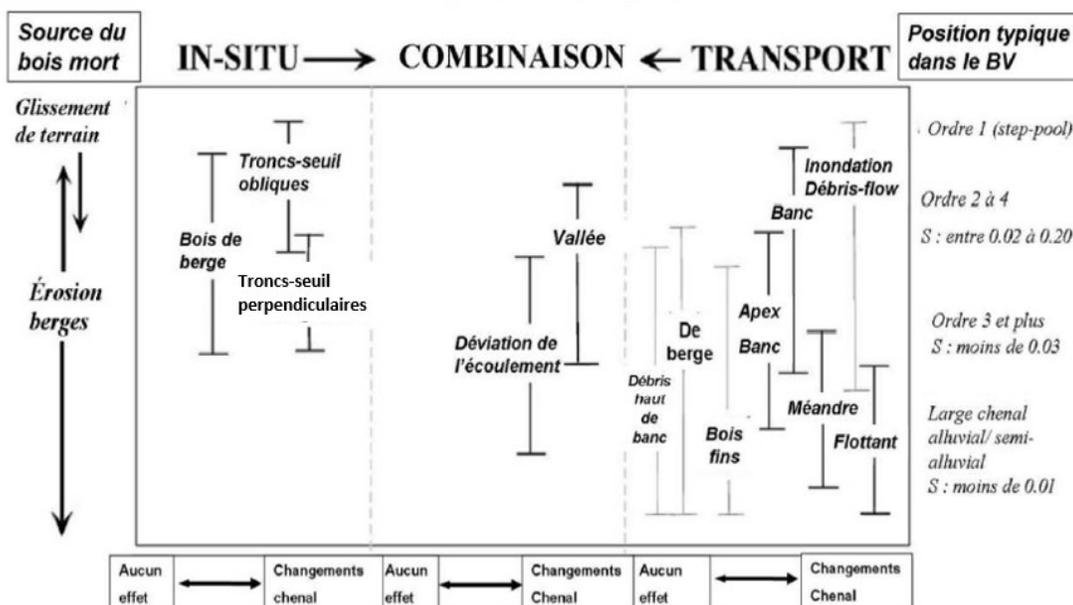


Figure 5. Typologie des embâcles de bois en rivière (adapté de Abbe et Montgomery, 2003)

2.4.2 Impact d'un embâcle sur la morphologie du cours d'eau

La présence du bois en rivière à l'origine des embâcles provient d'une diversité de processus naturels et anthropiques. Le bois provient majoritairement des berges par les processus naturels d'érosion du chenal ou lors de mouvement de masse/glissement de terrain à proximité d'un cours d'eau. Ce bois mort va créer une obstruction partielle de l'écoulement et cette obstruction va avoir un effet local sur le cours d'eau (Abbe et Montgomery 2003). Le bois mort aura donc une interaction avec plusieurs processus hydrogéomorphologiques comme l'érosion, la sédimentation, la morphologie du lit du chenal ainsi que l'hydrologie du chenal (Bocchiola *et al.* 2006). Ces interactions seront différentes selon la morphologie du cours d'eau ainsi que selon la dimension du bois mort. La distance de transport du bois mort dépend de sa dimension et de sa densité ainsi que la profondeur du cours d'eau (Bocchiola *et al.* 2006). Si le cours d'eau est peu profond, le bois mort se stockera plus facilement que dans un cours d'eau profond. Il faut aussi prendre en considération la présence d'obstacles qui peuvent intercepter le transport du bois mort et créer des embâcles. Selon l'étude d'Abbe et Montgomery (1996), le bois mort se stockera sur le lit du cours d'eau lorsque la profondeur

du lit est moins élevée que la moitié du diamètre du bois mort (Abbe et Montgomery 1996; Bocchiola *et al.* 2006). Lorsque la moitié du diamètre du bois mort est plus petit que la profondeur du chenal, le bois mort peut rouler lorsqu'il entre en contact avec le lit ou bien glisser, mais peut aussi flotter selon la flottabilité du tronc (Bocchiola *et al.* 2006). En général, les accumulations de bois ou les embâcles sont situés sur les berges et les bancs d'accumulation exondés lorsque le chenal est plus large que la longueur du bois mort (Le Lay et Piégay 2007). Avec la largeur de la rivière Saint-Jean, les embâcles sont en majorité sur les berges, les quelques exceptions sont lorsque le lit du cours d'eau est peu profond et que le bois mort s'y accroche. Lorsque les embâcles se forment, ils modifient la morphologie en aval et en amont de l'embâcle (Figure 6). En amont de l'embâcle, on retrouve un mélange de sédiments plus grossier et fin puisque l'embâcle piège ces sédiments provenant de la charge de fond ainsi que des particules fines qui sont transportées par l'écoulement (Wohl *et al.* 2016). Pour ce qui des sédiments en aval, c'est surtout des sédiments plus fins, ceux qui sont retenus par l'embâcle (Wohl *et al.* 2016). Les lignes sur la figure 6a représentent le relief de la zone, plus elles sont rapprochées, plus la pente est importante, donc en amont sur la figure, il y a une fosse. La sédimentation du cours d'eau va dépendre du volume de bois sur l'aire de l'ensemble du chenal, de l'orientation du bois mort ainsi que de la stabilité de celui-ci (Wohl *et al.* 2016). Selon son orientation et sa localisation, un embâcle peut faire dévier l'écoulement, ce qui peut amener une hausse de l'apport en sédiments pour le lit du cours d'eau, mais peut aussi amener le phénomène d'affouillement à proximité des embâcles (Abbe et Montgomery 2003). Ce phénomène amène de l'érosion au niveau du lit ou au niveau des berges, ce qui peut amener un affaissement de la berge (Wohl *et al.* 2016). L'érosion des berges due à l'affouillement amène un recrutement de nouveaux morceaux clés ou de bois morts qui peuvent s'ajouter à un embâcle (Abbe et Montgomery 2003). Il se peut aussi que l'érosion des berges amène de grandes quantités de bois avec peu de morceaux principaux ce qui va créer des embâcles peu stables qui vont lors de crues approvisionner les embâcles en aval (Abbe et Montgomery 2003). Le bois mort parallèle à l'écoulement a moins de chance d'augmenter en termes de volume puisque la surface de contact lors du transport du bois mort vers un embâcle est moins élevée généralement qu'un embâcle perpendiculaire au cours d'eau. Les embâcles perpendiculaires sont ceux qui seront plus stables et qui accumuleront

davantage de sédiments avec le temps. Cela peut engendrer l'enfouissement des embâcles de bois et créer des îlots de végétation à long terme (Wohl *et al.* 2016).

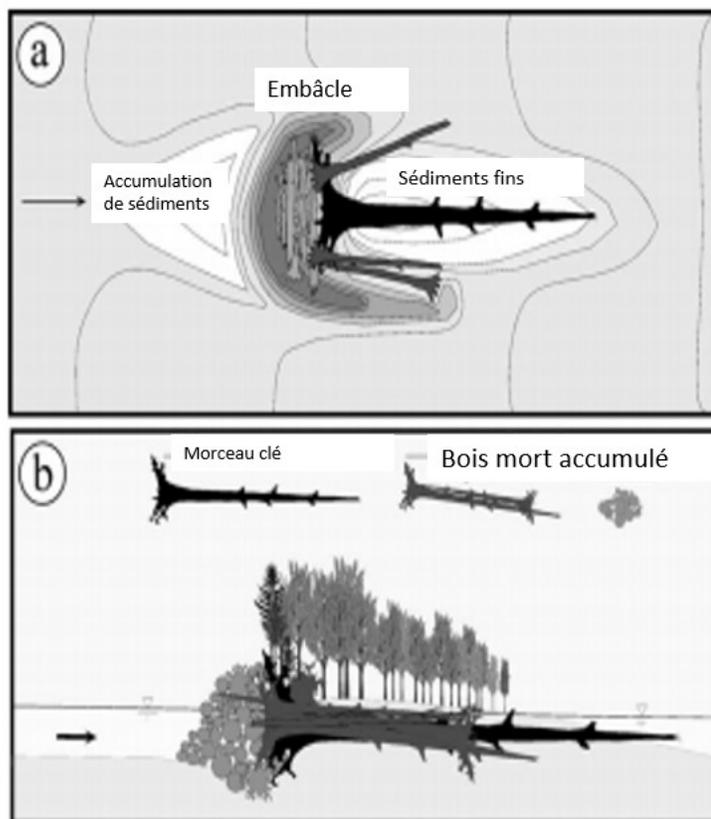


Figure 6. Représentation d'un embâcle situé dans le chenal avec un morceau clé. a) Vue en plan de l'embâcle, b) vue en coupe de l'embâcle (adaptée de Abbe et Montgomery, 2003)

Lorsqu'il y a formation d'un embâcle, le phénomène d'avulsion est possible puisque l'écoulement est dévié lorsqu'il entre en contact avec l'embâcle. Cette déviation amène un changement dans la trajectoire du cours d'eau et la création d'un nouveau chenal est possible. L'embâcle sera donc situé dorénavant dans l'ancien chenal puisque le bois mort viendra se stocker sur l'embâcle et l'écoulement ne passera plus dans ce chenal. À long terme, cet embâcle va se végétaliser (Abbe et Montgomery 2003).

Souvent les embâcles sont sur les bancs, mais on peut en trouver sur la berge extérieure. Ces embâcles sont souvent peu stables, mais certains peuvent rester accumulés pendant un certain temps. Avec la présence d'un embâcle sur la berge extérieure (concave), le méandre aura un rayon moins élevé qu'un méandre sans embâcles et le méandre aura une plus grande

amplitude (Figure 7). Le R sur la figure représente le rayon du méandre tandis que l'amplitude c 'est le chemin que le cours d'eau va utiliser selon une longueur linéaire, représenté par la largeur du méandre. L'embâcle stable va amener un élargissement du chenal puisque l'écoulement va être dévié par l'embâcle et va amener une augmentation de la vitesse d'écoulement dans des secteurs en aval (Abbe et Montgomery 1996).

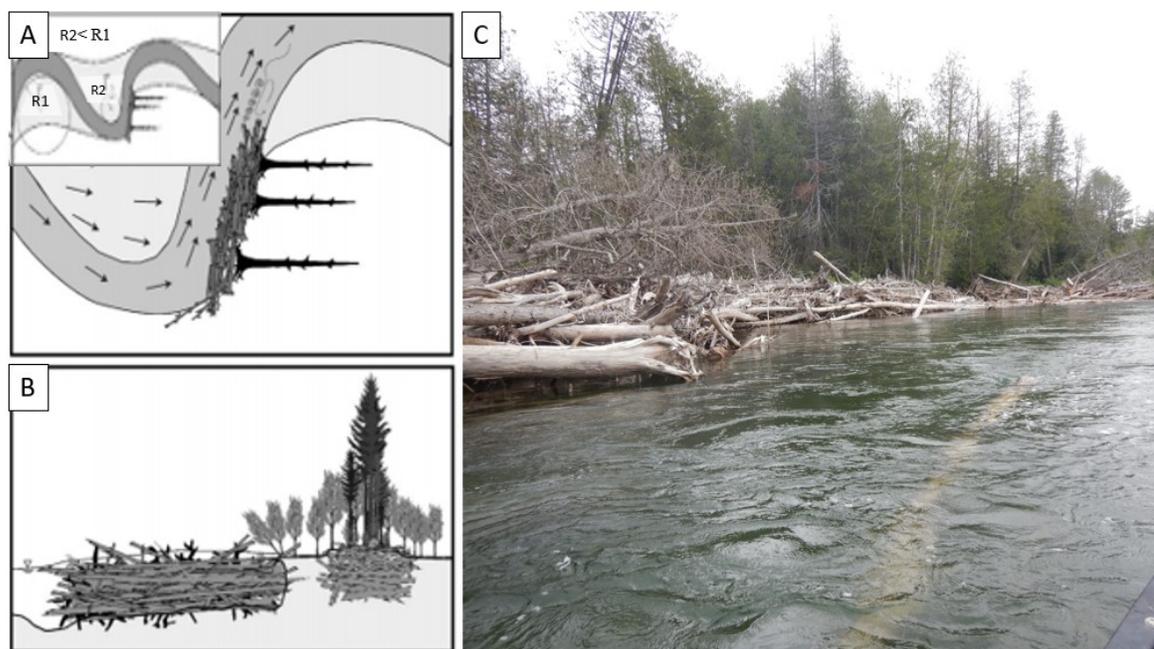


Figure 7. a) Schéma d'un embâcle situé dans un méandre, vue de haut, b) coupe longitudinale de l'embâcle dans un méandre, c) exemple d'un embâcle de la rivière Saint-Jean situé sur la berge concave d'un méandre (adaptée de Abbe et Montgomery, 2003)

Lorsqu'un embâcle est stable et qu'il est situé dans le chenal, il peut modifier les processus fluviaux, comme par exemple au niveau du transport sédimentaire, une modification dans les vitesses d'écoulement et engendrer un obstacle à l'écoulement. Ces embâcles créent des zones d'accumulation de sédiments et si l'embâcle s'étend sur une quasi-totalité du chenal, le niveau de l'eau peut augmenter et la formation d'un nouveau chenal (avulsion) est possible (Abbe et Montgomery 1996). Plus l'embâcle est stable et situé dans le chenal, plus il risque d'accumuler davantage de bois avec les années et jouera un rôle de plus en plus important sur la morphologie du cours d'eau (Montgomery et Piégay 2003).

Les embâcles ont aussi un rôle important sur la présence de fosses, peu importe la taille du cours d'eau (Abbe et Montgomery 1996; Chen *et al.* 2008). Sur une rivière graveleuse,

l'influence d'un embâcle de bois est significative sur la présence de fosses et sur la présence de bancs d'accumulation. Dans un cours d'eau avec un chenal alluvial large, les embâcles sont associés à 70 % des fosses présentes (Abbe et Montgomery 1996). Ces fosses ont tendance à être plus profondes que les fosses créées par le lit de la rivière et la variabilité dans les profondeurs de fosses est plus importante avec la présence d'embâcle (Figure 8) (Abbe et Montgomery 1996)

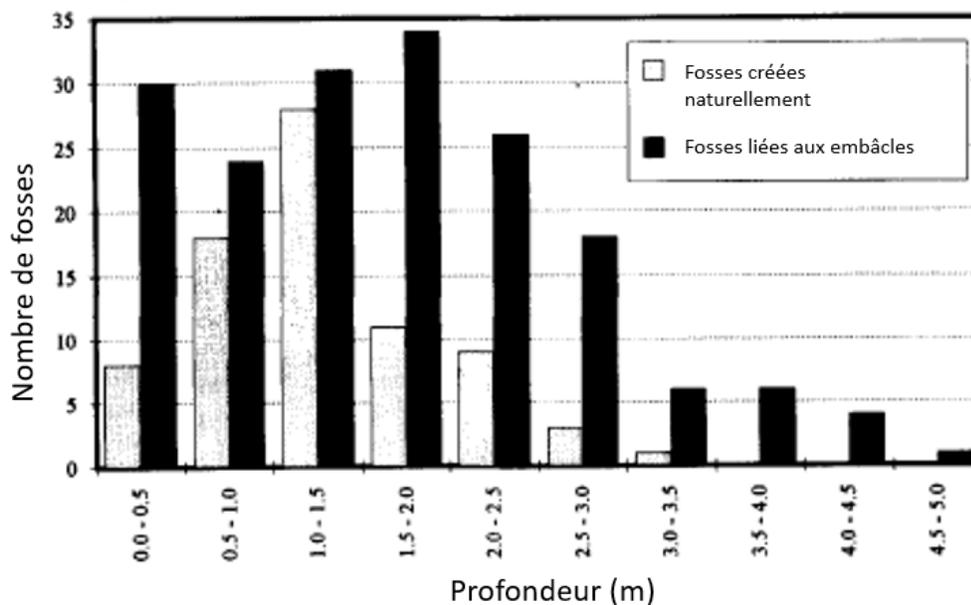


Figure 8. Profondeur des fosses liées aux embâcles et les fosses créées naturellement (traduite de Abbe et Montgomery, 1996).

La présence de ces fosses et des embâcles qui les créent amène une variabilité granulométrique importante pour les différentes espèces de poissons, les invertébrés ainsi que pour les bactéries en rivière (Angermeier et Karr 1984). Les fosses sont prisées pour différentes espèces de poissons, comme pour le saumon atlantique, puisqu'elles sont plus profondes que le lit du cours d'eau. La profondeur des fosses amène une baisse de la température de l'eau ce qui permet d'avoir des refuges thermiques durant les périodes d'étiage (Bocchiola et al. 2006). Les fosses sont aussi des secteurs de repos pour les espèces anadromes lors de la montaison et pour se réfugier face à des prédateurs lors des stades

juvéniles. Les fosses contribuent ainsi à une diversité des espèces et le cours d'eau devient un écosystème avec une plus grande biodiversité.

Dans un cours d'eau qui contient du bois mort, le phénomène d'érosion est autant et dans certains cas plus important selon la localisation et la position d'un embâcle sur la berge. Lorsqu'un embâcle ou un bois mort individuel est situé dans un angle de 90° à l'écoulement, donc perpendiculaires, les processus d'érosion sont plus importants que lorsque l'embâcle est parallèle au courant (Zhang et Rutherford 2020). Lorsque l'embâcle est parallèle, le courant garde la même vitesse sur l'ensemble du cours d'eau et de petites zones de ralentissement se créent à proximité des embâcles (Figure 9).

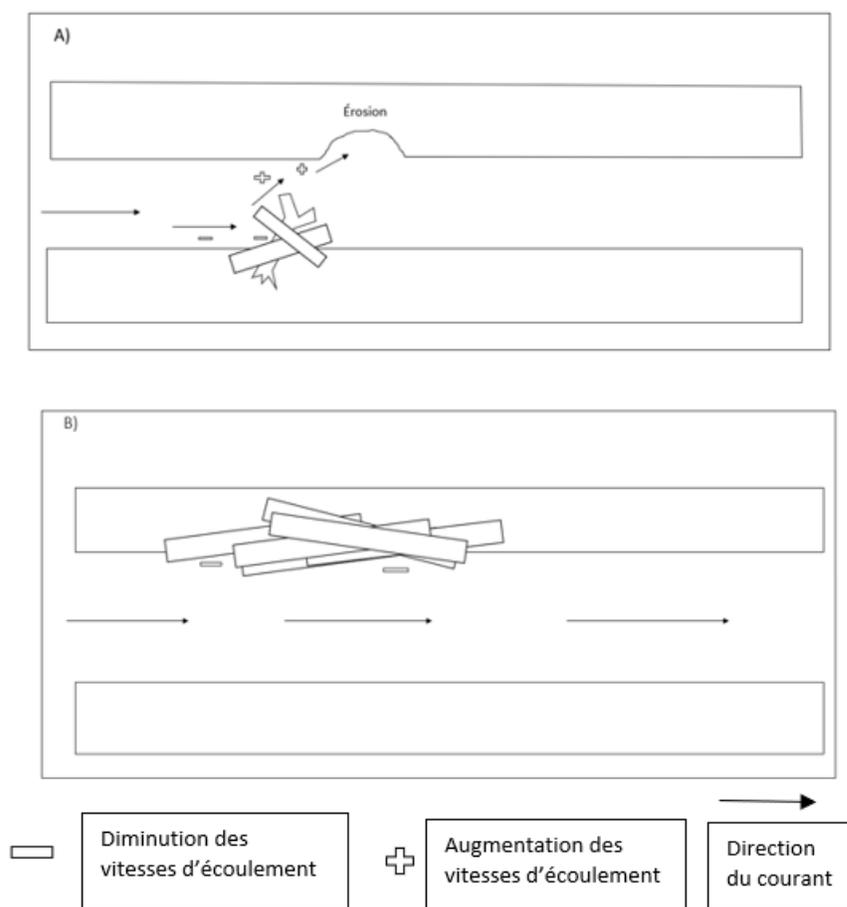


Figure 9. a) L'érosion de la berge opposée due à une hausse de la vitesse du courant en raison de la présence d'un embâcle perpendiculaire au courant b) Réduction du courant près d'un embâcle parallèle au cours d'eau qui protège la berge de l'érosion (©Antoine Carpentier)

L'érosion des berges ne dépend pas seulement de la position des embâcles ou du nombre de bois mort, mais aussi de sa localisation. Un seul bois mort individuel peut influencer un cours d'eau puisqu'il peut ralentir l'écoulement à proximité de la berge et ainsi diminuer l'érosion sur une berge. Il est préférable pour atténuer l'effet d'érosion que les bois morts individuels soient positionnés dans le cours d'eau à une distance rapprochée l'un de l'autre et de la berge au lieu d'être localisés de façon isolée. Lorsqu'ils sont isolés l'un de l'autre, l'érosion locale est plus susceptible d'apparaître que lorsque les bois morts sont positionnés près l'un de l'autre et qu'ils réduisent le courant (Zhang et Rutherford 2020). L'érosion des berges causée par des embâcles est différente sur les cours d'eau selon la position de l'embâcle, selon sa localisation et selon la composition des berges.

2.5 Le bilan ligneux

Le bilan ligneux est un concept assez récent dans les sciences qui étudient les systèmes fluviaux (Boivin *et al.* 2017b), mais est de plus en plus utilisé puisqu'il permet de bien comprendre la dynamique du bois en rivière aux différentes échelles spatio-temporelles. Le concept et les premières applications d'un bilan ligneux ont été développés par des chercheurs américains entre la fin des années 1970 et le début des années 2000 (Benda *et al.* 2003). À partir d'une analyse par bilan ligneux, on peut quantifier la dynamique du bois en rivière de façon temporelle (Keller et Swanson 1979; Benda *et al.* 2003; Montgomery et Piégay 2003). Le bilan ligneux est semblable au bilan sédimentaire qui recherche l'équilibre entre l'apport en sédiments, le stockage et l'évacuation à l'extérieur d'un système. Le bilan ligneux se divise donc en trois composantes : la zone de production, la zone de transport et la zone d'accumulation (Keller et Swanson 1979; Benda *et al.* 2003). Ces zones ne sont pas toujours très bien définies, mais en général les zones en amont sont celles qui produisent la majorité des volumes de bois mort en rivière qui vont se retrouver dans le cours d'eau. Dans ces zones, le chenal est souvent plus étroit et on peut y retrouver plusieurs embâcles puisque le bois est souvent plus large que le chenal (Curran 2010). Dans les zones de transition plus en aval, les embâcles sont souvent moins nombreux, mais les volumes sont plus élevés (Piégay et Gurnell 1997; Gurnell *et al.* 2002; Montgomery et Abbe 2006) Finalement, les

zones d'accumulation sont dans plusieurs cas la zone de rencontre entre le système fluvial et le système estuarien, car les chenaux sont moins profonds, plus nombreux, ce qui amène les volumes de bois à s'accumuler dans l'exutoire. La mise en place d'un bilan ligneux (production, transport, accumulation, exportation) permet de comprendre la dynamique du bois en rivière sur l'ensemble du bassin versant (Figure 10).

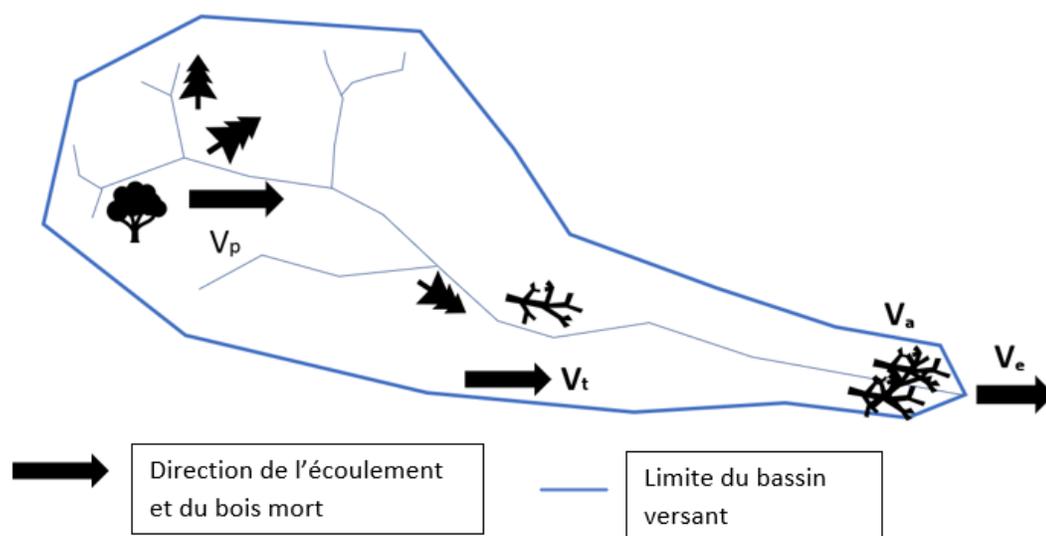


Figure 10. Représentation des composantes de la dynamique du bois en rivière sur l'ensemble d'un bassin versant. V_p : volume produit, V_t : volume transporté, V_a : volume accumulé, V_e : Volume exporté (adapté de Boivin et Buffin-Bélanger, 2010)

Il est possible avec le bilan ligneux de comparer ses trois composantes entre elles comme le volume recruté face au volume évacué, par exemple. Lorsque le volume évacué est plus faible que le volume produit, on comprend que la concentration de bois mort risque d'augmenter dans le cours d'eau. Lorsque le volume évacué est plus élevé que le volume recruté, le volume de bois dans la rivière a tendance à diminuer (Benda *et al.* 2003; King *et al.* 2013). Ces variations amèneront des changements morphologiques pour le cours d'eau. Ces variations de volumes sont dues aux changements hydrométéorologiques et aux événements (pluies torrentielles, feux de forêt, coupe forestière, modification du territoire, etc.) qui précèdent et qui succèdent ces changements. Ces changements hydrométéorologiques peuvent amener des

périodes de crues, des hausses soudaines du niveau d'eau, ce qui influence le bilan sédimentaire ainsi que le bilan ligneux (Benda *et al.* 2003; King *et al.* 2013).

2.5.1 Recrutement du bois en rivière

Le bois en rivière peut provenir de l'ensemble du bassin versant d'un cours d'eau. Plusieurs processus vont apporter du bois dans le cours d'eau, et ce bois provient majoritairement de la ripisylve. Cette formation végétalisée est primordiale pour la conservation des cours d'eau et pour la survie de la faune puisqu'elle représente une bande de protection pour le cours d'eau. Cette ripisylve est influencée par différents processus qui peuvent amener les arbres dans le cours d'eau, mais les processus changent selon la taille du cours d'eau ainsi que de la position du processus dans le bassin versant (Boivin *et al.* 2019). Lorsque le cours d'eau est de catégorie 1 à 3 donc que la largeur du niveau plein bord est entre 1 mètre jusqu'à 7 mètres, le cours d'eau est généralement linéaire et on retrouve peu de migration latérale (Chen *et al.* 2008). Donc l'apport en bois dans la rivière est dû majoritairement à des glissements de terrain, à des avalanches de neiges, de la mortalité naturelle ou des feux de forêt (Hassan *et al.* 2005; Lawrence *et al.* 2013). Ces apports comme mentionnés plus tôt sont moins importants puisque les arbres sont dans la plupart des cas plus larges que le chenal donc ils restent coincés et ne sont pas transportés avant la décomposition et la fragmentation (Nakamura et Swanson 1993; Hassan *et al.* 2005; Merten *et al.* 2010; Merten *et al.* 2013). Avec l'élargissement du chenal, on voit apparaître de nouveaux processus qui apportent du bois dans la rivière. Ces apports sont plus associés à des processus d'érosion des berges (Keller et Tally 1979; Marcus *et al.* 2002). Cette érosion des berges amène un apport de bois dans le chenal qui seront transportés et stockés puisque le chenal est plus large que la longueur des arbres (Benda *et al.* 2003). L'érosion se produit surtout en période de crue lorsque l'écoulement est élevé et qu'il met une pression sur les berges et cette pression fait déloger le matériel qui les compose. Cela amène un manque de support pour la section au-dessus qui malgré les racines de l'arbre, la pression est trop élevée et la zone cède et amène dans sa chute des arbres (Figure 11) (Boivin *et al.* 2019).



Figure 11. Exemple de l'érosion des berges et du manque de support de la berge sur l'arbre qui tombe vers le chenal
(©Antoine Carpentier, 2021)

L'érosion des berges dans des cours d'eau est généralement en augmentation plus on se retrouve en aval ainsi que près des confluences de tributaire et sur les berges concaves d'un méandre (Hooke 1980; Benda *et al.* 2003). Dans ces cours d'eau, on retrouve des processus qui apportent de grandes quantités de bois en rivière comme l'incision du chenal qui engendre l'érosion des berges, les crues instantanées et les phénomènes d'avulsion (Curran 2010). Les phénomènes d'avulsion sont l'un des processus qui amènent le plus de bois en rivière, car de grandes quantités de bois sont rejetées dans la rivière pour laisser place à un nouveau chenal (Seo *et al.* 2010). Les cours d'eau qui ont vécu des feux de forêt ont tendance à avoir de plus grands volumes de bois recrutés puisque ces arbres sont morts et ne soutiennent plus la berge, ce qui les rend vulnérables lors des périodes de crues (King *et al.* 2013). Ces cours d'eau connaissent aussi généralement une plus grande mobilité du chenal, ce qui amène de l'érosion, des pertes de berges et amènent une hausse de l'apport en bois (King *et al.* 2013). Les cours d'eau ont donc différents processus d'apport en bois de rivière selon la taille du chenal et selon la localisation du processus dans le bassin versant. Ces processus peuvent changer selon la mobilité présente et future du cours d'eau.

2.5.2 Transport du bois de rivière

Le transport du bois en rivière est différent d'un cours d'eau à l'autre puisqu'il dépend de trois composantes fondamentales : 1) les caractéristiques de l'arbre, 2) la morphologie du chenal et 3) le régime hydrologique (Gurnell *et al.* 2002). Le bois mort peut être transporté

si les caractéristiques physiques font en sorte que l'écoulement est assez fort pour le déplacer. Les arbres, qui sont plus longs que la largeur du chenal, vont rester bloqués sur les berges tandis qu'un arbre moins long aura plus de facilité à se déplacer. Il faut aussi prendre en considération le diamètre de l'arbre puisque pour augmenter la flottabilité et se déplacer, le diamètre doit être inférieur au niveau de l'eau du cours d'eau (Hassan *et al.* 2005; Curran 2010; Merten *et al.* 2010; Merten *et al.* 2013). Il faut aussi prendre en compte le système racinaire de l'arbre qui peut s'accrocher au lit de la rivière et l'immobiliser temporairement. Cette immobilisation du tronc peut faire en sorte que l'arbre devient un obstacle qui va accueillir d'autres arbres et créer un embâcle. Donc, plus le chenal est large, plus la mobilité du bois en rivière sera importante (Gurnell *et al.* 2002; Wohl 2013; Kramer et Wohl 2017). Lorsque les arbres sont bloqués par les deux berges, il faut un événement torrentiel pour déloger les arbres ou pour les fragmenter. Lorsque cela se produit, la majorité ou totalité du volume de bois va être acheminé vers les sections où le chenal est plus large en aval. Il faut aussi prendre en compte lors du transport de bois l'essence de l'arbre qui peut jouer un grand rôle. Les résineux sont des arbres avec un tronc assez uniforme et peu de branches lorsqu'il se retrouve dans le cours d'eau. Ils sont souvent les arbres les plus imposants en raison de leur volume (Wohl 2013). Pour ce qui est des feuillus, ils sont souvent plus fragmentés lors du transport que les résineux (Montgomery et Piégay 2003; Wohl et Jaeger 2009); (Merten *et al.* 2010). Cependant, lorsque le feuillu est encore en bon état, le réseau racinaire est plus imposant qu'un résineux, ce qui fait en sorte que l'arbre a plus tendance à s'ancrer sur le lit de la rivière. Ce sont souvent les feuillus qui agissent à titre de tronc clé, la pièce maîtresse d'un embâcle (Merten *et al.* 2010). Les chercheurs Harmon et al., (1991) ont mis de l'avant le fait qu'en général les conifères sont moins denses que les feuillus et que les feuillus s'imbibent d'eau plus que les résineux. Cela fait en sorte que les feuillus coulent davantage et s'ancrent au lit plus solidement (Harmon et Hua 1991; Webb et Erskine 2003).

L'autre composante est le régime hydrologique qui lui est primordial lorsque le chenal est plus large que la longueur de l'arbre (Gurnell *et al.* 2002; Wohl 2013). Dans ces cas, ce sont principalement les crues qui vont transporter de grands volumes de bois en rivière. Ces crues dépendent aussi des obstacles que l'on retrouve et qui peuvent permettre l'accumulation du bois mort, comme des bancs d'accumulation ou des infrastructures par exemple. Le

positionnement de l'arbre peut expliquer la force de l'écoulement lors de crues, puisqu'en s'introduisant dans le cours d'eau, l'arbre va se positionner parallèlement à l'écoulement tout en gardant un réseau racinaire sur la berge ou au fond du lit (Gurnell *et al.* 2002).

La morphologie du cours d'eau joue aussi un rôle, puisque la présence de bancs d'accumulation et de méandres influence la disposition du bois et son transport (Gurnell *et al.* 2002; Wohl et Scott 2017). Du bois en transport peut à tout moment s'arrêter à des endroits sur la rivière selon la morphologie du cours d'eau. Comme mentionné précédemment, la profondeur du cours d'eau est aussi primordiale puisqu'elle doit être plus élevée que la densité de l'arbre si l'arbre veut se déplacer.

Il faut aussi mentionner qu'au Québec particulièrement, on retrouve un couvert de glace sur les rivières et ce couvert joue un rôle important dans le transport du bois en rivière. Le couvert de glace et les débâcles qui suivent la fonte du couvert amènent le transport d'un plus grand volume de bois que lors de transport en eau libre (Boivin *et al.* 2017a). Avec le volume de glace et de bois transporté, le niveau d'eau est plus important dans ces périodes face aux crues en eau libre. Le bois transporté par le couvert de glace peut lui aussi se stocker sur des bancs d'accumulation ou autres obstacles et il peut même se stocker à des niveaux plus élevés sur le cours d'eau, car le niveau d'eau est souvent plus élevé qu'une crue sans glace (Boivin *et al.* 2017b).

2.5.3 Accumulation de bois en rivière

Lorsque le cours d'eau possède des obstacles naturels ou anthropiques comme des bancs d'accumulation ou des infrastructures, le bois se dépose et s'accumule. C'est dans ces moments que l'on peut retrouver des embâcles sur les bancs d'accumulation ou sur les piliers d'un pont. Ce dépôt dépend donc du niveau de l'eau et de la puissance de l'écoulement (Marcus *et al.* 2002). Lors de la formation d'un embâcle dans le chenal, sur un banc d'accumulation ou sur un autre obstacle, le bois s'accumule de l'aval vers l'amont dans la majorité des cas à partir d'un tronc clé (Abbe et Montgomery 1996; Piégay et Gurnell 1997). Cet élément est primordial puisqu'il doit être ancré assez solidement pour résister aux crues

et pour accueillir des arbres et troncs afin de créer des accumulations plus complexes (Piégay et Gurnell 1997; Gurnell *et al.* 2002; Abbe et Montgomery 2003; Collins *et al.* 2012). On peut retrouver différents embâcles dans un chenal en fonction de leur volume. On peut retrouver les embâcles totaux qui couvrent 90 % ou plus de la largeur du cours d'eau au niveau plein-bord (Curran 2010) ou les embâcles partiels qui couvrent seulement un certain pourcentage de la largeur de la rivière. Lorsque l'on fait face à des embâcles totaux qui bloquent la totalité du chenal (Figure 12), cela peut engendrer le phénomène d'avulsion en amont, car le cours d'eau se crée un nouveau chenal puisque l'écoulement est bloqué par l'embâcle.

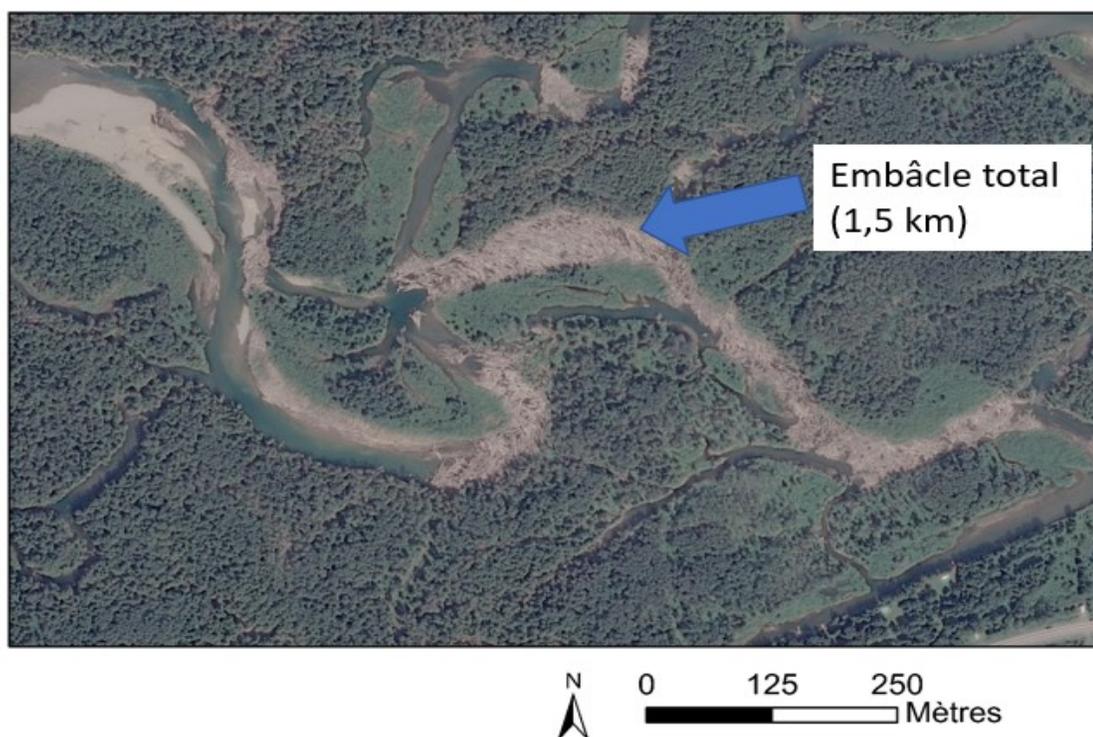


Figure 12. Embâcle total sur le chenal principal de la rivière Saint-Jean en 2013 (adaptée de Google Earth, 2021)

Comme pour le transport et la production de bois, la morphologie du cours d'eau, ainsi que les dimensions du chenal jouent un rôle primordial dans l'accumulation de bois. Lorsqu'un secteur du cours d'eau a une largeur plus faible qu'en amont ou en aval, le bois mort a tendance à s'accumuler et cette accumulation de bois morts progresse vers l'amont.

Il faut aussi mentionner que ce n'est pas tout le bois qui est accumulé, un certain volume est exporté hors du cours d'eau. Ce volume est difficile à calculer en raison du fait qu'il est souvent relâché dans un système plus grand que la rivière comme un fleuve, une mer, etc. Lorsque le chenal est bloqué, il est possible de calculer le volume de bois qui sortait de la rivière, mais lorsque le chenal est libre de circulation, il est impossible de calculer le volume de bois. Le bilan ligneux est donc partiellement calculé lorsque le volume de bois exporté est incalculable. Dans certains bilans ligneux, il faut aussi prendre en compte la décomposition du bois dans la rivière, mais avec le climat québécois et les périodes de froid, la décomposition est insuffisante pour avoir un impact réel sur les volumes en bois.

2.6 L'impact d'un démantèlement

Les démantèlements d'embâcles de bois sur un cours d'eau ne sont pas récents, ils existent depuis des dizaines d'années. Au départ, c'était pour faciliter la navigation, puis avec la période de la drave, les démantèlements étaient nombreux pour faciliter la descente des billots. Ces démantèlements étaient aussi pour augmenter la capacité hydraulique du chenal et pour la migration des poissons (Díez *et al.* 2000). Plusieurs études dans les années 80 ont voulu démontrer l'impact d'un démantèlement sur la morphologie d'un cours d'eau (Beschta 1979; Bilby 1984; Heede 1985; Gregory et Davis 1992; Lisle 1995). Ces études montrent l'impact d'un démantèlement dans de petits cours d'eau ou le démantèlement d'embâcles de petite taille. On ne retrouve aucune étude sur le démantèlement d'un embâcle majeur comme celle de la rivière Saint-Jean. Les impacts sont semblables, mais à moins grande échelle lors de démantèlement d'embâcle partiel ou d'embâcle qui n'obstrue pas la totalité du chenal.

Un démantèlement a plusieurs impacts sur la morphologie d'un cours d'eau ou sur l'écosystème autour de ce cours d'eau, mais les démantèlements sont souvent effectués dans un contexte de sécurité civile. Les démantèlements sont le résultat d'une décision de laisser libre circulation au cours d'eau. Cependant, plusieurs études montrent que les embâcles de bois en rivière jouent un grand rôle pour les différentes espèces de poissons en rivière puisque les amas de bois mort sont primordiaux pour l'écosystème (Angermeier et Karr 1984; Fausch et Northcote 1992; Biron *et al.* 2018a). Dans un écosystème, la matière organique est

importante pour la survie des espèces et lors d'un démantèlement, cette matière organique n'est pas retenue dans le cours d'eau (Fausch et Northcote 1992). Pour les espèces de poissons, les embâcles permettent d'augmenter la géodiversité fluviale, comme la création des fosses par exemple. Ces fosses vont créer des endroits à faible courant, avec des températures plus faibles. Ainsi, ces fosses créent des conditions idéales pour la survie du poisson dans un cours d'eau (Fausch et Northcote 1992). Lors d'un démantèlement, la présence de fosses diminue puisque le lit de la rivière devient plus homogène et s'uniformise par le remplissage des fosses par les sédiments (Fausch et Northcote 1992). Le lit possède moins de fosses, il est moins sinueux, plus large, donc les différentes espèces de poissons ont accès à un habitat moins diversifié sans embâcles (Fausch et Northcote 1992). Les secteurs avec des embâcles sont les secteurs où l'on retrouve les plus gros poissons et où le bois influence positivement la morphologie du cours d'eau (Figure 13) (Fausch et Northcote 1992).

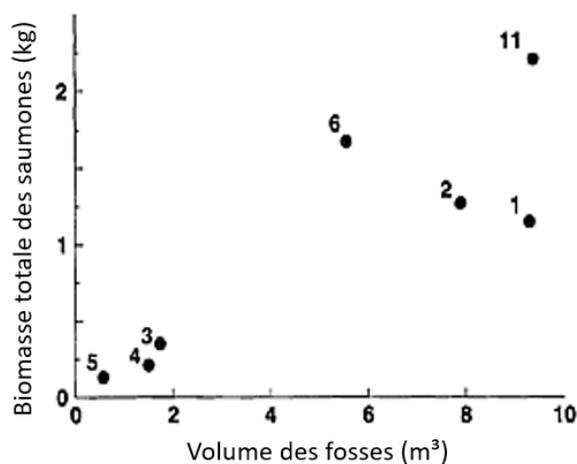


Figure 13. La biomasse totale des saumones selon le volume des fosses sur la rivière Musqueam et Cuthroat en 1990 (traduit de Fausch et Northcote, 1992)

Lorsqu'il y a un démantèlement, les vitesses d'écoulement sont généralement augmentées, ce qui peut amener une hausse de l'érosion locale et un apport en sédiments fins plus élevés présents près des embâcles (Wohl *et al.* 2016). Les sédiments grossiers stockés près de

l'embâcle seront aussi transportés par le cours d'eau et amèneront une hausse des sédiments grossiers dans certains secteurs en aval.

Les sédiments fins transportés après le démantèlement d'un embâcle se retrouveront dans les portions aval d'une rivière et augmentent le risque de colmatage du lit. Une étude a montré que le delta d'une rivière a tendance à augmenter en superficie directement après un démantèlement (Abbe et Montgomery 2003). Le delta de la rivière Queets aux États-Unis a vu sa taille augmenter en largeur et en longueur puisque près de 14 000 000 m³ de sédiments ont été introduits dans le delta sur une période de 29 ans suivant un seul démantèlement (Abbe et Montgomery 2003). Avec un démantèlement, le cours d'eau comporte de moins en moins de fosses et les fosses restantes sont de moins en moins profondes puisque le lit de la rivière s'incise. Aux États-Unis, sur la rivière Red, à la suite d'un démantèlement, le lit de la rivière s'est incisé sur une période de 19 ans (Díez *et al.* 2000). Les vitesses d'écoulement du cours d'eau sont en augmentation, ce qui amène un transport sédimentaire plus important. Cela engendre un déséquilibre sédimentaire puisque les sédiments sont plus facilement transportés et se retrouve dans l'exutoire de la rivière. Le démantèlement, qui amène une hausse des vitesses d'écoulement, peut amener de moins grandes surfaces de sédiments fins et une hausse des surfaces comportant des sédiments grossiers (Smith *et al.* 1993a; Díez *et al.* 2000). Sur une autre rivière des États-Unis, deux barrages ont été démantelés et cet événement a amené de grandes quantités de sédiments dans le reste du cours d'eau en raison du transport des sédiments et des vitesses d'écoulement. Les barrages peuvent avoir des impacts assez similaires à une autre échelle s'ils sont démantelés. Environ 65 % des sédiments exposés à la suite du démantèlement ont été érodés et de ces 65 %, seulement 10 % ont été déposés dans le cours d'eau, le reste est sorti du cours d'eau pour se retrouver dans le delta (Ritchie *et al.* 2018). Le transport de ces sédiments amène un changement dans la morphologie du cours d'eau. Les sédiments qui sont transportés dans un cours d'eau à la suite d'un démantèlement peuvent aussi se stocker sur le lit de la rivière et sur l'ensemble de sa trajectoire, ce qui peut amener une hausse du niveau du lit. Cette aggradation est souvent perceptible sur les bancs d'accumulation qui sont en hausse ou dans des zones de faible courant où le phénomène d'accumulation est plus propice que le phénomène d'incision. Un démantèlement va donc modifier le bilan sédimentaire d'un cours d'eau en augmentant ou

diminuant la quantité de sédiments, mais va aussi jouer sur la morphologie du cours d'eau en augmentant le phénomène d'érosion.

Étant donné les impacts d'un démantèlement sur la morphologie du cours d'eau et sur le bilan sédimentaire, la réintroduction du bois en rivière est un phénomène de plus en plus populaire en Amérique du Nord et dans quelques pays européens (Le Lay et Piégay 2007). Cette réintroduction est dans le but d'améliorer l'aspect hydraulique, écologique et morphologique d'un cours d'eau qui a été dégradé à la suite d'un démantèlement ou de multiples démantèlements dans le passé (Ruiz-Villanueva *et al.* 2016). La réintroduction permet de remettre en place des secteurs d'habitats pour le poisson, puisque le bois en rivière crée la majorité des fosses, endroit idéal pour la survie du poisson en rivière. Le bois en rivière va aussi diminuer l'érosion des berges, mais aussi l'érosion des sédiments fins situés à proximité des embâcles.

3. MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre décrit le territoire à l'étude, les démarches méthodologiques adoptées durant les campagnes de terrain et le traitement des données, pour répondre aux trois objectifs de cette recherche. Le premier volet se consacre au territoire à l'étude. Ce volet présente les différents secteurs de la zone étudiée de la rivière. Le deuxième volet est consacré à la cueillette de données sur le volume de bois en rivière lors des campagnes de terrain tenues durant les étés de 2019 et 2020. La dynamique spatio-temporelle du bois mort en rivière est représentée à partir de 2010 (données de Boivin, 2016) jusqu'à l'été 2020. Les campagnes de terrain ont eu lieu de 2010 à 2014 (Boivin *et al.* 2015; Boivin *et al.* 2017a; Boivin *et al.* 2017b) et de 2019-2020. Le troisième volet concerne la caractérisation hydrogéomorphologique du tronçon aval de la rivière avant et après le démantèlement de l'embâcle principal dans l'embouchure de la rivière Saint-Jean. Plusieurs aspects de la morphologie du cours d'eau seront caractérisés tels que la largeur, la superficie érodée, l'indice de sinuosité, etc. Ces aspects ont été analysés à partir d'images aériennes et satellites de 2014 à 2020. Le quatrième volet se penchera sur la caractérisation du delta de la rivière avant et après le démantèlement de 2015. Cette caractérisation considère la topographie et la bathymétrie du delta, la morphologie des différents chenaux, ainsi que les variations du volume de bois pré et postdémantèlement.

3.1 Site à l'étude

La rivière Saint-Jean est une rivière graveleuse qui s'écoule sur une distance d'environ 115 kilomètres et se jette dans la baie de Gaspé, à l'extrémité est de la péninsule gaspésienne (Figure 14). Dans le cadre de cette étude, les 60 derniers kilomètres ont été étudiés étant donné que la dynamique du bois mort est quasi inexistante dans la portion en amont en raison de l'absence des processus d'érosion, de bancs d'accumulation et de zones d'accumulation en bois (Boivin 2016). Le tronçon principal coule de l'ouest vers l'est de la péninsule gaspésienne à travers une vallée composée de dépôts fluvioglaciers et marins (Caron et Courtemanche 2001). Avec un bassin versant de 1 134 km², situé dans la MRC de la Côte-

de-Gaspé, la rivière prend sa source dans les Chic-Chocs, une chaîne de montagnes des Appalaches (Boivin 2016). Sur la couche rocheuse du lit de la rivière, on retrouve une couche de till avec des dépôts glaciaires provenant de la dernière glaciation (Demers *et al.* 2014). La glaciation Wisconsinienne a apporté les formes et dépôts sur l'ensemble de la rivière avec des moraines, le delta de la Saint-Jean ainsi que des terrasses de Kame. Ces terrasses sont composées de sable, de petits graviers ainsi que de till, ce qui est fortement représenté sur la rivière Saint-Jean. Le débit moyen annuel est de $30 \text{ m}^3/\text{s}$, la rivière est alimentée en majorité par les contributions en neige avec 371,8 cm en moyenne, ainsi que des précipitations annuelles liquides de 779,2 mm (Boivin 2016; Gouvernement du Canada 2022). La rivière Saint-Jean est une rivière graveleuse semi-alluviale, naturelle où l'on retrouve peu de modifications anthropiques et peu de tributaires importants. Cette rivière hydrogéomorphologiquement dynamique présente trois styles fluviaux distincts dans le corridor fluvial étudié de 60 kilomètres (Figure 15). La première section en amont située du kilomètre 60 au kilomètre 30 est de style alluvial avec la présence de méandres dynamiques qui s'écoule dans une large plaine alluviale avec une forte mobilité (Boivin 2016). Le secteur médian se situe du kilomètre 30 à 10 avec un style fluvial linéaire, semi-alluvial et contrôlé par la présence de berges à substrats rocheux. Un cours d'eau semi-alluvial est composé d'un mélange entre des sédiments fins et un substrat rocheux. Ce substrat fait en sorte que la migration latérale est très faible, même inexistante dans certains secteurs, et qu'on retrouve aussi peu de bancs d'accumulation, puisque l'apport de sédiments est faible dans ce secteur. Les sédiments provenant de l'amont sont évacués rapidement vers l'aval étant donné des puissances spécifiques élevées (Boivin *et al.* 2017b). Une puissance spécifique, c'est le produit entre la pente et le débit. Le dernier secteur du kilomètre 10 à 0 est un secteur similaire à celui en amont puisqu'il est aussi semi-alluvial et à méandres dynamiques. Ces deux secteurs (amont et aval) enregistrent une mobilité importante du chenal et la largeur du chenal varie de 50 à 70 mètres tandis que le secteur médian a une largeur moyenne de 40 mètres. Finalement, la dernière section qui se situe à l'embouchure de la rivière (section deltaïque), est un secteur avec un style fluvial anastomosé comportant de multiples chenaux composés majoritairement de sédiments fins (sableux et argileux). C'est un peu plus de 6 chenaux que l'on retrouve dans le delta, la plupart sont obstrués par des embâcles de bois ou sont presque asséchés durant la quasi-totalité de l'année. La dynamique de l'embouchure est influencée

depuis les années 1960 par la présence d'embâcles majeurs dont certains bloquent des chenaux, ce qui amène d'importantes avulsions avec une récurrence estimée tous les 10-15 ans (Boivin *et al.* 2015) (Figure 16). C'est dans le secteur aval que l'on retrouve l'un des plus gros embâcles au monde qui fût démantelé à l'hiver 2015.

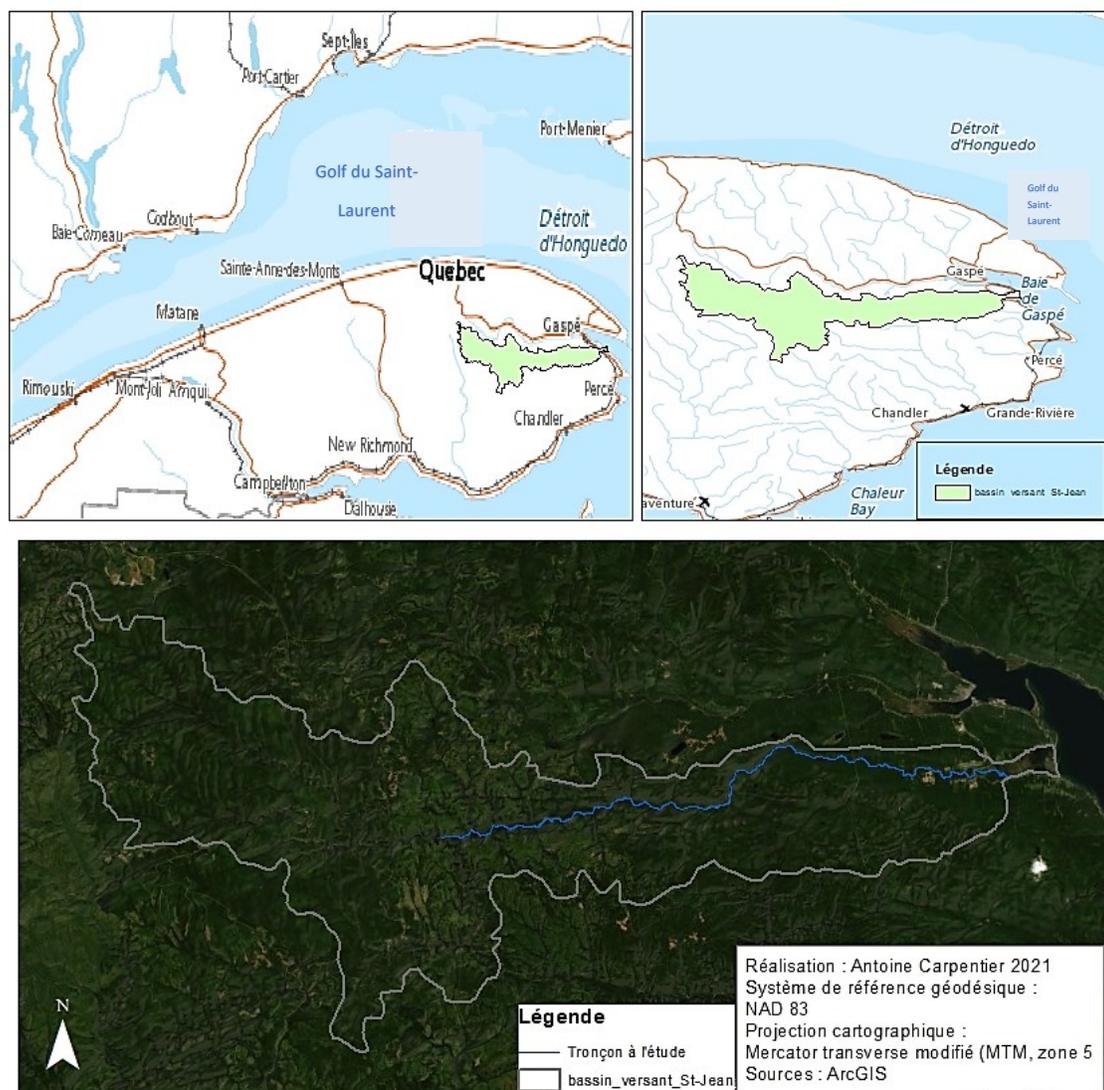


Figure 14. Localisation du bassin versant de la rivière Saint-Jean et du corridor fluvial étudié de 60 kilomètres de long (©Antoine Carpentier, 2021)

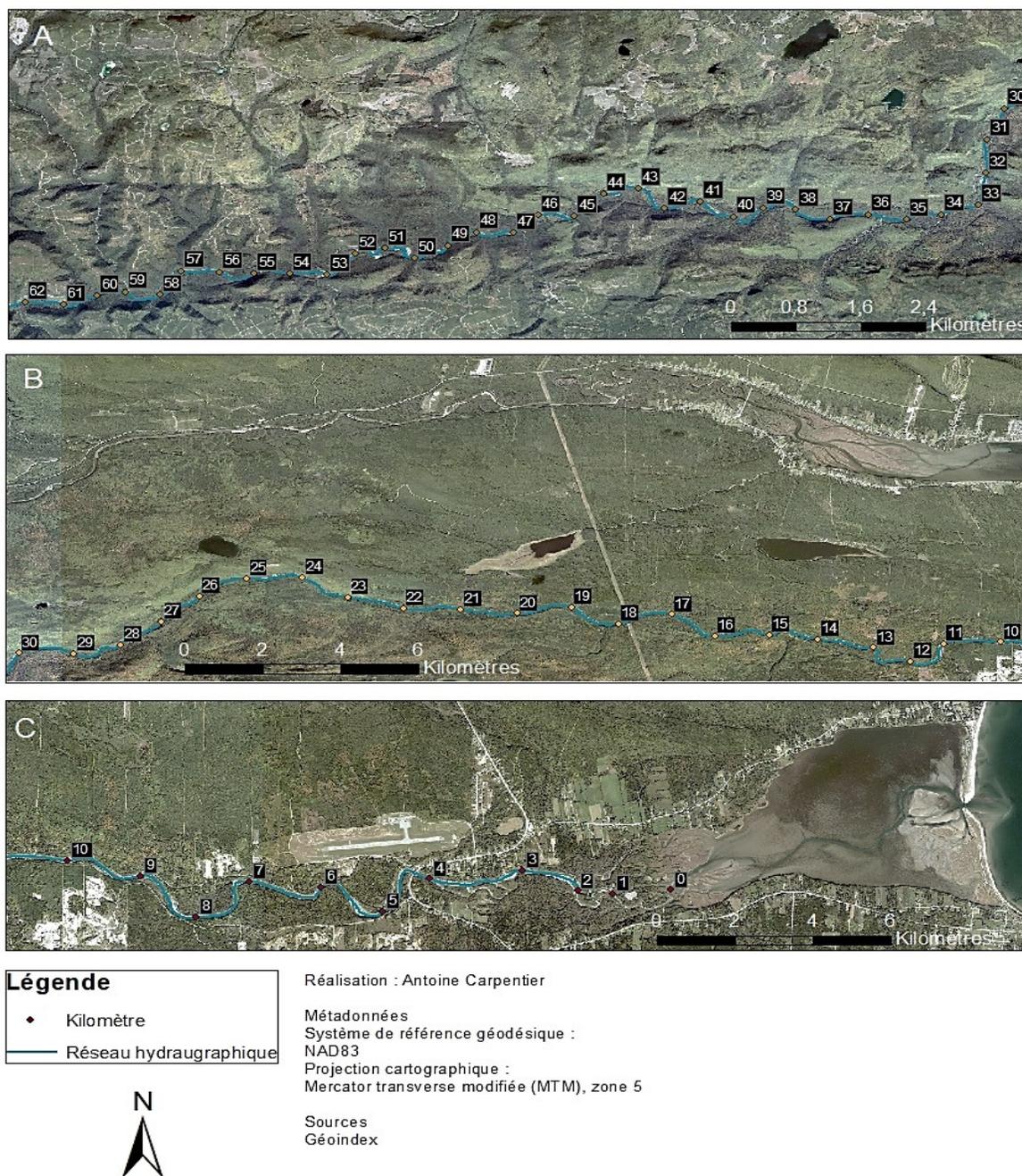


Figure 15. Localisation des trois styles fluviaux : a) Secteur amont (60-30) avec un style alluvial avec méandres, b) Secteur médian (30-10) avec un style linéaire semi-alluvial, c) Secteur aval avec style semi-alluvial avec méandres; Secteur du delta avec style anastomosé (©Antoine Carpentier, 2021)

Le climat de la rivière Saint-Jean (RSJ) situé sur la portion est de la péninsule gaspésienne est tempéré froid maritime (Savard *et al.* 2008) et les conditions hydrométéorologiques sont

influencées par la chaîne des Appalaches et par la présence du golfe du Saint-Laurent. La température moyenne annuelle est de 3,1 °C et la température moyenne pour la saison hivernale est de -8,8°C. Cette température fait en sorte que le couvert de glace est assez important sur la RSJ et qu'il est présent de décembre à avril généralement, pour ensuite amener une fonte du couvert de glace qui peut rehausser le niveau d'eau rapidement lors des débâcles mécaniques (Boivin *et al.* 2017a). Ce couvert amène aussi des phénomènes d'embâcles de glace, ce qui peut influencer l'apport en bois sur la rivière au printemps durant la fonte des glaces et de la neige (Kramer et Wohl 2014; Boivin *et al.* 2017b).

Pour ce qui est de l'activité humaine elle est peu présente sur la Saint-Jean, on retrouve en amont du pont de la route 132, une dizaine de bâtiments (résidences secondaires majoritairement) aux abords de la RSJ. En aval du pont on retrouve une vingtaine de maisons/chalets puisqu'on se retrouve dans un secteur plus près de la ville avec la présence de deux routes plus importantes.



Figure 16. Exemples d'embâcles majeurs bloquant un chenal sur la rivière Saint-Jean (©Antoine Carpentier, 2021)

3.2 Les données sur la dynamique spatio-temporelle du bois en rivière

Pour calculer les volumes de bois en rivière à l'échelle du corridor fluvial de 60 km, deux campagnes de terrain ont eu lieu durant les périodes estivales 2019 et 2020, lorsque le débit permettait de travailler dans la rivière en sécurité. La récolte des données s'est effectuée sur les 60 derniers kilomètres de la rivière en raison de la quasi-absence de la dynamique du bois mort en rivière en amont de ces 60 kilomètres (Boivin *et al.* 2015). Les volumes de bois obtenus lors du projet de Boivin (2016) qui s'est déroulé entre 2010 et 2014 ont aussi été analysés et ajoutés pour les comparer. Ces volumes de Boivin (2016) ont été calculés par une autre équipe ce qui peut amener des différences minimales, mais le volume total est assez différent selon les années en raison des périodes de crue. Plusieurs instruments ont été utilisés pour calculer et comptabiliser les données sur le volume du bois en rivière : GPS, mire de nivellement pour la hauteur des embâcles, ruban à mesurer, appareil photo, ainsi qu'une fiche de caractérisation des embâcles (Annexe 1). La fiche a été utilisée pour chaque embâcle identifié dans le corridor fluvial et pour chaque bois mort individuel. Tous les embâcles et les bois morts ont été identifiés, caractérisés, photographiés et localisés selon une position GPS. Les caractéristiques retenues sont le type d'embâcle (partiel, total ou majeur (plus de 15 troncs)), la position dans le cours d'eau et l'orientation. Les embâcles totaux obstruent la totalité du cours d'eau tandis qu'un embâcle partiel ou majeur obstrue en partie le cours d'eau. La position de l'embâcle dans le cours d'eau permet de situer l'embâcle au niveau des différentes unités morphologiques : dans la plaine alluviale, sur un banc d'accumulation ou dans le chenal. Avec la position vient aussi l'orientation de l'embâcle par rapport au sens de l'écoulement de la rivière. Chaque embâcle est positionné selon son angle approximatif. Comme mentionné dans les impacts d'un embâcle sur un cours d'eau, l'orientation de celui-ci peut avoir un impact sur la vitesse d'écoulement du cours d'eau, sur la présence d'érosion et sur sa stabilité dans l'écoulement. D'autres facteurs comme la composition des berges de chaque côté de l'embâcle sont pris en note tout comme la composition du lit du chenal. Pour ce qui est de la composition d'un embâcle, la provenance du bois mort est importante pour comprendre la distance parcourue par celui-ci et aussi pour expliquer si l'embâcle est formé d'arbres in situ ou transportés de l'amont. Le bois mort calculé individuellement est tout

arbre ou composante de l'arbre mesurant un mètre minimum et ayant un diamètre minimal de 10 cm (Piégay et Gurnell 1997; Wohl *et al.* 2010).

Les embâcles sont le regroupement d'un minimum de 3 arbres ou morceaux de bois avec une longueur minimum de 1 mètre et un diamètre de 10 centimètres minimum (Piégay et Gurnell 1997; Wohl *et al.* 2010). Pour le calcul du volume de bois, un embâcle est considéré comme une boîte en 3 dimensions pour faciliter les mesures sur le terrain (Figure 17). Dans l'embâcle, 90 % du volume est considéré comme de l'air, donc il faut enlever le volume d'air afin d'obtenir le volume réel en mètre cube (Thevenet *et al.* 1998). Pour calculer le volume d'un embâcle, l'équation suivante est utilisée :

$$V_{bm} = (L * l * H) * 0,1 \quad (1)$$

V_{bm} représente le volume en mètre cube de bois, L est la longueur, l la largeur, H la hauteur et 0,1 le pourcentage de bois dans l'embâcle (Thevenet *et al.* 1998). Le fait qu'environ 90 % d'un embâcle est de l'air a été étudié par Thevenet (1998), mais aussi par Boivin et Buffin-Bélanger en 2010. Pour ce qui est du volume du bois mort individuel, la longueur et le diamètre à la hauteur de poitrine (DHP) sont mesurés. Ce volume a été comptabilisé indépendamment du volume des embâcles afin de comparer les volumes des embâcles (3 pièces et plus) et les bois morts individuels. Ces volumes ont été mesurés sur deux étés différents afin de comparer les volumes totaux de 2019 et 2020. Les volumes de bois individuels n'ont pas été utilisés dans les volumes de bois totaux de la rivière en raison de leur proportion faible face aux volumes provenant des embâcles.

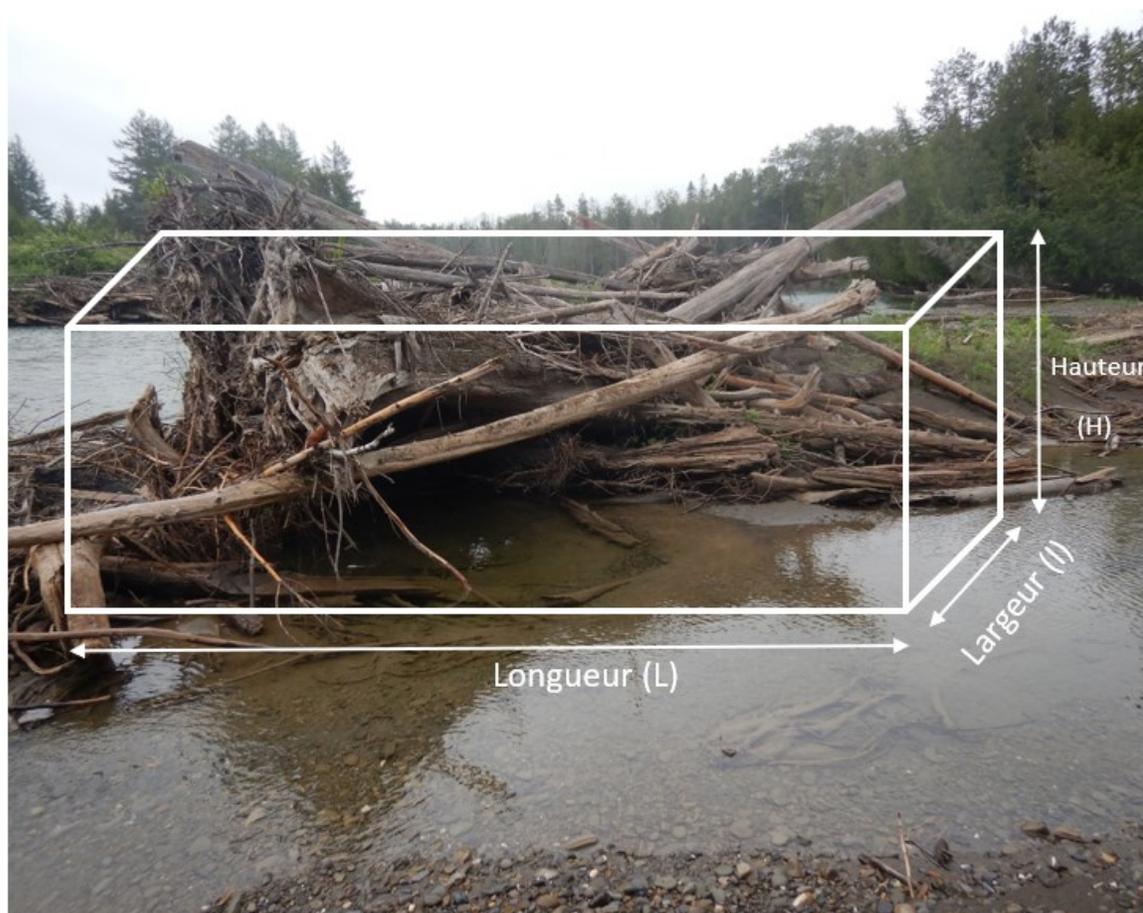


Figure 17. Représentation de la mesure d'un embâcle sur le terrain (©Antoine Carpentier, 2020)

Les embâcles et les bois morts individuels ont été géolocalisés à partir d'un GPS Garmin et leur point géographique a été ajouté sur une carte de la rivière afin de les localiser pour d'identifier les secteurs avec les plus grands volumes de bois et faire des comparaisons entre les secteurs.

3.2.1 Localisation et progression de l'embâcle du delta dans le chenal principal sud

Après le démantèlement en 2015 de l'embâcle qui obstruait le chenal principal sud dans l'embouchure, le bois s'est mis à obstruer à nouveau ce chenal à partir de 2017. Cet embâcle a donc été analysé à partir de 2017 jusqu'à 2021 grâce aux images aériennes et satellites obtenues par Google Earth. Deux sorties de terrain en 2019 et 2020 ont permis de confirmer les analyses d'images de 2019 et 2020. Les volumes mesurés par Boivin et al., (2015; 2017a;

2017b; 2018) ont été ajoutés pour augmenter la période de suivi de l'embâcle à 10 ans. Ces analyses se concentraient sur l'embâcle avant son démantèlement et permettent de comparer l'évolution suite au démantèlement majeur de 2015. L'embâcle terminal dans l'embouchure a été mesuré afin d'obtenir l'évolution annuelle des superficies (m^2). Des mesures de hauteur dans l'embâcle ont aussi été réalisées afin d'estimer les volumes de bois (m^3) accumulés annuellement (Figure 18a).

Ces volumes mesurés dans l'embâcle ont une marge d'erreur sous-estimée par rapport aux volumes totaux évacués par le bassin versant puisqu'une quantité de bois peut être évacuée du delta lors des crues importantes et des marées hautes. On retrouve un chenal à droite du chenal principal qui n'est pas totalement obstrué ce qui peut laisser passer une quantité de bois qui pourraient être calculés dans le volume de bois mort évacué (Figure 18). Aussi, on retrouve en amont de l'embâcle une jonction qui selon les années peut accueillir une certaine quantité de bois qui selon les crues vont venir se détacher pour aller se greffer à l'embâcle principal à la crue suivante. Cette quantité de bois est difficile à mesurer puisqu'elle peut s'ajouter à l'embâcle, elle peut être transportée dans l'autre chenal qui crée la jonction ou bien être évacuée du delta (Figure 18b).

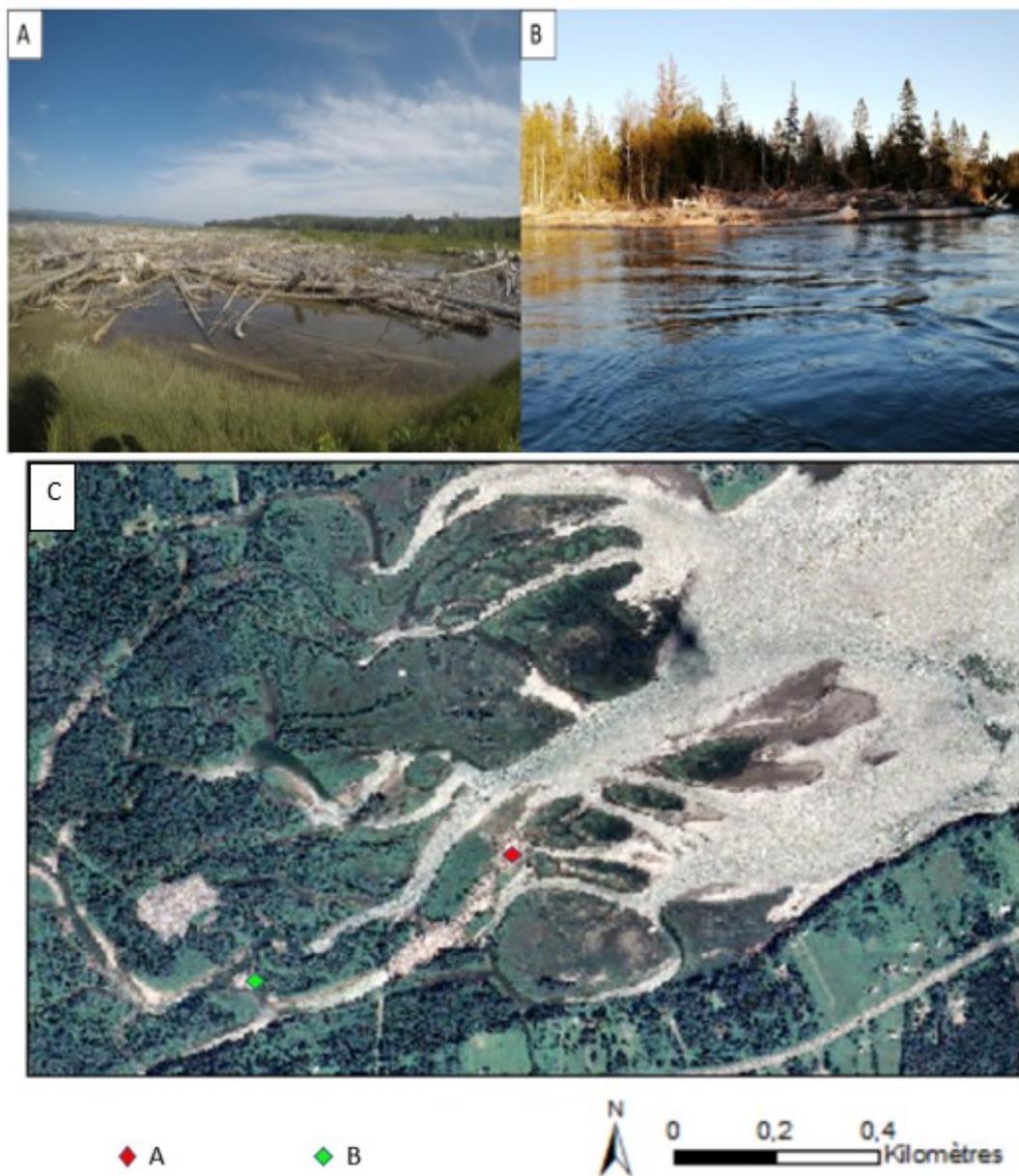


Figure 18. a) L'embâcle qui obstrue le chenal principal sud dans le delta, b) La jonction entre les deux chenaux qui accueille le bois mort qui sera transporté lors des crues, c) Localisation des embâcles a et b sur l'ensemble du delta de la rivière Saint-Jean (©Antoine Carpentier, 2021)

3.3 L'analyse hydrogéomorphologique

3.3.1 Analyse de débits

La mesure du débit de la rivière Saint-Jean permet de visualiser les périodes de crues et les périodes où le niveau d'eau est assez puissant pour modifier la morphologie du cours d'eau. On ne retrouve plus aucune station de calcul du débit sur la rivière Saint-Jean, la dernière a été en service de 1989 à 2006. Cependant, on retrouve une station encore opérationnelle sur la rivière York. Cette rivière dont le bassin versant est adjacent ou à proximité à celui de la rivière Saint-Jean a été utilisé pour estimer le débit de la rivière Saint-Jean. La rivière Saint-Jean possédait une station de mesure du débit ouverte jusqu'en 2006, dont les données ont été comparées aux débits des autres rivières pour obtenir une relation entre ces débits. La rivière York est celle qui a été utilisée puisqu'elle comporte des caractéristiques similaires à celle de la Saint-Jean comme sa longueur (110 km), la surface de son bassin versant (1028 km²) et la dynamique de son estuaire (plusieurs chenaux) (Boivin 2016). Une régression des moindres carrés ordinaires (R^2 de la régression linéaire) a été utilisée pour déterminer les coefficients d'une relation linéaire entre les débits des deux rivières (York et Saint-Jean) alors que la station sur la rivière Saint-Jean était opérationnelle (Figure 19). Cette relation permet de décrire les fluctuations conjointes des débits spécifiques journaliers des rivières et de prédire les débits de la rivière Saint-Jean à partir de 2006 (Figure 20). Le débit spécifique est le rapport entre le débit en m³ et la superficie du bassin versant correspondant (Benyahya *et al.* 2009).

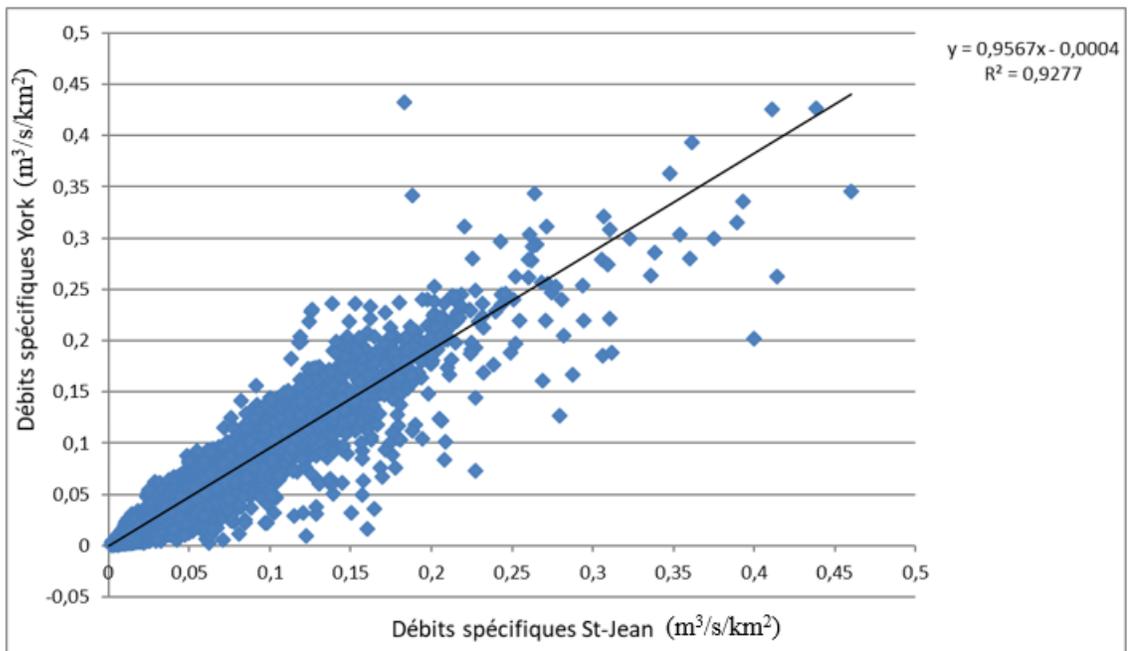


Figure 19. Relation entre les débits de la York et de la Saint-Jean (adapté de Boivin, 2016)

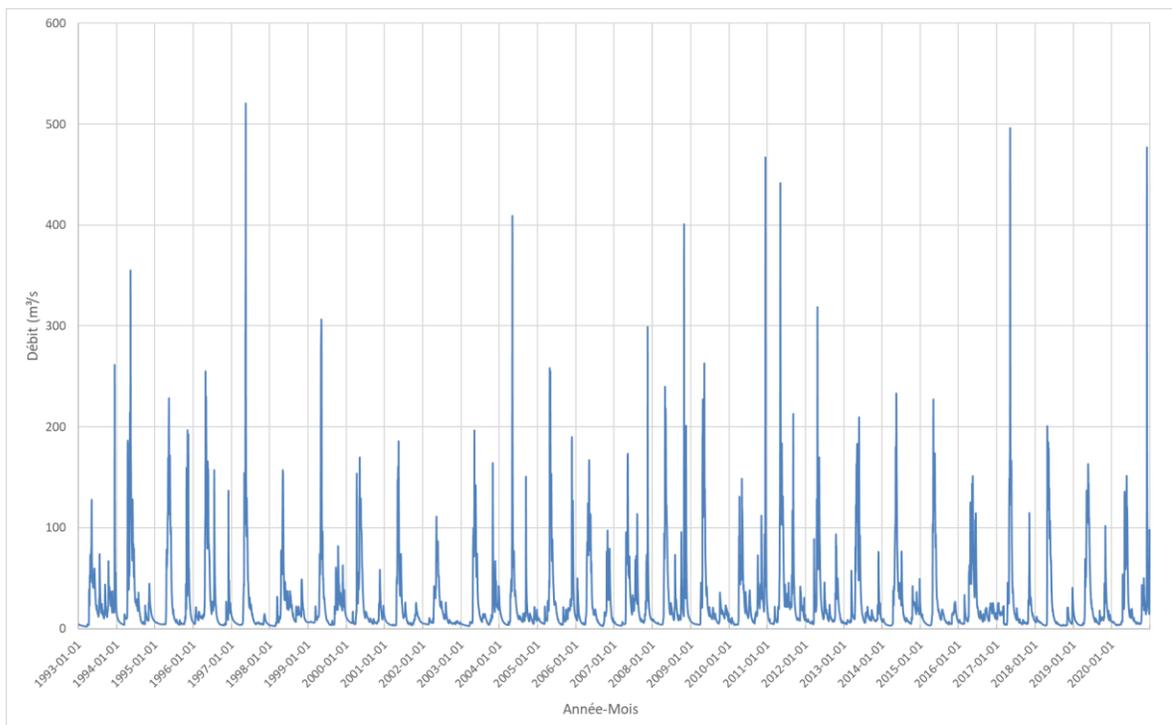


Figure 20. Projection des débits spécifiques de la rivière Saint-Jean (©Antoine Carpentier, 2021)

3.3.2 Géoréférencement des photographies aériennes

Les photographies aériennes historiques sont utilisées pour comparer les différentes années et pour effectuer des mesures par rapport à l'évolution du cours d'eau. Ces photographies doivent être choisies selon une période spécifique lorsque le débit est semblable ou identique entre les images. Si les débits de la rivière ne sont pas les mêmes durant la prise de ces photos aériennes, les mesures ne seront pas comparables comme la superficie des bancs d'accumulation qui varient selon les débits. Ces images doivent être géoréférencées à l'aide d'une orthomosaique géoréférencée. Le géoréférencement est une étape primordiale qui doit être faite de la bonne façon puisqu'il faut être le plus précis possible pour avoir le minimum d'erreur dans l'analyse des changements morphologiques sur le cours d'eau (Tableau 1). L'erreur moyenne de ces points référencés est de 0,9145 mètre. L'erreur résiduelle représente la différence en mètres entre les deux photos aériennes géoréférencées. Le x est la localisation est-ouest tandis que le y est sud-nord. L'erreur de ces points géoréférencés provient d'une image de 2017 prise dans l'embouchure de la rivière Saint-Jean. Cette image représente l'embouchure sur une longueur de 3,2 km et une largeur de 1,8 km.

Tableau 1. L'erreur en mètre des points pour le géoréférencement

Point référencé	Résiduel_x	Résiduel_y	Résiduel
1	0,08242010	-0,21531288	0,23054871
2	0,27827025	0,14680178	0,31461897
3	0,36739022	-0,41761176	0,55621503
4	-0,66382630	-0,79345801	1,03452452
5	-0,09634441	-0,05327415	0,11009260
6	0,55188347	-0,61707586	0,82786350
7	0,09299267	-0,16904140	0,19293168
8	-0,61278600	0,60581682	0,86169641
9	0,000000000	1,51315547	1,51315547

Les photographies aériennes de 2017 à 2019 ont été géoréférencées à partir de l'orthophotographie de 2016. Les images de 2016 ont été utilisées puisqu'elles couvrent l'entièreté du cours d'eau étudié. Cependant, les images aériennes de 2017 à 2019 proviennent de Google Earth Pro et ne couvrent pas l'entièreté du cours d'eau. Les images de 2017, 2018 et 2019 couvrent seulement les 18 derniers kilomètres du cours d'eau. Ces images ont donc été utilisées pour mesurer le secteur du delta de 2016 à 2019. Pour ce qui est de 2020, l'analyse des différentes composantes du cours d'eau a été analysée à partir des données LiDAR de 2020 qui couvrent la quasi-totalité du cours d'eau. Entre 2019 et 2020, il n'y a pas eu de grandes crues ce qui n'a pas amené de grands changements dans la morphologie du cours d'eau. Les orthophotographies de 2016 ont aussi été utilisées puisqu'elles couvrent la totalité de la rivière donc elles ont permis de comparer les données à celles analysées par Boivin et al., (2015; 2017a; 2017b) en 2014, avant le démantèlement.

Le géoréférencement consiste à prendre des repères géographiques au sol que l'on retrouve sur l'image à géoréférencer et l'image de référence. Sur le logiciel ArcGIS, en utilisant l'outil *georeferencing*, les points de l'image de référence vont être géoréférencés au même endroit sur l'image à spatialiser. En se retrouvant sur la même référence géographique, les deux images vont être superposées. Il peut y avoir un certain décalage entre les deux images selon la précision de la géolocalisation, la précision de la méthode et des choix de points au sol (Figure 21). Lorsque l'erreur résiduelle des points est près de zéro comme au tableau 1, le décalage entre les images n'est pas perceptible sur l'image. Les points de contrôle au sol doivent donc être judicieusement choisis, c'est pour cette raison que dans la majorité des cas, il est préférable de prendre des infrastructures. Les coins de bâtiments ou les intersections de routes sont souvent les meilleurs choix puisqu'ils ne bougent pas ou peu dans les années. Cependant, il se peut que l'image à géoréférencer ne contienne aucune infrastructure, dans ce cas, il faut prendre des objets qui sont isolés et facilement identifiables sur les deux images. Pour obtenir la meilleure précision possible, il faut prendre le plus de points de contrôle possible et les positionner sur l'ensemble du territoire. Si les points sont tous dans le même secteur, il peut y avoir un phénomène de torsion où l'image est bien géoréférencée près des points, mais avec des problèmes de distorsion à l'extrémité de l'image.

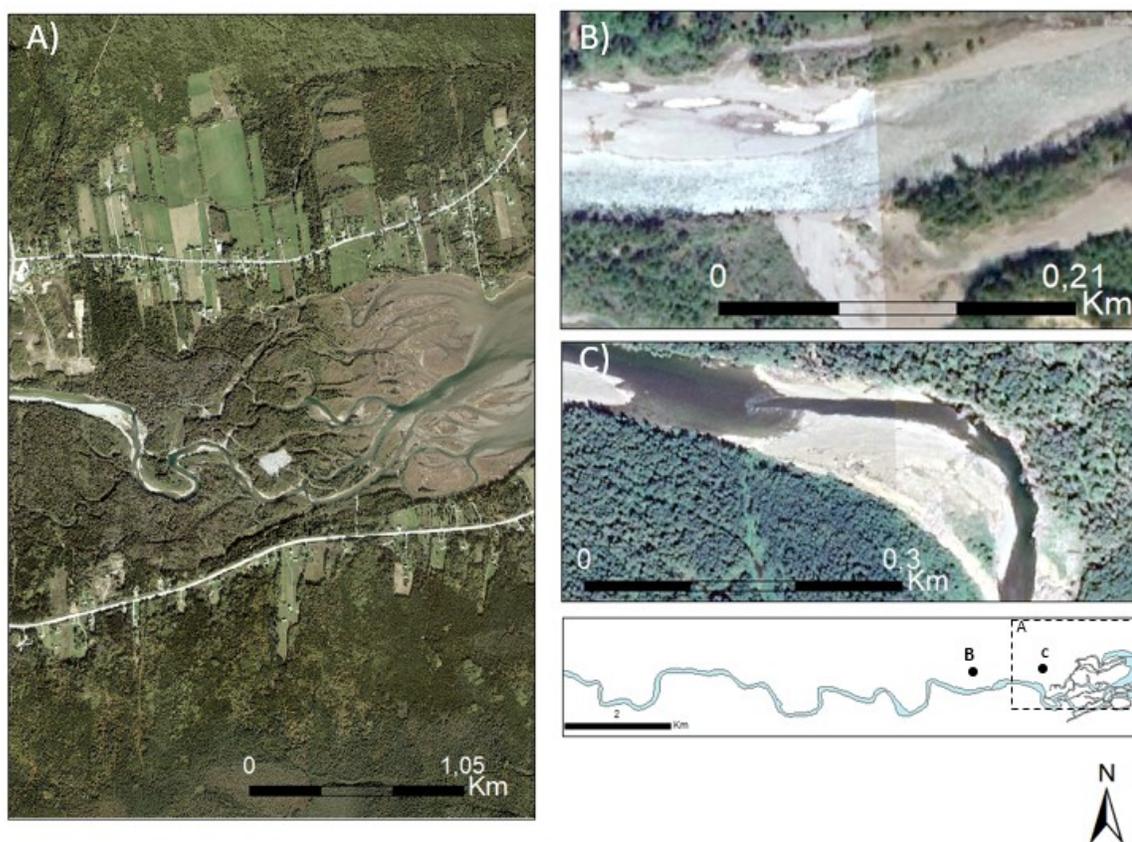


Figure 21. Localisation du tronçon géoréférencé de 2017 à 2019, a) l'orthophotographie de 2016 qui a servi de référence, b) géoréférencement de 2017, c) géoréférencement de 2019 (©Antoine Carpentier, 2021)

3.3.3 Trajectoire hydrogéomorphologique

Les différentes photographies aériennes géolocalisées permettent d'analyser la position du cours d'eau, sa forme et sa taille. Le fait de prendre des photographies de différentes années permet de témoigner des changements morphologiques (érosion, largeur, bancs d'accumulation...) du cours d'eau selon une période. À l'œil nu, il est difficile de voir les changements d'un cours d'eau selon les années, mais en superposant les photographies aériennes historiques, les changements survenus sont perceptibles et il est possible de quantifier ces changements. Ces changements sont perceptibles de façon quantitative grâce à des indicateurs mesurés à l'aide du logiciel ArcGIS. Les indicateurs mesurés sont la largeur du chenal, la superficie érodée, la sinuosité, la création de nouveaux chenaux et la superficie des bancs d'accumulation. Au total, six tracés ont été cartographiés à l'aide d'ensemble de

photographies aériennes couvrant l'entièreté du cours d'eau étudié : 1963, 1993, 2004, 2013, 2016, 2020. Pour le tracé de 2020, il a fallu utiliser les images LiDAR du gouvernement du Québec de 2020. Avec les données de pentes et du relief, il est possible de faire le tracé du cours d'eau. Le tracé du delta a aussi été fait au complet en incluant tous les chenaux. Les tracés du delta contiennent les mêmes années que le tracé du cours d'eau ainsi que les années 2017, 2018 et 2019.

Pour le tracé de chaque année, la vectorisation a été faite selon le niveau plein bord (niveau avant débordement sur la plaine alluviale) de la rivière Saint-Jean. Une vectorisation sert à rendre un élément, ici c'est le tracé en vecteur pour qu'il possède des coordonnées géographiques. Dans certains secteurs, il est difficile de déterminer le niveau plein bord selon la plaine alluviale. La limite a donc, dans ce cas, été délimitée au centre des arbres qui bordent la rivière. Avec l'angle de la prise de vue et l'ombre, il peut être difficile de déterminer la limite, c'est pour ces raisons que la limite est située sur les derniers arbres visibles avant le lit du cours d'eau (Figure 22).

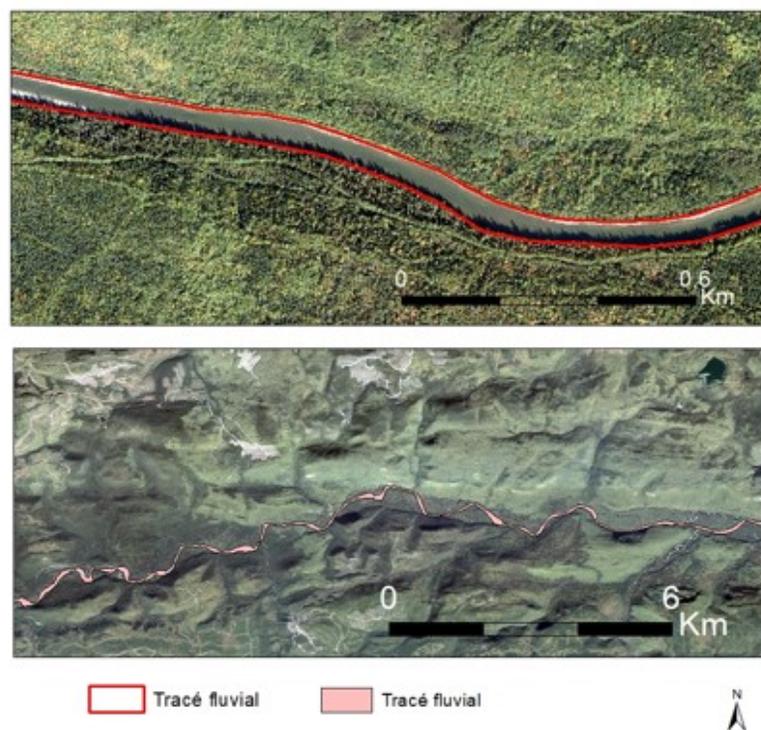


Figure 22. Représentation du tracé selon le niveau plein bord (©Antoine Carpentier, 2021)

La trajectoire de la rivière projetée selon les années montre les changements du cours d'eau, mais les différents indicateurs morphologiques mesurés selon les différents secteurs du site d'étude permettent de mieux percevoir les changements morphologiques de la rivière. Ces variables sont la largeur du cours d'eau, l'indice de sinuosité, les zones d'érosion et la superficie des bancs d'accumulation.

L'indice de sinuosité permet de montrer l'évolution de la rivière selon son intensité de méandrage. Lorsqu'un cours d'eau a un indice de sinuosité de 1, cela signifie qu'il est linéaire tandis que lorsqu'on dépasse des valeurs de 1.5, le cours d'eau possède des méandres davantage développés. Le calcul se fait sur le rapport entre la longueur du cours d'eau à vol d'oiseau et la longueur du talweg de la rivière. L'indice de sinuosité a été calculé sur l'ensemble du cours d'eau et il a aussi été calculé pour les trois secteurs de la rivière Saint-Jean. L'indice de sinuosité permet donc de comprendre les changements dans la morphologie d'un cours d'eau puisqu'un changement de la valeur montre que le cours d'eau subit d'avantage d'érosion et que des changements surviennent sur la rivière avec ce changement de sinuosité. Cela peut aussi dire qu'il y a des phénomènes d'avulsions qui augmentent la sinuosité ou qui peuvent la diminuer si le courant prend un chemin plus court après l'avulsion.

Le dynamisme d'un cours d'eau dépend de la mobilité qui est l'un des facteurs les plus importants pour comprendre la morphologie du cours d'eau. Cette mobilité influence grandement la trajectoire HGM et cette mobilité dépend majoritairement des facteurs géologiques, hydroclimatiques et anthropiques (Maltais 2019). Cette mobilité est calculée à partir des surfaces érodées entre différentes périodes selon la disponibilité des photos aériennes. Dans ce cas-ci, la mobilité a été calculée en 2016 sur l'ensemble de la rivière puis les années 2017, 2018 et 2019 ont permis de calculer les surfaces sur les 18 derniers kilomètres (selon la disponibilité des images aériennes). Ces surfaces sont le résultat d'une comparaison entre des trajectoires HGM comme celle de 2013 et 2016, une année avant le démantèlement et l'année après le démantèlement (Figure 23).

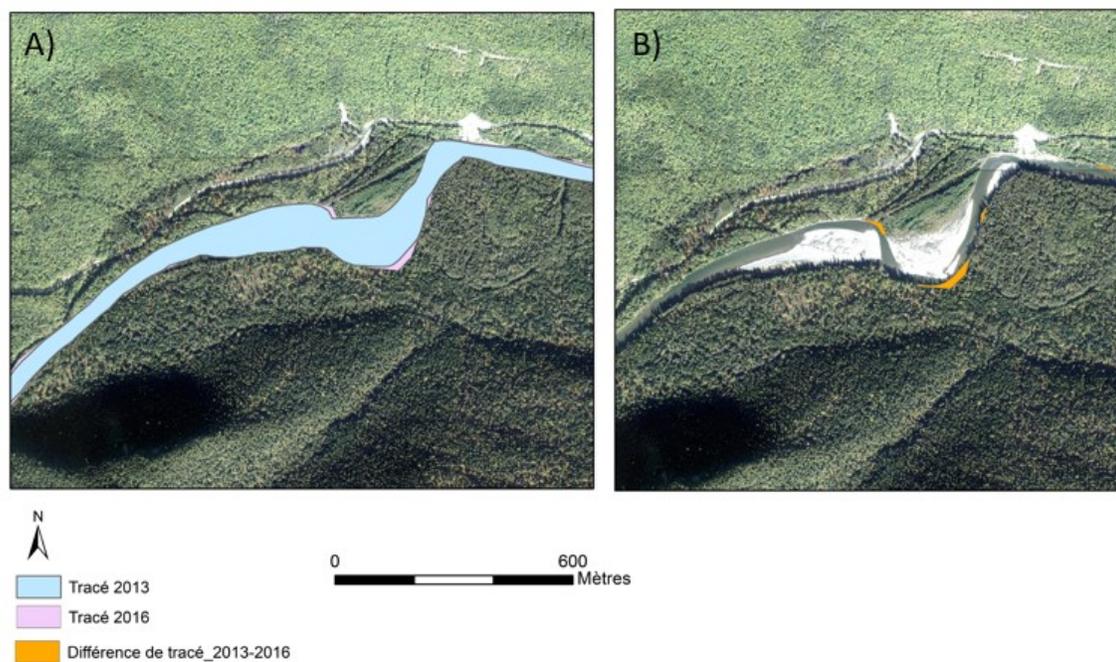


Figure 23. Quantification des surfaces érodées a) superposition des tracés de 2004 et 2013, b) identification des surfaces érodées (©Antoine Carpentier, 2021)

Cette superposition des tracés permet d'analyser l'évolution des surfaces érodées. Les surfaces érodées sont converties en polygones, ce qui permet de calculer les superficies d'érosion (m^2) entre chaque image. Pour connaître la distance de migration moyenne de chaque secteur, il a suffi de diviser le total des superficies érodées par le nombre de kilomètres représentant chaque secteur. Par exemple pour la période de 2016 à 2020, le secteur aval a eu des superficies érodées de $12\,739\ m^2$ pour une distance de 10 kilomètres donc $12\,739$ divisés par 10 donnent la superficie moyenne érodée dans ce secteur. Aussi, avec la distance de migration moyenne divisée par l'intervalle de temps entre les tracés, il est possible d'obtenir le taux de migration annuel moyen du cours d'eau. Pour connaître le taux annuel, il faut prendre le résultat du calcul précédent et le diviser par 4.

En lien avec la mobilité, la largeur permet de représenter l'érosion, mais aussi l'accumulation et la progression de la plaine alluviale. Avec la largeur, il est aussi possible de prendre en compte le phénomène d'avulsion qui peut être possible sur ce type de cours d'eau. Pour calculer la largeur, le tracé fluvial a été utilisé ainsi que la ligne centrale du cours d'eau. Cette ligne centrale est calculée en prenant le centre entre la berge gauche et la berge droite. À

partir de cette ligne centrale, il est possible de créer la largeur du cours d'eau. Cette largeur a comme limite les deux berges qui forment le tracé fluvial. Une largeur a été calculée à chaque transect distancé tous les 100 mètres. Avec des transects chaque 100 mètres, il est possible de différencier les secteurs selon la morphologie de la rivière et cette distance assure une précision plus homogène dans les analyses à l'échelle du site d'étude. Les transects ont été vectorisés sur les orthophotographies de 2016 pour prendre l'entièreté de la rivière. Pour les années 2017, 2018 et 2019, seulement le dernier secteur soit les 10 derniers kilomètres a été calculé, y compris le delta. Étant donné que les images aériennes entre 2016 et 2019 ne couvrent pas toutes la même superficie de territoire, la largeur a été calculée sur les 10 derniers kilomètres au lieu des 18 derniers kilomètres. Avec les images LiDAR, ainsi que les images aériennes de 2019 et 2021, la largeur de l'entièreté du cours d'eau a été calculée. La largeur varie selon les années et ce changement amène des modifications dans la distance d'un cours d'eau par rapport à son exutoire. La ligne centrale du chenal est donc utilisée pour garder la distance du cours d'eau tout en montrant les zones de mobilité.

Le dernier facteur calculé pour l'analyse dans les changements morphologiques est la superficie des bancs d'accumulation. Cette superficie est calculée de la même manière que les superficies érodées. Chaque banc d'accumulation qui était plus large que deux mètres (marge d'erreur), selon la résolution des images aériennes, ont été vectorisés en polygone. Ceux de moins de deux mètres n'ont pas été pris en compte puisque les images n'ont pas toutes été prises la même date annuellement, donc le niveau d'eau de la rivière peut être différent et certains bancs n'ont pas la même taille. Tous les bancs ont été répertoriés et grâce aux polygones, la surface peut être calculée en m². Ces superficies sont additionnées pour obtenir le volume total des bancs d'accumulation sur l'ensemble de la rivière, mais aussi selon les trois secteurs homogènes dans le bassin versant et dans la zone estuarienne. Le total de chaque année pouvait donc être comparé avec les autres suivis ou selon des périodes comme avant le démantèlement (2013) et après (2016). Ces polygones sont représentés sur la rivière pour les comparer d'une année à l'autre et pour identifier et quantifier les zones d'accumulation de sédiments et les zones de perte (Figure 24).

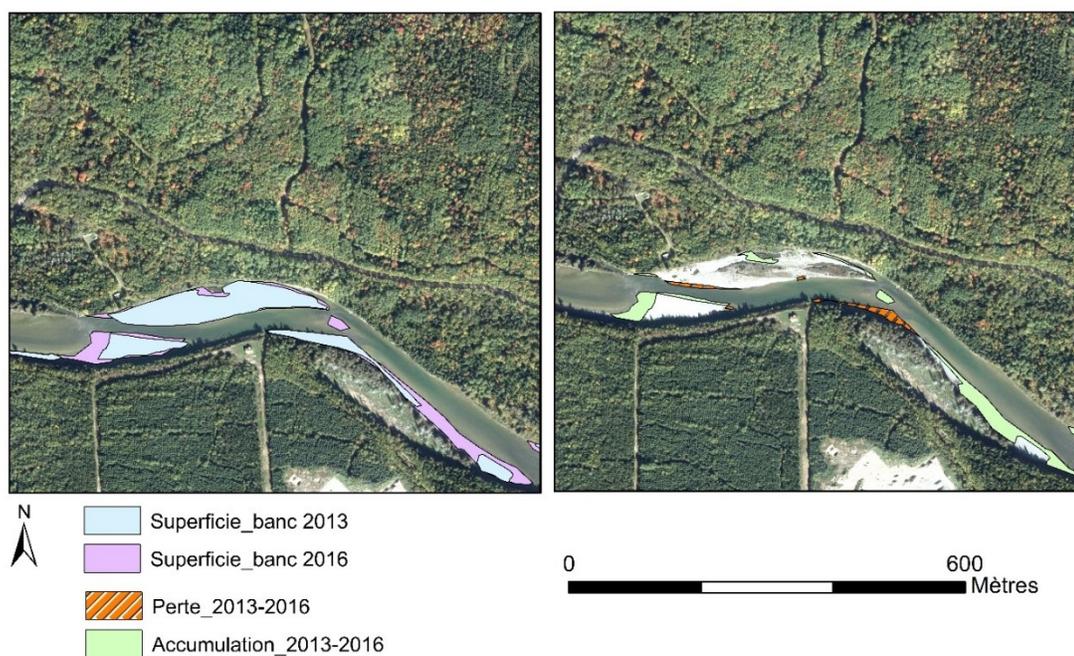


Figure 24. Différence entre les surfaces des bancs d'accumulation de la rivière Saint-Jean entre 2013 et 2016 (©Antoine Carpentier, 2021)

3.4 Changements morphologiques dans l'embouchure

Le dernier objectif est d'analyser les changements morphologiques dans l'embouchure suite au démantèlement de l'embâcle de 1,5 km dans le chenal principal sud du delta. Pour ce faire, la trajectoire HGM a été utilisée pour les années 2013, 2016, 2017, 2018 et 2019. Pour obtenir les données sur les changements morphologiques du delta, un profil en long a été réalisé sur le cours d'eau à partir du pont de la route 132 en 2020. Un profil du cours d'eau a été réalisé en 2016, soit un an après le démantèlement, à l'aide d'une bouée bathymétrique monofaisceau (Hydroball) (Annexe 2). Cet instrument a une très bonne précision pour ce genre de prise de données. Lorsque la profondeur est de 5 mètres et moins, l'erreur possible est de 5 cm sur la profondeur du lit. Lorsqu'on se retrouve à une profondeur de 10 mètres, l'erreur est de 10 cm. Cet outil est donc souvent utilisé pour faire des profils d'un cours d'eau en raison de sa fiabilité (Rondeau *et al.* 2016). Pour le profil en long de l'été 2020, un échosondeur monofaisceau Sea Floor de la compagnie Hydrolite a été utilisé (Berber et Wright 2017). Cet outil a aussi une marge d'erreur assez faible, entre 2 à 5 cm, puisque le

signal pour le positionnement des données provenait de l'aéroport qui était à moins de quatre kilomètres des points les plus éloignés. Les points qui étaient très différents des autres à proximité ont été nettoyés pour ne pas influencer le profil. Ces outils permettent de relever des données sur la profondeur de l'eau et la surface de l'eau afin d'obtenir le profil en long du lit et de la surface de la rivière. Ainsi, une mesure était prise chaque mètre linéaire du cours d'eau à l'aide des deux différents échosondeurs. Pour avoir le meilleur profil possible, le tracé de la rivière a été effectué trois fois pour prendre la profondeur à trois endroits différents sur la largeur de la rivière. Le profil a donc été réalisé à partir de ces mesures sur les 4 derniers kilomètres de la rivière afin de couvrir le secteur influencé par le démantèlement de l'embâcle principal dans l'embouchure de la rivière Saint-Jean.

Pour le profil, il a aussi fallu prendre des mesures pour identifier les bris de pente, la localisation des fosses ainsi que les secteurs qui ont été modifiés. Pour cela, à l'aide d'un canot, des profils transversaux ont été réalisés. Ces profils étaient difficiles à prendre puisqu'en raison du débit et le maniement du canot, les diagonales ne sont pas toujours exactement d'une rive à l'autre, mais permettent quand même d'analyser les changements morphologiques pré et postdémantèlement. Deux descentes ont été réalisées pour avoir le plus de sections transversales possible et prendre le plus possible la forme du lit de la rivière. Un DGPS a été utilisé pour prendre des mesures sur les berges, dans la plaine alluviale ainsi que dans certains secteurs du lit de la rivière. Le DGPS utilisé est de marque Leica (GS07). Un point était pris à chaque changement de pente dans le lit ou sur la plaine. Le point n'était pas pris lorsque l'erreur dépassait 5 cm. Pour la mesure du lit et de la topographie, la borne géodésique (M11K1000) située à proximité de l'aéroport de Gaspé a été utilisée comme référence afin d'améliorer le niveau de précision des relevés topographiques (Figure 25). Dans l'embouchure de la rivière, les chenaux obstrués n'ont pas été mesurés en raison de la présence trop importante de bois, ce qui empêche de prendre des données sur le lit de la rivière et il était impossible de parcourir ces chenaux en canot ou à pied.

Le profil de la rivière mesuré à l'été 2020 a été comparé à celui réalisé en 2016 afin de comparer les deux lits et voir si le profil a été modifié depuis le démantèlement. Pour bien représenter les différences dans la morphologie du cours d'eau et les différences dans la

topographie, une comparaison des données du LiDAR de 2012 et 2016 a été faite (Figure 26). Le LiDAR permet d'obtenir des modèles numériques de terrain, de surface et d'élévation. Ces modèles permettent donc sur un cours d'eau d'obtenir des données sur la surface de l'eau. Les données LiDAR ne prennent pas en compte le fond du lit d'un cours d'eau. Il est donc primordial si l'on veut comparer des années, d'avoir un LiDAR avec des débits similaires entre les années puisque la prise de mesures se fait durant l'été. Cette différence est appelée un DoD (Digital Elevation Model of Difference). Ce DoD permet de voir les secteurs érodés ainsi que les secteurs avec une accumulation de sédiments (Loghin 2016).

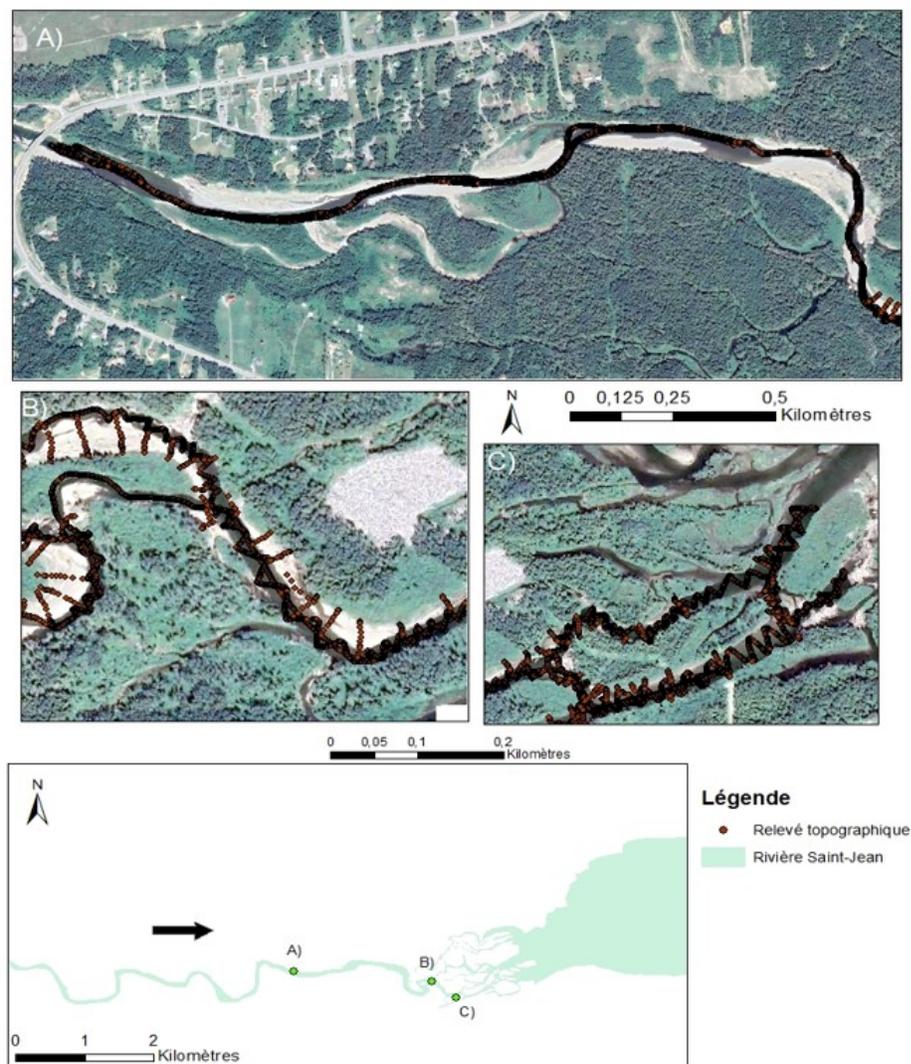


Figure 25. Exemple des relevés topographiques au DGPS de 2020 sur un secteur de la rivière Saint-Jean (©Antoine Carpentier, 2021)

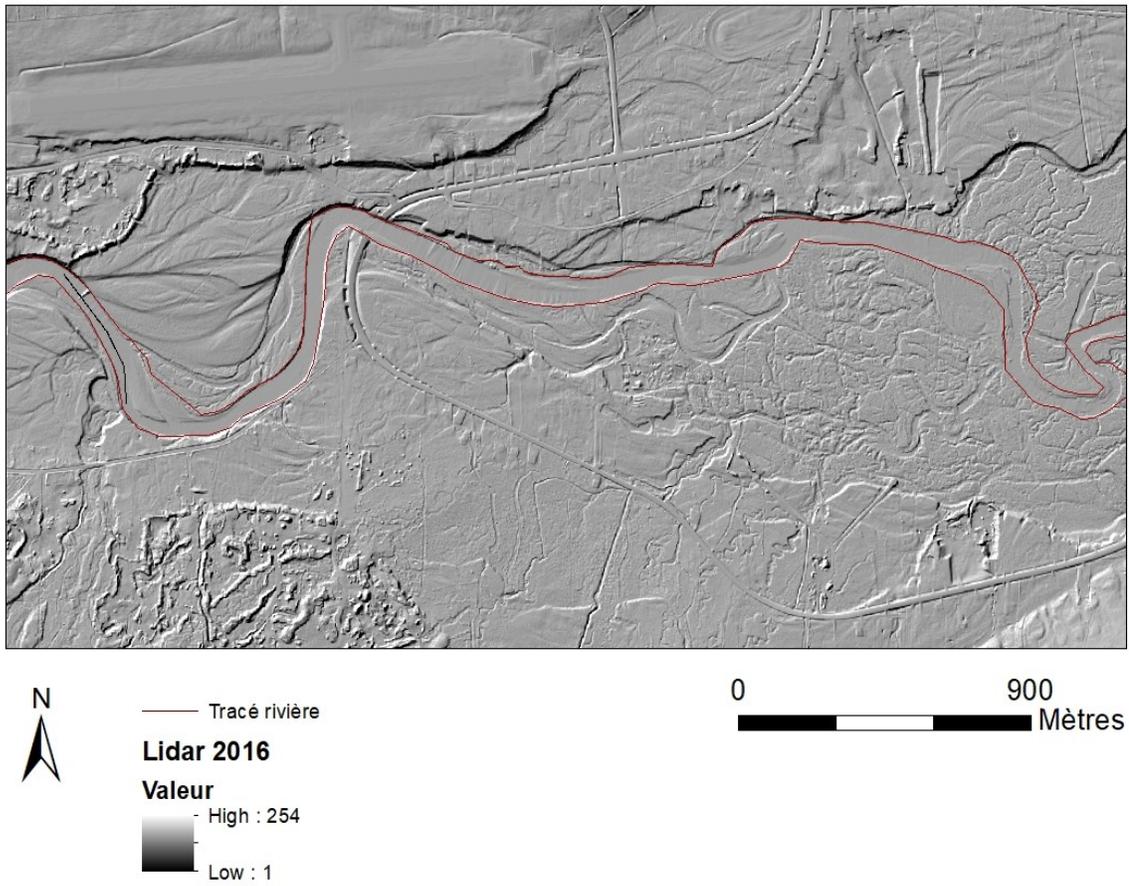


Figure 26. Exemple du LiDAR de 2016 utilisé pour le Digital Elevation Model of Difference (DoD) (©Antoine Carpentier, 2021)

4. RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats de la dynamique du bois mort sur la rivière Saint-Jean avant et après un démantèlement majeur ainsi que l'impact d'un tel démantèlement sur la morphologie de la rivière. La première partie concerne la distribution du volume de bois sur l'ensemble de la rivière sur une période de deux ans (2019-2020). Ce volume est comparé avec les volumes obtenus entre 2010 et 2014 dans le cadre des travaux de Boivin (2016). Le deuxième volet se penche sur les changements hydrogéomorphologiques avant et après le démantèlement sur l'ensemble de la rivière, incluant la portion de l'embouchure où le démantèlement a eu lieu. Le dernier volet concerne les changements morphologiques dans l'embouchure sur les différents chenaux en comparant avant et après le démantèlement.

4.1 La dynamique du bois mort sur la rivière Saint-Jean

Le volume des bois morts individuel a aussi été mesuré durant les deux terrains, mais ils n'ont pas été utilisés dans les résultats en raison du manque de données des volumes de bois mort pour les terrains de 2010 à 2013 (2019 : 5658 m³; 2020 : 7079 m³). En n'ayant pas de données pour les terrains de 2010 à 2013, il est difficile de comparer les volumes de bois mort de seulement deux années. À l'été 2019, c'est 353 embâcles qui ont été recensés pour un volume total de 11 410 m³, tandis qu'à l'été 2020, 326 embâcles ont été recensés pour un total de 9 844 m³ (Figure 27). Entre l'été 2019 et 2020, 27 embâcles se sont déplacés ou ont été ajoutés à d'autres embâcles. En moyenne, c'est 6 embâcles par kilomètre de rivière. Certains secteurs ont eu beaucoup plus d'embâcles en raison de la présence plus importante de bancs d'accumulation et la présence de méandres. Ces secteurs sont ceux en amont et en aval. Le volume d'embâcles situé dans le secteur aval est de 39,8 % (2817 m³) tandis que dans le secteur en amont, les embâcles représentent 52,8 % (3737 m³) du volume total des embâcles. Les deux secteurs ensemble représentent 92,6 % du volume total de bois mort dans les embâcles. Pour ce qui est des années prédémantèlement, le volume total est en constante augmentation entre 2010 et 2013. Entre 2010 et 2011, le volume de bois sur la rivière a presque doublé avec des volumes de 5 369 m³ et 9 202 m³. Les secteurs avec le plus de volume de bois sont les mêmes entre 2010 et 2013 comparés à 2019 et 2020.

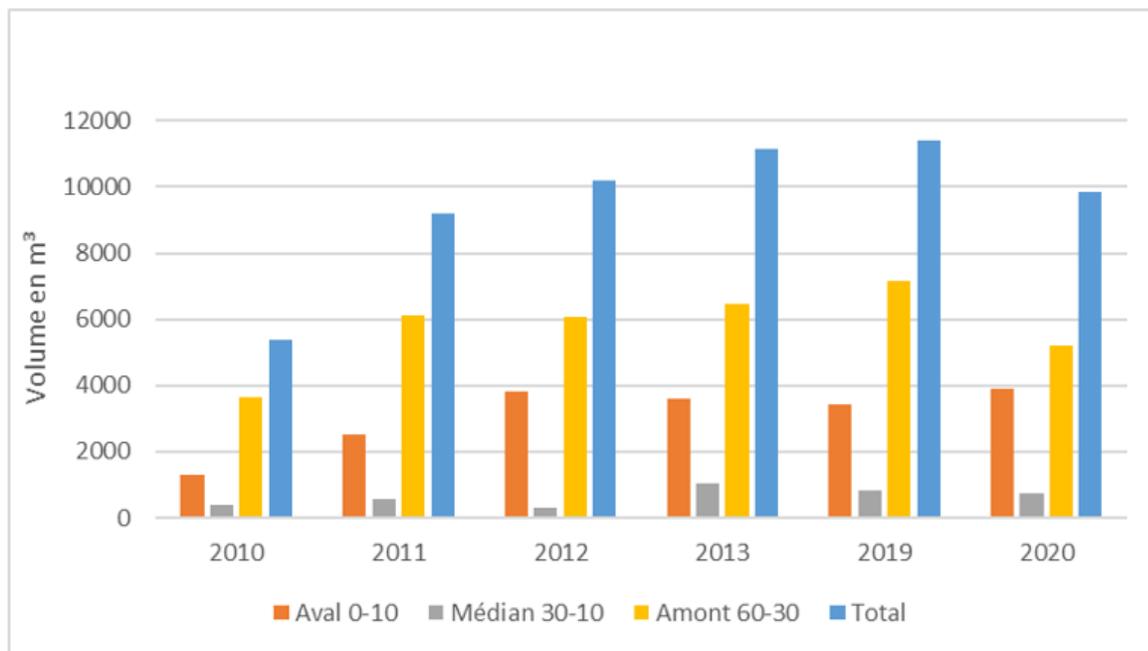


Figure 27. Volume d'embâcles de bois selon le secteur et au total. (©Antoine Carpentier, 2021)

Les figures 28 et 29 montrent les volumes cumulés selon chaque kilomètre de la rivière et révèlent les secteurs avec le plus grand volume de bois.

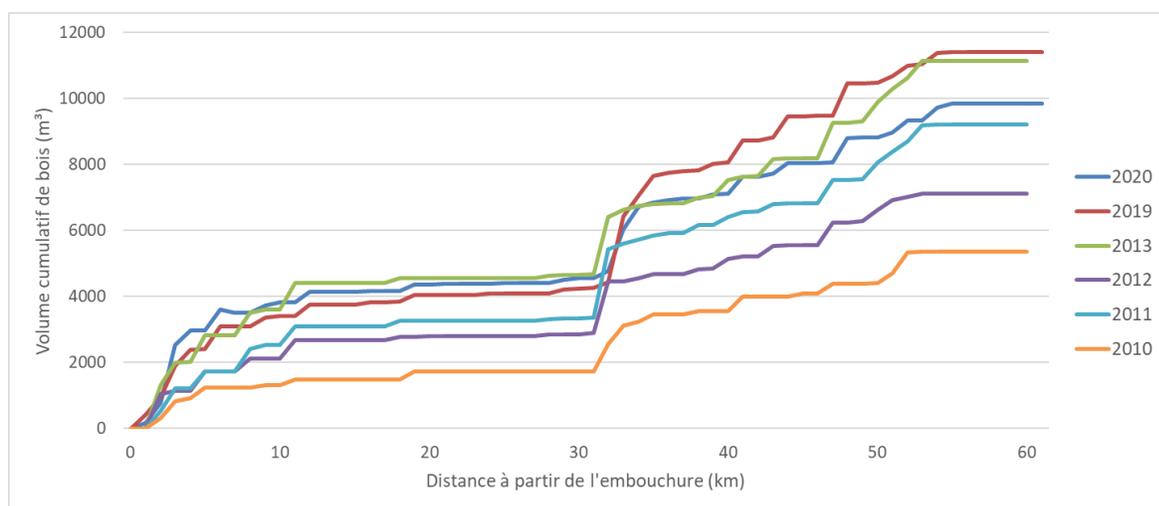


Figure 28. Évolution longitudinale cumulée du volume de bois (m^3) dans les embâcles sur l'ensemble de la rivière étudiée (©Antoine Carpentier, 2021)

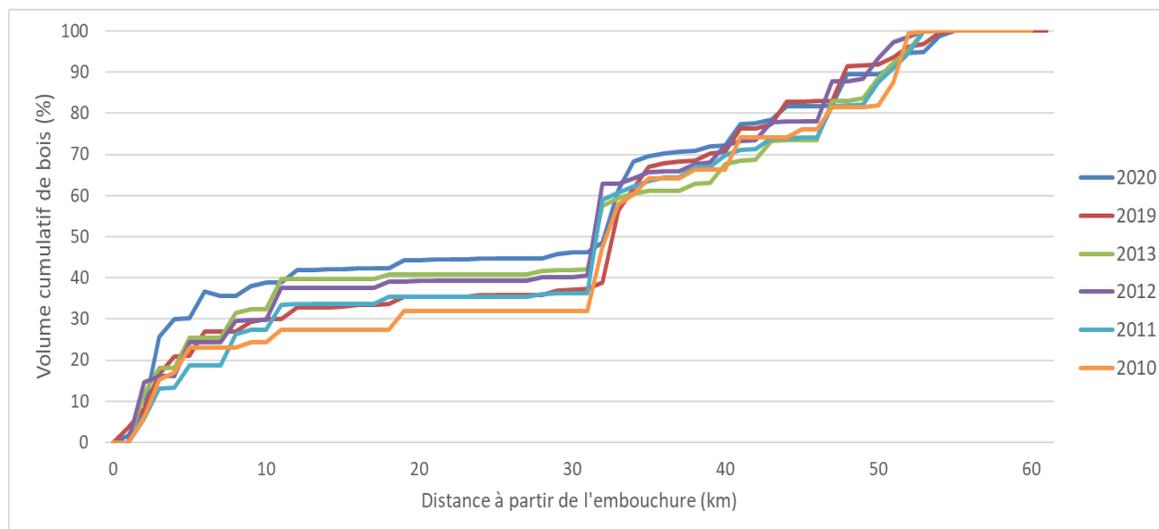


Figure 29. Évolution longitudinale cumulée du volume de bois (%) dans les embâcles sur l'ensemble de la rivière étudiée (©Antoine Carpentier, 2021)

Les volumes de bois se retrouvent en majorité dans le secteur aval et amont, une minorité se retrouve donc dans le secteur médian. En 2019, plus de 30 % du volume se trouvait dans le secteur en aval, soit les 10 premiers kilomètres à partir de l'embouchure. Pour le secteur en amont (km 60 à km 30), c'est près de 60 % du volume total du bois mort dans les embâcles. Pour l'année 2020, le pourcentage du volume total dans chaque secteur est un peu différent. On retrouve une hausse de 10 % du pourcentage du volume total dans le secteur aval. Ce secteur représente en 2020, 40 % du volume total. Le volume dans le secteur en amont est en baisse puisque le pourcentage est maintenant de 50 %. On remarque que le volume total (m^3) est moins important en 2020 (50 %) comparé au volume en 2019 (60 %).

Les mesures prises pour chaque embâcle (longueur, largeur, hauteur) sont calculées pour comparer les dimensions des embâcles selon chaque secteur de la rivière (Figure 30). Pour la longueur des embâcles, en 2019, les longueurs avaient une plus grande distribution entre les différentes longueurs sauf pour le secteur aval où elles sont plus diversifiées en 2020. La moyenne des longueurs est quasi identique entre 2019 (19,34 m) et 2020 (19,22 m). Le secteur avec la plus grande différence de la moyenne est le secteur du delta avec en 2019 une moyenne de 23 mètres et une moyenne de 17 mètres en 2020. Pour la largeur, la moyenne des valeurs est en baisse entre 2019 (8,44 m) et 2020 (6,7 m), ce qui est différent de la moyenne de longueur. Le secteur du delta est celui avec la différence la plus prononcée, en

2019 la moyenne était de 7,8 m et en 2020 de 5 mètres. Le secteur en amont connaît aussi une baisse de la moyenne entre 2019 et 2020 avec une diminution de 2,2 m. Pour la hauteur, les valeurs sont similaires en comparant la moyenne de 2019 (0,97 m) et 2020 (0,99 mètre). Chaque secteur possède une moyenne de la hauteur qui est quasi identique pour 2019 et 2020. Cependant, le secteur du delta de 2019 et 2020 possède une plus grande variété de hauteur (m) que les autres secteurs. En général, le volume moyen (m^3) dans le secteur aval connaît une augmentation en 2020 (44,98 m^3) comparativement à 2019 (34,05 m^3). Les volumes moyens du secteur médian et amont ont des valeurs plus grandes en 2019 (16,08; 35,5) qu'en 2020 (15,1; 29,54). Dans le delta, le volume moyen était plus important en 2019 (34,53) qu'en 2020 (23,39).

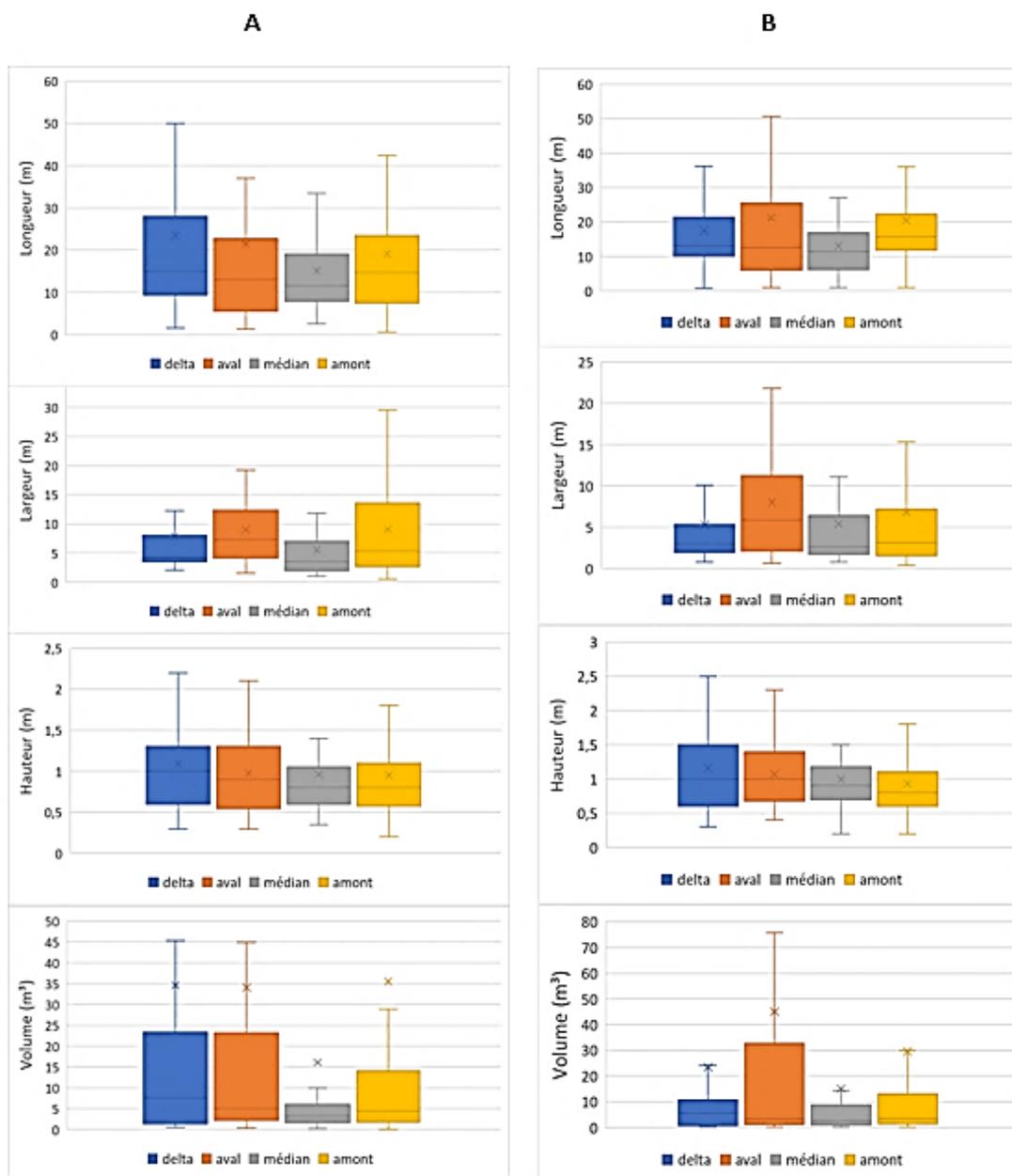


Figure 30. Dimension des embâcles de bois selon le secteur, a) 2019, b) 2020 (©Antoine Carpentier, 2021)

Entre 2019 et 2020, les embâcles majeurs (embâcle de plus de 15 troncs) ont augmenté en moyenne de 10% pour leur volume total en m³. Certains de ces embâcles ont été modifiés et transportés par l'écoulement pour devenir plusieurs plus petits embâcles dans les secteurs en aval. Certains embâcles ont été transportés pour s'intégrer à d'autres embâcles. Pour ce qui

est du bois mort individuel (1 morceau), certains ont été transportés pour s'accumuler sur d'autres bancs ou pour s'ajouter dans des embâcles situés en aval.

Pour l'été 2019, les embâcles sont répartis surtout dans le secteur amont et aval (Figure 31). On remarque que les embâcles, surtout les plus volumineux sont situés dans les méandres ou tout près d'anciens chenaux. Pour ce qui est de l'été 2020, les embâcles sont encore en majorité au même endroit (Figure 32). Certains embâcles ont été déplacés de leur secteur pour s'ajouter au volume d'embâcle situé dans les méandres. Ces embâcles provenaient surtout du secteur médian, le secteur plus rectiligne qui lors de crues importantes transporte généralement des embâcles et bois morts individuels qui étaient situés sur les berges.

Pour comprendre la dynamique du bois mort sur la rivière Saint-Jean, un bilan ligneux a été fait à partir de 1963 jusqu'à 2020 pour comprendre la production de bois, le transport de celui-ci ainsi que le volume exporté (Tableau 2). Les chiffres entre parenthèses représentent les valeurs par année pour chaque période.

Tableau 2. Bilan ligneux de la rivière Saint-Jean de 1963 à 2020. ¹Données de Boivin et al., 2017b; ²Estimation du volume exporté vers la baie de Gaspé ou retiré manuellement avant la formation du nouveau raft; *Volumes estimés de Boivin et al., 2017b.

	1963-1993 ¹	1993-2004 ¹	2004-2013 ¹	2016-2020
Volume produit (m ³)	17678 (589)	6922 (629)	16715 (1857)	1301 (325)
Volume exporté (m ³)	10410 (347)	5765 (524)	6747 (750)	2430 (608)
Volume transporté (m ³) (moyenne de 2010 à 2014)	7268 (242)	1158* (105)	9968 (1108)	2019 : 11410 2020 : 9844 Diff : 1566
Bilan	± 0	± 0	± 0	437 ²

La valeur du volume transporté pour les années 1963 à 2004 a été calculée selon la différence entre le volume produit et le volume exporté. Aucun volume du bois mort sur la rivière

n'avait été fait avant pour calculer le volume en transit. Pour la période de 1963 à 2013, le bilan atteint une valeur de plus ou moins 0 m³ (bilan en équilibre) puisque l'embâcle majeur dans l'embouchure a empêché le bois d'être évacué, tandis que pour la période suivante le bilan est positif, étant donné l'absence de l'embâcle qui a mené à l'évacuation du bois mort. La valeur a une petite marge d'erreur possible, puisqu'un volume très petit de bois peut être évacué malgré la présence de l'embâcle. Pour le bilan ligneux de 2016 à 2020, une partie du volume évacué a été retiré manuellement entre 2017 et 2020 dans des secteurs du delta de la rivière Saint-Jean. Le volume exporté est calculé à partir du volume de bois dans l'embâcle dans le chenal principal sud de l'embouchure. Le volume produit de 2016 à 2020 (325 m³ / année) est plutôt petit comparé aux autres volumes produits (589 m³/année pour 1963-1993, 629 m³/année pour 1993-2004 et 1857 m³/année pour 2004-2013). Pour le volume en transit, la valeur de la période de 2016 à 2020 est la différence entre le volume calculé de 2019 et 2020. Ce volume est celui qui a été transporté en 2020.

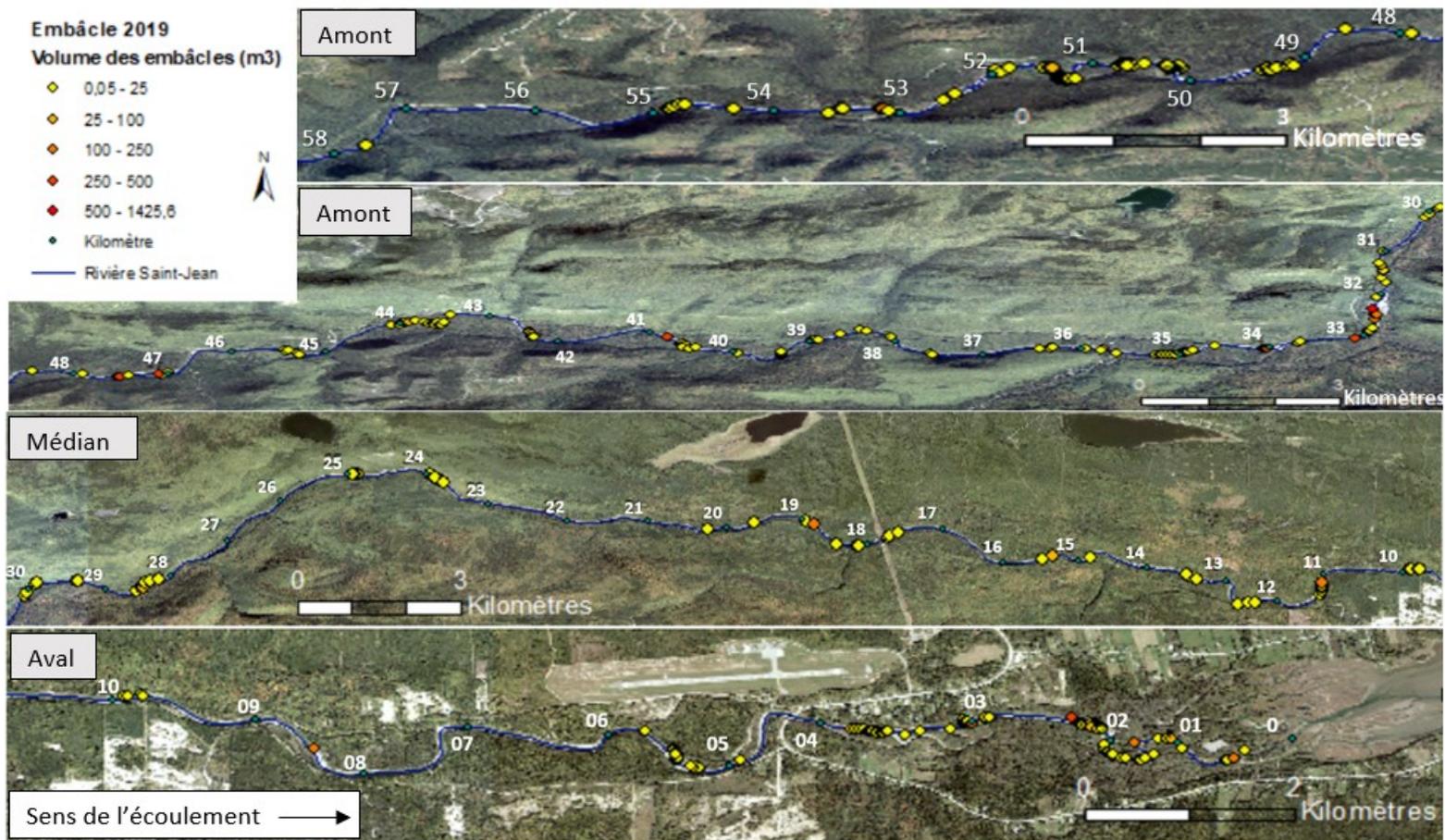


Figure 31. Distribution des embâcles en 2019 selon leur volume en m³ (©Antoine Carpentier, 2021)

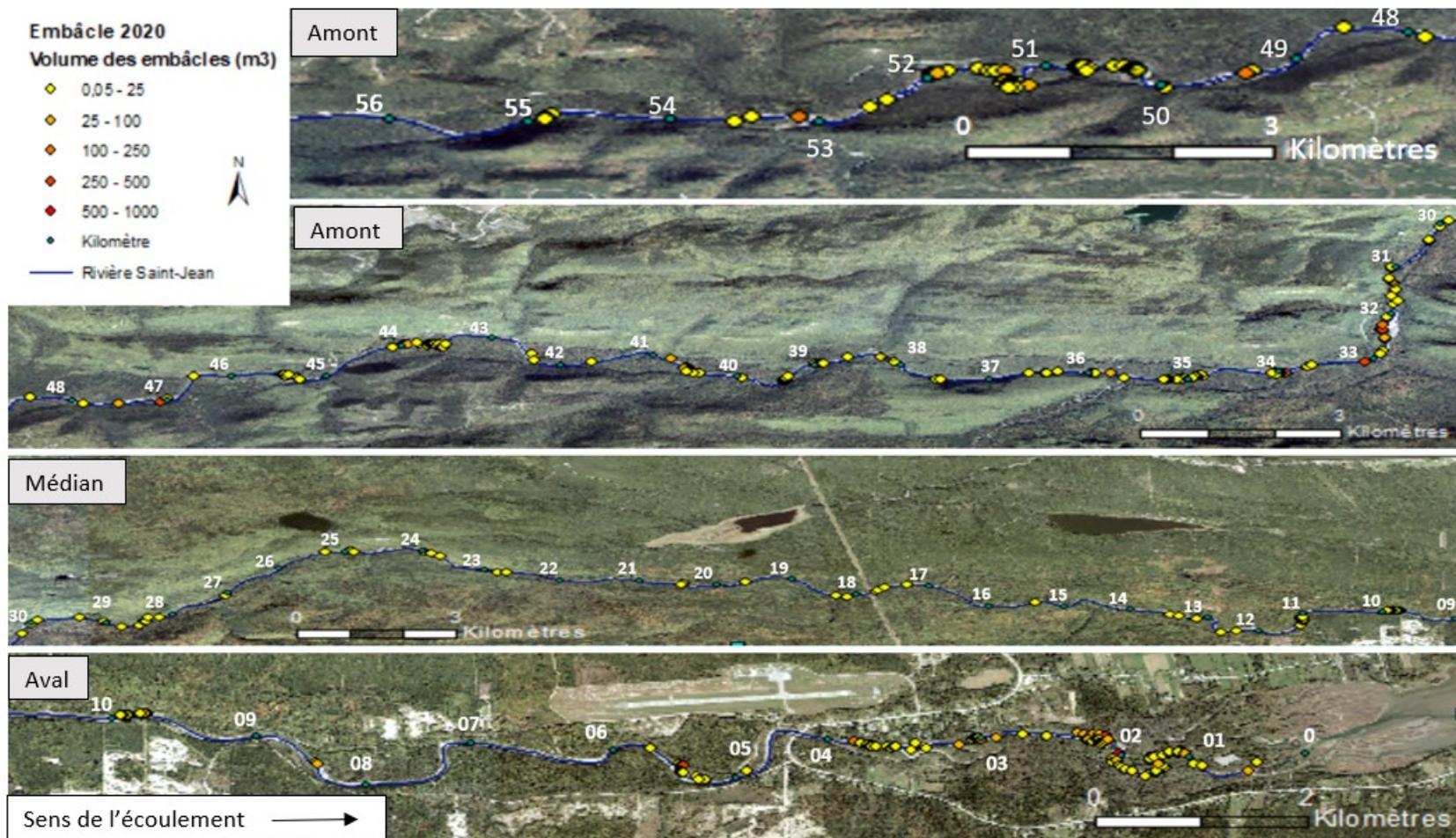
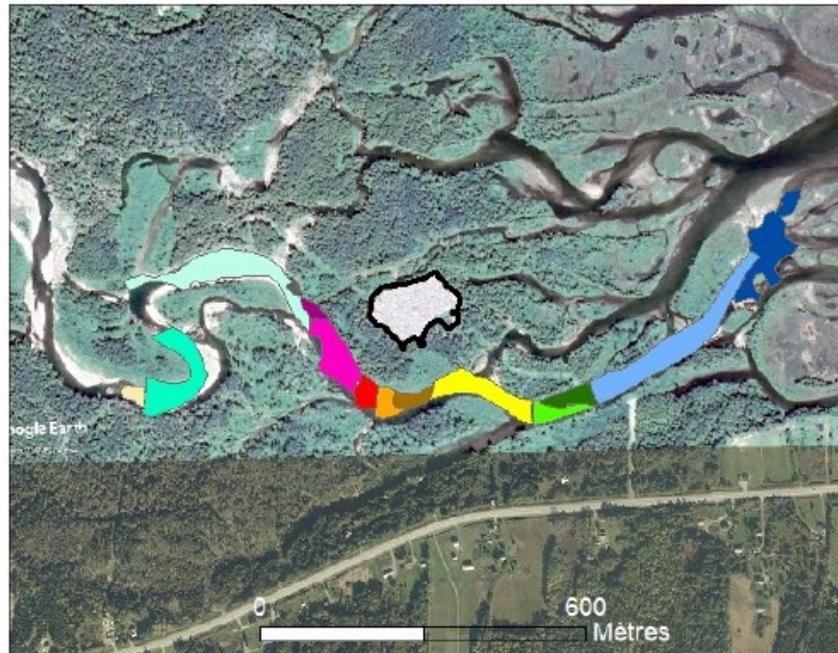


Figure 32. Distribution des embâcles en 2020 selon leur volume en m³ (©Antoine Carpentier, 2021)

4.1.1 La distribution des embâcles dans le chenal sud du delta selon les années

Le secteur du chenal sud-est la portion où l'on retrouve le plus grand volume de bois dans le delta de la rivière Saint-Jean (Figure 33). Ce secteur est la problématique principale du bois mort sur la rivière Saint-Jean identifiée par les gestionnaires et qui a mené au démantèlement de 2015. L'embâcle a commencé à se former en 1993 et a augmenté annuellement en volume jusqu'en 2015. En 2015, l'embâcle de 1,5 km du chenal sud a été démantelé sur toute sa longueur. Sur la figure 36, l'encadré noir (stockage delta) représente l'embâcle qui a été démantelé en 2015 et qui a été relocalisé mécaniquement, durant l'hiver, ailleurs dans le delta. À la suite du démantèlement de 2015, le bois mort a recommencé à s'accumuler dans le chenal sud du delta. (Figure 33). C'est à partir de 2017 que des volumes de bois plus élevés se sont installés dans ce secteur. Ce bois mort a remis sur la carte un embâcle qui obstrue le chenal comme celui avant le démantèlement de 2015. Le bois mort en 2017 s'est accumulé au croisement des deux chenaux (Figure 33 - point A), dont celui où l'on retrouvait l'embâcle majeur (Figure 33 – point B). Une autre portion du bois mort de 2017 s'est retrouvée dans le chenal sud. À l'été 2017, un démantèlement manuel a été effectué dans le secteur du croisement entre les deux chenaux (Figure 34). Ce démantèlement a amené le transport du bois mort dans le chenal déjà obstrué, mais aussi dans l'autre chenal, situé juste au nord de l'autre chenal. Le chenal qui se dirige vers le nord-est est lui exempté de bois mort donc le bois qui a été démantelé manuellement est transporté dans ce chenal et évacué (Figure 34). Le volume de l'embâcle du chenal sud-est donc difficile à calculer, puisqu'une portion provient du volume de bois mort déjà comptabilisé dans la rivière. C'est pour cette raison que dans la figure 35, on retrouve une section du volume cumulé en rouge puisqu'il ne peut être calculé complètement avec les démantèlements partiels et les pertes de bois mort de l'autre chenal vers l'exutoire.

Légende



Légende

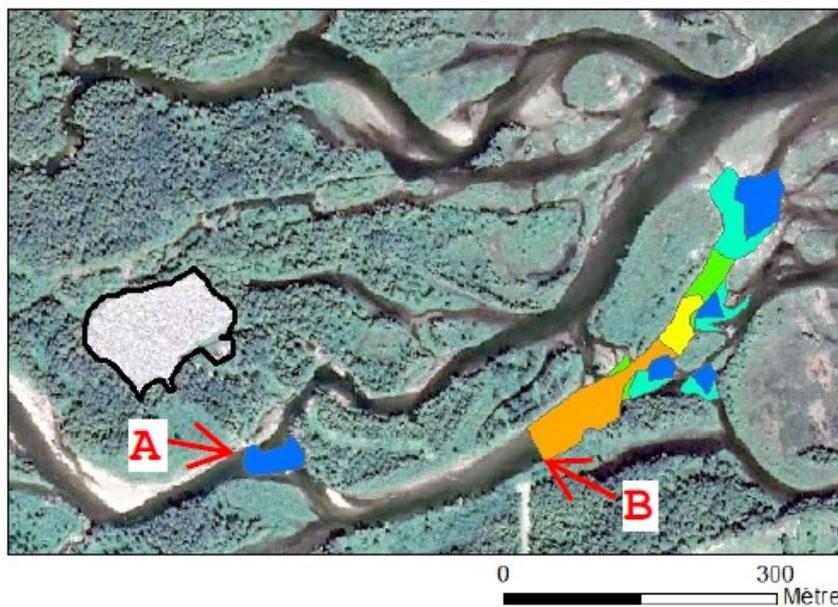


Figure 33. Évolution de l'embâcle principal dans le chenal sud, a) croisement des deux chenaux, b) embâcle majeur (©Antoine Carpentier, 2021)

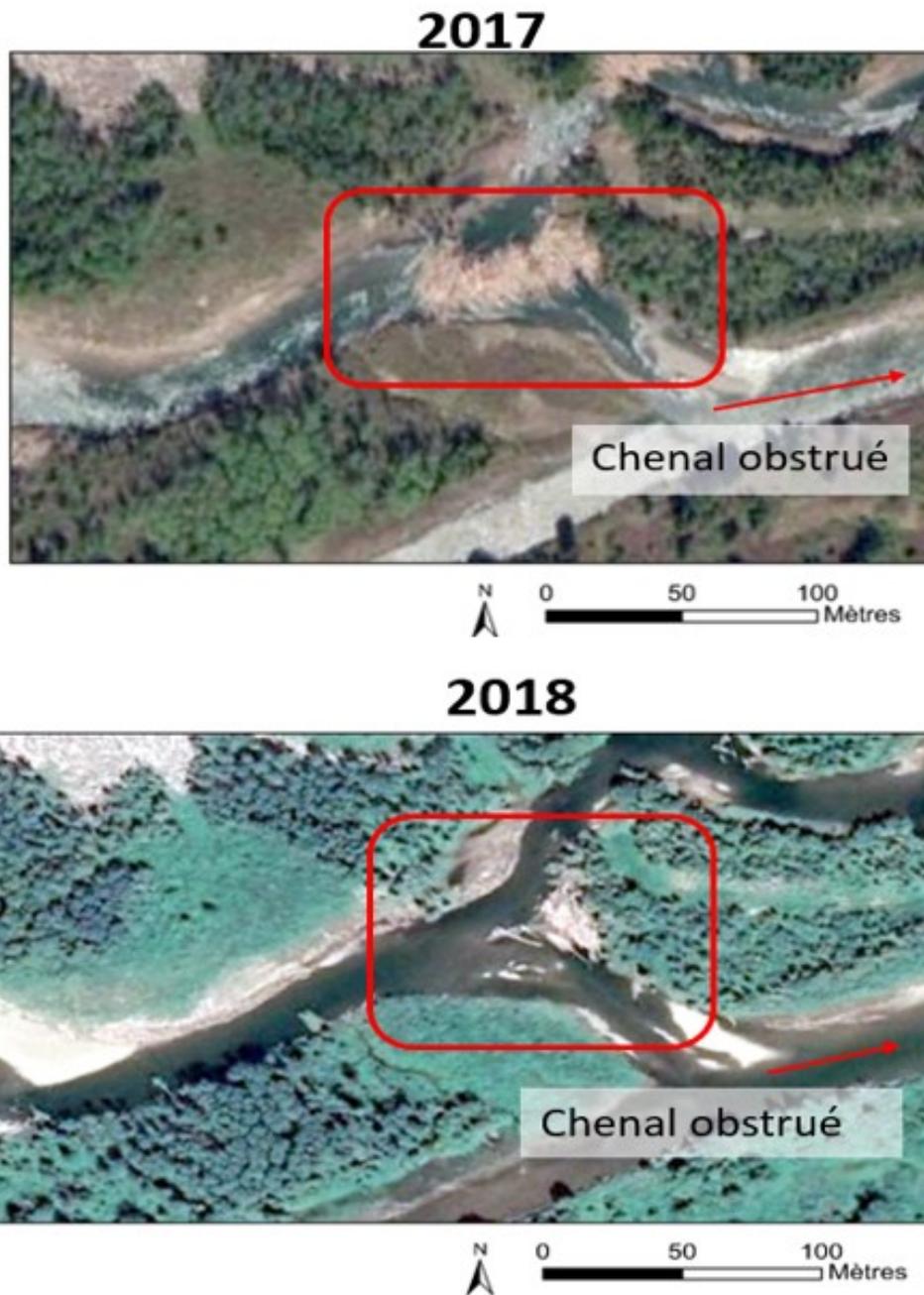


Figure 34. Démantèlement manuel de 2017 et le secteur démantelé en 2018 (©Antoine Carpentier, 2021)

Sur la figure 35, on retrouve l'évolution de la superficie cumulée de l'embâcle selon les années à partir de 1993 jusqu'à 2021. L'évolution a été calculée en m^3 selon les images aériennes et les orthophotographies disponibles. En 2015, avant le démantèlement, l'embâcle avait une longueur cumulée de 1,5 km et depuis le démantèlement c'est une longueur

cumulée de 440 mètres environ. L'embâcle reprend donc tranquillement sa position d'avant 2015 dans le chenal sud du delta.

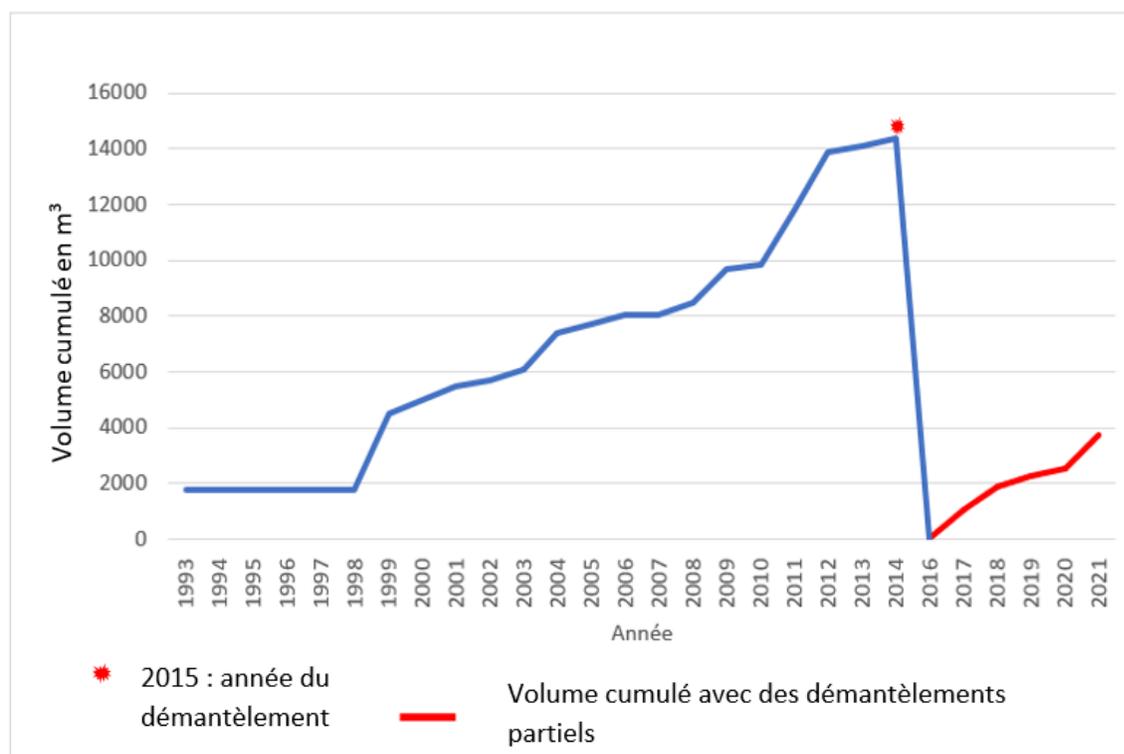


Figure 35. Superficie cumulée (m3) de l'embâcle dans le delta (©Antoine Carpentier, 2021)

Pour ce qui est des volumes cumulés, c'est un volume de 14 353 m³ de bois enregistré entre 1993 et 2015 (Boivin 2016). À la suite du démantèlement, c'est un volume de près de 4 000 m³ qui s'est accumulé en 6 ans. (2015-2021) La chute drastique que l'on voit sur la figure est en raison du démantèlement total de l'embâcle en 2015 qui a retiré la totalité du volume.

4.2 Les changements hydrogéomorphologiques avant et après le démantèlement

4.2.1 Évolution des débits

Les valeurs de débits sont calculées pour avoir une image de la situation de la rivière selon des périodes de l'année. Lorsqu'il y a un fort débit, la rivière subit des changements plus importants que lorsque le débit est au plus bas. Lorsque le débit est plus élevé, comme lors

des périodes de crue, les changements hydrogéomorphologiques sont plus perceptibles et plus importants (Figure 36). Les débits utilisés proviennent des analyses régionalisées à partir des données de la rivière York. Pour le calcul d'un débit spécifique, il faut soustraire la moyenne du débit maximal enregistré l'année en question et divisée par la suite le résultat par l'écart type.

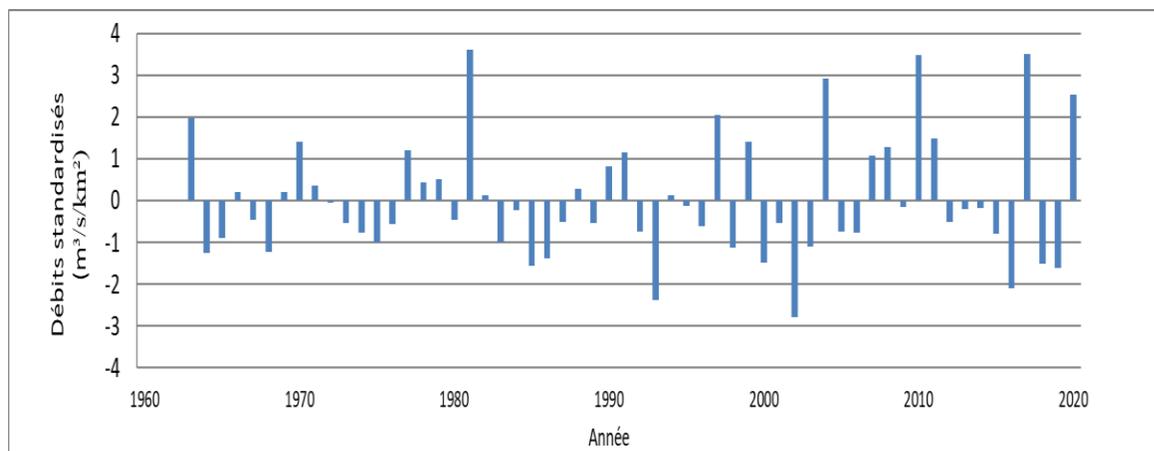


Figure 36. Débit standardisé sur la rivière Saint-Jean (@Antoine Carpentier, 2021)

Le débit de la rivière Saint-Jean varie et connaît des écarts de débits assez importants entre les années. Entre 1993 et 2020, le plus petit débit enregistré est de $2,35 \text{ m}^3/\text{s}$ tandis que le débit le plus élevé est de $520,07 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui représente un débit 221,3 fois plus élevé. La moyenne du débit est assez semblable entre chaque année. En 1993, la moyenne du débit est de $26,34 \text{ m}^3/\text{s}$ tandis qu'en 2020, la moyenne est de $28,31 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit est resté assez stable entre 1963 et 1980 puisque le débit standardisé se situait autour de 1,5. Une valeur faible indique que le débit ne dépasse pas la moyenne des débits enregistrée pour la rivière. À partir de 1980, le débit a connu une baisse face aux débits standardisés historiques de la rivière. Depuis 1980, la rivière a des débits plus bas que la moyenne historique, mais certaines années, la Saint-Jean se retrouve avec des débits standardisés plus importants. Les années 2010 et 2017 sont les deux années qui ont connu les plus grands débits observés sur la rivière Saint-Jean. Une des crues historiques (1963 à 2020) les plus importantes est survenue durant le mois de décembre 2020. Au mois de décembre 2010, une quantité de 275 mm de pluie s'est abattue en quelques heures sur le bassin versant de la rivière Saint-Jean, ce qui a amené

un débit de 465 m³/s. En décembre 2020, ce sont des quantités de 162 mm de pluie qui sont tombés dans le secteur de la rivière Saint-Jean ce qui a causé un débit de 468 m³/s (Figure 37).

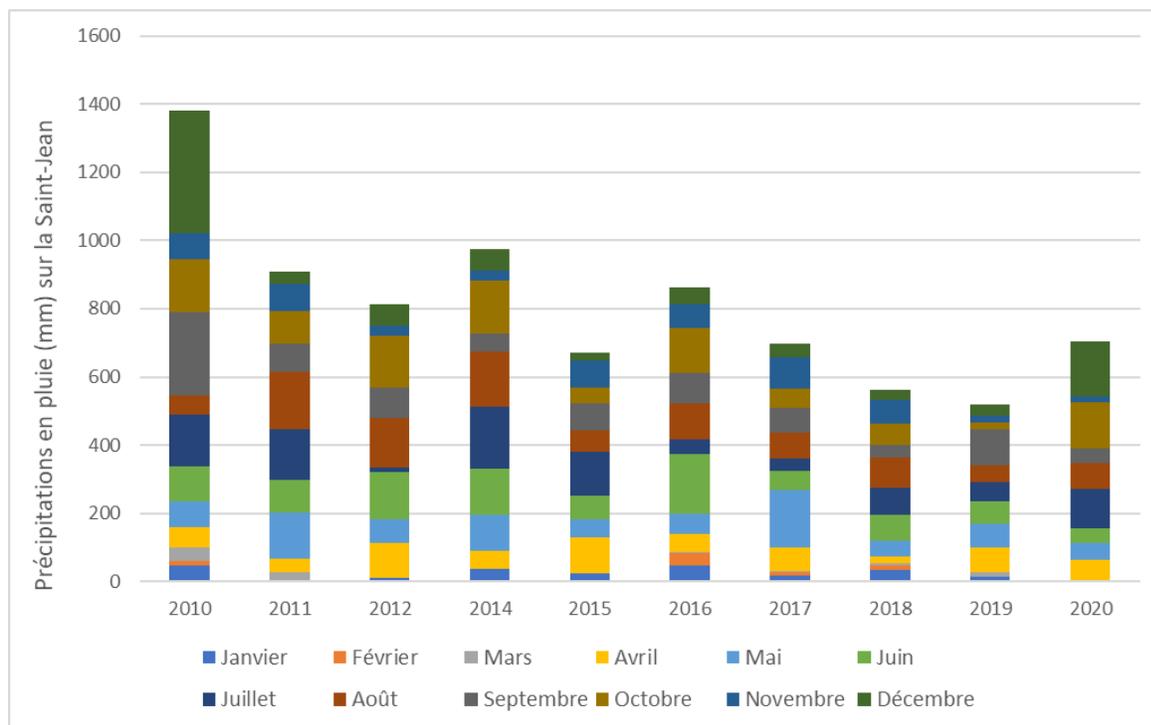


Figure 37. Les précipitations en pluie (mm) sur la rivière Saint-Jean (@Antoine Carpentier, 2021)

Les précipitations en pluie sont surtout durant l'automne ainsi qu'au printemps. Cependant, il y a eu quelques épisodes de pluie en décembre (par exemple en 2020 et en 2010). Les quantités de pluie tombées en décembre 2010 et 2020 ont amené des débits historiques. Le mois de décembre 2010 a reçu 359 mm de pluie, ce qui a amené une crue de 465 m³/s. On voit une tendance vers la baisse de la quantité totale de pluie en millimètres par année à partir de 2010. En 2010, c'est un total de près de 1 400 mm tandis qu'en 2020, le total est d'environ 700 mm. Le plus bas a été en 2019 avec près de 500 mm de pluie.

4.2.2 La trajectoire hydrogéomorphologique

Les crues de 2010, 2017 et 2020 ont modifié la trajectoire de la rivière, ce qui a influencé la largeur de la rivière Saint-Jean. La largeur est étroitement liée à la superficie des bancs d'accumulation, l'indice de sinuosité ainsi que l'érosion des berges. Ces variables modifient la rivière annuellement selon l'intensité des crues, ce qui fait en sorte que les quantités de bois mort dans la rivière changent aussi annuellement.

La largeur de la rivière Saint-Jean est recensée entre 1963 jusqu'à 2020 (Figure 38). Les largeurs les plus importantes ont été recensées en 1963. La largeur la plus élevée est de 322 m en 1963 et la plus petite est de 19 m également en 1963. Le secteur en aval est celui avec la majorité des grandes valeurs de la largeur tandis que le secteur médian possède les largeurs moyennes les plus petites. Les moyennes de largeur pour les années 1963, 1993 et 2004 sont de 59 mètres, 55 mètres et de 52 mètres. À partir de 2013, ces moyennes augmentent avec des valeurs entre 63,8 et 63,9. Les largeurs maximales enregistrées diminuent passant de 322 mètres en 1963 à 191 en 2020. À partir de 2013, il y a un élargissement du cours d'eau pour les trois secteurs. Entre 2013 et 2020, les largeurs dans le secteur en amont sont en augmentation sur une plus grande distance qu'avant 2013. Les largeurs de 1963 et 1993 ont des valeurs plus élevées sur une plus courte distance de la rivière tandis qu'on retrouve en 2013 et 2020 des largeurs plus élevées sur une plus longue distance (20 kilomètres en amont) de la rivière. Les 5 derniers kilomètres ont connu une hausse des largeurs surtout dans le chenal du sud où était situé l'embâcle de 2014.

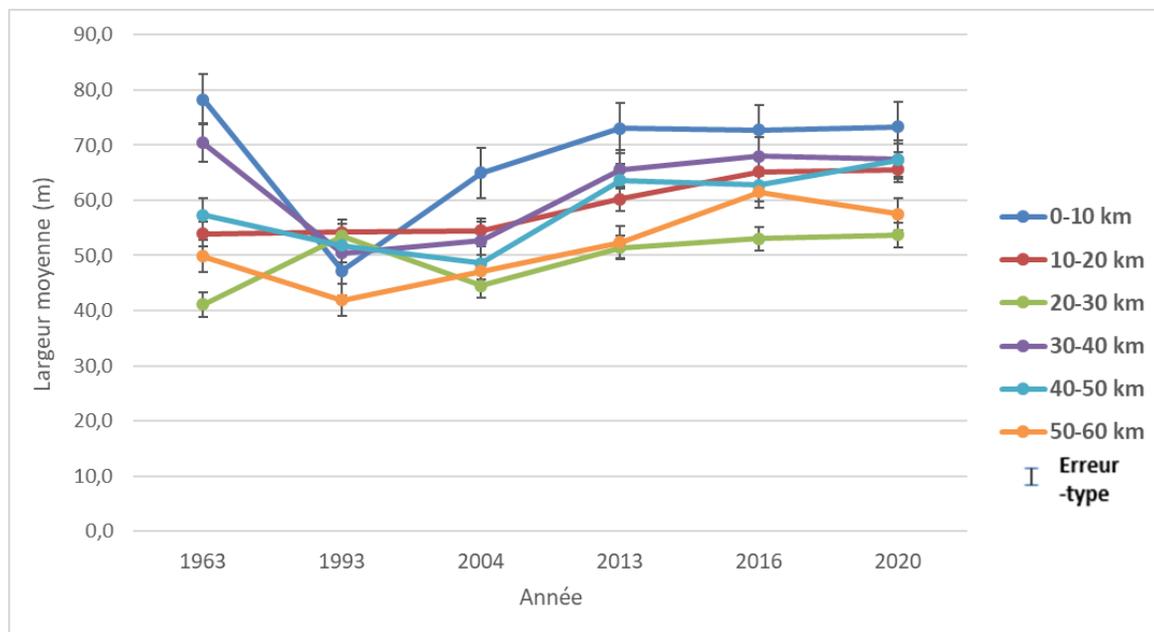


Figure 38. Largeur moyenne du chenal (en m) selon les années pour chaque tronçon de 10 kilomètres (©Antoine Carpentier, 2021)

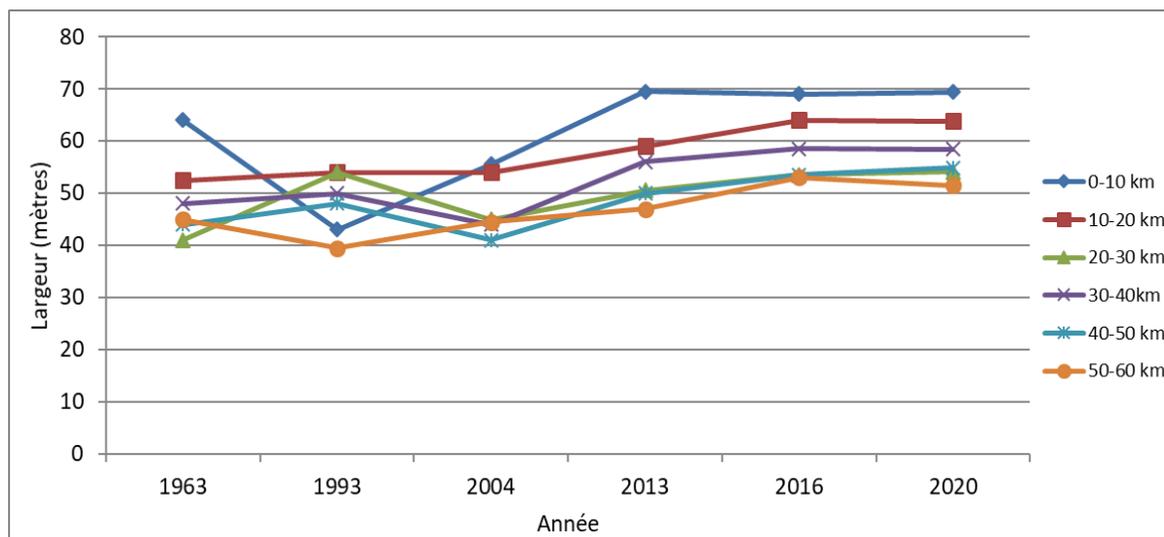


Figure 39. Médiane de la largeur selon les années et pour chaque tronçon de 10 kilomètres (©Antoine Carpentier, 2021)

Pour la médiane, on remarque une certaine tendance vers la hausse de la largeur selon la localisation sur la rivière (Figure 39). Plus on est près de l'embouchure, plus la médiane est élevée. Cette tendance est perceptible pour chaque période étudiée. Seule 1993 se retrouve avec une médiane plus faible dans les 10 derniers kilomètres, cette médiane est semblable à celle en amont dans les 10 premiers kilomètres. On remarque une certaine baisse de la médiane dans toutes les années pour le secteur de la rivière situé près du kilomètre 30. La

médiane entre 2016 et 2020 est identique ou similaire pour les différents tronçons de la rivière tandis qu'avant 2016 la médiane varie plus entre les années. Entre 1963 et 1993, l'écart de la médiane est de 21 mètres pour le secteur comprenant les dix derniers kilomètres et l'écart entre 2004 et 2013 est de 14 mètres. Cette médiane montre que la rivière Saint-Jean est une rivière assez large et que cette largeur évolue vers un élargissement avec les années. Certaines zones vont connaître un élargissement dans les prochaines années.

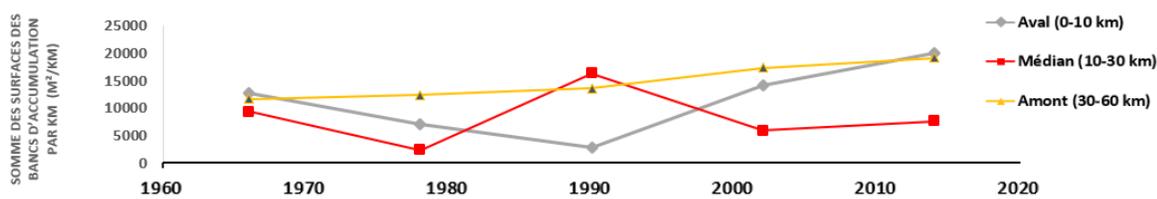


Figure 40. Somme des superficies des bancs d'accumulation par secteur (@Antoine Carpentier, 2021)

La superficie des bancs d'accumulation joue un rôle sur la trajectoire hydrogéomorphologique d'une rivière, puisqu'elle peut engendrer une augmentation de la sinuosité et une augmentation de l'érosion (Figure 40). Aucune image de 2020 n'était disponible, il était donc impossible de calculer la superficie des bancs d'accumulation et connaître la trajectoire. En général, la superficie des bancs est en hausse entre 1963 et 2016, particulièrement pour le secteur amont. La superficie est passée de 11 644 m² à 19 093 m², soit une augmentation de 1,6 fois. La plus forte hausse a été entre 2004 et 2013, une hausse de 3 744 m². La plus faible hausse s'observe entre les années 1963 et 1993 avec 623 m². L'écart entre ces années est de 30 ans, mais la hausse de la superficie est moins grande tandis qu'entre 2004 et 2013, c'est une période de 9 ans et la hausse de la superficie est plus élevée. Entre 2013 et 2016, c'est une hausse de 1 811 m², ce qui représente une hausse de la superficie de 603 m² par an. Pour la hausse de la superficie entre 1963 et 1993, la superficie augmente de 20 m² par an. Pour le secteur médian, la superficie a une tendance très variée selon les années. Entre 1963 et 1993, la superficie du secteur médian connaît une forte baisse, puis à partir de 1993, la superficie des bancs augmente jusqu'en 2004 pour ensuite diminuer. À partir de 2013, la superficie reste semblable jusqu'en 2016. En 1993, le secteur médian se retrouve avec des superficies de bancs de 2 273 m² tandis qu'en 2004 les superficies atteignent 16 244 m² soit 7 fois supérieurs. Cependant, ces superficies vont diminuer par la

suite pour se situer aux alentours de 6 000 m². Finalement, le secteur aval connaît un peu la tendance inverse au secteur médian. En 1963, le secteur aval a la superficie la plus élevée des trois secteurs puis cette superficie diminue jusqu'en 1993 pour devenir le secteur avec le moins de superficies de bancs d'accumulation. À partir de 1993, cette superficie ne fait qu'augmenter pour atteindre en 2016 une superficie totale de près de 20 000 m². En 2004, la superficie dans le secteur aval est semblable à la superficie médiane en 1993, soit 2600 m². Entre 2013 et 2016, les trois secteurs vont connaître une augmentation de leur superficie ce qui représente la seule période où les trois secteurs sont en hausse. Les secteurs aval et amont possèdent des superficies similaires en 2016 tandis que le secteur médian se retrouve avec des superficies plus faibles.

Les bancs d'accumulation et la largeur sont reliés avec le taux d'érosion, une autre variable qui influence la trajectoire hydrogéomorphologique. Le taux d'érosion a été calculé en m² en comparant les années de la trajectoire hydrogéomorphologique en créant des zones érodées entre les années (Figure 41).

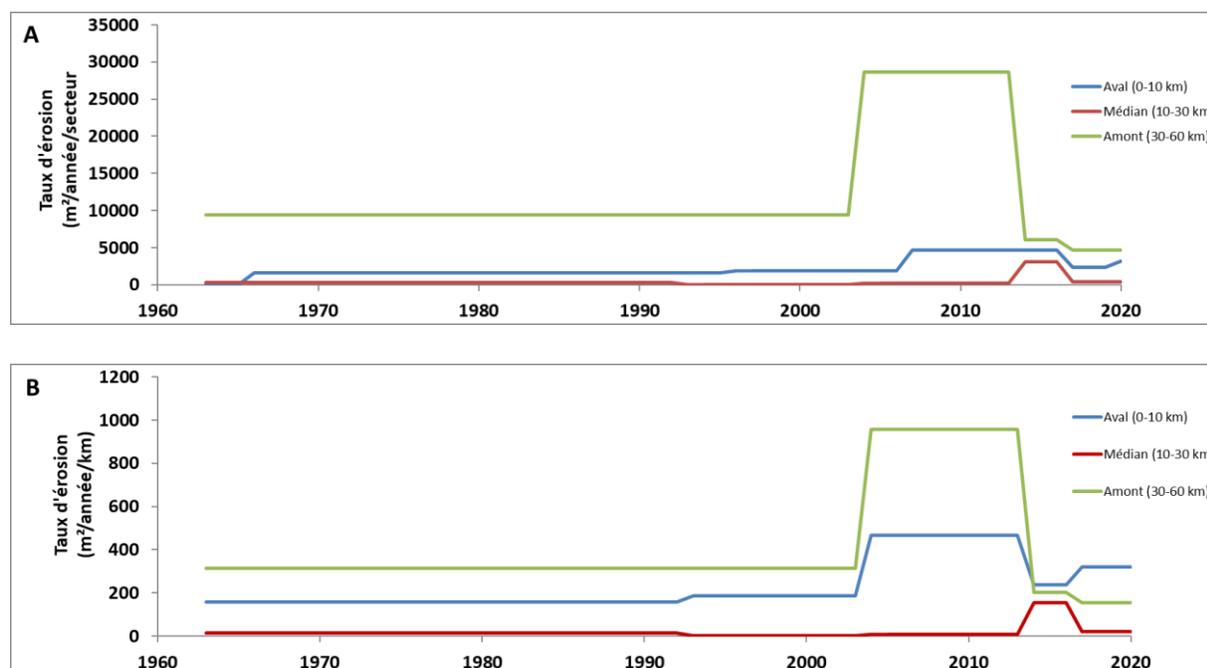


Figure 41. a) Taux d'érosion en m² par année pour les trois secteurs, b) Taux d'érosion en m² par année par kilomètre de rivière (©Antoine Carpentier, 2021)

Le taux d'érosion est relativement faible avant 2004 comparativement à la période post 2004. Il est resté stable puis il a connu une forte hausse en 2004 pour ensuite redescendre jusqu'en 2020. Le taux d'érosion dans le secteur amont est passé de 314 m² érodés annuellement entre 1963 et 1993 à 955 m² annuellement entre 2004 et 2013. Ce secteur est celui qui a connu la plus grande hausse du taux d'érosion avec 642 m²/an. Le secteur aval est le deuxième secteur avec une hausse en 2003. Entre 2003 et 2013, le taux d'érosion a augmenté de 280 m²/an, passant de 187 m² à 467 m². Le secteur médian n'a pas connu de hausse avant 2013. Le secteur médian est le seul qui a connu une légère hausse entre 2013 et 2016. Les autres secteurs ont connu une baisse du taux d'érosion. Cette baisse est assez importante puisque pour le secteur amont cette baisse amène le taux d'érosion annuel plus bas que la période 1963-2003. Le taux passe de 955 m² à 202 m². Pour le secteur aval, le taux passe en 2013 de 467 m² à 235 m² en 2014. Après le démantèlement de 2015, le taux d'érosion est resté stable jusqu'en 2016. À partir de 2016, une hausse du taux d'érosion est perceptible dans le secteur aval avec une hausse de 235 m² à 318 m². Les autres secteurs ont connu une baisse du taux d'érosion.

Lorsque l'on regarde la figure 45 A et B, il est possible de voir que pour le secteur aval, le taux d'érosion est en hausse pour chaque kilomètre tandis que pour l'analyse par secteur, le taux est en baisse entre 2016 et 2020. Cela signifie que les zones érodées sont moins nombreuses pour le secteur aval, mais ces zones érodées ont des superficies plus importantes. Pour le secteur amont, le taux est similaire selon le secteur et par kilomètre. Pour le secteur médian, le taux est plus important pour chaque kilomètre que pour le secteur en entier. Cela montre que les superficies érodées sont nombreuses, mais moins grandes et les zones sont réparties sur le secteur de 20 kilomètres.

Finalement, le dernier facteur soulignant l'évolution dans la trajectoire de la rivière, c'est l'indice de sinuosité. L'indice de sinuosité est différent pour les trois secteurs de la rivière (Figure 42). Tout d'abord pour le secteur amont et médian, l'indice est stable depuis 1963. L'indice était de 1,21 en 1963 et est de 1,22 en 2020. Il a connu une petite hausse en 2013 avec un indice de 1,24. Pour le secteur médian, il était à 1,28 en 1963. C'était le secteur avec l'indice le plus élevé pour cette année-là. L'indice est resté assez stable jusqu'en 2016. Puis,

il a diminué jusqu'en 2020 pour se situer à 1,27. Finalement, le secteur aval est celui qui a connu le plus de changement entre 1963 et 2020. L'indice en 1963 était de 1,27 puis il a connu une tendance à la hausse jusqu'en 2020 avec un indice à 1,34. Entre 2013 et 2016, l'indice a connu une petite baisse, mais en 2020, l'indice est remonté pour atteindre l'indice le plus élevé jusqu'à maintenant avec une valeur de 1,34.

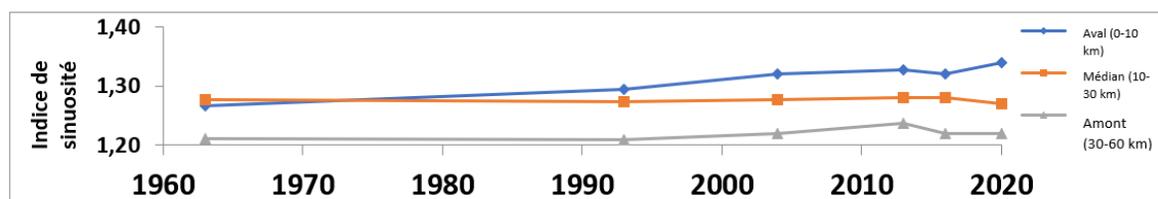


Figure 42. L'indice de sinuosité selon les secteurs (@Antoine Carpentier, 2021)

Tous ces indices permettent d'analyser les changements dans sa trajectoire selon les années et d'exposer les liens entre chacun.

4.3 Changements morphologiques dans l'embouchure après le démantèlement

Le delta de la rivière Saint-Jean a connu des changements morphologiques dans les dernières années. Avant 2015, le chenal sud du delta était occupé par un embâcle de bois de 1,5 km de long. Avec cet embâcle dans le chenal sud de 1993 à 2015, il y a eu peu de modifications dans sa trajectoire et dans sa morphologie. Après le démantèlement qui a eu lieu à l'hiver 2015, le delta a connu des changements morphologiques plus importants. L'absence de bois a amené une modification dans la morphologie du delta, puisque le nombre de bancs d'accumulation a augmenté dans ce secteur et certaines zones ont connu de l'érosion. Le retrait du bois mort a aussi amené une incision dans le lit de la rivière, ce qui sera présenté dans les prochaines sections. La majorité des chenaux dans le delta ont été obstrués par des embâcles entre 1963 et 2015, ce qui fait en sorte que seulement les deux chenaux les plus au sud du delta sont libres à la circulation de l'eau.

Pour comprendre la modification du chenal et voir les secteurs qui ont le plus été modifiés, une analyse de la bathymétrie a été réalisée. La première a eu lieu en 2016 et la seconde en 2020. Le secteur analysé compte 4,3 kilomètres de long, elle commence au pont de la route 132 et se termine dans l'embouchure. Les portions profondes dans les profils de la rivière montrent les secteurs de fosses (Figure 43). En orange, on voit le profil de surface de l'eau pour l'année 2020, en bleu c'est la surface en 2016. En 2016, le débit était moins élevé puisque le profil à la surface débute avec une hauteur plus basse qu'en 2020. Cependant, le profil de la surface de l'eau permet de voir les seuils sur la rivière et voir où de nouveaux seuils se sont créés. Les nouveaux seuils dans le profil coïncident avec la présence de fosses ou de profondeur du lit plus élevée. Lorsqu'il y a une pente plus prononcée à la surface, on voit des fosses plus profondes en 2020 qu'en 2016. Cependant, en général, la bathymétrie de 2020 montre une diminution de la profondeur moyenne des fosses et de la diminution du nombre de fosses. À l'embouchure, le niveau de l'eau est lui aussi plus élevé en 2020 qu'en 2016 en lien avec les marées de la Baie de Gaspé.

Pour ce qui est du lit de la rivière, il est assez semblable entre 2016 et 2020. On peut voir dans un secteur bien précis, plus de fosses profondes dans le secteur entre le kilomètre 3,3 et 2,8 en 2016 comparativement à 2020. Par la suite, le nombre de fosses est assez semblable entre les deux années. Cependant, les fosses les plus profondes sont en 2020 avec des profondeurs de près de 3 mètres et 2 mètres. Certaines fosses ont été déplacées et d'autres se sont créées comme les trois grandes fosses, celles à 3700 mètres; 2300 mètres ainsi que la fosse à 1100 mètres de distance de l'embouchure. Ces trois fosses n'étaient pas présentes en 2016. Ces fosses coïncident avec des ruptures de pente qui n'étaient pas présentes en 2016 ou qui ont connu une incision en 2016.

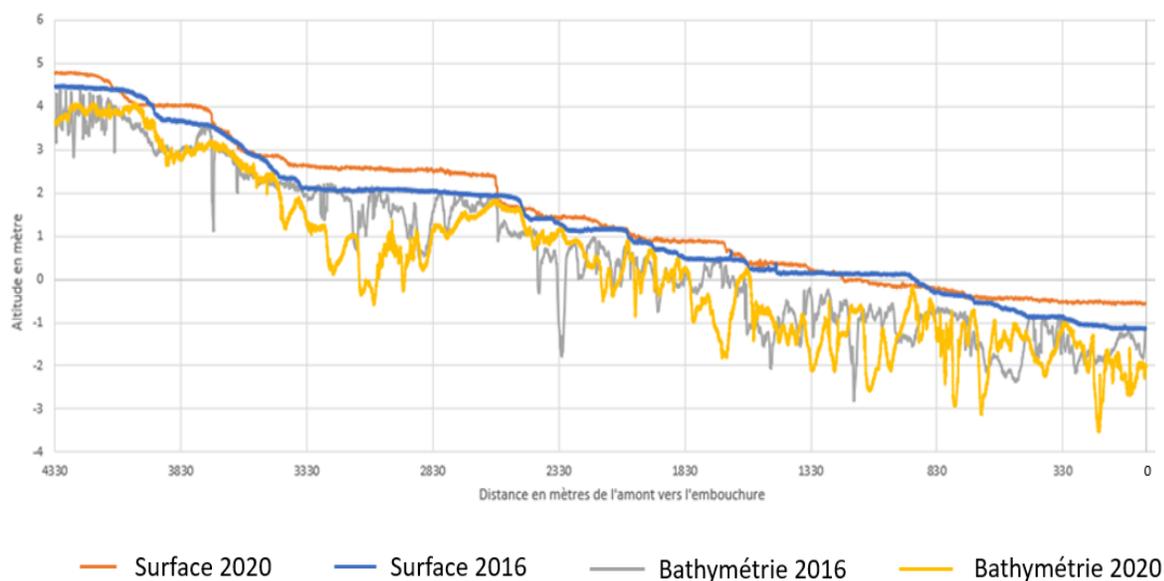


Figure 43. Profil de la rivière en 2016 et 2020 (@Antoine Carpentier, 2021)

La figure 44 présente la différence d'élévation des bancs d'accumulation et des berges de la rivière Saint-Jean entre les années 2012 et 2016. Cette différence est nommée « Digital Elevation Model of Difference » (DoD). Les secteurs bleus montrent une hausse de l'élévation due à la présence de bancs d'accumulation qui était moins élevée en 2012. Les secteurs rouges représentent le phénomène d'érosion dans la rivière. Les données LiDAR prennent en compte que la hauteur à la surface de l'eau, donc les données ne prennent pas en compte le fond de la rivière. Le secteur du kilomètre 3 jusqu'au 1,5 km est le secteur qui a le plus de modifications morphologiques dans la rivière. Ce secteur est le secteur qui a connu la plus grande hausse du nombre de bancs d'accumulation, ce qui amène des changements plus importants dans la morphologie de la rivière. Entre le kilomètre 4 et 3, le secteur a connu des phénomènes d'érosion qui amène une baisse du niveau de la rivière. Cette baisse peut être causée par la réduction de la superficie de certains bancs d'accumulation ou par l'érosion d'une berge (en rouge). Ce phénomène est aussi perceptible entre le kilomètre 1,5 et l'embouchure. Entre le kilomètre 6 et 5, on voit une zone rouge entre des zones bleues. Cela est dû au fait que le banc d'accumulation a été séparé au milieu par l'écoulement. Cet écoulement se produit lors des périodes de crue. Cette zone d'écoulement n'est pas perceptible durant les périodes d'étiage l'été, car le niveau d'eau n'est pas assez élevé.

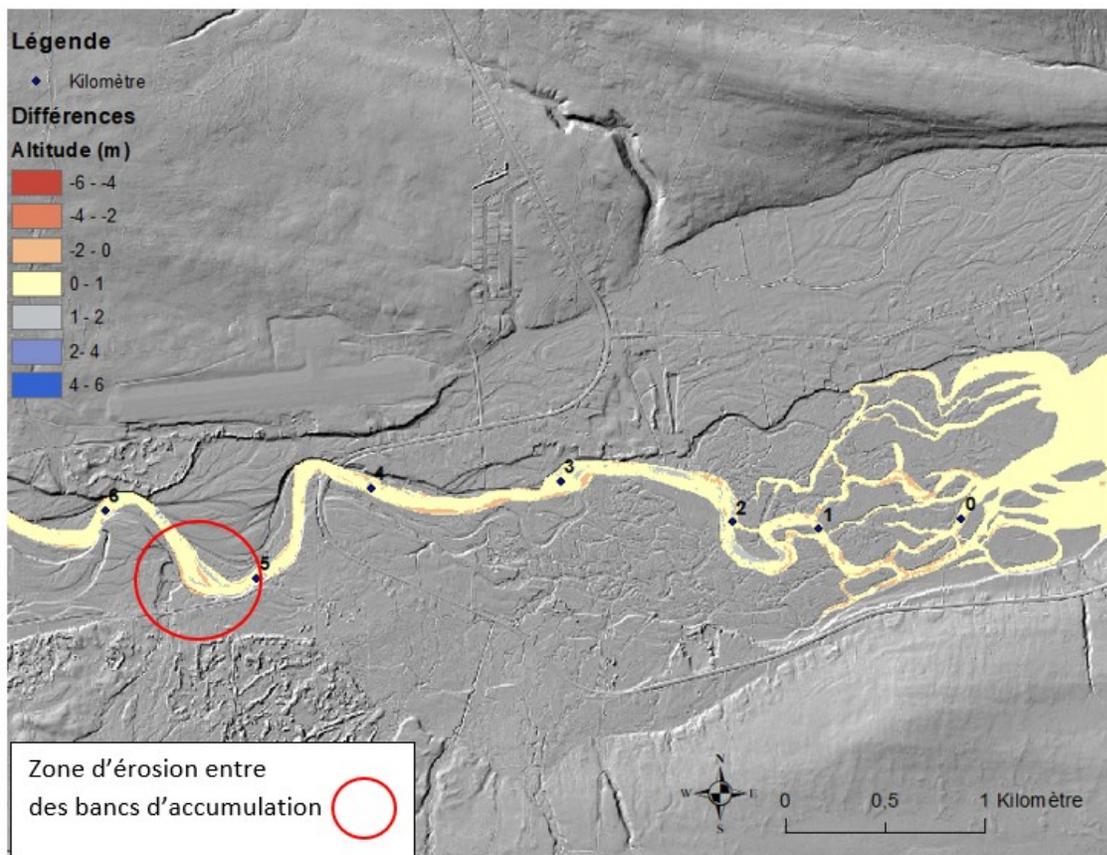


Figure 44. Différences d'altitude de la surface de l'eau sur la rivière entre 2012 et 2016 (©Antoine Carpentier, 2021)

Le delta a eu des changements dans la superficie et le nombre de bancs d'accumulation. La figure 45 montre le nombre de bancs d'accumulation que l'on retrouve entre 2013 et 2019. L'année 2020 n'est pas dans la figure puisque les images satellites ne sont pas disponibles, donc seulement le Lidar a été utilisé. Ainsi, le Lidar ne permet pas de voir les bancs d'accumulation. La tendance montre une hausse du nombre des bancs d'accumulation entre la période pré et postdémantèlement de l'embâcle en 2015. En 2013, le nombre de bancs est de 50 puis ce nombre va augmenter pour atteindre 66 en 2019.

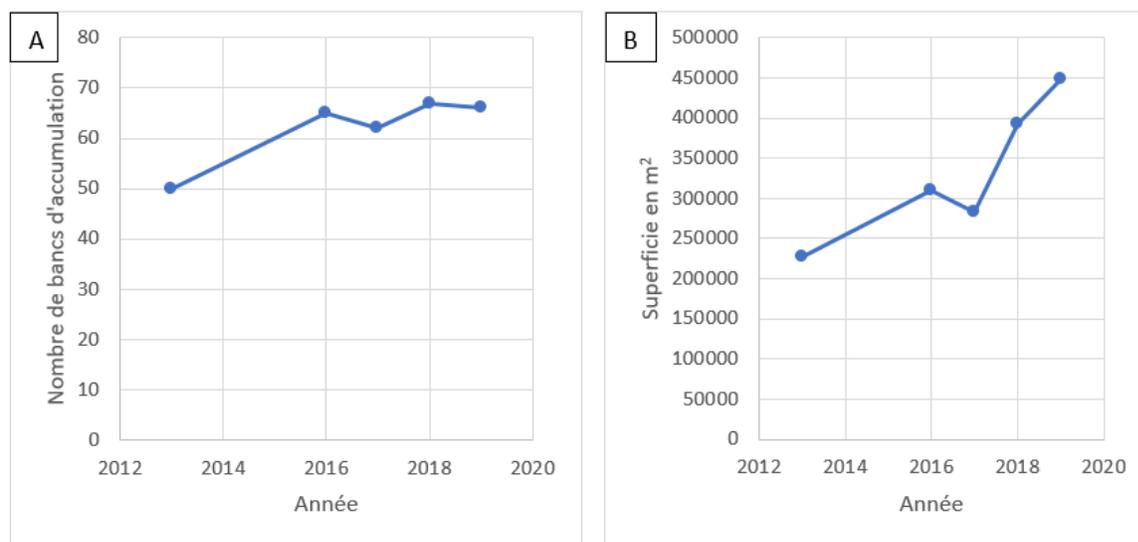


Figure 45. a) nombre de bancs d'accumulation sur les 10 derniers kilomètres, b) superficie totale des bancs d'accumulation sur les 10 derniers kilomètres (©Antoine Carpentier, 2021)

Les deux figures montrent une certaine cohérence entre le nombre de bancs d'accumulation et la superficie de ceux-ci. Entre 2013 et 2016, les bancs ont augmenté en nombre ainsi qu'en superficie. Cette comparaison a été possible grâce à la période de captation des images aériennes où les débits étaient similaires. En 2017, le nombre de bancs diminue passant de 65 à 62 et la superficie des bancs diminue elle aussi pour passer de 309 083 m² à 282 686 m². Par la suite, le nombre de bancs va remonter entre 2017 et 2018 pour atteindre 67. Le nombre de bancs va baisser d'une unité en 2019, mais la superficie des bancs elle va augmenter à partir de 2017. Cette hausse va être plus importante entre 2017 et 2019 qu'entre 2014 et 2016. La superficie totale en 2019 va atteindre 448 723 m². Le nombre de bancs a diminué en 2019 (66), mais la superficie totale a augmenté ce qui signifie que les bancs ont augmenté de superficie et certains bancs se sont fusionnés pour devenir un seul banc par exemple.

Le delta a aussi eu des changements sur la largeur des chenaux, puisque les changements ont surtout été causés par l'érosion des berges. Certains secteurs dans le delta ont subi plus d'érosion. L'érosion a amené des quantités plus élevées de sédiments ce qui amène des hausses de superficie pour les bancs d'accumulation. L'érosion peut également amener le contraire et diminuer les superficies des bancs d'accumulation selon leur localisation puisque l'écoulement peut éroder le banc d'accumulation et transporter les sédiments sur d'autres bancs. La figure 46 montre les aires érodées pour chaque kilomètre selon la période de 1963

à 2015 ou la période de 2016 à 2019. La période de 1963 à 2015 représente la période avec la présence de l'embâcle de 1,5 km et la période de 2016 à 2019, représente la période post-démantèlement.

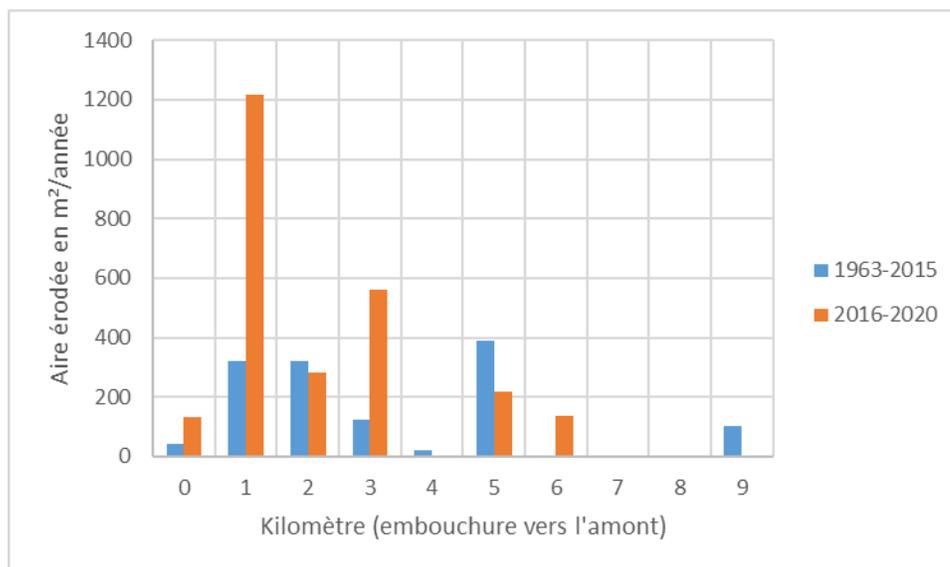


Figure 46. Aire érodée en mètre carré par année pour chaque kilomètre du delta (©Antoine Carpentier, 2021)

La période entre 2016 et 2020 a connu des superficies érodées plus importantes que la période 1963-2015. L'aire érodée entre 2016 et 2019 la plus importante est entre le kilomètre 1 et 2. Cette zone a été érodée de 1218 m². Cette érosion est due à l'avulsion du chenal au kilomètre 1,5. Plus on remonte en amont, l'aire érodée est en diminution. L'aire érodée est semblable entre les deux périodes. Entre 1963 et 2015, on retrouve de l'érosion en amont du kilomètre 5, au kilomètre 9 et une petite zone autour du kilomètre 4. Les secteurs du kilomètre 4 et 9 n'ont pas connu d'érosion entre 2016 et 2020. Cependant, entre 2016 et 2020, un secteur du kilomètre 6 a été érodé. Le secteur où était situé l'embâcle de 1,5 km a connu à partir de 2016 un phénomène d'érosion plus important que la période entre 1963 et 2015.

5. DISCUSSION

Cette section permet de faire les liens entre les résultats présentés et les recherches faites précédemment sur l'interaction du bois mort et l'hydrogéomorphologie dans la rivière Saint-Jean et dans d'autres rivières. Pour débiter, l'évolution du bois mort et sa distribution ont été mises en lien avec les trois secteurs de la rivière (l'embouchure est incluse dans le secteur aval). Les différents styles fluviaux attribués à chaque secteur influencent la distribution du bois mort dans la rivière. De plus, la rivière a connu plusieurs changements dans sa trajectoire à travers les années. La trajectoire a été affectée par des périodes de crue et la trajectoire du delta a elle été affectée par le démantèlement d'un embâcle de près de 1,5 km linéaire. Finalement, l'impact du démantèlement a eu des conséquences sur le profil de la rivière et surtout sur sa trajectoire, avec l'apparition d'un nouveau chenal.

5.1 La dynamique du bois mort dans la rivière Saint-Jean

La dynamique du bois mort peut s'analyser à partir du concept de bilan ligneux. Le bilan ligneux s'intéresse à l'évaluation des quantités de bois produits, transportés et exportés. Ce bilan a été analysé grâce aux taux d'érosion, aux volumes de bois mort sur la rivière et le volume de bois mort dans l'embâcle du delta de la rivière. Pour la période de 2016 à 2020, le bilan montre qu'il y a une grande quantité de bois accumulée dans le lit mineur de la rivière et avec une production de bois plus faible que pendant les périodes précédentes. Tout ce volume de bois pourrait être transporté jusqu'à l'embâcle de l'embouchure. Le volume produit est plus faible en raison du taux d'érosion plus faible et de périodes de crues moins importantes en 2016-2020 que pour les périodes précédentes. Le volume de bois dans la rivière est plus important que le volume qui est exporté, donc le bois s'accumule sur l'ensemble de la rivière. Ce bois a plus de difficulté à être exporté en raison de la présence d'embâcles dans les chenaux du delta de la rivière. Le bois mort est donc transporté jusqu'à ces embâcles et s'ajoute à leur volume. Ce phénomène est perceptible dans les deux derniers kilomètres où cinq chenaux sont obstrués par des embâcles totaux qui bloquent l'entièreté du chenal et qui avec les années accumulent le bois mort.

La mobilité du bois mort en rivière dépend fortement du rapport entre la taille du cours d'eau et celles des arbres riverains (Gurnell *et al.* 2002; Hassan *et al.* 2005). Lorsqu'un cours d'eau est moins large que la hauteur des arbres, le bois mort est moins mobile que lorsque le cours d'eau est plus large (Hassan *et al.* 2005). Le secteur étudié de la rivière Saint-Jean est considéré comme un cours d'eau de type 4, donc c'est la classe avec la largeur de rivière de plus de sept mètres et on peut assumer une bonne mobilité du bois mort puisque la hauteur des arbres est généralement inférieure à la largeur du cours d'eau. Cependant, en amont du secteur étudié, la largeur de la rivière peut être moins large que la hauteur des arbres. La dynamique du bois mort a été analysée à partir des trois secteurs puisque ces secteurs ne réagissent pas de la même manière concernant la dynamique du bois mort, mais aussi sur les processus géomorphologiques.

5.1.1 Évolution des volumes de bois accumulés par tronçons

Les volumes ont été calculés pour les années 2010, 2011, 2012 et 2013 (Boivin *et al.* 2017b), ainsi que pour 2019 et 2020 (Tableau). Le volume a été en constante augmentation entre 2010 et 2013.

Tableau 3. Volume de bois (m³) dans les embâcles selon l'année

Année	Volume de bois calculé dans les embâcles (m ³)
2010	5 369
2011	9 202
2012	10 198
2013	11 137
2019	11 410
2020	9 844

Ces volumes montrent que la progression de l'embâcle dans le chenal sud du delta est elle aussi en progression de 2010 à 2013. On voit donc une certaine tendance à la hausse du

volume total de bois mort dans la rivière Saint-Jean. Le volume de bois accumulé dans la rivière augmente chaque année depuis 2010. Selon le bilan ligneux, la production est moins importante depuis 2016 et les volumes de bois exportés sont en hausse, ce qui peut être lié à une plus grande mobilité du bois. La production de bois mort est reliée à des périodes de crues importantes comme celles durant les mois de mai et novembre. Entre 2016 et 2020, il y a eu deux crues importantes, mais celle de 2020 a eu lieu au mois de décembre donc les impacts ont été calculés en 2021. La période de 2016 à 2020 a eu une crue importante et les autres années les crues ont eu peu d'impacts, ce qui peut causer une baisse de la production ligneuse. Les crues importantes comme celle de 1994, 1997, 2010, 2017 amènent un effet d'érosion et ajoutent du bois mort au cours d'eau par la migration latérale du chenal dans les plaines alluviales forestières le long du corridor fluvial de la rivière Saint-Jean. Le bilan ligneux entre 1963 et 2013 atteint 0 puisqu'il n'y a pas ou peu de bois morts qui sont évacués. Le bois mort produit et transporté s'accumule dans l'embâcle total du chenal sud, donc il permet de constater que ce volume aurait été évacué sans la présence de cet embâcle. C'est pour cette raison que le bilan donne un résultat de 0. À partir de 2017, le bois mort retourne dans le chenal de l'ancien embâcle total pour créer à nouveau un embâcle. Le bois mort a donc eu le temps d'être évacué entre 2015 et 2017. Le bois mort peut encore être évacué puisque l'embâcle ne rejoint pas encore l'intersection des deux chenaux principaux (Figure 34).

Le premier secteur (amont) comprend les kilomètres 60 à 30 et est de style à méandres dynamiques. Ce secteur est celui qui contient le plus grand volume de bois mort entre les trois secteurs, si l'on ne considère pas l'embâcle majeur de plus d'un kilomètre dans l'embouchure. À partir des données de 2010, 60 % et plus du volume total répertorié sur la rivière se situent dans le secteur amont. Le volume dans le secteur amont a été depuis 2010 en hausse sauf pour l'année 2020 où une diminution est observée. Puisque le secteur présente des méandres dynamiques, celui-ci se retrouve avec une mobilité importante qui amène des modifications dans la largeur de la rivière et sur sa trajectoire. Ce secteur et le secteur aval (kilomètre 0 à 10) sont les endroits qui ont le plus de probabilité d'accumuler des embâcles de bois mort, puisqu'on y retrouve des méandres, des bancs d'accumulation, des chenaux

secondaires ainsi que des zones d'eau peu profonde (Gurnell *et al.* 2002; Abbe et Montgomery 2003) (Figure 47).



Figure 47. Exemple d'embâcle majeur situé à l'amont du chenal secondaire et situé sur un banc d'accumulation (©Antoine Carpentier, 2021)

La présence de bois mort peut amener un phénomène d'érosion, mais peut aussi diminuer l'érosion de certains secteurs sur la rivière (Collins *et al.* 2012). Lorsqu'il y a la présence

d'un embâcle de bois sur la rivière, selon l'orientation de celui-ci et selon sa stabilité, il peut faire dévier l'écoulement vers la berge opposée (Figure 48). Cette déviation de l'écoulement amène donc une hausse de la vitesse sur la berge opposée à l'embâcle et peut causer de l'érosion (Abbe et Montgomery 2003; Wohl *et al.* 2016). L'érosion créée par l'accélération de l'écoulement peut amener de nouveaux volumes de bois dans la rivière. C'est pour cette raison que le secteur amont avec des taux d'érosion élevés est l'un des deux secteurs avec le plus de bois mort. Le bois mort produit est transporté des zones amont jusqu'à ce qu'il s'arrête soit sur un banc d'accumulation, soit sur une zone d'eau peu profonde ou près d'un chenal secondaire abandonné. Un autre élément qui peut faire dévier l'écoulement et amener de l'érosion sur la berge opposée est la présence d'un banc d'accumulation (Figure 49). Dans le secteur amont, on retrouve une grande quantité de bancs d'accumulation (91 bancs au total en 2016). Ces 91 bancs composent 53,5 % du nombre total de bancs sur l'ensemble des 60 kilomètres de la rivière étudiée.



Figure 48. Exemple d'embâcle qui dévie l'écoulement vers la berge opposée (à droite sur l'image) (©Antoine Carpentier, 2021)



Figure 49. Exemple d'érosion qui peut subvenir à proximité d'un banc d'accumulation (©Antoine Carpentier, 2021)

Pour le deuxième secteur, le secteur médian, il se situe entre les kilomètres 30 et 10. Ce secteur est la portion de la rivière qui est de style rectiligne, semi-alluvial et composé d'un substrat rocheux. Ce secteur possède 10 % du volume total de bois mort sur la rivière. Le style de ce secteur permet d'expliquer le faible taux d'occupation du bois mort dans ce secteur. En raison de sa forme rectiligne et de ses parois rocheuses, il y a peu d'érosion, donc peu d'apports en bois. Le bois mort qui se retrouve dans ce secteur vient en majorité du secteur en amont et transit rapidement vers l'aval (Boivin *et al.* 2017b). Cependant on retrouve un peu de bois sur les berges, principalement sur de petits bancs d'accumulation ou sur des portions de lits rocheux surélevées du cours d'eau (Figure 50). Ces embâcles sont des amas de bois qui peuvent être transportés lors d'une période de crue importante, puisqu'ils ne sont pas les plus stables. Ils ont été déposés sur des affleurements rocheux lors de crues et ils ne se sont pas ou peu stabilisés sur un banc d'accumulation ou dans une zone végétalisée. Ce secteur en raison de sa forme rectiligne amène une accélération des vitesses d'écoulement et une hausse de la puissance spécifique de la rivière, ce qui permet de transporter de grands volumes de bois vers le secteur aval (Nagayama *et al.* 2012; Kramer et Wohl 2017). Le secteur médian est le secteur qui devrait transporter le plus de bois mort et par conséquent être le secteur où le bois mort reste sur la rivière le moins longtemps (Nakamura et Swanson 1993; Kramer et Wohl 2017). Dans ce secteur on retrouve des distances de quelques kilomètres où il n'y a pas d'embâcles et peu de bois mort individuel.



Figure 50. Embâcle accumulé sur un affleurement rocheux dans le secteur médian (©Antoine Carpentier, 2021)

Le dernier secteur est le secteur aval. Il comporte les 10 derniers kilomètres et son style fluvial est très similaire au secteur amont (méandre dynamique avec une large plaine alluviale). C'est un secteur semi-alluvial avec des méandres dynamiques. On retrouve des recoupements de méandres dans ce secteur et des processus de migration latérale plus importants que dans la portion médiane (Boivin *et al.* 2019). Comme pour le secteur amont, ce secteur possède un grand pourcentage (+30%) du volume de bois de la rivière Saint-Jean. Selon les années, le pourcentage du volume total situé dans le secteur aval se trouve entre 40% et 30% du volume total de bois dans les embâcles. Cependant, il faut mentionner que l'embâcle total situé dans le chenal principal sud de l'embouchure n'est pas comptabilisé dans les volumes d'embâcles. Cet embâcle est calculé indépendamment et sa progression est analysée chaque année. À l'extrémité aval de ce tronçon se trouve le delta de la rivière Saint-Jean. Ce secteur est composé en majorité par des sédiments fins (argileux et sableux) et est caractérisé par des pentes faibles. C'est dans ce secteur que le bois mort est évacué pour se retrouver dans la baie de Gaspé. On retrouve de nombreux chenaux obstrués par la présence d'embâcles majeurs qui bloquent les différents chenaux (Figure 51).



Figure 51. Embâcle se situant à l'entrée d'un bras mort situé dans le delta au kilomètre 1,4 (©Antoine Carpentier, 2021)

On retrouve dans le secteur aval, le phénomène d'avulsion et des cicatrices d'anciens chenaux. Ce secteur amène donc de grandes quantités de bois mort dans le delta. L'avulsion du kilomètre 1,5 amène une production de bois mort pour le dernier kilomètre puisque l'écoulement se fait un nouveau chemin et érode les berges qui sont occupées par des arbres de grandes tailles. Le delta possède plusieurs chenaux, mais seulement les deux chenaux situés au sud du delta sont navigables. L'écoulement se trouve dans ces deux chenaux, mais l'un d'eux accueille le bois mort pour créer un embâcle de plusieurs mètres. L'autre chenal lui évacue le bois mort vers la côte gaspésienne.

5.1.2 L'Évolution interannuelle du bois mort sur le profil en long de la rivière Saint-Jean

Le volume de bois que l'on retrouve dans les embâcles a été calculé de 2010 à 2013 et de 2019 à l'été 2020. Le volume plus faible en 2020 peut être dû à la présence de crues plus faibles entre 2019 et 2020, ce qui a fait en sorte que le bois s'est transporté plus facilement, mais avec une faible production de nouveaux bois. Lorsqu'il y a des crues importantes, le bois a tendance à se concentrer dans des secteurs proximaux des zones de production et

lorsque la crue est faible, le bois est redistribué sur l'ensemble du cours d'eau (Gurnell *et al.* 2002). Il faut aussi mentionner que dans la plupart des cas, le bois mort qui est transporté dans des secteurs avec une mobilité des berges et la présence d'obstacles comme un banc d'accumulation va s'accumuler sur le prochain obstacle rencontré. Les embâcles ont donc souvent une origine de proximité avec sa zone de production (Bocchiola *et al.* 2006; Curran 2010). Un recensement des embâcles a été réalisé sur la rivière Petite-Cascapédia en Gaspésie et les résultats sont similaires concernant les volumes de bois entre 2019 et 2020 (Jeanney 2021). Dans les deux cas de rivières, le volume total a diminué. Une partie du volume a été transporté pour se retrouver dans les embâcles plus importants en aval. Il y a donc un lien important entre la présence des bancs d'accumulation et le volume de bois mort dans les embâcles (Figure 52). Les volumes de bois les plus importants sont liés aux bancs d'accumulation avec de grandes superficies. Les superficies augmentent au même endroit que les volumes de bois mort dans les embâcles. Certains volumes de bois mort ont été transportés d'un banc d'accumulation à l'autre puisque le pourcentage du volume cumulé change selon les années pour les mêmes kilomètres. Par exemple, au kilomètre 29, en 2013 le pourcentage cumulé du volume de bois était de 60% tandis qu'en 2020, ce pourcentage est de 43%. Le 17% manquant est du volume de bois qui a été transporté de l'amont vers l'aval.

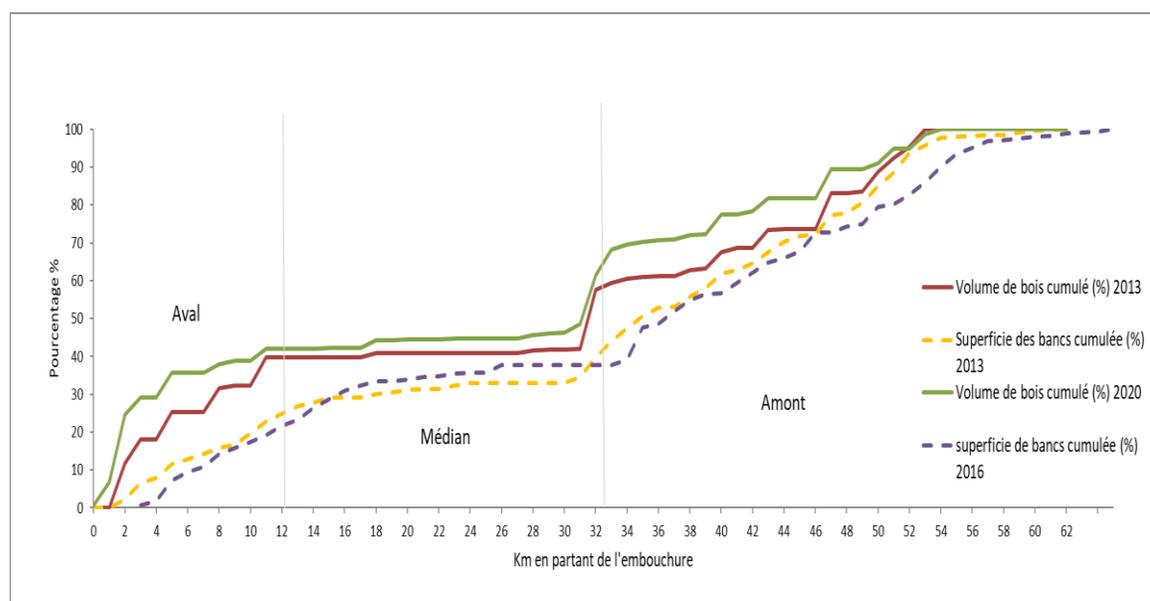


Figure 52. Les volumes de bois cumulé (5) en lien avec la superficie des bancs d'accumulation (%) (Antoine Carpentier, 2021)

Avec le transport du bois mort partant du secteur médian, ce bois mort va s'accumuler sur les bancs d'accumulation et dans certains chenaux, dont celui où l'on retrouvait l'embâcle majeur de 2015. En 2013, le volume de bois dans le secteur aval a diminué en raison du transport d'une quantité de bois morts qui s'est ajoutés dans l'embâcle majeur du chenal sud (Figure 52). Dans le secteur aval, de grandes quantités de bois comptabilisées dans le volume proviennent d'embâcles situés en partie à l'entrée d'anciens chenaux, puisque ces embâcles sont de grandes tailles, ils sont solides, donc ils vont accueillir de nouveaux bois morts à chaque période de crue. C'est dans le secteur aval que l'on retrouve les embâcles avec la moyenne de longueur la plus élevée puisque ce secteur est le plus large et le secteur avec une superficie totale des bancs d'accumulation la plus élevée. Ces deux facteurs font en sorte que le bois mort transporté se dirige vers l'embouchure et qu'ils s'accumulent sur les bancs d'accumulation pour créer des embâcles avec des longueurs importantes. La rivière Saint-Jean est une rivière assez large, donc les arbres peuvent être transportés sur de grandes distances, et peuvent se retrouver sur des bancs d'accumulation puisque la rivière possède une mobilité élevée. La Saint-Jean avec ces grands volumes de bois est une rivière avec une succession d'embâcles qui amène une plus grande variabilité de sa largeur pour les secteurs en amont, mais aussi pour le secteur aval comprenant le secteur du delta (Montgomery et Piégay 2003; Gurnell et Bertoldi 2020). Avec le calcul des volumes de bois mort dans les embâcles ainsi que la localisation des embâcles, il est possible de comprendre les secteurs propices à la production, au transport ainsi qu'à l'évacuation du bois mort.

5.1.3 La distribution et la progression de l'embâcle dans le chenal principal sud du delta selon les années

L'embâcle majeur qui était présent de 1993 à 2015 s'est étalée sur une distance de 1,5 kilomètre dans le chenal principal sud. Cet embâcle total a obstrué l'entièreté de la largeur du chenal sud. Durant l'utilisation de la rivière pour l'industrie du bois, les embâcles n'avaient pas un temps de résidence très élevé, mais lorsque les compagnies ont délaissé la rivière Saint-Jean pour la drave, l'embâcle s'est installé à long terme dans le chenal. Avec la présence d'arbres matures, de grandes tailles, l'embâcle a eu de la facilité à s'installer

puisque avec la morphologie du delta, il y avait moins d'érosion et les embâcles prenaient toute la largeur du chenal (Boivin *et al.* 2012). De plus, le secteur deltaïque est celui où l'on retrouve le plus d'embâcles majeurs puisque la largeur de ce secteur est, en moyenne, inférieure à 30 mètres et la longueur moyenne des arbres est de 25 mètres et plus. Aussi, le delta est une zone où la pente du lit est faible donc c'est l'endroit idéal pour accumuler du bois mort.

L'embâcle total de 1,5 kilomètre et des embâcles autour avait un volume total de près de 27 000 m³ en 2014 tout juste avant le démantèlement à l'hiver 2015 (Boivin *et al.* 2015; Boivin *et al.* 2017b). Tout ce bois provient des berges en amont dans la rivière, mais surtout des secteurs amont et le secteur aval. Avec les phénomènes d'avulsion et l'érosion de certains secteurs, le bois est transporté jusqu'à l'embâcle où le transit est bloqué par la présence d'embâcles totaux dans les chenaux de l'embouchure. Le volume de bois qui est transporté dans l'embouchure va en majorité rester dans l'embâcle et ne sera pas évacué. De petites quantités de bois mort vont être évacuées lors de grande crue via des chenaux qui sont activés seulement quelques fois dans l'année lorsque la hauteur d'eau dépasse la hauteur du lit mineur (Figure 53).



Figure 53. Bois mort qui n'a pas été évacué lors de crues dans les chenaux secondaires (©Antoine Carpentier, 2021)

Puisque le bois mort reste dans l'embâcle total, et qu'il se compacte avec le temps, l'évolution de l'embâcle peut être analysée de façon temporelle. L'embâcle qui était présent en 2014 et qui fut démantelé a été stocké à proximité du chenal dans la plaine alluviale. (Figure 55) À la suite de son démantèlement, le bois mort est revenu s'installer à partir de 2017. En 2017, c'est un volume d'environ 1 000 m³ de bois qui s'est installé au même endroit. Le bois s'est accumulé également à l'entrée des autres chenaux qui compose le secteur aval (Figure 54a). On retrouve aussi un embâcle partiel à l'intersection entre le chenal sud et le chenal au nord de celui-ci (Figure 54b).

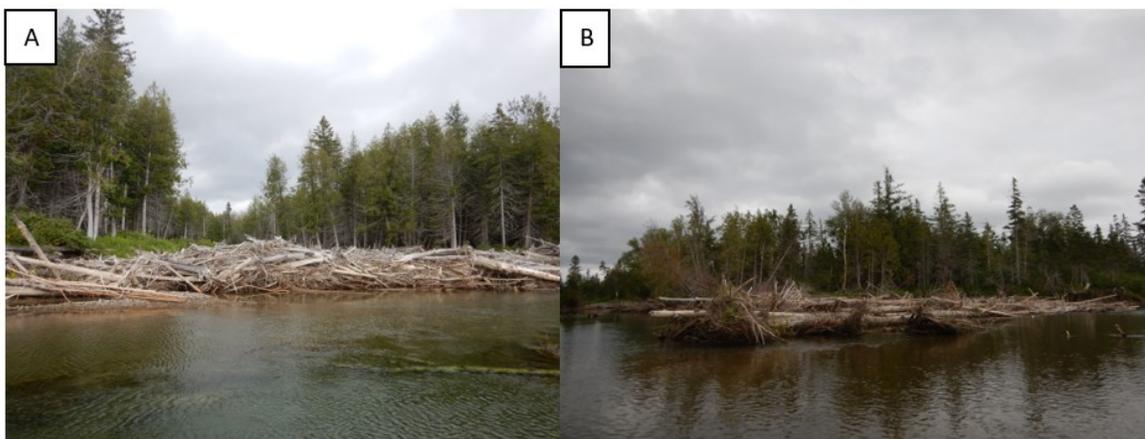


Figure 54. a) Embâcle accumulé à l'entrée d'un chenal, b) Embâcle accumulé à l'intersection de deux chenaux (©Antoine Carpentier, 2021)

Puisque ces embâcles ne faisaient pas l'entièreté de la largeur du chenal, une quantité de bois transporté vers ce chenal a été évacuée de la rivière. L'embâcle situé à l'intersection a été démantelé en 2017 et le bois qui s'y retrouvait a été soit transporté vers l'embâcle plus en aval ou a été évacué par le chenal tout juste au nord. Par la suite, en 2017, du bois mort s'est accumulé dans le chenal sud de l'embouchure pour créer un embâcle qui occupera progressivement la totalité de la largeur du chenal. Les années suivantes, d'autres bois morts ont été transportés jusqu'à l'embâcle total du chenal sud, pour occuper en 2021, une longueur de 440 mètres. Avec les données sur l'évolution de l'embâcle à partir de 2016 et des données prédéamment, la comparaison permet de montrer que l'évolution de l'embâcle est plus rapide aujourd'hui, à comparer de la période avant le démantèlement (1993-2015). En seulement 5 ans, l'embâcle a atteint un volume cumulé de près de 4 000 m³ tandis qu'en 1993, ce volume a été atteint en 21 ans. La proportion du volume cumulé la plus importante a été ajoutée à la fin de l'année 2020. En décembre 2020, de grandes quantités de pluie se sont abattues sur la péninsule gaspésienne et sur la baie des Chaleurs. Ces pluies ont fait augmenter le débit de la Saint-Jean à près de 640 m³. Les calculs de volumes de bois dans l'embâcle ont une certaine marge d'erreur due au fait que l'embâcle situé à l'intersection a été démantelé au moins à deux reprises et que ce volume de bois est peut-être ajouté à l'embâcle ou évacué, donc cela peut modifier légèrement les volumes calculés. Aussi, il peut y avoir des volumes de bois qui sont évacués lors des périodes de crues via les chenaux secondaires avoisinants. Avec l'avulsion du chenal au kilomètre 1,5, les quantités de bois

peuvent changer et l'érosion des berges amène des quantités importantes de bois, ce qui fait augmenter l'embâcle du chenal principal sud. La différence entre le volume de bois installé dans le chenal principal sud en 2019 et 2020 est assez importante. La quantité de bois a fortement augmenté et cela se perçoit sur la figure 56.

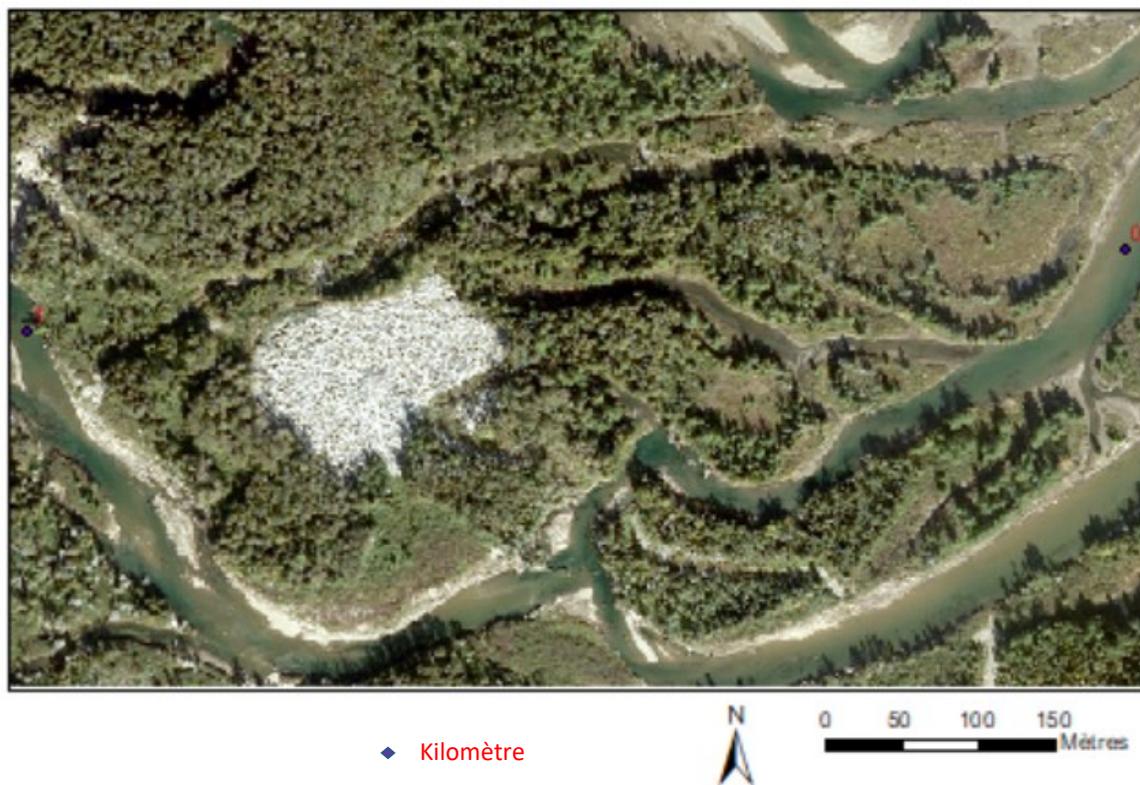


Figure 55. Stockage de l'embâcle démantelé en 2015 entre le kilomètre 1 et 0 (position aval maximale) (©Antoine Carpentier, 2021)



Figure 56. L'embâcle total dans le chenal principal sud, a) 2019, b) 2020 (©Antoine Carpentier, 2021)

5.2 Les changements hydromorphologiques avant et après le démantèlement sur l'ensemble de la rivière

La rivière Saint-Jean est une rivière avec une forte mobilité du chenal et cette mobilité amène des modifications notamment sur sa largeur et sur la composition des bancs d'accumulation. La rivière Saint-Jean a connu des périodes de crues assez importantes dans son histoire, mais les crues majeures sont en hausse depuis 2004. Entre 1963 et 2004, on dénombre 16 crues, dont 6 importantes, tandis qu'à partir de 2004, on dénombre 7 crues importantes (Figure 57). Les crues les plus importantes sont celles de 1981, 2010, celle de 2017 et celle de 2020. Lors d'une période de crue morphogène, l'érosion est plus importante, ce qui peut mener à une hausse de la sinuosité et à une augmentation de la superficie des bancs d'accumulation. Ces crues amènent une mobilité du chenal et amènent une production de bois mort importante si les berges érodées sont occupées par des arbres (Comiti *et al.* 2016). Selon l'atlas hydroclimatique du Québec et du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), les prévisions pour la rivière Saint-Jean montrent une augmentation possible du débit moyen annuel (Figure 58). Cette augmentation se perçoit pour les périodes de 2011-2040, 2041-2070 et de 2071 à 2100 (Ministère de l'Environnement 2022).

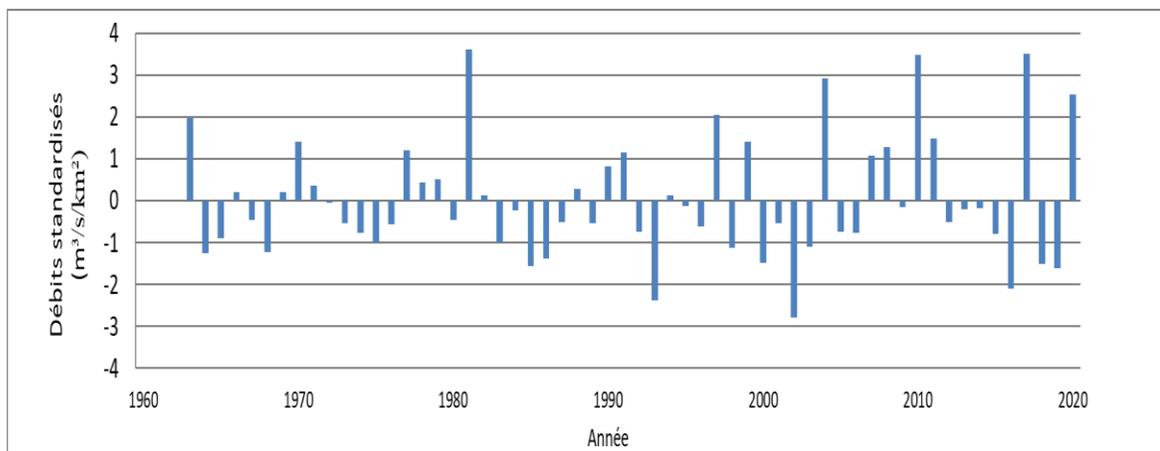


Figure 57. Débits maximaux standardisés sur la rivière Saint-Jean (©Antoine Carpentier, 2021)

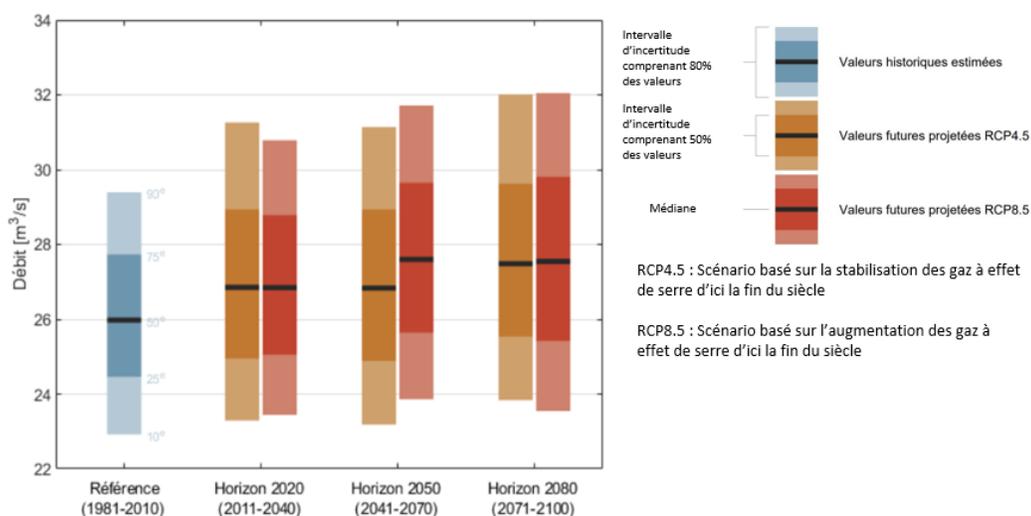


Figure 58. Impact projeté des changements climatiques sur le débit moyen de la rivière Saint-Jean (adapté de MELCC, 2022)

Cette augmentation du débit moyen amènera des changements dans la morphologie de la rivière et ces changements seront perceptibles sur la largeur ainsi que sur les superficies érodées. L'analyse des événements de crue permet d'analyser les années où la trajectoire de la rivière change. Les crues qui sont survenues après les années 2000 ont eu un impact sur la morphologie de la rivière puisque l'indice de sinuosité a augmenté tout comme la largeur médiane du chenal, la production ligneuse et le taux d'érosion. Tous ces indicateurs

permettent de montrer qu'il y a bel et bien eu des modifications dans la trajectoire de l'ensemble de la rivière Saint-Jean. En un peu plus de 20 ans, la rivière a connu ses plus grandes modifications, mais depuis 2016, ces indicateurs sont en baisse (Figure 59). La baisse du taux d'érosion et de l'indice de sinuosité est reliée par le fait que tout d'abord, le débit moyen annuel est en baisse malgré un débit morphogène plus important. Cela amène une diminution du temps d'exposition à de forts courants pour les berges qui pourraient être érodées. Aussi, dépendamment de la zone exposée à l'érosion, la végétation disponible pour la production ligneuse peut être moins présente. Certains secteurs ont déjà été érodés et certains possèdent des affleurements rocheux où la végétation est moins disponible. En diminuant le taux d'érosion, la trajectoire du cours d'eau change peu et les berges peuvent se végétaliser. La végétalisation des berges peut diminuer la distance du cours d'eau et donc de diminuer l'inde de sinuosité.

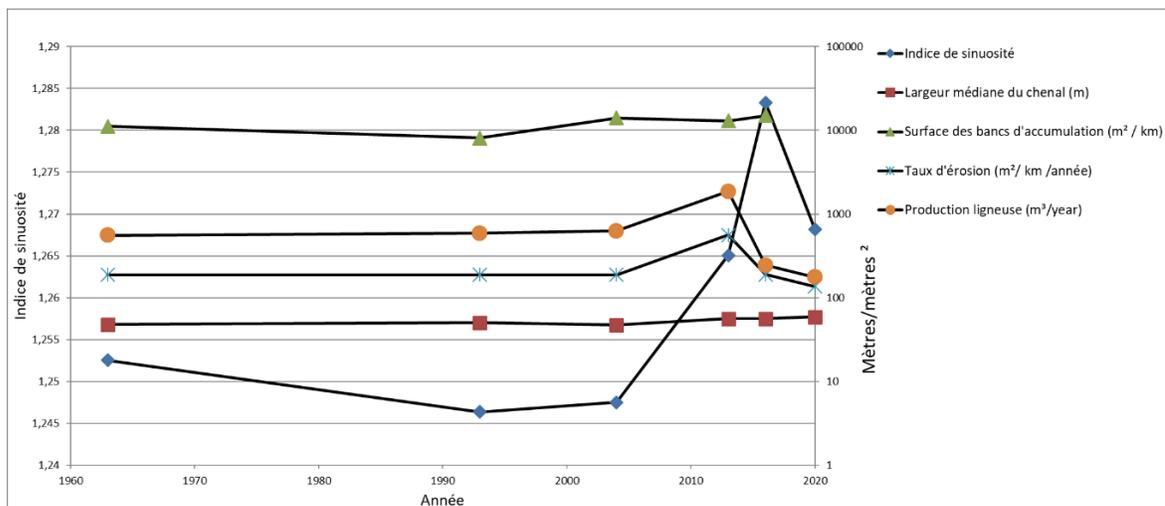
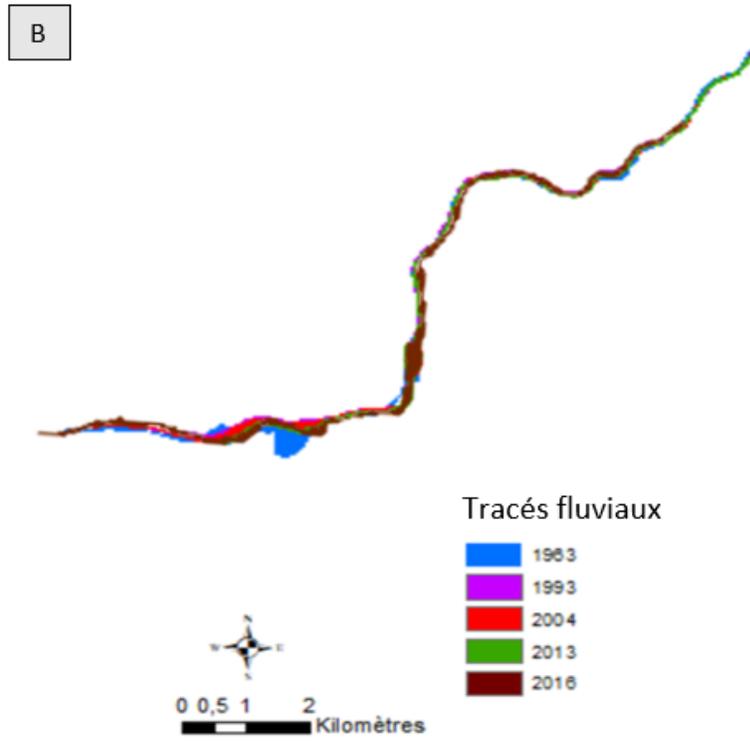
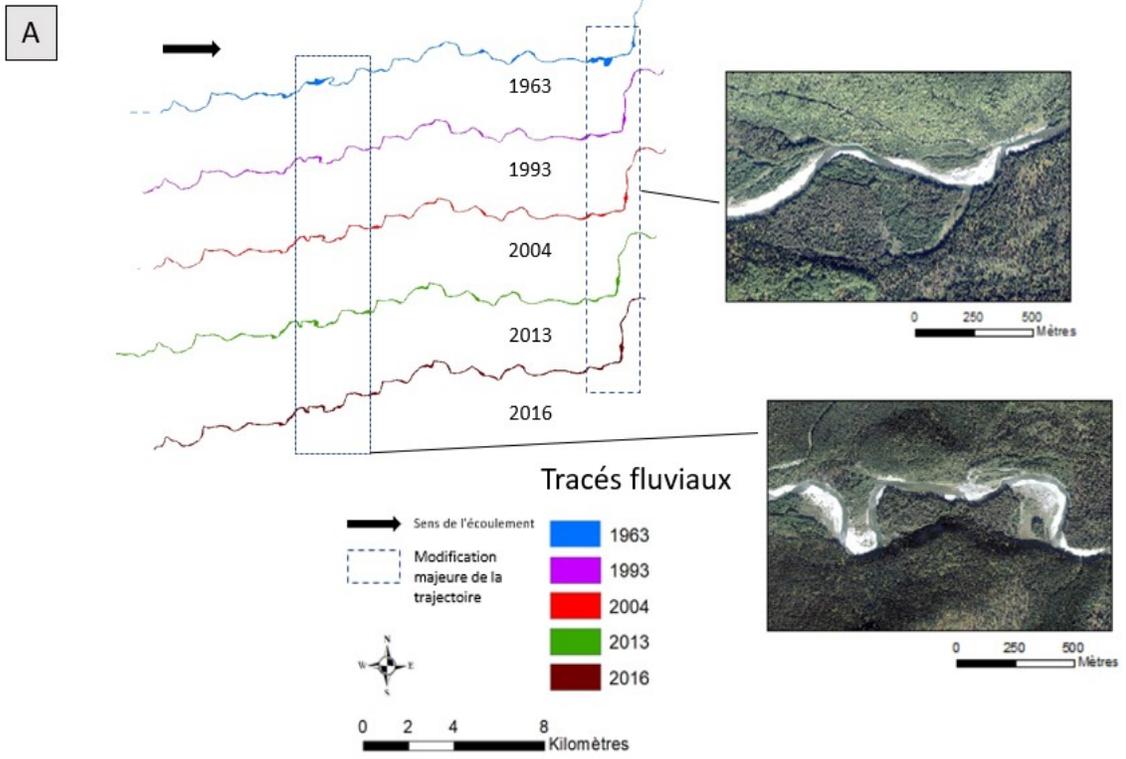


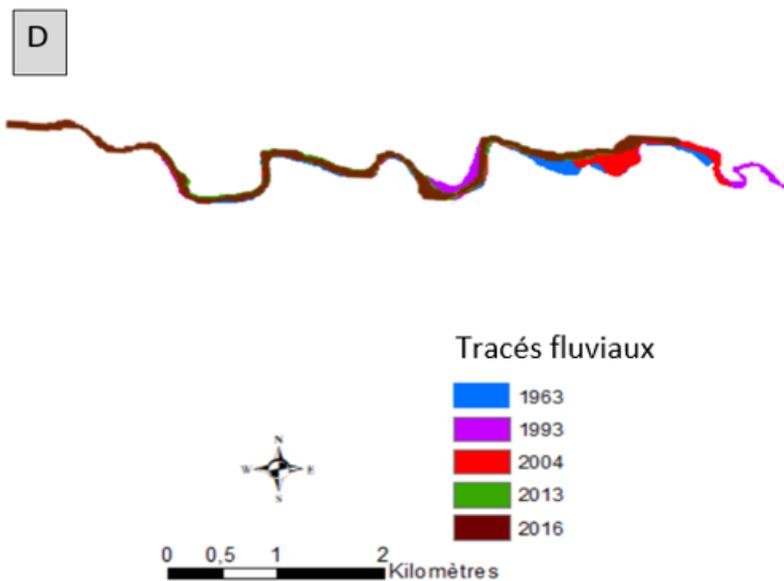
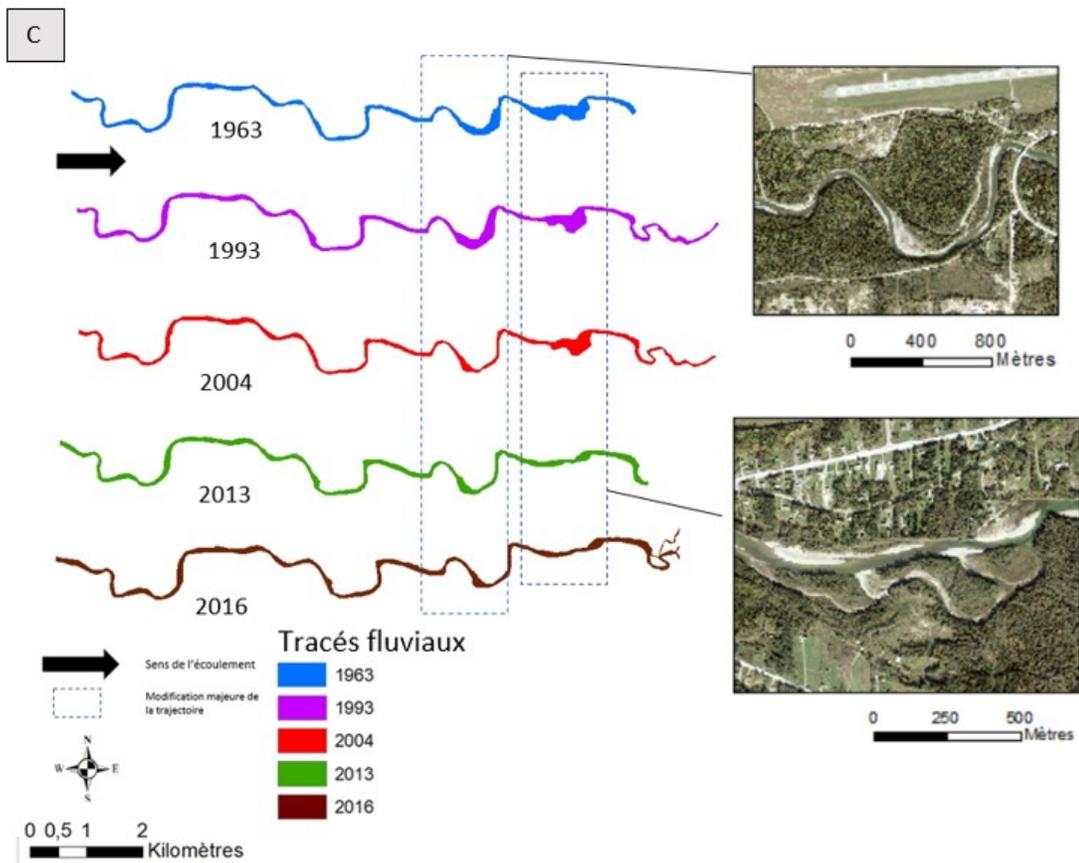
Figure 59. Les indicateurs de mobilité de la rivière Saint-Jean, sur les 60 kilomètres, calculés à partir de 1963 jusqu'en 2020 (©Antoine Carpentier, 2021)

Lorsque l'on retrouve une zone d'accumulation de sédiments, cela signifie que les sédiments proviennent d'autres secteurs qui eux ont connu un phénomène de perte (Piégay et Gurnell 1997). La production naturelle de sédiments est dans la majorité des cas de la rivière Saint-Jean due à l'érosion des berges ou au phénomène d'avulsion. Lorsque le banc est en perte de sédiments, cela peut être causé par le phénomène d'incision ou par une érosion progressive du banc lors de période de crue. Les bancs sont donc soit le résultat d'une érosion des berges

suivi d'une accumulation ou un phénomène de perte de sédiments qui eux sont transportés vers l'aval sur un autre banc ou dans l'exutoire (Wohl et Scott 2017).

Le bois mort joue un des grands rôles face à la mobilité du cours d'eau. La présence de bois mort influence l'érosion, la présence de bancs d'accumulation et l'incision possible du lit de la rivière (Gurnell *et al.* 2002; Montgomery et Piégay 2003; Ravazzolo *et al.* 2015). Certains secteurs de la rivière Saint-Jean sont donc plus susceptibles de connaître une grande mobilité comme le secteur amont et aval. Ces modifications touchent surtout les secteurs avec la présence de chenaux secondaires ou la présence de méandres dynamiques. La figure 60 présente les secteurs où les changements morphologiques sont les plus importants. Ces zones possèdent aussi de très grands volumes de bois, ce qui influence la mobilité de la rivière (Keller et Swanson 1979). Certains secteurs avaient une plus grande largeur dans les années 1963 et 1993 (Figure 60). Ces secteurs ont connu une baisse de leur largeur puisque les berges se végétalisent et les sédiments empiètent sur le lit pour réduire la largeur de la rivière. Le secteur médian n'a pas connu de grands changements dans la trajectoire hydrogéomorphologique en raison de son style fluvial rectiligne et la présence de parois rocheuses qui réduit l'érosion des berges.





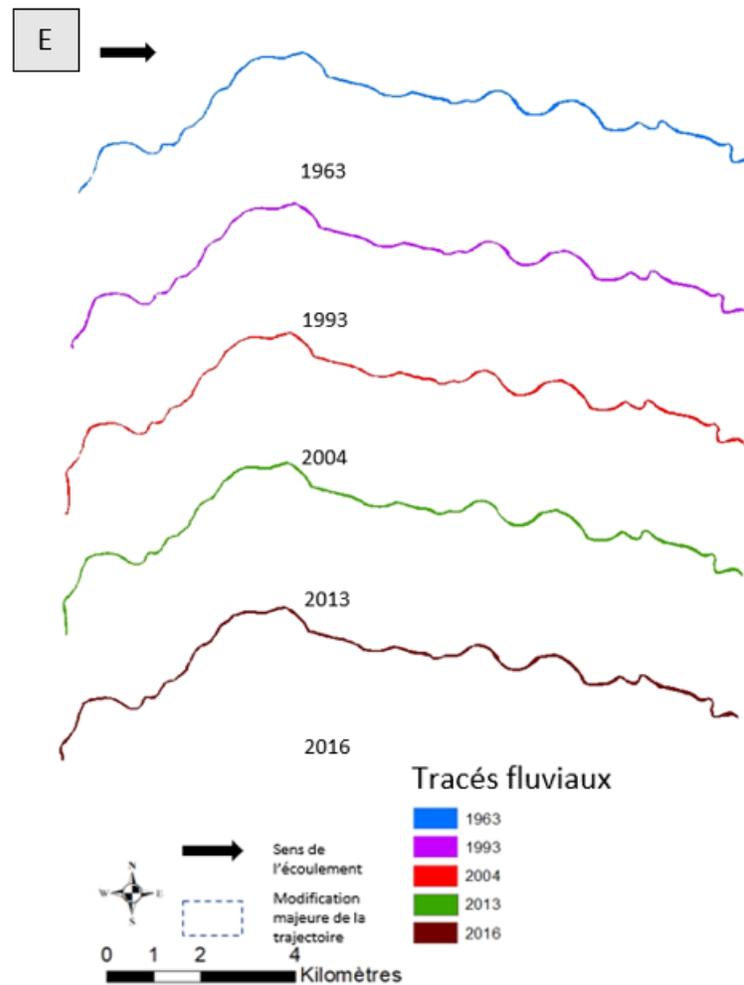


Figure 60. La trajectoire de la rivière Saint-Jean selon les années, a) secteur amont, b) secteur aval, c) secteur amont superposé, d) secteur aval superposé. E) secteur médian (©Antoine Carpentier, 2021)

Il était déjà connu que le démantèlement d'un embâcle avait plus d'impacts sur le secteur démantelé et à proximité (Beschta 1979; Bilby et Likens 1980; Heede 1985; Gregory et Davis 1992). L'année suivante du démantèlement, en 2016, sur les dix derniers kilomètres, la mobilité de la rivière n'a pas augmenté, et elle a diminué concernant le taux d'érosion et la production ligneuse. Cependant, certains indicateurs ont augmenté comme la superficie des bancs d'accumulation, l'indice de sinuosité. La largeur médiane du chenal est restée assez stable entre 2014 et 2016. Puis, pour l'année 2020, la production ligneuse et le taux d'érosion ont diminué, tandis que la largeur médiane du chenal, l'indice de sinuosité et les surfaces de bancs d'accumulation ont augmenté pour les 10 derniers kilomètres.

Le secteur de l'ancien embâcle (secteur aval) où l'on retrouve des méandres dynamiques va encore être modifié dans les prochaines années, tout comme le secteur amont. Certains méandres peuvent prendre de l'expansion, mais peuvent aussi créer un phénomène de recouplement où le cours d'eau réduit sa distance à parcourir. Ce recouplement peut amener une nouvelle trajectoire ce qui peut augmenter la production ligneuse et la largeur de la rivière. Une nouvelle trajectoire va impacter aussi l'indice de sinuosité, le taux d'érosion. La rivière possède beaucoup d'anciens chenaux ou d'anciens méandres qui pourraient faire en sorte que la rivière retrouve son ancien lit selon les secteurs. Les anciens chenaux ou méandres possèdent maintenant des zones végétalisées qui pourraient amener du nouveau bois mort sur l'ensemble de la rivière. Ces bois morts pourraient aussi se retrouver dans le secteur aval où des embâcles majeurs se trouvent.

5.3 Les impacts du démantèlement avant et après dans le delta de la rivière Saint-Jean

Les démantèlements sont des pratiques qui sont assez courantes pour de petits embâcles, mais peu de démantèlements de grande envergure ont été réalisés dans le monde. Le démantèlement de la rivière Saint-Jean est l'un des plus importants jamais réalisé. Puisqu'il est l'un des premiers, peu de recherches ont été réalisées sur l'impact d'un démantèlement sur la morphologie d'une rivière et de son embouchure avant et après. Les recherches réalisées durant 2019 et 2020 ont permis d'acquérir plus de connaissances sur la situation du delta après le démantèlement. Il faut mentionner que l'embâcle se situait sur l'entièreté de la largeur du chenal du sud et sur une distance de 1,5 kilomètre. Cela fait en sorte qu'il n'y avait pas de données sur le lit de la rivière sous l'embâcle et sur la présence ou pas de bancs d'accumulation avant le démantèlement. Le profil de la rivière est donc réalisé en 2016 tout juste après le démantèlement et un autre profil a été réalisé en 2020. Avec les images satellites, il a aussi été possible de quantifier les changements significatifs dans le chenal sud du delta.

Depuis le démantèlement, on observe une hausse du nombre de bancs d'accumulation (51 en 2013; 66 en 2019) et une hausse de la superficie totale des bancs dans le delta (227 848 en

2013; 448 723 en 2019). Avec l'absence d'obstacles, les méandres ont tendance à être des secteurs propices à la présence de bancs d'accumulation. Lorsqu'il y a la présence d'un embâcle, on retrouve dans la plupart des cas des sédiments fins en amont de l'embâcle et des sédiments grossiers en aval (Abbe et Montgomery 2003; Daniels et Rhoads 2003; Faustini et Jones 2003; Montgomery et Piégay 2003). Lors du démantèlement, ces sédiments seront transportés jusqu'à un nouvel obstacle comme un banc d'accumulation ou un méandre situé à l'aval (Wohl *et al.* 2016). Lorsqu'il y a une absence de bois, le courant recommencera ces processus naturels comme l'érosion. Lorsqu'il y a la présence de bois mort, le courant est dévié vers la berge opposée, ce qui amène une diminution de l'érosion spécifiquement localisée sur le secteur de l'embâcle. Depuis que l'embâcle a été retiré, l'érosion a augmenté dans les deux derniers kilomètres du delta, tandis que pour les huit kilomètres en amont ce taux d'érosion a diminué. Cette érosion, dans les deux derniers kilomètres, causée par l'avulsion du chenal, amènera de nouvelles quantités de bois mort dans la rivière. Cette nouvelle quantité de bois ramènera des processus qui modifieront la morphologie de la rivière. L'absence de bois dans le chenal sera de courte durée puisqu'avec le phénomène d'érosion qui augmente dans le secteur du démantèlement et une production en bois mobilisé de l'amont, on se retrouvera avec une nouvelle accumulation de bois mort dans le delta qui jouera un rôle important dans le système fluvial. À la suite d'un démantèlement, le secteur n'aura pas de changements morphologiques assez importants pour réduire les probabilités de voir un nouvel embâcle se créer. Ce secteur restera propice à l'accumulation de bois mort.

L'impact le plus important est la modification du profil en long du lit de la rivière et de la surface de l'eau suite à un démantèlement (Figure 61). Lorsqu'il y a un embâcle dans une rivière graveleuse, l'embâcle joue un rôle primordial sur la présence de fosses (Abbe et Montgomery 1996). Ces fosses sont l'habitat principal des saumons puisqu'elles sont plus profondes et que la température de l'eau est plus froide (Angermeier et Karr 1984; Bocchiola *et al.* 2006). Ces fosses jouent donc un rôle primordial dans l'écosystème de la rivière. Le démantèlement diminue la profondeur des fosses ainsi que leur nombre sur la rivière Saint-Jean depuis le démantèlement (Fausch et Northcote 1992).

Certains secteurs situés dans la zone de l'ancien embâcle de 1,5 kilomètre ont des fosses plus profondes ce qui est dû à la présence de bois mort qui s'est ajouté après le démantèlement et

avec le changement de la trajectoire fluviale. L'uniformisation du lit du chenal est un phénomène que l'on peut apercevoir sur d'autres rivières où on retrouve un démantèlement d'embâcles. Sur la rivière Neigette, plusieurs fosses ont été remblayées par les sédiments qui étaient en amont et aval des embâcles (Massé 2014).

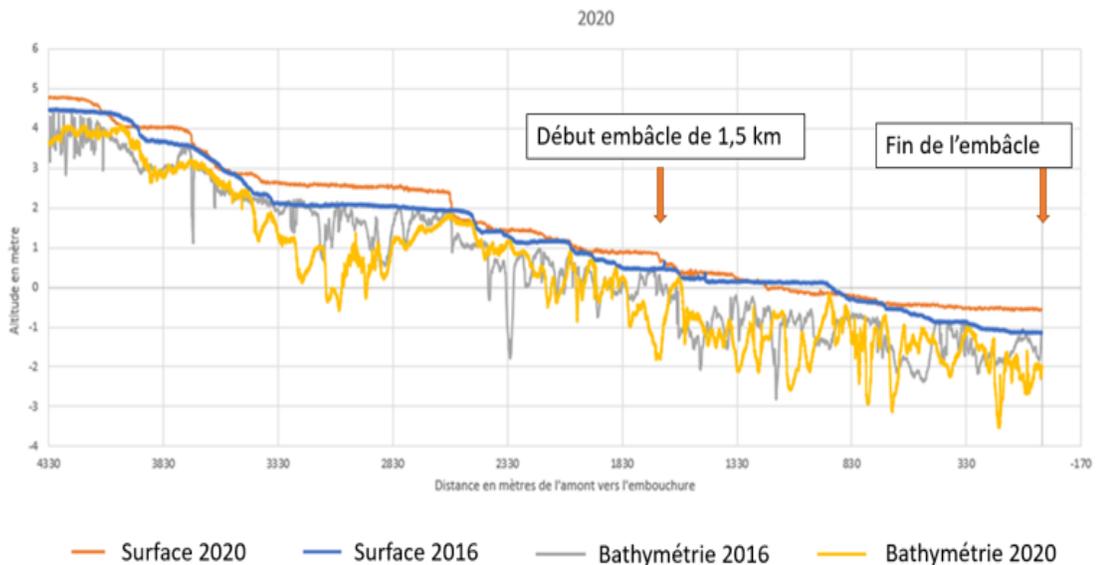


Figure 61. Profil de la rivière Saint-Jean en 2016 et 2020 avec la bathymétrie (©Antoine Carpentier, 2021)

Depuis le démantèlement, on retrouve le phénomène d'avulsion dans le delta aux alentours du kilomètre 1,5. Cette avulsion amène de nouvelles quantités de bois mort dans le delta et ce volume se retrouve en partie dans le secteur de l'ancien embâcle (Figure 62). On voit aussi sur la figure 66 la différence de bancs d'accumulation entre 2016 et 2020. Les bancs d'accumulation ont de plus grandes superficies en 2020, ce qui amène une modification dans la trajectoire du cours d'eau.

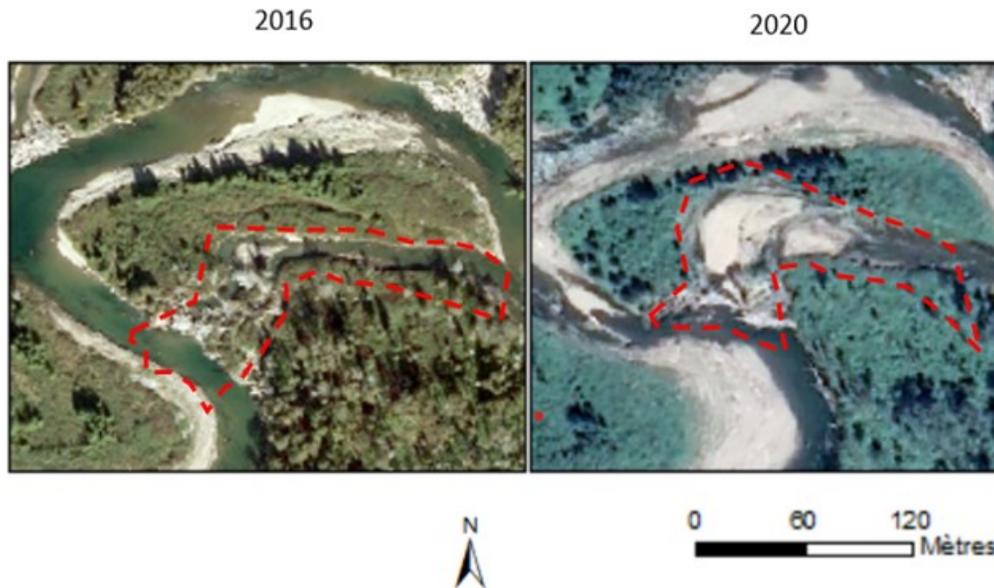


Figure 62. L'avulsion au kilomètre 1,5 en 2016 et 2020 (©Antoine Carpentier, 2021)

Enfin, la différence entre le LiDAR de 2016 et 2020 permet de montrer les différences à la surface de l'eau. La surface de l'eau inclut les bancs d'accumulation ainsi que l'érosion de berges ou la perte de superficie d'un banc d'accumulation. La différence aussi marquée entre la hauteur d'eau de 2016 et 2020 au kilomètre 1 est due à l'absence d'embâcle majeur dans le chenal en 2016. Sans l'embâcle, la surface de l'eau est moins haute que la hauteur d'eau en 2020 où il y a présence d'embâcle de bois mort. En enlevant l'embâcle de bois, la surface est plus basse, ce qui diminue la hauteur et crée la zone de perte d'altitude. En amont de l'embâcle et entre le kilomètre 1 et 2, il y a une hausse de la hauteur puisqu'il y a la présence de nouveaux bancs d'accumulation. Ce secteur a changé de morphologie entre 2016 et 2020. D'autres secteurs plus en amont ont été érodés surtout sur les berges en raison de la modification de la trajectoire du cours d'eau. Il y a aussi la perte de superficie pour certains bancs. Comme pour la rivière Neigette certains secteurs ont connu un phénomène d'incision (Massé et Buffin-Bélanger 2016). Avec le retrait de l'embâcle, l'écoulement est libre de circulation, et donc, il est plus rapide et peut transporter plus de sédiments. Ces sédiments transportés amènent le lit de la rivière à être plus susceptible à de l'érosion verticale (Aubert 2014).

L'impact d'un démantèlement a aussi été observé sur des rivières aux États-Unis, en Espagne. Le démantèlement sur la rivière Red a amené une hausse de l'incision du lit et donc un déséquilibre sédimentaire (Triska 1984; Abbe et Montgomery 2003). Il y a une hausse du transport sédimentaire puisque le débit a augmenté en raison de l'absence d'obstacles qui ralentissent le courant (Angermeier et Karr 1984; Fausch et Northcote 1992; Díez *et al.* 2000; Bocchiola *et al.* 2006). Dans la baie de Matagorda au Texas, à la suite du retrait d'un embâcle, $14 \times 10^6 \text{ m}^3$ de sédiments fins se sont déposés dans la baie sur une période de 29 ans (Abbe et Montgomery 2003). Dans les rivières graveleuses de l'Alaska ainsi que sur deux rivières en Espagne, le démantèlement a amené une hausse des surfaces de bancs d'accumulation comportant des sédiments grossiers (Smith *et al.* 1993b), ce qui est similaire sur notre site d'étude. Un autre impact du retrait de l'embâcle sur la rivière Red est la hausse du nombre d'embâcles majeurs sur la rivière (Triska 1984). De plus, dans la vallée de la rivière Red, le style fluvial a changé à la suite du retrait de l'embâcle pour devenir une rivière anastomosé (Triska 1984). Cette hausse est reliée à la hausse de la turbidité ainsi que la présence de sédiments qui étaient situés à proximité des embâcles, mais qui après leur retrait étaient sujets à du transport.

Depuis le démantèlement de 2015, le bois mort s'est accumulé de nouveau dans le chenal sud pour obstruer le chenal avec une superficie de près de 4000 m^3 . L'embâcle a donc de fortes probabilités de se reformer puisqu'en cinq ans, l'embâcle s'est reformé dans le même chenal. Avec le phénomène d'érosion qui se produit encore sur la rivière, surtout dans le secteur d'avulsion qui amène une production ligneuse importante, l'embâcle pourrait, avec le temps, être aussi gros qu'en 2015. De plus, le bois mort venant de l'embâcle démantelé de 2015 se localise tout près de la rivière, donc il ne manque qu'une avulsion pour revoir ce bois mort dans la rivière.

6. CONCLUSION GÉNÉRALE

La rivière Saint-Jean possède un nombre élevé de bois mort sur le corridor fluvial de 60 kilomètres de la rivière. Cette rivière a été caractérisée par la présence d'un embâcle de bois majeur de 1,5 kilomètre dans le chenal principal situé dans le secteur du delta. À la suite de son démantèlement, de nouveaux volumes de bois mort se sont installés dans le delta. Les résultats de ce mémoire ont permis d'analyser la dynamique du bois mort avant et après un démantèlement majeur. Le mémoire a aussi pu analyser la morphologie de la Saint-Jean avant et après le démantèlement. Puisqu'on ne retrouve que peu de recherches sur la dynamique spatio-temporelle du bois mort dans les rivières graveleuses des climats tempérés froids, ces données permettent de mieux comprendre la problématique du bois mort en rivière. La rivière Saint-Jean possède quatre styles fluviaux, dont deux qui sont très similaires. Le secteur amont qui comporte les kilomètres 60 à 30 est de style alluvial avec des méandres dynamiques. Le secteur semblable est le secteur comportant les kilomètres 10 à 2. Le secteur médian, kilomètre 30 à 10 est de style rectiligne avec un substrat rocheux. Finalement, le secteur du delta, les deux derniers kilomètres sont de style anastomosé avec de multiples chenaux. Ces secteurs ne comportent pas tous les mêmes volumes de bois mort, puisque certains possèdent les obstacles qui augmentent les probabilités de retrouver des embâcles comme les bancs d'accumulation, des zones d'eau peu profonde et des méandres. Les secteurs amont et le secteur aval possèdent 90 % du volume total de bois situé dans les embâcles. La dynamique du bois mort interannuelle montre une tendance à la hausse dans le total de volume de bois situé dans la rivière entre la première année d'acquisition du volume en 2010 et l'année 2020. On constate une légère baisse du volume en 2020 comparé à l'année 2019. Aussi, 10 % du volume total de bois des embâcles s'est déplacé du secteur amont vers le secteur aval. On dénombrait en 2019, 353 embâcles et ce chiffre a diminué à 326 embâcles en 2020, pour une baisse de 27 embâcles. Ces volumes ont été transportés vers le secteur aval pour s'ajouter au volume d'embâcles déjà présents ou pour créer de nouveaux embâcles. Cette petite baisse du volume a été observée de la même façon sur d'autres rivières de la Gaspésie et de régions aux alentours comme la rivière Petite-Cascapédia et la rivière Port-Daniel.

La trajectoire de la rivière a elle aussi été modifiée avec les années. À partir de 1963, des changements majeurs se sont faits sur la rivière à la suite de l'arrêt de l'utilisation de la Saint-Jean pour le transport de bois (drave). De nouveaux chenaux et de nouveaux méandres ont fait leur apparition. Par la suite, avec les années, certains chenaux ont été abandonnés et la rivière a modifié son trajet. Ces changements ont amené de grandes quantités de bois mort sur la rivière, ce qui a causé la présence de l'embâcle total dans le delta de la Saint-Jean. Ces nouveaux volumes de bois sont causés par les périodes de crues importantes ainsi que par les secteurs érodés qui produisent du bois mort qui est transporté sur la rivière. Après le début des années 2000, la rivière a connu de grands changements, causés par l'arrêt de la drave, une augmentation des crues, dans sa trajectoire avec des taux d'érosion imposants, mais ces taux d'érosion ont baissé à partir de 2013 pour se situer au même taux depuis. L'indice de sinuosité lui a augmenté aussi au début des années 2000 pour ensuite revenir à une valeur stable depuis 2016 (1,27). Après le démantèlement majeur de 2015, la trajectoire du delta a changé avec le phénomène d'avulsion situé au kilomètre 1,5 et qui amène de nouveaux volumes de bois et de sédiments grossiers.

Le démantèlement a aussi entraîné des impacts sur le profil de la rivière, puisqu'avec la présence de l'embâcle avant 2015, on retrouvait de nombreuses fosses profondes qui pouvaient accueillir les saumons. Après 2015, le lit de la rivière s'est uniformisé ce qui a diminué le nombre de fosses et la profondeur de celles-ci. Le bois mort jouait un rôle dans la création de fosses et de stockage de sédiments fins et grossiers à proximité de l'embâcle. Après le démantèlement, l'absence d'obstacles a permis à l'écoulement de transporter les sédiments vers les berges pour créer des bancs d'accumulation et aussi remplir les fosses plus profondes. De plus, depuis le démantèlement, on voit une réapparition d'un embâcle total dans le chenal principal sud. La progression de cet embâcle est assez importante puisque depuis 2016, l'embâcle s'agrandit pour cumuler une longueur totale de 440 mètres en l'espace de cinq ans. L'embâcle avant 2015 faisait 1,5 kilomètre et l'embâcle s'est créé sur un espace-temps de 21 ans. L'embâcle se reforme assez rapidement et avec la progression qu'il connaît actuellement il faut se demander dans combien d'années l'embâcle va faire à nouveau 1,5 kilomètre. Il faut aussi se demander quelles actions doivent être prises pour gérer l'embâcle à moyen et long terme puisque s'il faut à nouveau démanteler l'embâcle, cela

amène des coûts importants pour les gestionnaires et le bois mort va retourner s'installer dans le chenal les années suivantes. Une des solutions envisagées est la gestion localisée de certains embâcles pour ne pas que ces embâcles ne prennent que la largeur totale du cours d'eau. Aussi, il faut peut-être mettre en place une zone de déposition du bois mort lors de crues. Des solutions vont être étudiées durant l'année 2022 ainsi que 2023 pour proposer des solutions à la problématique. La dynamique du bois mort sur la rivière Saint-Jean ne devrait pas disparaître prochainement, il faut donc se demander si l'on décide de contrer l'érosion des berges qui produisent une quantité de bois chaque année, couper les arbres susceptibles d'être transportés dans la rivière ou on laisse la situation telle quelle. La situation du bois mort de la rivière Saint-Jean est un cas assez unique mondialement et peu de solutions ont été mises en place ailleurs pour contrer autant de volume. En prenant connaissance de la dynamique du bois mort sur la rivière Saint-Jean et sur d'autres rivières de la Gaspésie, il sera plus facile d'identifier les secteurs susceptibles de produire des volumes de bois et de prédire les volumes selon les crues.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[Anonyme]. 1999. Oregon aquatic habitat: Restoration and enhancement guide. Oregon, 103 p.

Abbe TB et Montgomery DR. 1996. Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers. *Regulated Rivers: research & management*, 12 : 201-221.

Abbe TB et Montgomery DR. 2003. Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington. *Geomorphology*, 51 : 81-107.

Angermeier PL et Karr JR. 1984. Relationships between woody debris and fish habitat in a small warmwater stream. *Transactions of the American Fisheries Society*, 113 : 716-726.

Aubert G. 2014. Processus d'incision des rivières à fond rocheux-simulations numériques en éléments discrets. Thèse de doctorat, Ecole normale supérieure de lyon-ENS LYON, 141 p.

Beechie TJ et Sibley TH. 1997. Relationships between channel characteristics, woody debris, and fish habitat in northwestern Washington streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, 126 : 217-229.

Benda L, Miller D, Sias J, Martin D, Bilby R, Veldhuisen C et Dunne T. Wood recruitment processes and wood budgeting. Dans : *American Fisheries Society Symposium*, 2003. American Fisheries Society, p. 49-74.

Benyahya L, Daigle A, Caissie D, Beveridge D et St-Hilaire A. 2009. Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'est du Canada. *INRS-ETE*, 88 p.

Berber M et Wright W. 2017. Hydrographic survey of a south Florida canal using a hydrolite. *Journal of Geodetic Science*, 7 : 79-83.

Bérubé J et Boivin M. 2020. Étude de la dynamique du bois mort en rivière et de son impact sur la migration anadrome du Saumon de l'Atlantique dans la rivière Port-Daniel.

Beschta RL. 1979. Debris removal and its effects on sedimentation in an Oregon Coast Range stream. *Northwest Science*, 53 : 71-77.

Bilby RE. 1984. Removal of woody debris may affect stream channel stability. *Journal of Forestry*, 82 : 609-613.

Bilby RE et Likens GE. 1980. Importance of organic debris dams in the structure and function of stream ecosystems. *Ecology*, 61 : 1107-1113.

Biron P, Buffin-Bélanger T et Demers S. 2018a. La restauration de l'habitat du poisson en rivière: L'angle de l'hydrogéomorphologie. *Vecteur Environnement*, 51 : 34.

Biron PM, Buffin-Bélanger T et Massé S. 2018b. The need for river management and stream restoration practices to integrate hydrogeomorphology. *Canadian Geographer*, 62 : 288-295.

Bocchiola D, Rulli MC et Rosso R. 2006. Transport of large woody debris in the presence of obstacles. *Geomorphology*, 76 : 166-178.

Boivin M. 2016. Analyse par bilan ligneux de la dynamique des bois morts à multiples échelles spatiales et temporelles dans une rivière semi-alluviale de région froide. Thèse de doctorat, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, 185 p.

Boivin M et Buffin-Belanger T. 2010. Étude hydrogéomorphologique liée à la présence de bois morts dans le corridor fluvial de la rivière Saint-Jean, Gaspé.

Boivin M, Buffin-Bélanger T et Piégay H. Le raft de la rivière Saint-Jean en Gaspésie, Québec: diagnostic des causes et interventions possibles. Dans : *Integrative Sciences Rivers*, Lyon, Paris, 2012.

Boivin M, Buffin-Bélanger T et Piégay H. 2015. The raft of the Saint-Jean River, Gaspé (Québec, Canada): A dynamic feature trapping most of the wood transported from the catchment. *Geomorphology*, 231 : 270-280.

Boivin M, Buffin-Bélanger T et Piégay H. 2017a. Interannual kinetics (2010–2013) of large wood in a river corridor exposed to a 50-year flood event and fluvial ice dynamics. *Geomorphology*, 279 : 59-73.

Boivin M, Buffin-Bélanger T et Piégay H. 2017b. Estimation of large wood budgets in a watershed and river corridor at interdecadal to interannual scales in a cold-temperate fluvial system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42 : 2199-2213.

Boivin M, Buffin-Bélanger T et Arseneault D. 2018. Using tree-rings to determine large wood residence time and transport pulses in a gravel-bed river. *E3S Web Conf*, 40 : 02008.

Boivin M, Maltais M et Buffin-Bélanger T. 2019. Guide d'analyse de la dynamique du bois en rivière. 97 p.

Buffin-Bélanger T, Roy AG et Kirkbride AD. 2000. On large-scale flow structures in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 32 : 417-435.

Buffington JM et Montgomery DR. 1999. Effects of hydraulic roughness on surface textures of gravel-bed rivers. *Water Resources Research*, 35 : 3507-3521.

Bujold V. Embâcles de bois et migration du saumon l'atlantique dans la rivière Saint-Jean. Dans : *Gaspésie-Les-Îles Cef, Conférences - La faune " vedette" et l'aménagement forestier, Gaspésie, Québec, 2011.*

Carlson JY, Andrus CW et Froehlich HA. 1990. Woody debris, channel features, and macroinvertebrates of streams with logged and undisturbed riparian timber in northeastern Oregon, USA. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47 : 1103-1111.

Caron F et Courtemanche D. 2001. Rapport d'opération de la rivière Saint-Jean 2000. Direction de la recherche sur la faune, Société de la faune et des parcs du Québec,, Québec, 67 p.

Chen X, Wei X, Scherer R et Hogan D. 2008. Effects of large woody debris on surface structure and aquatic habitat in forested streams, southern interior British Columbia, Canada. *River Research and Applications*, 24 : 862-875.

Chin A, Laurencio L, Daniels M, Wohl E, Urban MA, Boyer K, Butt A, Piégay H et Gregory K. 2014. The significance of perceptions and feedbacks for effectively managing wood in rivers. *River Research and Applications*, 30 : 98-111.

Chin A, Daniels MD, Urban MA, Piégay H, Gregory KJ, Bigler W, Butt AZ, Grable JL, Gregory SV et Lafrenz M. 2008. Perceptions of wood in rivers and challenges for stream restoration in the United States. *Environmental Management*, 41 : 893-903.

Church M. 2006. Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 34 : 325-354.

Collins BD, Montgomery DR, Fetherston KL et Abbe TB. 2012. The floodplain large-wood cycle hypothesis: a mechanism for the physical and biotic structuring of temperate forested alluvial valleys in the North Pacific coastal ecoregion. *Geomorphology*, 139 : 460-470.

Comiti F, Lucía A et Rickenmann D. 2016. Large wood recruitment and transport during large floods: a review. *Geomorphology*, 269 : 23-39.

- Curran JC. 2010. Mobility of large woody debris (LWD) jams in a low gradient channel. *Geomorphology*, 116 : 320-329.
- Daniels MD et Rhoads BL. 2003. Influence of a large woody debris obstruction on three-dimensional flow structure in a meander bend. *Geomorphology*, 51 : 159-173.
- Demers S, Olsen T, Buffin-Bélanger T, Marchand J-P, Biron PM et Morneau F. 2014. L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid: l'exemple de la rivière Matane (Québec). *Physio-Géo Géographie physique et environnement* : 67-88.
- Díez JR, Larrañaga S, Elosegi A et Pozo J. 2000. Effect of removal of wood on streambed stability and retention of organic matter. *Journal of the North American Benthological Society*, 19 : 621-632.
- Dinehart RL. 1999. Correlative velocity fluctuations over a gravel river bed. *Water Resources Research*, 35 : 569-582.
- Doust H et Omatsola E. 1989. Niger delta. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 48 : 201-238.
- Fausch KD et Northcote TG. 1992. Large woody debris and salmonid habitat in a small coastal British Columbia stream. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49 : 682-693.
- Faustini JM et Jones JA. 2003. Influence of large woody debris on channel morphology and dynamics in steep, boulder-rich mountain streams, western Cascades, Oregon. *Geomorphology*, 51 : 187-205.
- Fortier G. 2011. Les activités forestières à Gaspé (1700-1950). *Recherche documentaire Cégep de la Gaspésie et des Îles*.
- Genivar. 2011. Impact des embâcles de bois sur le profil d'écoulement et la montaison de saumons dans l'estuaire de la rivière Saint-Jean - Rapport du volet 3 - Impacts potentiels sur les infrastructures. Rapport de Genivar inc. à la Société de gestion des rivières de Gaspé inc., 17p. et annexes p.
- Gippel CJ. 1995. Environmental hydraulics of large woody debris in streams and rivers. *Journal of Environmental Engineering*, 121 : 388-395.

Goujon R, Guézennec L, Meyer R et Romana L-A. 1999. Seine-Aval: un estuaire et ses problèmes. Editions Quae, Versailles, 33 p.

Gouvernement du Canada. 2022 (mis à jour le 2022-03-02). Données climatiques historiques. Consulté le 2022-04-07, https://climat.meteo.gc.ca/index_f.html

Gregory K et Davis R. 1992. Coarse woody debris in stream channels in relation to river channel management in woodland areas. *Regulated Rivers: research & management*, 7 : 117-136.

Gregory K et Davis R. 1993. The perception of riverscape aesthetics: an example from two Hampshire rivers. *Journal of environmental management*, 39 : 171-185.

Gurnell A et Bertoldi W. 2020. Wood in fluvial systems. Dans : *Treatise on geomorphology*. Elsevier, p. 163-188.

Gurnell A, Piégay H, Swanson F et Gregory S. 2002. Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology*, 47 : 601-619.

Harmon ME et Hua C. 1991. Coarse woody debris dynamics in two old-growth ecosystems. *BioScience*, 41 : 604-610.

Hassan MA, Hogan DL, Bird SA, May CL, Gomi T et Campbell D. 2005. Spatial and temporal dynamics of wood in headwater streams of the Pacific Northwest. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41 : 899-919.

Heede BH. 1985. Channel adjustments to the removal of log steps: an experiment in a mountain stream. *Environmental Management*, 9 : 427-432.

Hooke JM. 1980. Magnitude and distribution of rates of river bank erosion. *Earth surface processes*, 5 : 143-157.

Hooke JM. 2004. Cutoffs galore!: occurrence and causes of multiple cutoffs on a meandering river. *Geomorphology*, 61 : 225-238.

Jeanney B. 2021. Les embâcles de bois en rivières nordiques : le rôle de la dynamique glacielle sur la mobilité du bois. UQAR, 134 p.

Kail J. 2003. Influence of large woody debris on the morphology of six central European streams. *Geomorphology*, 51 : 207-223.

Keller EA et Swanson FJ. 1979. Effects of large organic material on channel form and fluvial processes. *Earth surface processes*, 4 : 361-380.

Keller EA et Tally T. 1979. Effects of large organic debris on channel form and fluvial processes in the coastal redwood environment. Dans : *Adjustments of the Fluvial System*. Routledge, London, p. 386.

King L, Hassan MA, Wei X, Burge L et Chen X. 2013. Wood dynamics in upland streams under different disturbance regimes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38 : 1197-1209.

Kramer N et Wohl E. 2014. Estimating fluvial wood discharge using time-lapse photography with varying sampling intervals. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39 : 844-852.

Kramer N et Wohl E. 2017. Rules of the road: A qualitative and quantitative synthesis of large wood transport through drainage networks. *Geomorphology*, 279 : 74-97.

Lafleur N. 2001. La drave en Mauricie. *Histoire Québec*, 7 : 24-26.

Lane EW. 1955. Importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proceedings (American Society of Civil Engineers)*; v 81, paper no 745.

Lawrence J, Resh V et Cover M. 2013. Large-wood loading from natural and engineered processes at the watershed scale. *River Research and Applications*, 29 : 1030-1041.

Le Lay Y-F et Piégay H. 2007. Le bois mort dans les paysages fluviaux français: éléments pour une gestion renouvelée. *LEspace géographique*, 36 : 51-64.

Le Lay YF, Piégay H, Gregory K, Chin A, Dolédec S, Elozegi A, Mutz M, Wyzga B et Zawiejska J. 2008. Variations in cross-cultural perception of riverscapes in relation to in-channel wood. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 33 : 268-287.

Leeder M. 1983. On the interactions between turbulent flow, sediment transport and bedform mechanics in channelized flows. *Modern and ancient fluvial systems* : 3-18.

Lisle TE. 1995. Effects of coarse woody debris and its removal on a channel affected by the 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington. *Water Resources Research*, 31 : 1797-1808.

Loghin A-M, Oniga, V., Wieser, M. 2016. Analysing and Modelling Terrain Surface Changes Using Airborne Laser Scanning Data. *World Journal of Engineering Research and Technology* 2 : 87-95.

Magilligan F, Nislow K, Fisher G, Wright J, Mackey G et Laser M. 2008. The geomorphic function and characteristics of large woody debris in low gradient rivers, coastal Maine, USA. *Geomorphology*, 97 : 467-482.

Maltais M. 2019. Évolution spatiale et temporelle de la dynamique du bois mort en rivière, Mont-Louis, Gaspésie. 190 p.

Manners RB, Doyle M et Small M. 2007. Structure and hydraulics of natural woody debris jams. *Water Resources Research*, 43.

Marchand J-P. 2013. Stratigraphie holocène et application d'un modèle séquentiel de vallée de fjord pour la vallée de la rivière Matane, Est-du-Québec, Canada. Université du Québec à Rimouski, 193 p.

Marcus WA, Marston RA, Colvard Jr CR et Gray RD. 2002. Mapping the spatial and temporal distributions of woody debris in streams of the Greater Yellowstone Ecosystem, USA. *Geomorphology*, 44 : 323-335.

Martín-Vide JP, Amarilla M et Zárate FJ. 2014. Collapse of the Pilcomayo River. *Geomorphology*, 205 : 155-163.

Massé S. 2014. Analyse hydrogéomorphologique de la dynamique des embâcles de bois mort de la rivière Neigette, Bas-Saint-Laurent, Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, 191 p.

Massé S et Buffin-Bélanger T. 2016. Understanding hydrogeomorphological dynamics and the distribution of large wood jams to promote sustainable river management strategies. *The Canadian Geographer/Le Géographe canadien*, 60 : 505-518.

Merten E, Finlay J, Johnson L, Newman R, Stefan H et Vondracek B. 2010. Factors influencing wood mobilization in streams. *Water Resources Research*, 46.

Merten EC, Vaz PG, Decker-Fritz JA, Finlay JC et Stefan HG. 2013. Relative importance of breakage and decay as processes depleting large wood from streams. *Geomorphology*, 190 : 40-47.

Montgomery DR et Piégay H. 2003. Wood in rivers: interactions with channel morphology and processes. *Geomorphology*, 51 : 1.

Montgomery DR et Abbe TB. 2006. Influence of logjam-formed hard points on the formation of valley-bottom landforms in an old-growth forest valley, Queets River, Washington, USA. *Quaternary Research*, 65 : 147-155.

Moulin B, Schenk ER et Hupp CR. 2011. Distribution and characterization of in-channel large wood in relation to geomorphic patterns on a low-gradient river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36 : 1137-1151.

MRC De La Côte De Gaspé. 2011. Politique relative à la gestion des cours d'eau sous juridiction de la M.R.C de la Côte-de-Gaspé. Gaspé, 15 p.

Nagayama S, Nakamura F, Kawaguchi Y et Nakano D. 2012. Effects of configuration of instream wood on autumn and winter habitat use by fish in a large meandering reach. *Hydrobiologia*, 680 : 159-170.

Nakamura F et Swanson FJ. 1993. Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18 : 43-61.

Ouranos. 2015. Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Ouranos, Montréal, Québec, 415 p.

Phillips JD. 2012. Log-jams and avulsions in the San Antonio River delta, Texas. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37 : 936-950.

Piégay H et Gurnell A. 1997. Large woody debris and river geomorphological pattern: examples from SE France and S. England. *Geomorphology*, 19 : 99-116.

Piégay H, Le Lay Y-F et Moulin B. Les risques liés aux embâcles de bois dans les cours d'eau: état des connaissances et principes de gestion. Dans : Bois mort et à cavité, une clé pour des forêts vivantes, 2004. p. 193-202.

Piégay H, Gregory KJ, Bondarev V, Chin A, Dahlstrom N, Elozegi A, Gregory SV, Joshi V, Mutz M et Rinaldi M. 2005. Public perception as a barrier to introducing wood in rivers for restoration purposes. *Environmental Management*, 36 : 665-674.

Pinna S, Malenfant A, Hébert B, Côté M et Biondo S. 2009. Portrait forestier historique de la Gaspésie. Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles.

Ravazzolo D, Mao L, Picco L, Sitzia T et Lenzi M. 2015. Geomorphic effects of wood quantity and characteristics in three Italian gravel-bed rivers. *Geomorphology*, 246 : 79-89.

Ritchie AC, Warrick JA, East AE, Magirl CS, Stevens AW, Bountry JA, Randle TJ, Curran CA, Hilldale RC, Duda JJ, Gelfenbaum GR, Miller IM, Pess GR, Foley MM, McCoy R et Ogston AS. 2018. Morphodynamic evolution following sediment release from the world's largest dam removal. *Scientific Reports*, 8 : 1-11.

Rondeau M, Seube N et Denuf JL. 2016. Surveying in Hostile and Non Accessible Areas with the Bathymetric HydroBall $\text{\textcircled{R}}$ Buoy. Dans : Quantitative monitoring of the underwater environment. Springer, p. 47-56.

Roy AG, Buffin-Belanger T, Lamarre H et Kirkbride AD. 2004. Size, shape and dynamics of large-scale turbulent flow structures in a gravel-bed river. *Journal of Fluid Mechanics*, 500 : 1-27.

Ruiz-Villanueva V, Piégay H, Gurnell AM, Marston RA et Stoffel M. 2016. Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges. *Reviews of Geophysics*, 54 : 611-652.

Savard J-P, Bernatchez P, Morneau F et Saucier F. 2009. Vulnérabilité des communautés côtières de l'est du Québec aux impacts des changements climatiques. *La Houille Blanche* : 59-66.

Savard J-P, Bernatchez P, Fraser C, Friesinger S, Jolivet Y, Dugas S, Drejza S et Morissette A. 2008. Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques. *Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, Rimouski*, 256 p.

Schumm SA. 1977. *The fluvial system*. Blackburn Press, Londres, 360 p.

Seo JI, Nakamura F et Chun KW. 2010. Dynamics of large wood at the watershed scale: a perspective on current research limits and future directions. *Landscape and Ecological Engineering*, 6 : 271-287.

Smith R, Sidle RC et Porter P. 1993a. Effects on bedload transport of experimental removal of woody debris from a forest gravel-bed stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18 : 455-468.

Smith R, Sidle RC, Porter P et Noel J. 1993b. Effects of experimental removal of woody debris on the channel morphology of a forest, gravel-bed stream. *Journal of Hydrology*, 152 : 153-178.

Swanson FJ, Gregory SV, Iroumé A, Ruiz-Villanueva V et Wohl E. 2020. Reflections on the history of research on large wood in rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* : 55-66.

Thevenet A, Citterio A et Piégay H. 1998. A new methodology for the assessment of large woody debris accumulations on highly modified rivers (example of two French piedmont rivers). *Regulated Rivers: Research & Management: An International Journal Devoted to River Research and Management*, 14 : 467-483.

Thibault I. 2020. Suivi des populations témoins de saumon atlantique au Québec : Rapport scientifique 2019. Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Québec, 72 p.

Triska FJ. 1984. Role of wood debris in modifying channel geomorphology and riparian areas of a large lowland river under pristine conditions: A historical case study. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 22 : 1876-1892.

Wadham-Gagnon B et Castilloux M. 2010. Suivi télémétrique de saumons atlantiques (*Salmo salar*) dans l'estuaire et l'embâcle de la rivière Saint-Jean (Gaspésie, Québec, Canada). *Société de gestion des rivières de Gaspé Inc, Gaspé*, 69 p.

Webb AA et Erskine WD. 2003. Distribution, recruitment, and geomorphic significance of large woody debris in an alluvial forest stream: Tonghi Creek, southeastern Australia. *Geomorphology*, 51 : 109-126.

Wohl E. 2013. Floodplains and wood. *Earth-Science Reviews*, 123 : 194-212.

Wohl E. 2014. A legacy of absence: wood removal in US rivers. *Progress in Physical Geography*, 38 : 637-663.

Wohl E. 2015. Of wood and rivers: bridging the perception gap. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2 : 167-176.

Wohl E. 2017. Bridging the gaps: An overview of wood across time and space in diverse rivers. *Geomorphology*, 279 : 3-26.

Wohl E. 2020. Wood process domains and wood loads on floodplains. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45 : 144-156.

Wohl E et Jaeger K. 2009. A conceptual model for the longitudinal distribution of wood in mountain streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34 : 329-344.

Wohl E et Scott DN. 2017. Wood and sediment storage and dynamics in river corridors. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42 : 5-23.

Wohl E, Cenderelli DA, Dwire KA, Ryan-Burkett SE, Young MK et Fausch KD. 2010. Large in-stream wood studies: a call for common metrics. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 35 : 618-625.

Wohl E, Bledsoe BP, Fausch KD, Kramer N, Bestgen KR et Gooseff MN. 2016. Management of large wood in streams: an overview and proposed framework for hazard evaluation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 52 : 315-335.

Zhang N et Rutherford ID. 2020. The effect of instream logs on river bank erosion: field measurements of hydraulics and erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms* : 1677-1690.

ANNEXE 1

Fiche caractérisation des embâcles

Nom du site: _____ # d'embâcle : _____ Date: _____ Opérateurs : _____
 # Photo Aval: _____ Point GPS: _____ # Photo Amont: _____ # photo (Autre) : _____
 Commentaires : _____

CARACTÉRISTIQUE DE L'EMBÂCLE

Type d'embâcle : Partiel / Total / Majeur (plus de 15 troncs) % du chenal obstrué : 0-25% / 25-50% / 50-75% / 75% et + / Complet
 % de l'Aire obstruée : 0-25% / 25-50% / 50-75% / 75% et + / Complet Orientation (degrés) de l'embâcle dans le chenal : _____
 Position dans le chenal : _____ Chenal : Principal / Secondaire : Largeur : _____
 Provenance (%) du bois mort : Proximale / Distale Indicateur de provenance : Anthropique / Inconnue / Autres : _____ Spécifiez :
 _____ Volume de l'embâcle (V-m³) : Épaisseur (m) : _____ Largeur (m) : _____ Longueur (m) : _____
 Densité (M-Kg) : M= 45.3 V + 62.3 : _____
 Commentaires : _____

CARACTÉRISTIQUE DU BOIS MORT (DE 10 CM DE CIRCONFÉRENCE ET 30 CM DE LONG) DANS L'EMBÂCLE

Nombre de bois mort (BM) (+) : 3-5 / 6-10 / 11-15 / 16-20 / 20-24 / 25 et + : _____
 Circonférence (cm) du BM : Nb de l'échantillon : _____ Valeur : _____

 Longueur (m) du BM : Nb de l'échantillon : _____ Valeur : _____

 Réseau racinaire (BM) : Absent / 0-25% / 25-50% / 50-75% / 75% et +
 Composition (%) de l'embâcle : Troncs : _____ Branche : _____ Racine : _____ Débris Organiques : _____ Autres (Spécifiez) : _____
 Commentaires : _____

Caractéristiques Morpho-dynamique (Érosion, aggradation, Avulsion, Seuil-mouille, Surcreusement, affouillement, écoulement) :

Style fluvial : _____ Longueur de la section : _____ Commentaires : _____

Amont	Embâcle	Aval
Lit du chenal : _____	Lit du chenal : _____	Lit du chenal : _____
Berge Gauche : meuble / consolidé Berge Droite : meuble / consolidé Composition des berges : _____	Berge Gauche : meuble / consolidé Berge Droite : meuble / consolidé Composition des berges : _____	Berge Gauche : meuble / consolidé Berge Droite : meuble / consolidé Composition des berges : _____
État berge (Érosion, Accumulation ou stable) Gauche : _____ Droite : _____ Source de sédiments? : Oui / Non Sédiment (%) : Fin : _____ Grossier : _____	État berge (Érosion, Accumulation ou stable) Gauche : _____ Droite : _____ Source de sédiments? : Oui / Non Sédiment (%) : Fin : _____ Grossier : _____	État berge (Érosion, Accumulation ou stable) Gauche : _____ Droite : _____ Source de sédiments? : Oui / Non Sédiment (%) : Fin : _____ Grossier : _____
Commentaires : _____ _____ _____		

ANNEXE 2

HYDROBALL®

Mapping the inaccessible now becomes possible !



HydroBall® Buoy

The HydroBall® buoy is a fully-autonomous solution for bathymetric data acquisition. Its spherical design and robust shell casing have been engineered to make the HydroBall® buoy most effective in perilous whitewater areas (e.g. river gorges, high-flowing river, very shallow water). The 40cm spherical shell encloses* a singlebeam echosounder, a GNSS receiver and a digital compass.

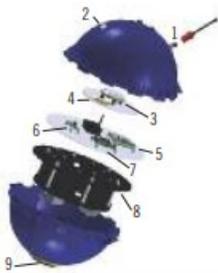
* See reverse for detailed specifications



M₂OCEAN
THINKING OUTSIDE OF THE BOX

115, rue Saint-Germain Ouest, local 1, Rimouski (Qc) G5L 4B6 | Telephone: 506 449-3109 www.m2ocean.com

TECHNICAL SPECIFICATIONS HydroBall®

DIMENSIONS	Diameter: 0.4m (16 inches)	
WEIGHT	13kg (28 pounds)	
POWER CONSUMPTION	Rechargeable 6V gel-cel (x6)	
BATTERY LIFE (in operation)	24h	
CONNECTION	USB	
GPS	<p>Standalone mode 2.5m (95%)</p> <p>DGPS (SBAS) mode 0.6m (95%)</p> <p>Post-Processed (PPK) mode 0.02m (95%)</p> <p>Update Rate: 1Hz -> 10Hz</p>	
DIGITAL COMPASS	<p>Heading Tilt < ±20°: 0.5</p> <p>Pitch, Roll Tilt < ±20°: 0.4° Tilt > ±20°: 06°</p> <p>Update rate: 10Hz</p>	
DEPTH SOUNDER	<p>Shallow to mid-range model Frequency : 675kHz Beam width : 10° Range : 0.50m – 50.0m Range resolution : 20mm Update rate : 1Hz -> 10Hz</p>	<p>Ultra-shallow model Frequency : 500kHz Beam width : 6° Range : 0.10m – 10.0m Range resolution : 0.025% of range Update rate : 10Hz</p>
SOFTWARE	<p>HydroBall® data is easily processed with either the cloud-based or the desktop version of SBP. SBP provides filtering tools and an intuitive georeferencing process. Quality analysis functions are also available to quickly confirm the integrity of the collected soundings. Together, the HydroBall® and the SBP software offer an integrated and cost-effective solution that meets the requirements of the highest IHO standards. The HydroBall® is also compatible with Hydromagic and Hypack software packages.</p>	
	<p>1-Switch 2-Light indicator (LED) 3-GNSS antenna 4-Iridium (option) 5-GNSS receiver 6-Digital compass 7-ME processor and datalogger 8-Rechargeable batteries 9-Depth sounder</p>	

APPLICATIONS

RIVERBED SURVEY



Dropped upstream, the HydroBall® buoy autonomously collects bathymetric data while drifting.

ULTRA-COASTAL ZONE SURVEY



Mounted on an amphibious vehicle, the HydroBall™ buoy can produce continuous land-sea profiles for integration of continuous land and sea data.

STEALTH SURVEY



The HydroBall® buoy can stealthily be towed by combat divers for military landing reconnaissance survey.

WATER LEVEL AND WAVE MEASUREMENTS



Equipped with an external battery pack, the HydroBall® buoy can be moored up to 30 days for water level and wave measurements campaigns.

CONTACT

M₂OCEAN
THINKING OUTSIDE OF THE BOX
115, rue Saint-Germain Ouest, local 1
Rimouski (Québec) G5L 4B6
+1 506 449-3109 • info@m2ocean.com
www.m2ocean.com

TECHNOLOGY
DEVELOPED BY
CIDCO
www.cidco.ca