



Université du Québec
à Rimouski

**LES EMBÂCLES DE BOIS EN RIVIÈRES NORDIQUES :
LE RÔLE DE LA DYNAMIQUE GLACIELLE SUR LA MOBILITÉ DU BOIS**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en géographie
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

PAR

© BAPTISTE JEANNEY

Août 2023

Composition du jury :

Francis Gauthier, président du jury, Université du Québec à Rimouski

**Thomas Buffin-Bélanger, directeur de recherche, Université du Québec à
Rimouski**

Maxime Boivin, codirecteur de recherche, Université du Québec à Chicoutimi

Étienne Boucher, examinateur externe, Université du Québec à Montréal

Dépôt initial le 16 août 2021

Dépôt final le 21 août 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

Un mémoire peut être une aventure solitaire, surtout en période de pandémie. Mais grâce à un réseau solide, formé par le laboratoire de recherche en géomorphologie fluviale et mon entourage, cette aventure a été tout sauf solitaire ! Les terrains d'été, les sorties au baromètre, les discussions, les réunions zooms ... des moments de sociabilité formateurs. Ce sont toutes les personnes qui m'ont accompagné dans cette aventure à qui je souhaite adresser mes remerciements.

D'abord, Thomas, pour m'avoir fait confiance et attribué ce sujet de maîtrise. Merci d'avoir été un directeur aussi pédagogue et d'avoir été un soutien lors de cette période. Merci d'avoir été à l'écoute et d'avoir adapté la maîtrise pour la rendre plus aisée lors de la pandémie. Tes conseils m'ont permis de mener ce projet à son terme.

Également, merci à Maxime Boivin pour ton partage de connaissances, ton aide précieuse sur le terrain et pour l'utilisation de certains outils. Malgré notre chute en canot, une de tes rares chutes en Gaspésie, ton expertise de terrain m'a été précieuse ! Merci pour ta codirection éclairante.

Un merci tout particulier aux personnes qui m'ont aidé sur ce terrain laborieux ! D'abord Samuel Laroche pour son soutien technique sur le DGPS et les caméras, mais aussi pour avoir pris l'eau en m'aidant dans mes inventaires de bois. Merci aussi à MaximeM pour ton aide sur le terrain, tes retours après ta maîtrise et tes conseils. Les missions de terrain ont été facilitées par votre aide à tous les deux.

Merci aussi à Olivier, Lancelot, Sophie, Mackenzie, Sylvio d'être venu m'accompagner sur le terrain pour compter plus de 1000 embâcles sur 5 semaines de terrain en 2 ans. Merci à vous tous pour les moments autour du feu et les bons repas du soir après les journées de terrain ! Merci Marie-André pour ta réactivité et ton aide pour le matériel de terrain.

Je suis reconnaissant pour l'aide financière du CRSNG, du MAMH et de la MRC de Bonaventure sans quoi la maîtrise et les campagnes de terrain n'auraient pas pu être possible.

Plus largement, je tiens à remercier tous mes amis et ma famille, qui m'ont permis de rester motivé et d'aller jusqu'au bout de ce projet. Merci à Lucille, colloque hors pairs pour m'avoir supporté dans mes moments de doute et d'avoir rendu cette expérience plus douce ! Merci à Manon, mon coach de vie, mon agent, ma meilleure amie ... d'avoir su me motiver au moment où justement je manquais de motivation. Merci à Mathieu, pour avoir été à l'écoute et de m'avoir donné toute la motivation nécessaire pour finir ce projet dans sa dernière ligne droite. Merci à toutes mes amies qui m'ont permis de me changer les esprits et de garder le moral. Merci donc à Camille, Violette, Chloé, Caroline et Mariya. Je remercie aussi Stéphane, qui 3 ans après la fin de mon master 1 a continué à m'aider et à m'orienter quand je manquais de me perdre. Le plus important, ma famille, pour m'avoir soutenu tout le long de cette aventure québécoise !

RÉSUMÉ

En tant que rivière nordique, la Petite-Cascapédia connaît des épisodes d'embâcles de glaces lors des redoux hivernaux ou lors des précipitations printanières et du réchauffement saisonnier. Ces événements sont connus pour leurs impacts sur les infrastructures, pour leurs crues associées ou pour leurs impacts sur la géomorphologie des cours d'eau, mais peu pour leur rôle sur la mobilité du bois en rivière. La rivière Petite-Cascapédia compte d'importants volumes de bois dans son corridor, plus de 12 000 m³ en 2019 et 2020. Ainsi, l'objectif de cette recherche est d'évaluer le rôle des embâcles de glace sur la mobilité du bois en rivière. La trajectoire hydrogéomorphologique de la rivière a été caractérisée pour déterminer l'influence de la morphologie sur les phénomènes de congestion par la glace ou le bois. Des inventaires interannuels des embâcles de bois et de cicatrices ont été réalisés pour observer la distribution du bois et la relation de celle-ci avec les zones d'occurrences d'embâcle de glace. Enfin, un dispositif de caméra a été installé pour suivre le débit ligneux lors d'événements d'embâcles.

L'absence d'évènement d'embâcle de glace durant cette recherche ne permet pas d'établir des relations directes entre la distribution des embâcles de bois et l'occurrence d'embâcle de glace. Cependant, les résultats ont permis d'identifier l'influence de la morphologie tant sur la distribution interannuelle du bois en rivière que sur la formation d'embâcle de glace. Les indices de prédispositions à la formation d'embâcle pour les deux types d'embâcles soulignent en effet le rôle majeur que jouaient des variables morphométriques sur la congestion du chenal. Ces résultats permettent de déterminer l'impact relativement faible de la dynamique glacielle sur la mobilité du bois de la rivière Petite-Cascapédia. Le régime glacielle de la rivière est en effet trop faible pour être un facteur dominant du transport du bois en rivière. Ainsi, du fait des obstacles méthodologiques, la recherche sous-estime probablement le rôle de la dynamique glacielle. Le régime ligneux de la Petite-Cascapédia, particulièrement actif, souligne davantage l'influence des différents événements en eaux libres ou de la morphologie sur son dynamisme.

Mots clés : Mobilité du bois en rivière, rivière nordique, hydrogéomorphologie, dynamique glacielle, embâcles de bois, embâcles de glace, distribution du bois en rivière, débits ligneux

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	VI
Table des matières	VII
Table des figures.....	X
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Problématique de recherche.....	5
1.1. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE	5
1.2. OBJECTIFS D'ETUDE.....	7
Chapitre 2 : La dynamique du bois en rivière nordique : état des connaissances	8
2.1. UNE APPROCHE NATURALISTE DU BOIS EN RIVIERE.....	8
2.1.1. Les enjeux régionaux du changement climatique	9
2.1.2. Les enjeux sociaux économiques des perturbations anthropiques.....	11
2.1.3. Les enjeux pour la biodiversité	13
2.2. LA MOBILITE DU BOIS EN RIVIERE ET SES ECHELLES SPATIO- TEMPORELLES.	16
2.2.1. Une mobilité événementielle : les conditions du transport du bois.....	16
2.2.2. Distribution spatiale du bois en rivière	23
2.2.3. L'étude de la distribution spatiale et d'une mobilité interannuelle.....	26
2.3. LES RIVIERES NORDIQUES ET LA DYNAMIQUE GLACIELLE	28
2.3.1. La glace de rivière : typologie et mise en place	28
2.3.2. Formation du couvert de glace.....	29
2.3.3. Formation des embâcles : typologies et processus.....	29
2.3.4. Facteurs abiotiques à l'origine des embâcles de glace.....	32
2.3.5. Les impacts de la dynamique glacielle.....	34
2.4. LE ROLE DE LA DYNAMIQUE GLACIELLE SUR LE TRANSPORT LIGNEUX.....	37
Chapitre 3 : Méthodologie.....	40
3.1. TERRITOIRE A L'ÉTUDE	40
3.2. TRAJECTOIRES HYDROGEOMORPHOLOGIQUES	45
3.3. CARACTERISATION DES VOLUMES DE BOIS	48

3.3.1. Inventaire interannuel des volumes de bois	48
3.3.2. Typologie des embâcles de bois.....	50
3.4. CARACTERISATION DE LA DYNAMIQUE GLACIELLE.....	53
3.4.1. Choix des indices	53
3.4.3. Modèle de prédisposition aux embâcles de glace	56
3.5. Ouverture méthodologique : réalisation d'un modèle de prédisposition aux embâcles de bois	58
3.6. Vidéographie.....	61
Chapitre 4 : Résultats.....	63
4.1. TRAJECTOIRES HYDROGEOMORPHOLOGIQUES	63
4.1.1. Trajectoire hydrogéomorphologique longitudinale : le dynamisme de la rivière Petite-Cascapédia.....	63
4.1.2. Trajectoire hydrogéomorphologique des tronçons homogènes.....	66
4.1.3. Trajectoire hydrologique.	71
4.2. CARACTÉRISATION DES EMBACLES DE BOIS	72
4.2.1. Portait des embâcles	72
4.2.2. Distribution spatiale du bois et évolution interannuelle.....	77
4.3. CARACTÉRISATION DE LA DYNAMIQUE GLACIELLE.....	80
4.3.1. Inventaire des cicatrices	80
4.3.2. Indice de prédispositions aux embâcles de glace	84
Chapitre 5 : Discussion.....	87
5.1. HYDROGEOMORPHOLOGIE ET MOBILITE DU BOIS	87
5.1.1. Paramètres morphologiques des zones d'accumulation	87
5.2. HYDROGEOMORPHOLOGIE ET EMBACLES DE GLACE	95
5.3. RELATION ENTRE LA MOBILITE DU BOIS ET LA DYNAMIQUE FLUVIO-GLACIELLE.....	102
Conclusion Générale	107
Bibliographie	110
Annexes	119
Annexe 1 : Fiche de caractérisation des embâcles de bois	120
ANNEXE 2 Fiches de caractérisation des cicatrices de glaces	121

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Modèle conceptuel de la circulation du bois en rivière, adaptée de Kramer et Wohl, 2017	21
Figure 2. Importance des différents paramètres de mobilité relative à la taille des cours d'eau, Source : Maxime Maltais (2019) adapté de Gurnell et al. (2002).....	23
Figure 3. Distribution du bois hypothétique le long du continuum fluvial, (Wohl et al., 2019).....	25
Figure 4. Deux types de fronts de débâcles : (a) front de décombres, (b) front de plaques, Sources : Jasek, 2003.....	31
Figure 5. Schéma d'un embâcle de glace et des niveaux d'eau associés. Sources : Rokoya et al., 2018	35
Figure 6. Processus de retrait des berges après un embâcle de glace. Sources : Boucher et al., 2009	36
Figure 7. Modèle conceptuel de la mobilité du bois lors d'un évènement en eau libre et un évènement d'embâcle de glace. Boivin et al. (2017)	38
Figure 8. (A) Cycle saisonnier du stockage du bois (B) Variation des stocks de bois lors d'évènements associés à un embâcle de glace contre des évènements en eau libre. Kramer et al. (2017).....	39
Figure 9. Localisation du secteur à l'étude	41
Figure 10. Localisation des évènements d'embâcles de glaces répertoriés sur la Petite-Cascapédia.....	44
Figure 11. Image drone des inondations à New Richmond en octobre 2020, sources : Drone Cowboy, Mr A. Douglas Shaw.....	45
Figure 12. Image drone d'embâcles en amont de la rivière, source : Maxime Boivin, 2019	45
Figure 13. Segmentation de la rivière par tronçons homogènes.....	46
Figure 14 Segmentation de la rivière par tronçons homogènes.....	47
Figure 15. Typologie des embâcles de bois de la Petite-Cascapédia	52
Figure 16. Exemples de cicatrices de glaces anciennes (gauche) et récentes (droite)....	53

Figure 17. Secteur à embâcle de glace avec berge érodée.....	54
Figure 18. Localisation des secteurs relevés au GPS et au DGPS	56
Figure 19. Schéma de l'approche utilisée pour calculer l'indice de rétrécissement, modifié à partir de Munck et al. (2017)	57
Figure 20. Relations entre la sinuosité (A), le taux d'érosion (B), la puissance spécifique (C) et la superficie des bancs (D) avec les volumes de bois. Source : Boivin et al. (2017b)	59
Figure 21. Position des caméras	62
Figure 22. Evolution de l'indice de la sinuosité pour l'ensemble de la Petite-Casapédia	64
Figure 23. Largeurs du lit par année, entre 1963 et 2016.....	64
Figure 24. Variabilité longitudinale de la largeur et des taux d'érosion entre 1963 et 2016, adaptée de Maltais et al., 2021	65
Figure 25. Variation de la largeur et des taux d'érosion par tronçon homogène entre 1963 et 2016. Adaptée de Maxime Maltais, 2021	68
Figure 26. Evolution du chenal par secteur entre 2004 et 2016	69
Figure 27. Différence altimétrique du lit mineur en aval de la Petite-Casapédia entre 2013 et 2020. Source J.F. Beaudoin	70
Figure 28. Débit maximal annuel entre 1962 et 2021	71
Figure 29. Photographie Reckonyx du 22 mai 2020	72
Figure 30. Evolution du volume total de bois et du nombre d'embâcles entre 2019 et 2020	73
Figure 31. Embâcle d'un volume équivalent au volume moyen des embâcles en 2020. 73	
Figure 32. Localisation des plus gros embâcles et leur volume en 2019 (gras) et 2020 (italique)	75
Figure 33. Photographie drone du raft en aval, 2019 (gauche), 2020 (droite), source M.Boivin.....	76
Figure 34. Part des différents types d'embâcles dans le nombre total d'embâcles (anneau extérieur) et dans le volume total (anneau intérieur).....	77
Figure 35. Volume cumulé d'amont en aval en 2019 et 2020	78

Figure 36. Évolution entre 2019 et 2020 des volumes et du nombre d'embâcles par tronçon homogène	79
Figure 37. Evolution des volumes de bois par tronçon de 250m entre 2019 et 2020.....	80
Figure 38. Taille des cicatrices par secteur inventorié en 2020.....	82
Figure 39. Profil en long de la hauteur des cicatrices.....	82
Figure 40. Hauteur d'eau liée à la congestion par embâcle de glace	84
Figure 41. Carte de l'indice de prédisposition aux embâcles de glaces.....	86
Figure 42. Carte géomorphologique d'un secteur à méandre dans le tronçon 5.....	88
Figure 43. Mosaïque de photographies de l'embâcle de 366 m ³ (2019)	89
Figure 44. Carte géomorphologique d'un secteur divaguant dans le tronçon 4.....	90
Figure 45. Embâcle de débordement lié à des chenaux de dissection.....	90
Figure 46. Photographies d'un embâcle de bois de 541m ³ (A), d'un embâcle piégé en tête de banc (B), photographie drone du secteur (C) et d'embâcles (D).....	92
Figure 47. Indice de prédisposition aux embâcles de bois et volumes de bois cumulé en 2019	93
Figure 48. Part des sections prédisposées aux embâcles de bois par tronçon homogène	94
Figure 49. Mosaïque de photographies d'un seuil rocheux obstruant le chenal principal (A), d'un chenal secondaire vue aval (B), tributaires (C et D).....	96
Figure 50. Carte hydrogéomorphologique d'un secteur à embâcle de glace en amont du tronçon 3	97
Figure 51. Modèle conceptuel reliant le concept de lien sédimentaire à l'occurrence et à l'intensité des processus de la dynamique glacielle en rivière, source : Bergeron et al., 2011	99
Figure 52. Carte hydrogéomorphologique d'un secteur à embâcle de glace en aval du tronçon 3	100
Figure 53. Photographie d'une berge rocheuse sur la Petite-Casapédia	101
Figure 54. Profil en long de la rivière et des volumes cumulés de bois en rapport avec les secteurs à embâcles de glace	104
Figure 55 Mosaïque de photographies (2019) d'embâcle de berges en secteur à embâcles de glace (A,B,C) et d'un banc d'accumulation (D)	104

Figure 56. Photographie d'une débâcle mécanique mobilisant du bois sur la Petite Cascapédia (janvier 2015, ZEC de la Petite Cascapédia)..... 105

INTRODUCTION GENERALE

À travers les différentes régions du monde, les craintes d'observer une multiplication et une amplification des aléas naturels motivent la recherche scientifique pour mieux analyser et prédire les risques naturels ainsi que la vulnérabilité des populations associées. Des scénarios sont analysés pour identifier les trajectoires suivies par les aléas dans un contexte de changements environnementaux à l'échelle globale (Mazzorana *et al.*, 2011). En milieu nordique, les impacts du changement climatique se font déjà sentir, la hausse des températures expose les forêts boréales à des feux d'origine naturelle plus fréquents et plus vastes (Price *et al.*, 2013 ; Kilpeläinen *et al.*, 2007). De nombreux aléas naturels, contrôlés par des variables hydroclimatiques sont aussi susceptibles d'évoluer dans les prochaines décennies. Parmi ces aléas, les inondations par embâcle de glace qui touchent 60% des rivières de l'hémisphère nord (Rokoya *et al.*, 2018). Ces événements ont des impacts majeurs sur la sécurité civile et les infrastructures, notamment les ponts (Doyle, 1988). En décembre 2018, à la suite de pluies hivernales, un embâcle de glace de six kilomètres s'était formé sur la rivière Bonaventure et menaçait les voies routières, dont un pont qui permet de rejoindre la municipalité de Saint-Elzéar. Ces événements soudains ont un rôle prépondérant sur la morphologie des cours d'eau. La dynamique glacielle sur les rivières nordiques peut participer à l'élargissement du chenal actif, à l'érosion des berges ou encore modifier les charges sédimentaires transportées. En créant des obstacles à l'écoulement, la glace de rivière peut produire des crues hivernales d'une magnitude plus importante que lors de crues sans entrave à l'écoulement. La glace de rivière influence également la distribution de la végétation aquatique et de la ripisylve. Ainsi, les nombreux impacts géomorphologiques des

embâcles de glace nous invitent à s'interroger sur l'influence de ces derniers sur la mobilité des embâcles de bois au sein des rivières nordiques et tempérées froides.

La mobilité des embâcles de bois en rivière se définit par l'ensemble des processus associés au recrutement du bois, au stockage, et au transport. La recherche sur les éléments ligneux dans les rivières a mis l'accent ces dernières années sur la question de dynamique ligneuse, s'opposant à une recherche traditionnellement orientée sur la stabilité du bois. En effet, l'accumulation en embâcle, puis la remobilisation et le transport en aval représentent des enjeux majeurs pour la morphologie des cours d'eau, la biodiversité et la sécurité. Les dommages causés par le bois en rivières ont lieu pendant des épisodes de crues où le bois est davantage mobile. Lors de son transport vers l'aval, le bois peut endommager des ponts et détruire des routes.

D'ailleurs, ce sont ces images qui marquent l'imaginaire et font du bois en rivière un objet social. L'appellation d'«embâcles de bois » désigne bien souvent un risque pour les usagers, les riverains et les infrastructures. L'utilisation du terme « déchets flottants » est souvent faite pour évoquer la contrainte que représente le bois dans les activités productives. Puis l'appellation « débris ligneux » est plus souvent utilisée pour souligner les atouts écologiques du bois en rivière (Le Lay, 2007). La perception sociale du bois est liée à un fort imaginaire collectif nourri par des événements dramatiques. Des images de ponts endommagés, ou complètement détruits par le passage des embâcles de bois, accompagnent souvent ces événements. Des images de presses qui soulignent les aspects négatifs des embâcles. Lors des crues de 2017 dans les rivières de la Baie des Chaleurs, le pont de la 132 qui passe la rivière Cascapédia a été menacé par l'accumulation de bois sur ses piles augmentant l'instabilité du pont à sa base. Plus tôt, en 2010, le pont couvert de Saint-Edgar a été détruit par le passage du bois dans la rivière Petite Cascapédia. Il s'agit d'épisodes récurrents sur la Petite-Cascapédia avec également des ponts forestiers détruits.

Néanmoins, la recherche scientifique sur le bois en rivière s'attelle à nuancer l'image du bois en rivière en valorisant ses impacts positifs sur les hydrosystèmes. En effet, le bois dès son entrée dans le cours d'eau peut créer des modifications hydrauliques en

influençant notamment les vitesses, la hauteur d'eau, la composition granulométrique ou encore la direction l'écoulement (Maridet *et al.*, 1996 ; Abbe et Montgomery, 1996 ; L'Hommedieu *et al.*, 2020). Le bois introduit ainsi une plus grande variabilité physique et diversifie les habitats aquatiques. Il rend de nombreux services écosystémiques en favorisant la biodiversité au sein des cours d'eau. Il s'agit d'un véritable noyau de réseaux trophiques (Steel *et al.*, 2003), servant de pièges pour la matière organique et de ressources pour les macro-invertébrés (Schneider *et al.*, 2008). Ainsi, poissons (Gustafsson *et al.*, 2014 ; He *et al.*, 2009 ; Mitchell *et al.*, 2012 ; Nagayama *et al.*, 2012), ou encore oiseaux et mammifères (Gurnell *et al.*, 2002 ; Figarski et Lukasz, 2015) bénéficient de la présence d'embâcles de bois dans le chenal. Ceux-ci encouragent également la recolonisation par la végétation et la diversité végétale dans la ripisylve (Francis *et al.*, 2008). D'ailleurs, l'ingénierie faunistique s'oriente désormais vers la réintroduction d'amas ou de pièces libre dans les cours d'eau pour recréer une complexité dans la structure des habitats (Reich *et al.*, 2003). La recherche vise ainsi une gestion pragmatique du bois en rivière qui puisse faire cohabiter les enjeux de sécurités civiles et ceux des services écosystémiques..

Le présent mémoire de maîtrise explore le rôle de la dynamique glacielle sur la mobilité du bois en rivière. Le projet de maîtrise s'intéresse essentiellement au rôle des embâcles de glaces sur la mobilité des embâcles de bois. Il s'intègre dans un plus vaste projet d'actualisation de la cartographie des zones inondables dans la MRC de Bonaventure, mandaté par le Ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation (MAMH), sur six rivières, dont la rivière Petite-Cascapédia. Il poursuit également la recherche sur le bois des rivières de l'Est-du-Québec menée par le laboratoire de recherche en géomorphologie fluviale de l'UQAR et celui d'expertise et de recherche en géographie appliquée de l'UQAC.

Le premier chapitre du mémoire reviendra sur la problématique de recherche, les objectifs ainsi que les enjeux sociaux d'une recherche sur le bois en rivière en milieux nordiques. Le deuxième chapitre propose un état des connaissances sur la dynamique du bois en rivière et de la dynamique glacielle en approfondissant les enjeux et les questions

soulevées dans cette introduction générale. Le chapitre trois détaille la méthodologie appliquée pour répondre aux questions de recherches et aux sous-objectifs. Les résultats émanant des intenses campagnes de terrain sont exposés dans le chapitre 4. Ce dernier souligne notamment l'évolution dans le temps et dans l'espace des embâcles de bois dans le tronçon étudié de la rivière Petite Cascapédia où sévices des épisodes d'embâcles de glace. Enfin, le cinquième et dernier chapitre est dédié à la discussion entre la multitude de données collectées sur la trajectoire morphologique de la rivière, la mobilité du bois et la dynamique glacielle.

CHAPITRE 1 : PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE

1.1. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

Les évènements hydrologiques sont les facteurs principaux de la mobilité du bois (Kramer et Wohl, 2017). En milieu froid, s'ajoutent des variations hydroclimatiques saisonnières très marquées avec la présence de processus glaciels en hiver. L'interaction entre ces processus et la mobilité des embâcles de bois est encore peu étudiée. Comblent les lacunes de connaissances à l'échelle des régions bioclimatiques est un enjeu de la recherche actuelle sur le bois en rivière. Une meilleure compréhension des interactions entre le bois et des processus régionaux permet d'appréhender des problématiques plus larges comme celle des changements environnementaux globaux et de résilience des hydrosystèmes.

La question de la mobilité du bois concerne le recrutement, le transport et le stockage. L'influence des embâcles de glace sur le recrutement du bois ne sera pas traitée ici, bien que les impacts de la glace de rivière sur la végétation (Lind *et al.*, 2014) et sur l'érosion des berges (Ettema, 2004) soulignent l'influence potentielle de la dynamique glacielle sur le recrutement. Le présent mémoire s'intéresse davantage aux enjeux liés au transport du bois, au stockage sous forme d'embâcle et à la remobilisation de celui-ci. Les interrogations portent également sur le temps de résidence, bien que les méthodes ne traitent pas directement de cette problématique. L'étude se concentre sur la distribution des embâcles de bois sur trente kilomètres à l'aval de la Petite-Cascapédia. Le transport correspond à une composante événementielle de la mobilité du bois et donc à une échelle temporelle du bois très brève. Pour obtenir une échelle spatio-temporelle plus large, les inventaires d'embâcles de bois permettent une évaluation annuelle voir interannuelle de la mobilité sur l'ensemble d'un cours d'eau. À cette échelle, des secteurs de remobilisation du bois peuvent être identifiés, ainsi que des secteurs de transit ou de stockage.

D'amont en aval, des relations entre la distribution des embâcles de bois et des embâcles de glace sont recherchées afin d'évaluer les impacts potentiels de la dynamique glacielle sur le transport du bois et plusieurs questions motivent cette recherche de relation :

- Les zones d'occurrences d'embâcles de glace sont-elles des zones où le transit du bois est accéléré ?
- Les embâcles de bois s'accumulent-ils dans des zones d'embâcles de glace ou directement en aval ?
- La glace permet-elle de remobiliser des embâcles de bois d'une année à l'autre ?
- Les épisodes de crues à embâcle de glace charrient-ils davantage de bois ?

Toutes ces questions font suite aux travaux de Boivin *et al.* (2016, 2017a, 2017b, 2018) sur la rivière Saint-Jean en Gaspésie et aux observations faites par caméra vidéo en continu lors d'un évènement d'embâcle de glace en 2012 (Boivin *et al.*, 2017a). Sur les images, les chercheurs ont remarqué et quantifié une quantité importante de bois transportée sur des blocs de glace lors d'une débâcle mécanique des glaces. Cette contribution de la dynamique glacielle à la mobilité du bois n'a jamais été abordée directement dans la littérature et il demeure délicat de déterminer si la mobilité du bois à l'échelle d'un évènement, mais aussi à l'échelle de plusieurs cycles annuels est différente lorsque sévissent des embâcles de glace dans un corridor fluvial. La présente étude s'inscrit ainsi dans la continuité d'une étude menée par le laboratoire de recherche en géomorphologie fluviale de l'UQAR et celui d'expertise et de recherche en géographie appliquée de l'UQAC sur cinq rivières du Québec. Cette étude permet de mettre en lumière les spécificités régionales de l'Est canadien. Les recherches de Boivin (2016) dans un premier temps, sur la Rivière-Saint-Jean à Gaspé a permis de développer une base méthodologique pour l'analyse par bilan ligneux à une échelle temporelle plus large, en remontant jusqu'à 1963 (Boivin *et al.*, 2017b). Par la suite, les travaux de maîtrise de

Massé (2014) sur la rivière Neigette et de Maltais (2019) sur la rivière Mont-Louis ont permis d'approfondir les connaissances sur la relation entre le bois en rivière et les processus hydrogéomorphologiques.

1.2. OBJECTIFS D'ETUDE

L'objectif principal de cette étude est de discuter l'impact relatif de la dynamique glacielle sur la mobilité du bois en rivière à la lumière d'indicateurs nouveaux. L'attention porte plus spécifiquement sur le rôle de la dynamique glacielle sur la mobilité événementielle du bois et sur l'influence de la glace sur la distribution spatiale des embâcles de bois dans un corridor fluvial. Il s'agit de déterminer l'importance relative des processus glaciels sur la mobilité du bois en rivière. La première hypothèse est que la distribution et les caractéristiques des embâcles de bois dépendent fortement des zones d'occurrence d'embâcles de glace. La seconde hypothèse est que les embâcles de glaces augmentent la mobilité des embâcles de bois en favorisant la remobilisation et le transport du bois. Les zones d'embâcle évacueraient plus rapidement le bois qui y transite et sont donc dépourvues d'embâcles de bois. Pour confirmer ces hypothèses, le projet compte quatre sous-objectifs :

1. Examiner la trajectoire hydrogéomorphologique de la rivière.
2. Evaluer les mobilités événementielles et interannuelles du bois en rivière.
3. Caractériser la dynamique glacielle le long du corridor fluvial.
4. Analyser le morphodynamisme de la rivière pour mieux discriminer les impacts de la morphologie, des impacts de la dynamique glacielle sur la mobilité des embâcles de bois.

Le projet a également pour objectif général de mieux comprendre les différents processus de congestion, par la glace ou le bois dans le cadre de la réalisation de cartes de zones inondables mandatées par le MAMH pour la MRC de Bonaventure.

CHAPITRE 2 : LA DYNAMIQUE DU BOIS EN RIVIERE NORDIQUE : ETAT DES CONNAISSANCES

L'état de l'art présenté dans ce chapitre est l'occasion d'affirmer un positionnement épistémologique en faveur d'une géographie naturaliste consciente que la science qu'elle produit est source d'engagement pour la résilience des espaces naturels. L'exercice permet aussi de positionner la recherche dans un contexte scientifique plus large. Ainsi, trois parties sont dédiées aux recherches sur la mobilité du bois en rivière, à la dynamique glacielle et à l'interaction entre les deux. Il s'agit ici d'inscrire l'étude dans la continuité des divers travaux scientifiques pour espérer apporter une contribution éclairée.

2.1. UNE APPROCHE NATURALISTE DU BOIS EN RIVIERE

Un objet d'étude tel que le bois peut être abordé sous le prisme d'une géographie dite naturaliste. Une géographie qui intègre dans sa réflexion les enjeux socio-environnementaux contemporains du changement climatique. Dans le manifeste pour une géographie environnementale (2016), dirigé par Chartier et Rodary, plusieurs chercheurs ont exprimé leur désir d'accepter et d'encourager la transformation de leur discipline du fait des enjeux sociaux et politiques liés à l'environnement. Parmi eux, les auteurs Gautier et Pech appellent à « une reconstruction d'une géographie naturaliste ». Cette reconstruction consiste d'abord à renouer avec une approche traditionnelle de la géographie physique intégrant différentes échelles spatiales et temporelles et valorisant les analyses régionales systémiques. Les auteurs soulignent également la pertinence des approches multidisciplinaires pour appréhender la complexité de la notion d'environnement. Ils notent par exemple les collaborations avec les anthropologues ou les écologues. La géographie physique naturaliste peut se renouveler aussi par le biais de la modélisation. En effet, les risques potentiels liés aux changements environnementaux accroissent la nécessité de modéliser pour mieux anticiper ces risques. Selon les deux chercheurs, la géomorphologie fluviale a des prédispositions naturelles, car l'analyse des hydrosystèmes nécessite l'intégration d'une approche systémique englobant un ensemble

de processus dépendant des sociétés présentes ou anciennes. La rivière est alors étudiée à travers ses héritages sociaux, morphologiques ou encore sédimentaires. Le développement d'une géographie naturaliste, marqué en premier lieu par l'essor des recherches sur les services écosystémiques, montre la nécessité d'une « solidarité écologique » entre la nature et la culture.

Les lignes directrices de cette géographie naturaliste constituent le positionnement épistémologique du projet, motivé notamment par le contexte particulier des régions nordiques face aux changements climatiques, mais aussi les enjeux sociaux et écologiques qui s'y superposent.

2.1.1. Les enjeux régionaux du changement climatique

Le premier positionnement épistémologique est encouragé par le contexte bioclimatique de l'étude : les milieux nordiques apparaissent comme des espaces plus vulnérables face aux changements environnementaux actuels, et leur capacité de résilience est à interroger (Price *et al.*, 2013 ; Kilpeläinen *et al.*, 2007). Pour le bois en rivière, différentes études se sont orientées vers une approche comparative entre biomes (Wohl *et al.* 2017 ; Lininger *et al.* 2017).

Les facteurs influençant la distribution du bois en rivière peuvent fortement varier d'une zone bioclimatique à une autre. Les températures, influençant les types écoforestiers ou bien les différences de précipitations distinguant des écosystèmes humides et arides, modifient les caractéristiques du bois transporté dans les rivières. Ces caractéristiques correspondent à la mortalité des arbres, à leur perméabilité, leur forme, leur poids, leur rythme de décomposition ou encore leur fragilité. Autant de caractéristiques pouvant justifier des écarts dans les volumes de bois transportés selon les zones bioclimatiques. Wohl *et al.* (2017) et Lininger *et al.* (2017) ont comparés les volumes de bois accumulés dans le chenal, mais aussi dans les plaines alluviales de différentes régions bioclimatiques. Elles notent l'importance de ces études comparatives, car « bien que les processus physiques soient constants, chaque segment de rivière reflète

des combinaisons de spécificités locales entre le climat, la géologie, l'hydrologie, le biotope, les perturbations naturelles ou anthropiques » (trad. Wohl *et al.*, 2017). Ainsi, leurs résultats montrent qu'en Amérique du Nord, les plus grands volumes de bois dans le chenal se retrouvent dans la région humide du nord à conifère tandis que la région humide du nord à feuillu possède les volumes les plus faibles. Une des potentielles raisons mentionnées par les autrices est le rythme de décomposition plus rapide des feuillus réduisant fortement leur temps de résidence dans le chenal. Lininger *et al.* (2017) montrent aussi que la différence de diamètre et de longueur varie fortement en fonction des biomes avec des arbres au diamètre faible en milieu boréal aride dû à une croissance des arbres plus lente en opposition aux autres biomes (subtropical et tempéré) ou même à des forêts boréales plus humides comme en Suède (Dahlström et Nilson, 2006). La différence d'humidité entre ces zones explique en partie les différences entre les volumes de bois stockés dans les plaines alluviales du fait d'une meilleure croissance des arbres en milieu humide.

Un second aspect de ces approches comparatives est la différence de résilience entre les biomes face aux perturbations anthropiques notamment. La résilience des systèmes fluviaux ou *river sensitivity* (Fryis, 2016) est un concept clé pour évaluer la capacité des cours d'eau à s'adapter aux changements environnementaux. Lininger *et al.* (2017) différencient dans chaque biome, les forêts perturbées et les forêts non perturbées. La plus grande différence de volumes entre les forêts anthropisées ou non se retrouve dans les zones boréales. Les forêts boréales semblent plus sensibles à des perturbations telles que des tempêtes ou des feux de forêt introduisant de grandes quantités de bois dans les plaines et le chenal. Parmi les raisons citées par les autrices (Lininger *et al.*, 2017), on retrouve le type de végétation ainsi que le froid ralentissant la décomposition. La sensibilité accrue des forêts boréales à ces perturbations pourrait être à l'origine de phénomènes de congestion de grande ampleur due à des temps de résidences plus importants et des perturbations plus intenses et plus récurrentes. Il apparaît essentiel de décrire et évaluer la dynamique du bois par région bioclimatique et de répertorier les

variations de facteurs, car trop souvent ces variations sont sous représentées et peu documentées (Wohl *et al.* 2017).

2.1.2. Les enjeux sociaux économiques des perturbations anthropiques

Le deuxième enjeu essentiel pour une géographie naturalisée du bois en rivière nordique est l'importance du contexte sociohistorique. L'exploitation ou la gestion des rivières influencent les concentrations de bois dans le chenal. Le bois est l'une des ressources les plus importantes et nécessaires pour les communautés humaines. Au Québec, pas moins de 35 millions de mètres cubes de bois sont récoltés chaque année faisant de la foresterie un des premiers secteurs économiques de la province (Wellburn *et* Kuhlberg, 2010).

L'exploitation des forêts influence la densité du bois présent dans le chenal. En Suède, dans un milieu boréal humide, l'exploitation du bois en zone alluviale réduit fortement les apports de bois en retirant une partie du bois présent et en renforçant en plus les arbres laissés du fait de la moins grande compétitivité (Dahlström *et al.* 2005). Ces pratiques, ainsi que les contrôles des incendies, réduisent grandement la mortalité naturelle et conduit à un déficit de bois dans le chenal. Des résultats similaires sont observables dans d'autres biomes, Wohl *et al.* (2017) relèvent une différence significative du volume de bois entre les sites gérés et les sites naturels avec $73,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de bois contre $214 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en moyenne. Ces différences augmentent la vulnérabilité des sites exploités face aux changements climatiques avec moins de zones d'ombre ou encore face à l'érosion.

Dans des contextes plus septentrionaux, le bois est primordial pour la survie et le développement des communautés autochtones. Pour celles-ci, le bois transporté par la rivière constitue la première source de bois et il possède de multiples usages tels que la construction d'habitat, de kayak ou des outils. Il sert également à de nombreuses activités

traditionnelles comme les bains de fumés (Wheeler et Alix, 2004). Alix (2005) met en lumière les dépendances socio-environnementales à travers le bois en rivière. Elle questionne notamment les changements dans la dynamique du bois dans un contexte de changements climatiques des régions polaires, pouvant amener à une diminution des ressources en bois. Elle souligne également des particularités dans le transport du bois en milieu nordique. Parmi celles-ci, les embâcles de glace ayant des conséquences sur l'humidité du bois et donc sur sa qualité. Elle cite l'exemple d'un tronc arraché de sa base lors du passage de la glace dont le taux d'humidité est plus élevé qu'un tronc tombé dans la rivière à l'été précédent.

Le concept de « solidarité écologique » entre nature et société apparaît comme un prisme privilégié pour conduire une recherche sur le bois en rivière. Pourtant, ce concept est aujourd'hui à défendre contre les différentes représentations du bois en rivière.

Le Lay (2007) identifie plusieurs aspects et positions justifiant les différences de perceptions du bois en rivière. En premier lieu, il relève trois grands paradoxes chez les acteurs de la gestion du bois. Le premier est le paradoxe des usagers de la rivière. Dans les dernières années, les usagers des cours d'eau ont montré un enthousiasme grandissant pour les programmes de renaturation, mais en même temps ont une perception négative du bois en rivière, car il représente une contrainte et un danger pour les pratiques récréatives. Le deuxième paradoxe est celui du légiste, qui possède une forte culture technique d'ingénieur. Malgré sa reconnaissance de l'intérêt de préserver les milieux aquatiques, il est contraint à un entretien régulier du chenal et à son aménagement. Enfin, le dernier paradoxe est celui qui concerne le gestionnaire des milieux naturels. Celui-ci a acquis au cours de sa formation les connaissances théoriques sur les bienfaits du bois en rivière, mais dans sa pratique, il est contraint par sa responsabilité professionnelle. En effet, la présence du bois soulève pour lui des enjeux pour la sécurité des usagers et des enjeux économiques le poussant à mettre en place des actions contre le bois.

En 2019, Boivin *et al.* publient les résultats d'une enquête réalisée sur les acteurs de l'eau au Québec, auprès de soixante-dix intervenants (MRC, OBV, ZEC). Les résultats montrent une représentation négative pour 57% des répondants. Seuls 9% affirment avoir une perception positive, et quasiment la totalité de ces derniers, la justifient par les bienfaits écologiques pour l'ichtyofaune. Aussi, l'enquête s'est intéressée aux raisons qui amenaient les acteurs à intervenir sur le bois dans leurs rivières. Rarement les actions sont menées pour la faune et l'habitat, mais plutôt pour les inondations, la sécurité civile et les infrastructures. La raison principale est celle du libre écoulement. L'enquête révèle ainsi l'importance du contexte législatif qui encourage les gestionnaires à retirer le bois des cours d'eau. La notion de libre écoulement des cours d'eau fait référence aux articles 103 à 109 de la Loi sur les compétences municipales, attribuant aux collectivités la compétence de garantir le libre écoulement. Il existe donc une pression politique sur les acteurs municipaux, du fait du contexte législatif.

2.1.3. Les enjeux pour la biodiversité

Le bois mort possède également de nombreux bénéfices écologiques. Dans les milieux forestiers, de nombreuses études soulignent les bienfaits du bois mort pour des espèces d'oiseaux, d'amphibiens ou de mammifères (DeMaynadier et Hunter, 1995 ; Bütler *et al.*, 2004 ; Sullivan et Sullivan, 2001 ; Bunnell et Houde, 2010). Les animaux utilisent les troncs et amas de bois pour se nourrir, se reproduire, se réfugier ou même se déplacer (Bunnell et Houde, 2010).

En rivière, les bienfaits pour l'ichtyofaune et les invertébrés sont bien connus. Les pièces de bois constituent un des éléments primordiaux dans la répartition des invertébrés au sein du continuum fluvial (Vannote *et al.*, 1980, Schneider *et* Winemiller, 2008). Suite à la réintroduction de bois en rivière, les densités de communautés d'invertébrés, telles que les collecteurs, augmentent fortement (Gabriel *et al.*, 2009). Situés à la base de la chaîne alimentaire, ils permettent l'épanouissement d'espèces telles que la truite ou

encore le saumon, dont les juvéniles consomment essentiellement des invertébrés (Allan, 1978). Le saumon et la truite sont également des illustrations parfaites des services rendus par le bois. En Suède (Gustafsson *et al.*, 2014), l'introduction de bois dans les rivières nordiques a permis une meilleure croissance des truites communes (*Salmo trutta*). Les chercheurs ont d'abord pensé à une plus grande abondance des proies du fait du rôle de nœud trophique des embâcles de bois. Cependant, les analyses diététiques des poissons ne révèlent aucun changement entre les rivières sans bois et celles où du bois a été introduit. Les auteurs remarquent que c'est davantage l'impact sur les processus physiques qui influence la croissance des poissons. Les modifications induites par les embâcles de bois sur la vélocité du courant ou encore la profondeur des fosses sont des éléments favorisant l'habitat de la truite commune, par exemple. Les fosses constituant de meilleures opportunités pour se nourrir et l'affaiblissement des vitesses d'écoulement demandent moins d'énergie aux poissons et leur permettent ainsi de croître plus rapidement. Le bois en rivière est aussi essentiel pour les plus petits poissons de la famille de cyprinidés (carpes, loches ...) en assurant une hétérogénéité des habitats (Kalogianni *et al.*, 2020). Cette variabilité au sein du lit mineur garanti une plus grande résilience face aux variations saisonnières et à l'étirement des saisons de basses-eaux (Kalogianni *et al.*, 2020).

Pour les autres communautés du lit mineur, les effets du bois en rivières sont encore peu répertoriés. En forêt, les écologistes ont remarqué que l'abondance et la diversité d'oiseaux étaient plus fortes dans les zones où du bois mort était accumulé. L'avifaune utilise les amas de bois ou les troncs morts comme zone de nidification ou d'alimentation (Bunnell et Houde, 2010). En rivière, le bois apparaît tout aussi crucial. Sur des rivières régulées et entretenues, certaines espèces de harles ou des insectivores comme les bergeronnettes ont diminué suite à une réduction anthropique du volume de bois de 65% (Figarski et Kajtoch, 2015). Cette relation a également été observée à l'inverse lors de crues. Une plus grande diversité d'espèce était en effet observée après une sévère crue avec notamment un triplement des volumes de bois dans les rivières entretenues régulièrement (Kajtoch et Figarski, 2013).

De ces faits, la géographie environnementale apparaît comme un prisme éclairant les questions sur le bois en rivière. Les questions urgentes posées par les changements environnementaux encouragent les nouvelles recherches à interroger cet élément du paysage devenu si important en géomorphologie fluviale (Wohl *et al.* 2019). Son rôle majeur pour les écosystèmes et sur les processus géomorphologiques en fait un élément de résilience pour les rivières nordiques. Une approche recentrée sur les caractéristiques régionales intégrant les héritages sociohistoriques et les solidarités entre nature et culture permet de répondre aux enjeux contemporains. Les impacts des changements environnementaux, et du changement climatique en particulier, sur la biodiversité et sur les habitats suscitent également des questions urgentes. En 2009, une quarantaine de chercheurs (écologues, biologistes, géographes) publient un papier dans *Conservation Biology* (Sutherland *et al.*, 2009) et identifient 100 questions décisives pour les politiques de conservation. Certaines de nos interrogations s'inscrivent dans ces grands débats : « quels éléments de la biodiversité et quels espaces sont les plus vulnérables au changement climatique et aux évènements extrêmes ? » (Question 10) ou encore « comment évolue la résilience des écosystèmes affectés par les interventions humaines ? » (Question 11). Ces questions concernent différents aspects du bois en rivière et de sa mobilité tels le rôle des évènements hydroclimatiques ou encore sa gestion par l'homme dans des contextes de préservation de la faune ou de mitigation des risques inondation.

2.2. LA MOBILITE DU BOIS EN RIVIERE ET SES ECHELLES SPATIO-TEMPORELLES.

2.2.1. Une mobilité événementielle : les conditions du transport du bois.

Le transport du bois en rivière est une composante majeure de la dynamique fluviale, influençant l'écoulement, le transport de sédiment ainsi que la richesse des habitats. Kramer et Wohl (2017) considèrent la mobilité du bois comme l'un des aspects centraux de la dynamique fluviale, davantage que sa stabilité et son stockage. D'amont en aval, le passage du bois structure les paysages et enrichit les écosystèmes fluviaux. La formation et la pérennité d'embâcles de bois morts influencent les modalités de l'écoulement et modifient durablement la géomorphologie de la rivière (Curan, 2010).

Kramer et Wohl (2017) résument les différentes recherches sur le bois mort et identifient les caractéristiques principales des morceaux de bois qui influencent leur mobilité. L'ancrage des morceaux de bois (enterrement, enracinement, embâcles et autres obstacles), la longueur, le diamètre, l'orientation et le type d'espèce (dégradation, densité, forme) sont les principales variables considérées par les autrices.

Dans leur article, Iroumé *et al.* (2010) trouvent des résultats similaires. En effet, 84% des bois déplacés avaient un diamètre inférieur ou égal à 40 centimètres et 96% mesuraient jusqu'à 7 mètres. Les auteurs notent une forte relation entre la longueur des pièces de bois et la largeur du chenal ainsi que le diamètre du bois et la profondeur du chenal. Ainsi, pour 78% des rondins déplacés, le ratio entre la longueur et la largeur du chenal était inférieur à 0,5. Pour 96%, le ratio entre le diamètre et la profondeur du chenal était également inférieur à 0,5. De plus, les chercheurs relèvent l'orientation après déplacement et le type de bois. 93% des morceaux déplacés sont des rondins de bois, sans branches et sans racines, avec une probabilité d'ancrage plus faible. 41% des morceaux ont été retrouvés en position parallèle au cours d'eau tandis que 37% ont été retrouvés en position orthogonal et 21% en position oblique. Bien que les morceaux de bois en

position perpendiculaire soient mobilisés plus tôt du fait de la plus grande force exercée par le courant, les bois parallèles sont souvent plus mobiles, car moins susceptibles de s'ancrer aux berges ou d'être bloqués par un obstacle.

Curan (2010) ajoute le rôle des différentes espèces dans la mobilité du bois mort, qui influence les variables relevées également par les autres auteurs. Ainsi, elle remarque que les peupliers sont les moins mobiles au sein du cours d'eau à cause d'un ratio longueur du tronc et largeur du chenal élevé de 1,43. À partir de la modélisation, les peupliers sont considérés comme les bois les moins mobiles. Une prédiction confirmée par les observations de terrain, où l'auteur souligne la prévalence des peupliers dans les embâcles, bien que le peuplier ne soit pas une espèce dominante dans la région. Gurnel (2003) note également l'influence du type d'espèce sur la densité des bois en rivière. Elle donne l'exemple de l'Australie où les espèces ont une densité élevée, empêchant les arbres de flotter dans les cours d'eau. Elle ajoute aussi le rôle de l'âge, qui augmente la capacité d'absorption d'eau par le bois. Une plus forte absorption accroît la densité du bois et réduit sa mobilité, mais accélère sa décomposition. La flottabilité des morceaux de bois constitue le facteur principal de leur mobilité. Si le bois en rivière est trop dense ou enraciné, il est davantage susceptible de créer des embâcles.

Les caractéristiques du bois conditionnent sa capacité à être transporté par le cours d'eau. Néanmoins, la configuration du cours d'eau peut parfois bloquer le transport en aval du bois mort.

De la même manière qu'elles ont synthétisé différentes caractéristiques des bois morts, Kramer et Wohl (2017) ont résumé les recherches sur l'influence des caractéristiques des rivières sur le transport du bois. Elles remarquent une plus forte mobilité du bois dans les secteurs confinés que dans les secteurs à chenaux multiples, car le bois est moins susceptible d'être retenu lors de crues du fait de la plus grande concentration d'énergie.

En comparant un secteur à chenal unique et un secteur en tresse, Ruiz-Villanueva *et al.* (2016) remarquent des différences notables entre le ratio de transport et les différentes

variables. Pour le volume du bois, dans un secteur confiné, des morceaux de bois supérieur à 6m^3 peuvent être mobilisés lors des hautes-eaux. Dans le secteur à chenaux multiples, des pièces de bois de 3m^3 ne sont pas déplacées lors de conditions similaires. Cependant, des morceaux plus longs peuvent être transportés sur de plus longues distances dans des secteurs en tresse où le cours d'eau s'élargit.

Cependant, dans son exemple dans la région de The Highland Waters, Gurnel (2003) souligne les changements de fréquences des différentes pièces de bois en fonction de l'ordre des cours d'eau. Ainsi, pour les petits cours d'eau, elle remarque une prédominance d'arbres enracinés, joignant les deux berges et constituant la pièce principale des embâcles. Les arbres tombés sont plus fréquents dans les cours d'eau d'ordres supérieurs. Kramer et Wohl (2017) ont aussi souligné un plus fort taux de remobilisation dans les larges rivières à tresses, jusqu'à trois fois supérieures par rapport aux petits cours d'eau confinés. En dehors des périodes de crue importante, les cours d'eau confinés sont plus facilement obstrués par la chute d'arbre.

Le style fluvial peut également constituer un obstacle pour le transport du bois. Pour la réalisation de son modèle, Curan (2010) intègre l'indice de sinuosité pour prédire la formation et la localisation des embâcles. Comme les bancs dans un système en tresse (Gurnell, 2003), les sinuosités d'un système divagant peuvent bloquer le transport du bois en aval. Plus les méandres sont éloignés, plus la distance parcourue par les pièces de bois augmente. Les résultats du modèle de Curan (2010) permettent d'illustrer la dépendance entre la morphologie et la localisation des embâcles. De plus, l'auteur remarque une persistance de certains embâcles à des endroits précis du chenal. Cette continuité renforce les processus morphologiques en favorisant le dépôt de sédiment autour de l'embâcle, permettant le développement de bancs, eux-mêmes favorables à l'accumulation de bois en rivière. Jochner *et al.* (2015) notent cette interrelation entre les processus morphologiques et l'accumulation de morceaux de bois dans un modèle conceptuel, en quatre étapes, sur le transport du bois dans une rivière torrentielle. Lorsqu'un embâcle n'est pas mobilisé depuis une longue période, il réduit le transport du bois et des sédiments et favorise la stabilisation des berges. Après une crue

exceptionnelle, l'embâcle est évacué, réactivant les processus de versants et l'érosion des berges et introduisant de nouveaux arbres dans le cours d'eau. Ils forment alors un nouvel embâcle, à la même localisation, et initient un nouveau cycle d'accumulation.

De ce fait, on comprend que les caractéristiques de la rivière, sa morphologie, son style fluvial ou les processus de dépôts et d'érosions sont des facteurs qui influencent la dynamique du bois mort au sein du cours d'eau. La rivière forme des obstacles où le bois est susceptible de s'accumuler et d'influencer en retour la morphologie du cours d'eau. Cependant, le régime hydrologique demeure la variable de contrôle principale (Kramer et Wohl, 2017) dans le transport du bois en rivière, et notamment avec les crues exceptionnelles qui permettent de mobiliser les embâcles.

Dans leurs *règles de la route*, Kramer et Wohl (2017) considèrent le régime hydrologique comme une variable de contrôle majeure dans le transport du bois en rivière. Leur modèle conceptuel (Figure 1), réalisé sous la forme de lumières de circulation, illustre le rôle des crues dans le transport du bois. En effet, les pièces de bois ont un potentiel de mobilité maximal lorsque le pic de crue est plus fort que la crue précédente, mais aussi lors du stade de montée des eaux qui précèdent le pic et lorsque la hauteur d'eau est inférieure ou égale à la hauteur des berges.

Les résultats d'Iroumé *et al.* (2015) explicitent la première condition liée aux séquences de crues. En effet, les auteurs ont trouvé une corrélation significative entre la mobilité du bois et des unités de puissance spécifique à hauteur maximale, ainsi qu'avec le ratio entre cette hauteur et celle de la berge. La variation temporelle de la mobilité du bois dépend donc des variations des pics de crues, de leur fréquence et de leur magnitude. Alors que se distingue une relation linéaire entre le ratio maximal par rapport à la hauteur de berge et la mobilité du bois, les auteurs n'en ont trouvé aucune avec le nombre de crues excédant la hauteur de berge. Les plus grandes crues n'impliquent pas une plus forte mobilité, car la mobilité du bois est liée aux crues précédentes qui ont configuré les différentes accumulations.

Ruiz-Villanueva *et al.* (2016) ont théorisé l'existence d'un seuil au-delà duquel le transport du bois était limité. Ainsi, dans les deux tronçons aux styles différents, le ratio de transport augmente avec le débit jusqu'à un certain point. Pour le secteur à chenal unique, ce seuil correspond à la hauteur des berges. Une fois cette hauteur atteinte, l'eau inonde la plaine et transporte les morceaux de bois dans des secteurs avec une énergie plus faible. Le même phénomène est observé pour le secteur à chenaux multiples le bois va être déposé sur les bancs et les îles où l'eau est moins profonde. Le transport du bois est donc optimal avant la hauteur des berges, au-delà on atteint une « valve de sécurité » qui correspond au point où le courant est dispersé dans la plaine inondable et perd une partie de son énergie.

Cependant, le rôle des évènements hydrologiques varie d'un système à l'autre. Le modèle conceptuel de Jochner *et al.* (2015) propose quatre entrées qui considèrent les caractéristiques temporelles d'apport et d'export de bois dans le cours d'eau. Ils distinguent ainsi les rivières où les modalités du transport sont complètement continues, des rivières où l'apport ou l'export est épisodique et enfin des rivières où l'apport et l'export sont complètement épisodiques. Ce modèle permet de distinguer des rivières dans lesquelles la mobilité du bois est régie uniquement par des évènements hydroclimatiques extrêmes, d'autre part, des rivières où les processus fluviaux sont continus et transportent du bois de façon régulière. Dans des rivières régulées, où les processus fluviaux sont altérés (Schenk *et al.* 2018), les morceaux de bois parcourent souvent de plus longues distances du fait de l'allongement des périodes de crues. Dans le cas de l'étude de Schenk *et al.* (2018), les distances parcourues vont de 30 à 100 km. Le rôle des évènements extrêmes est donc dominant dans l'export, mais aussi l'apport, du bois en rivière sur les rivières occupées par des barrages. Les rivières de l'étude de Jochner *et al.* (2015) et de Schenk *et al.* (2018), sont donc deux rivières au fonctionnement complètement épisodique selon le modèle conceptuel défini ici.

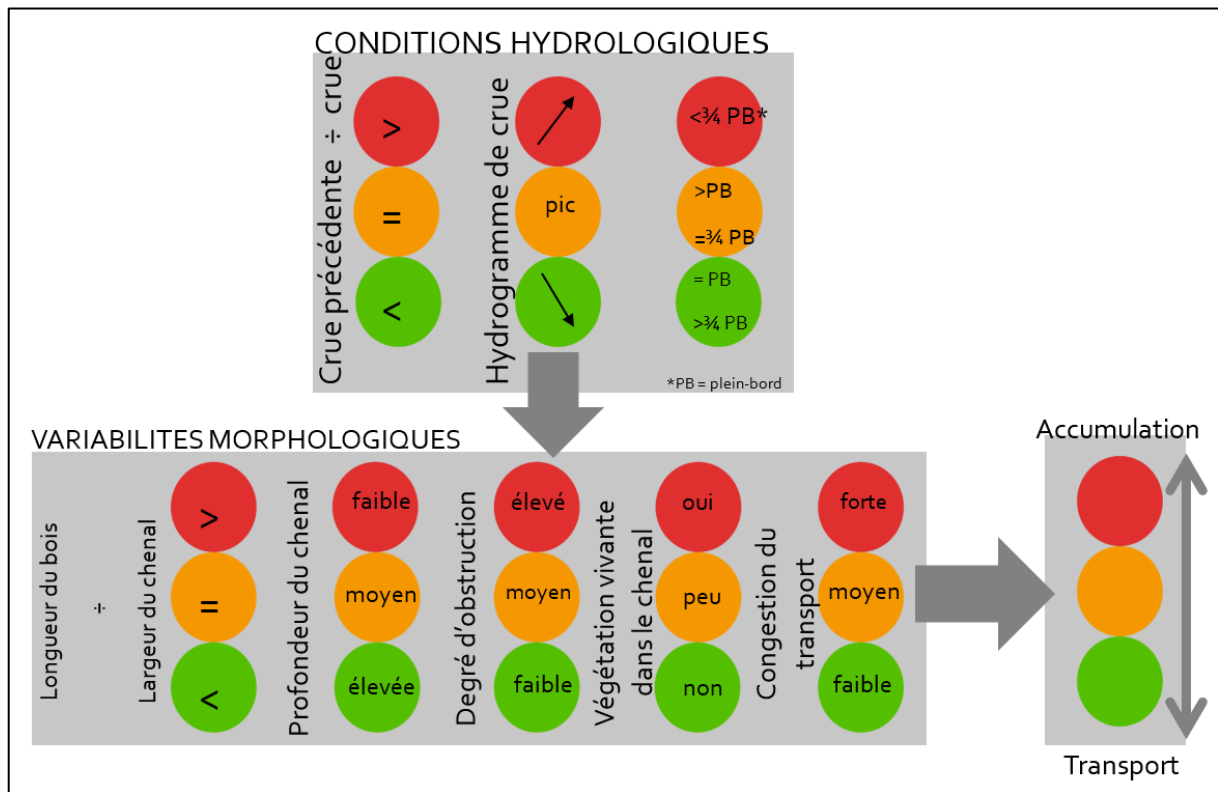


Figure 1. Modèle conceptuel de la circulation du bois en rivière, adaptée de Kramer et Wohl, 2017

La métaphore du trafic présentée par Kramer et Wohl en 2017 (Figure 1) synthétise l'ensemble de facteurs favorables à la mobilité du bois en rivière. Elles identifient les conditions hydrauliques comme la motivation au déplacement, la congestion fait référence aux embâcles ou encore la variation du trafic entre le jour et la nuit renvoie aux variations saisonnières entre hautes et basses eaux. On retrouve aussi les caractéristiques du bois par les différents types de véhicules en circulation, puis la notion de perturbation et d'évènements catastrophes en fonction de l'état de la route. Selon Kramer et Wohl « c'est l'arrêt et la reprise, la congestion puis la décongestion, ou la discontinuité du débit ligneux qui est l'aspect le plus important du régime ligneux pour la morphologie de la rivière, sa mobilité et ses biotopes, bien davantage que la stabilité du bois. » Par cette métaphore, les autrices synthétisent les principes de la mobilité du bois. Ainsi, celle-ci est conditionnée par les caractéristiques morphologiques et sa flottabilité

du bois. Le diamètre et la longueur du bois sont identifiés comme les principales caractéristiques pour évaluer la mobilité potentielle du bois en rivière. Néanmoins ce potentiel est lié à la capacité de la rivière à transporter les pièces de bois d'amont en aval. La morphologie du chenal peut constituer un frein, une rivière étroite et peu profonde étant capable de transporter des morceaux d'un diamètre et d'une longueur limités. Les bancs et méandres représentent des obstacles et favorisent la formation d'embâcles. Les conditions hydrologiques sont la « motivation » (Kramer et Wohl, 2017) qui permet au bois d'être déplacé. Sans ces conditions préalables, le bois, gros ou petit, dans un chenal large ou étroit, ne sera pas mobilisé.

Ces règles de circulation varient en fonction de la taille des cours d'eau (Figure 2). Par exemple, les caractéristiques du bois telles que sa taille ou son rapport à la largeur du chenal sont des facteurs dominant la mobilité du bois dans les rivières de petite à taille moyenne (Iroumé *et al.*, 2015). Pour ce qui est des caractéristiques hydrologiques ou géomorphologiques, elles sont plus importantes pour des cours d'eau plus larges où le style fluvial varie grandement et où des débits plus fort sont nécessaires pour mobiliser le bois.

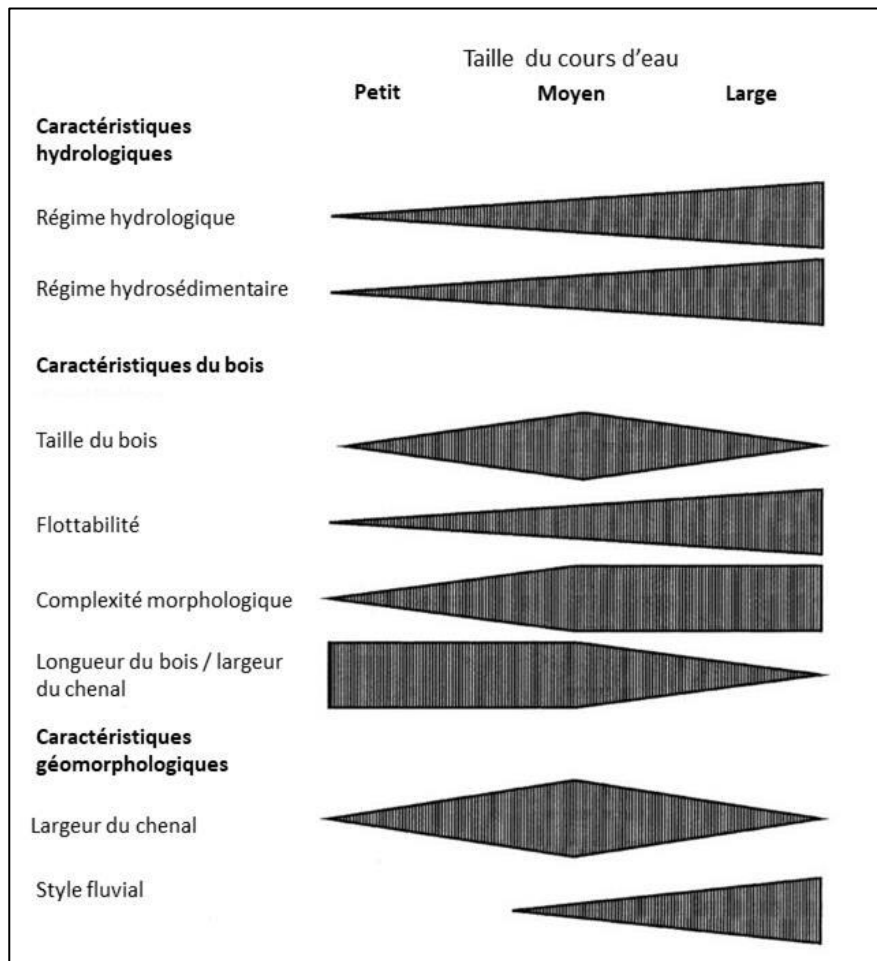


Figure 2. Importance des différents paramètres de mobilité relative à la taille des cours d'eau, Source : Maxime Maltais (2019) adapté de Gurnell et al. (2002)

2.2.2. Distribution spatiale du bois en rivière

L'ampleur des accumulations de bois, leur temps de résidence et leur distribution longitudinale font l'objet d'une littérature riche. Le spectre des différents volumes de bois par hectare varie grandement d'une rivière à l'autre en fonction des caractéristiques de ces dernières (Wohl *et al.*, 2019). En règle générale, les chercheurs justifient ces variations à partir de trois facteurs : l'aire de drainage, la morphologie du chenal et les perturbations extérieures. Pour ce qui est du temps de résidence, il varie grandement en

fonction des profils hydroclimatiques régionaux qui influencent la décomposition du bois et la remobilisation du bois en rivière. Sur la rivière Saint-Jean, Boivin *et al.* (2018) remarquent un temps de résidence médian de trois ans, du fait des épisodes réguliers d'embâcles de glace et de la récurrence forte des périodes de crues les dix années précédant l'étude. Ces chiffres sont inférieurs à d'autres moyennes régionales pouvant varier d'un à dix-mille ans (Wohl *et al.*, 2019). La régulation des rivières par des barrages peut également renforcer grandement le temps de résidence des embâcles de bois en aval du fait de l'assouplissement hydrologique (Moulin *et al.* 2011). Pour ces cours d'eau perturbés, la décomposition *in situ* est souvent le destin des embâcles de bois. Ailleurs, des chercheurs ont trouvé une corrélation entre la taille des surfaces urbanisées et le temps de résidences des embâcles dans le chenal. Plus le bassin versant est occupé et anthropisé, moins le bois se stocke sous la forme d'embâcle, car les morceaux ligneux n'ont pas d'éléments auxquels s'accrocher (Blauch et Jefferson, 2019).

De plus, il existe une grande variabilité longitudinale pour chaque cours d'eau en fonction de l'évolution des styles fluviaux. La taille des embâcles, leur composition et leur distribution changent à mesure que le chenal s'élargit (Ruiz-Villanueva *et al.* 2016). Wohl et Cadol (2011) soulignent les plus fortes accumulations avec des embâcles plus larges lors de la multiplication des chenaux créant une boucle de rétroactions favorisant la formation de nouveaux chenaux. Ces observations sont synthétisées dans la Figure 3 de Wohl *et al.* (2019). Ainsi, en amont des bassins versants, les processus de recrutement dominant avec les dynamiques de versant (glissement de terrain, coulée de débris ...). Ces processus s'affaiblissent avec la diminution des pentes pour aboutir à une première organisation des embâcles, notamment en fonction des seuils et des mouilles. Les secteurs à tresses et l'augmentation de rugosité sont favorables à l'accumulation de bois qui s'échouent sur les bancs. En aval, la végétation des îles et les bancs de convexité de méandres piègent du bois. Enfin, les estuaires à chenaux multiples accumulent souvent de grands rafts de bois dont une partie est évacuée en mer et une autre enterrée au rythme des évolutions morphologiques du cours d'eau.

Les variations longitudinales de la distribution des embâcles ont également été décrites dans la typologie d'Abbe et Montgomery (2003). Ils distinguent les embâcles *in situ*, dominante dans les têtes de bassin versant et composés d'arbres tombés, possédant encore leurs racines et leurs branches. Ce sont des embâcles peu mobiles, bien attachés aux berges desquelles ils proviennent. Lors d'épisodes de crues, les embâcles *in situ* peuvent piéger des troncs en transit de l'amont aboutissant à des embâcles de combinaisons. Lorsque le bois s'agglomère pendant son transport sur des bancs ou encore des têtes d'îles, on parle d'embâcle de transport.

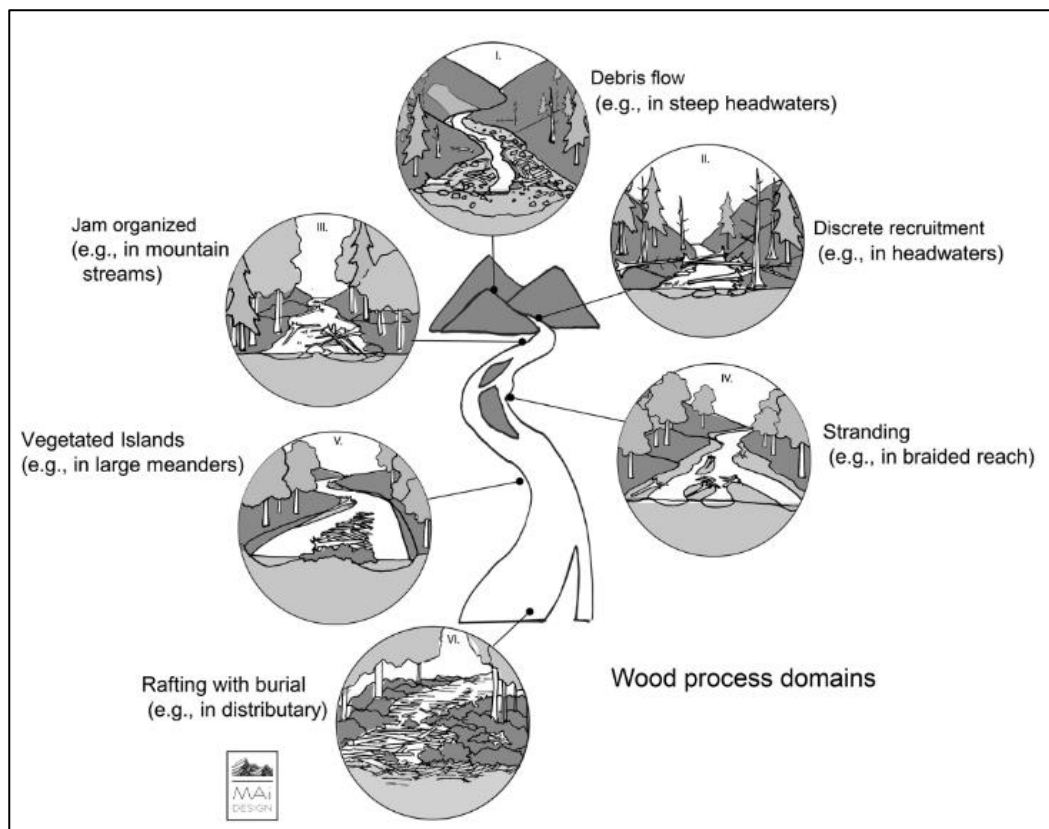


Figure 3. Distribution du bois hypothétique le long du continuum fluvial, (Wohl et al., 2019)

Enfin, les accumulations sont favorisées par la congestion du chenal qui s'entretient en piégeant davantage de bois en transit. La présence d'un embâcle constitue un obstacle et diminue fortement les distances parcourues par le bois en rivière (Wohl et

Jaeger, 2009). Avec l'élargissement du chenal vers l'aval, l'organisation du bois est plus sporadique augmentant la mobilité du bois et réduisant fortement les temps de résidence (Kraft *et al.* 2011, Wohl et Cadol, 2011).

2.2.3. L'étude de la distribution spatiale et d'une mobilité interannuelle.

Les études sur la mobilité du bois reposent bien souvent sur des inventaires de bois réalisé sur le terrain. L'inventaire systématique des embâcles de bois et/ou pièces isolées permet d'obtenir une photographie de la distribution des embâcles de bois à un instant précis, à la saison de basses eaux ou après un évènement hydrologique précis (Pettit *et al.*, 2005). Une autre approche similaire est l'inventaire des bois en amas ou seuls par image satellite (Kramer *et al.*, 2017). L'utilisation d'imagerie satellite ou aérienne permet aussi d'évaluer la superficie des zones érodées et d'estimer la quantité de bois entrant dans le chenal. Ainsi, avec ces méthodes, on obtient une idée des volumes de bois présent dans le chenal. En répétant ces dernières, à partir d'une année de référence, il est possible d'obtenir des taux de variations dans le stockage du bois en rivière et d'estimer ainsi la mobilité du bois que ce soit un tronçon complet de rivière (Maltais, 2019) ou bien sur des secteurs très précis (Kramer *et al.*, 2017).

La mobilité du bois peut être étudiée à partir de caméra de surveillance ou caméra de chasse pour obtenir des débits ligneux (Kramer et Wohl, 2014), notamment lors d'évènements précis tels que des crues ou des débâcles de glace (Boivin *et al.*, 2017a). Cette méthode s'adapte également parfaitement pour suivre des infrastructures comme des réservoirs de barrage (MacVicar *et al.*, 2009 ; Benacchio *et al.*, 2016). Cependant, la limite principale de cette méthode est son échelle spatio-temporelle très réduite. Enfin la mobilité du bois peut être suivie par marquage (Dahlström *et al.*, 2005) pour obtenir des informations sur les distances parcourues par les pièces de bois.

Une dernière méthode utilisée pour caractériser la mobilité du bois est la datation pour obtenir le temps de résidences des pièces de bois. La datation peut être réalisée par

Carbone 14 (Guyette *et al.*, 2008) ou bien en utilisant les cernes des arbres morts présents dans le chenal (Boivin *et al.*, 2018). La dendrochronologie apparaît plus économique et permet également de déterminer notamment si un évènement d'embâcle de glace est à l'origine du recrutement du bois (Boivin *et al.*, 2018).

Les données récoltées sur la mobilité du bois à travers ces différentes méthodes permettent d'obtenir les données nécessaires pour estimer le bilan ligneux de la rivière. Le bilan ligneux correspond au budget du bois en faisant le rapport entre le bois recruté, stocké et exporté dans le chenal. Il s'agit d'une approche systémique permettant d'évaluer la dynamique globale du bois en rivières à des échelles spatio-temporelles variées. Le budget en bois mort s'écrit ainsi (Boivin, 2016 ; Boivin *et al.*, 2017b) :

$$W = F + D + \Delta S / \Delta t \quad (1)$$

Où W correspond aux imports de bois mort par année et dépend du volume de bois évacué par le transport fluvial par année (F), du volume de bois détruit par décomposition ou par fragmentation (D), du taux de variation des volumes accumulés (ΔS) pour une période donnée (Δt).

La formule de Boivin *et al.* (2017b) s'inspire de celle de Benda et Sias (2003). Cependant, cette formule représente la dynamique du bois mort en termes de flux en m^3/an pour un bassin versant. L'équation se décompose aussi pour prendre en compte des facteurs environnementaux propre à chaque contexte. Par exemple, la destruction des morceaux de bois se calcule de cette manière :

$$D = [V_d + V_f + V_{fi}] / \Delta t \quad (2)$$

Ainsi, V_d correspond au volume de bois éliminé par décomposition, V_f au volume fragmenté durant une crue en eau libre, puis V_{fi} lors de débâcle de glace pour une période donnée Δt .

L'ajout de composante propre à des environnements froids constitue une des pistes prises par la recherche sur le rôle relatif de la dynamique glacielle dans le transport

du bois en rivière présentée dans ce mémoire. Une dynamique contrastée au sein des différentes rivières froides et dont les effets sur la mobilité du bois sont encore peu connus.

2.3.LES RIVIERES NORDIQUES ET LA DYNAMIQUE GLACIELLE

2.3.1. La glace de rivière : typologie et mise en place

Dans leur état de l'art, Rokoya *et al.* (2018) soulignent l'importance des processus glaciels qui concernent 60% des rivières nordiques, justifiant les recherches sur les embâcles de glace. Les difficultés à prédire l'occurrence et la magnitude des événements d'embâcles sont le moteur principal de la recherche. Les auteurs ont identifié 188 articles scientifiques entre 1984 – date du premier article publié – et 2017, 45% de ces articles ont été publiés entre 2010 et 2017, montrant l'intérêt croissant de la recherche. Rokoya *et al.* (2018) rapportent aussi la multidisciplinarité des recherches avec l'hydrologie, l'ingénierie et la géologie représentant respectivement environ 25% des articles publiés. Autrement, l'écologie ou encore la géographie physique sont des domaines émergents dans la recherche sur les embâcles de glace, avec les sciences atmosphériques et la télédétection. Cette diversité s'explique par la ramification des impacts sociaux, économiques et écologiques. En termes d'orientation prise par la recherche, 35% des articles se tournent vers l'application de modèle. La grande majorité des recherches prennent en considération les impacts du changement climatique et la régulation des rivières et tentent de les quantifier. Enfin, les recherches sont essentiellement concentrées au Canada, dans l'ouest et au Québec, aux États-Unis, en Europe avec l'Islande, la Finlande, puis également l'Europe de l'Est. Enfin, la Russie et la Chine sont un autre pôle de la recherche sur les embâcles de glace.

2.3.2. Formation du couvert de glace

Les chercheurs identifient trois grands processus de formation de la glace en rivière, qui dépendent des attributs morphologiques des rivières. Bergeron *et al.* (2011) détaillent cette typologie. Ils identifient d'abord les glaces de berges se formant dans les zones aux écoulements plus lents du fait du refroidissement plus rapide des berges et de l'absence de mélange verticale. Le frasil est le second processus décrit par les auteurs, présent dans les zones à plus forte pente. L'absence de couvert de glace dans ses zones plus turbulentes favorise la perte de chaleur lorsque l'eau est exposée à l'atmosphère plus froide dans les rapides et cascades. Enfin les accrétions de frasil forment des barrages ancrés dans les sections peu profondes à l'écoulement rapide, les cristaux de frasil s'accrochent alors aux obstacles tels que les roches ou la végétation. Ces deux processus sont décrits comme du frasil actif sous la typologie de Turcotte et Morse (2013).

2.3.3. Formation des embâcles : typologies et processus

Turcotte et Morse (2013) proposent une typologie des phénomènes de congestion, distinguant d'abord le frasil actif, du frasil passif, transporté sous un couvert de glace existant et qui se dépose dessous dans les zones où l'écoulement ralentit. Le frasil passif peut créer d'importantes obstructions, constituant un agent d'érosion qui creuse le lit à cause d'une plus grande vélocité. C'est aussi un important facteur de risque, car ces barrages peuvent augmenter les niveaux d'eau en amont. Les auteurs discernent aussi deux autres types d'obstructions : les barrages de glaces (*ice dam*) et les embâcles (*ice jam*) à proprement parler. Les barrages de glace se forment au moment de formation du couvert de glace dans les secteurs à forte pente qui accumulent une grande quantité de frasil actif. Ils grossissent rapidement et peuvent augmenter significativement les niveaux d'eau. Un embâcle est une accumulation de glace contraignant l'écoulement et se produit au moment de la débâcle, quand les blocs de glace se fracturent et sont mobilisés. Ils

s'agglomèrent en aval, bloqués par la morphologie du chenal ou par un couvert de glace stationnaire épais. Il existe deux grands processus de débâcles : les débâcles mécaniques et les débâcles thermiques. Les débâcles thermiques dépendent de la radiation solaire et de la température atmosphérique (Bergeron *et al.* 2011). Ainsi la glace fond *in situ* permettant de légers déplacements de plus gros blocs de glace. La rupture mécanique se produit lorsque la pression de l'eau augmente avec des niveaux d'eau plus hauts. Elle contribue au transport de blocs de diverses tailles plus loin en aval.

Les différentes conditions hydroclimatiques influencent également les processus de rupture des embâcles. Jasek (2003) distingue deux fronts de rupture différents (Figure 4). Les fronts de décombres apparaissent dans des secteurs où le couvert de glace est confiné limitant sa capacité à être mobilisé. Souvent, ces fronts surviennent dans des secteurs aux berges abruptes avec quelques bancs ou bien en amont d'un lac. La glace est aussi plus fine et se rompt rapidement lors de la pression de l'eau. Lorsque les décombres de glace s'accumulent, ils exercent une forte pression. Jasek (2003) note une célérité pouvant aller jusqu'à 5 m/s sur un tronçon de 18km. Le second type de front correspond à un couvert de glace plus solide et homogène. Il est présent dans les secteurs plus larges, où le couvert est facilement mobilisé puis brisé en larges plaques. Contrairement au premier type, le couvert de glace est surélevé et supporté par l'eau. Les plaques de glaces qui se fragmentent sont alors transportées rapidement vers l'aval, plus rapide encore que la vitesse du courant. Ce dernier type peut créer des vagues de crues importantes.

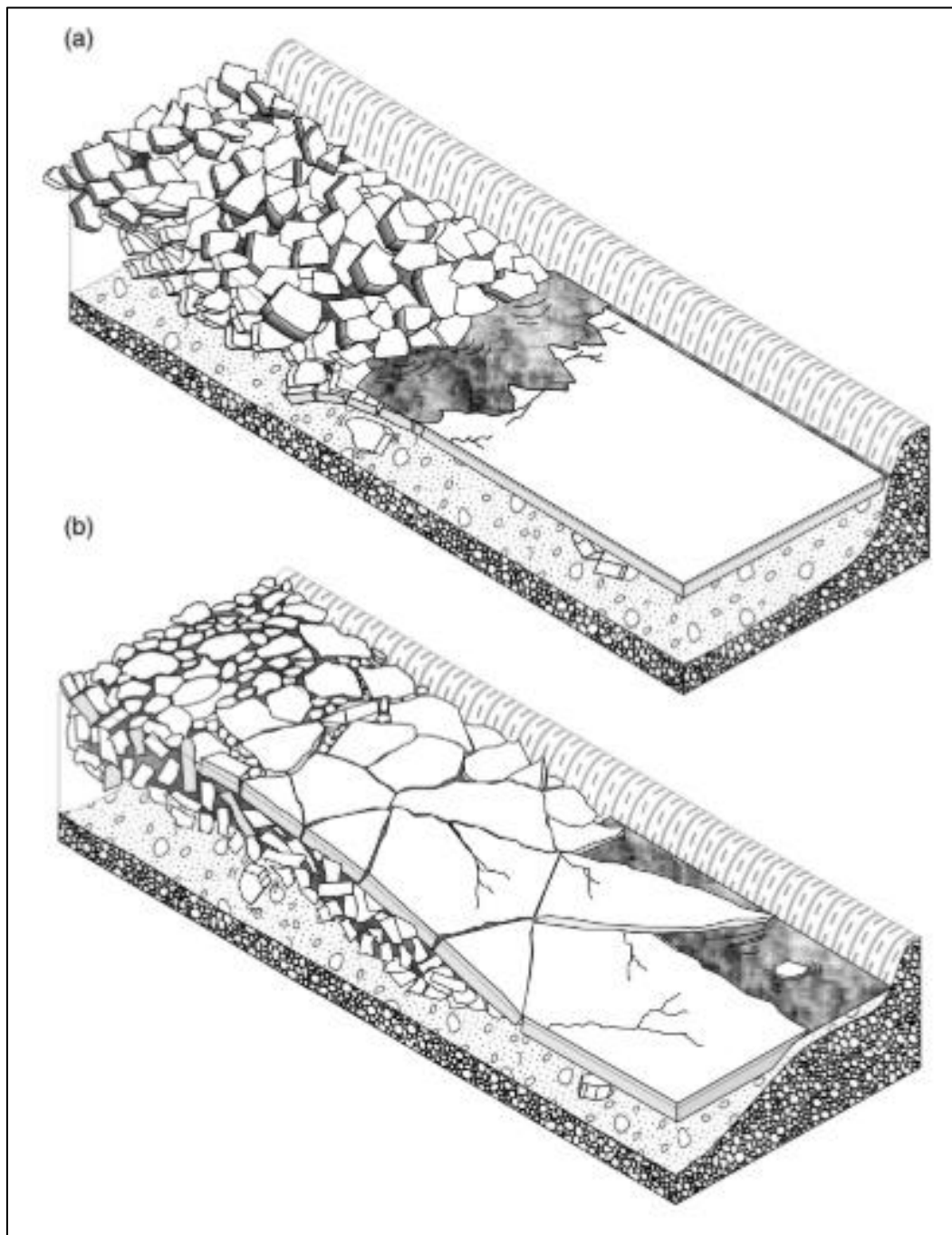


Figure 4. Deux types de fronts de débâcles : (a) front de décombres, (b) front de plaques, Sources : Jasek, 2003

2.3.4. Facteurs abiotiques à l'origine des embâcles de glace

De Munck *et al.* (2017) synthétisent les facteurs favorisant la congestion des blocs de glace, créant des embâcles. Ils en notent cinq principaux : la réduction de la pente ou la rupture de pente, la réduction de la largeur supérieure du chenal, les constriction du chenal (méandres, ponts, îlots), la présence de tronçon peu profond, puis la présence d'un couvert de glace intact. La géomorphologie joue un rôle prédominant dans l'occurrence des événements d'embâcles de glace. Ces présupposés ont conduit les auteurs à créer un modèle de prédiction du risque d'embâcle basé sur ces différents facteurs morphologiques. Ils se situent ainsi dans la continuité des travaux de Turcotte et Morse (2013) et leur modèle de classification des glaces de rivières.

Ainsi, Turcotte et Morse (2013) relèvent les lieux de prédilection dans la formation d'un couvert de glace et les lieux favorables à la congestion. Ils se basent sur une description des morphologies du chenal dans un gradient amont aval classique. Ainsi, les tronçons à forte pente tels que les chutes, cascades et rapides en tête de bassin versant sont décrits comme des zones favorables au frasil actif pouvant contribuer à une congestion à leur pied lors la formation du couvert de glace. Plus en aval, les secteurs divagants, plus larges et moins profonds permettent la formation d'un couvert de glace plus dense pouvant contribuer à la création d'embâcles lors de la rupture du couvert de glace. Les secteurs en anabranch, possédant plusieurs chenaux étroits à l'écoulement plus lent, sont les premiers à s'englacer. Lors de la débâcle, la division de l'écoulement dans les chenaux secondaires peut participer à la création d'un embâcle en diminuant la pression de l'eau et réduisant ainsi le transport des blocs de glace. Entre les secteurs à fortes pentes en amont, et ceux à la pente plus douce en aval, les auteurs intègrent les tronçons seuils-mouilles. Ces tronçons peuvent être courts ou longs, profonds ou non, larges et parfois à méandres. L'ensemble de ces variations influencent les processus de congestion de la même manière que l'on retrouve dans les autres tronçons. Les rapides participent à la création de frasil, mais constituent aussi des ruptures de pente favorables

à la congestion à leur pied. Les mouilles, parfois peu profondes, possèdent souvent un couvert de glace stable qui retient les blocs et forme un embâcle en amont. Dans leur étude, Morin *et al.* (2015) ont identifié des facteurs similaires à partir de l'analyse des formes générées par les embâcles. Ils notent l'importance du forçage morphologique dans la formation d'embâcle.

Bergeron *et al.* (2011), montrent de leur côté le rôle prédominant des confluences sur la formation d'embâcle à partir d'un modèle conceptuel sur les liens sédimentaires. L'influence des tributaires est d'ailleurs intégrée dans le modèle prédictif de De Munck *et al.*, (2017). Les méandres représentent également des secteurs favorables à la formation d'embâcle du fait des variations de la vitesse du courant (Kämäri *et al.*, 2017), et sont également introduits dans le modèle prédictif par le biais d'un indice de convexité.

Bien qu'il est possible de définir des secteurs prédisposés à la formation d'embâcle à partir de facteurs géomorphologiques, l'influence de l'eau et de la température atmosphérique joue un rôle important dans l'apparition de ces événements de congestion en sein d'un cours d'eau.

Dans leur modèle conceptuel, Turcotte et Morse (2013) insistent davantage sur l'intensité de l'hiver pour distinguer les différents régimes glaciels à l'échelle globale. Ils considèrent quatre catégories de climat qui dépendent de la sévérité des hivers : doux, froid, subarctique et arctique. Ces catégories sont fonction des jours de gel cumulatif, la température moyenne de l'air, et l'épaisseur du couvert de glace. La plupart des études se situent dans un climat froid où des embâcles de mi-saisons peuvent arriver, mais globalement, le couvert est stable durant toute la saison hivernale.

Lagadec *et al.* (2015) notent que « les embâcles de glaces sont des processus complexes et multivariés, plusieurs conditions hydroclimatiques doivent être considérées pour les décrire et les prédire ». À partir d'une étude dendrochronologique et de données historiques, les auteurs ont cherché à prédire les conditions hydroclimatiques conduisant à la formation d'embâcle. Les auteurs ont identifié vingt-et-une variables importantes réparties en trois catégories : climatique (précipitations hivernales ou printanières,

température maximum en décembre ...), hydrologique (débit minimum, médian en mai ou septembre, débit maximum au printemps, volume d'eau ...) et hydroclimatique (pic de débits, débit maximum annuel, débit moyen en mai...). L'analyse par arbre de classification a permis aux chercheurs de différencier deux scénarios conduisant à la formation d'embâcle. Le premier scénario, le plus fréquent, correspond à un débit faible précédent la saison hivernale, réduisant la profondeur d'eau ce qui permet un couvert de glace plus épais. La mobilité de la glace est alors fortement réduite au printemps favorisant la congestion au moment de la débâcle, souvent thermique. Le second scénario est davantage contrôlé par les conditions printanières. Il s'agit d'une rupture mécanique du couvert de glace lié à un pic de débit important. Le couvert de glace se fracture et s'agglomère dans des secteurs où le volume de glace excède la capacité de transport du cours d'eau.

2.3.5. Les impacts de la dynamique glacielle

Il existe une grande variété de processus glaciels correspondant à la large diversité des styles fluviaux, des régimes hydrologiques et climatiques des rivières nordiques. De ce fait, la dynamique glacielle en rivière a des impacts sur la morphologie, la végétation et peut représenter un risque pour les populations.

La congestion du chenal lors de la rupture du couvert de glace constitue un risque supplémentaire d'inondation. La rigidité et l'épaisseur de la couverture de glace peuvent augmenter le niveau de l'eau jusqu'à deux ou trois fois pour un débit similaire sans couvert (Prowse et Beltaos, 2002). Le schéma synthèse de Rokoya *et al.* (2018) (Figure 5) illustre l'impact des embâcles de glace sur la ligne d'eau lors des ruptures du couvert de glace. L'embâcle crée un réservoir d'eau à l'origine d'une vague lors du démantèlement de l'embâcle. La dangerosité de cet aléa est accrue du fait de son déclenchement rapide. Comme cela a été montré plus haut, la formation des embâcles de glace dépend de variables hydroclimatiques de l'hiver (durée, sévérité), mais aussi du printemps (précipitations, températures) ou encore de l'automne (hiver précoce, débit)

(Lagadec *et al.*, 2015). Ces variations aboutissent à deux types de formation d'embâcles (par débâcles thermiques ou mécaniques) dont l'influence sur le risque diffère. Selon Prowse et Beltaos (2002), le risque est plus élevé lors des ruptures mécaniques précoces associées à un redoux hivernal ou à des épisodes de fortes précipitations dans les régions nordiques plus tempérées. Du fait de la résistance encore élevée de la glace, car la détérioration thermique n'a pas encore eu lieu, l'ampleur des accumulations et des crues est accrue.

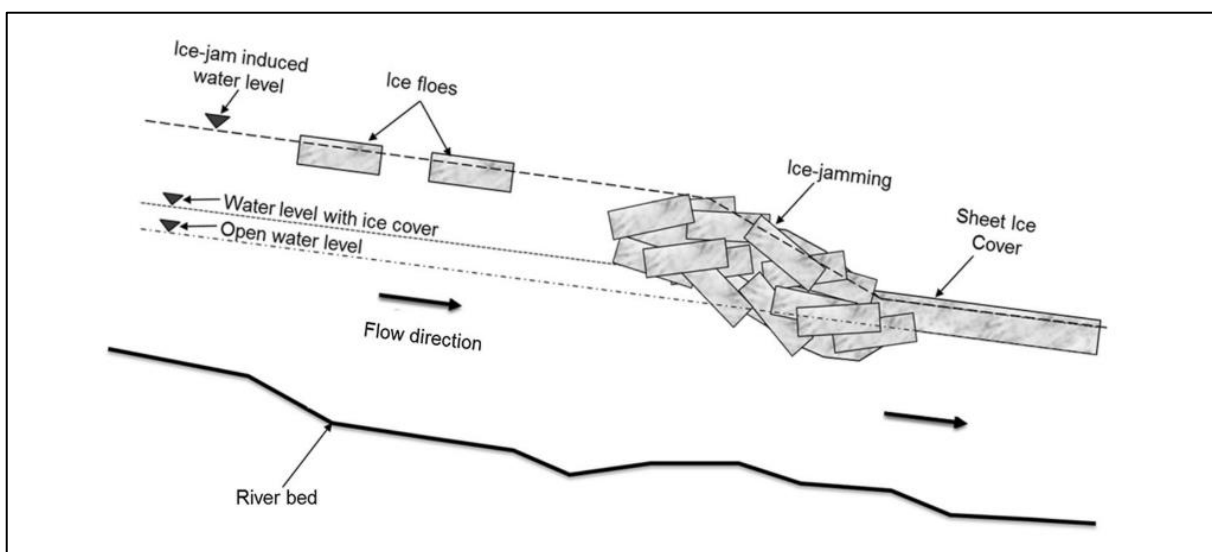


Figure 5. Schéma d'un embâcle de glace et des niveaux d'eau associés. Sources : Rokoya *et al.*, 2018

Les accumulations de glaces au moment de la débâcle peuvent avoir plusieurs conséquences sur le transport sédimentaire et la morphologie du chenal. En amont par exemple, les sédiments s'accumulent temporairement du fait du ralentissement de l'écoulement dans la zone de rétention d'eau associée à l'embâcle (Turcotte *et al.*, 2011). Le passage des embâcles de glace modifie la géométrie du chenal. Smith (1979) observe notamment que le surcreusement lié à la débâcle et la formation d'embâcle de glace contribuent à l'élargissement du chenal. En effet, lors de son déplacement vers l'aval, l'embâcle creuse le talweg ainsi que les berges. L'érosion se réalise par blocs de sédiment. Smith a remarqué des blocs de 2,4 par 7,6 mètres être emporté dans le chenal. De tels déplacements de portion de berge représentent un risque pour la sécurité civile et les

infrastructures. Les secteurs les plus confinés semblent les plus vulnérables, car l'espace pour que l'énergie se dissipe est restreint (Boucher *et al.*, 2009). Enfin, la surélévation du niveau d'eau et de la glace contribue à éroder principalement la partie supérieure de la berge (Figure 6). Le recul de la berge supérieure, puis les processus alluviaux, contribuent avec le temps à l'apparition des berges à deux niveaux, ou « bechevnik », communes à de nombreuses rivières nordiques et décrites notamment par Louis-Edmond Hamelin dès 1979. L'érosion annuelle lors des épisodes débâcles printanières participent également à l'entrée du bois dans le système par l'érosion des berges (Unala *et Church*, 2015).

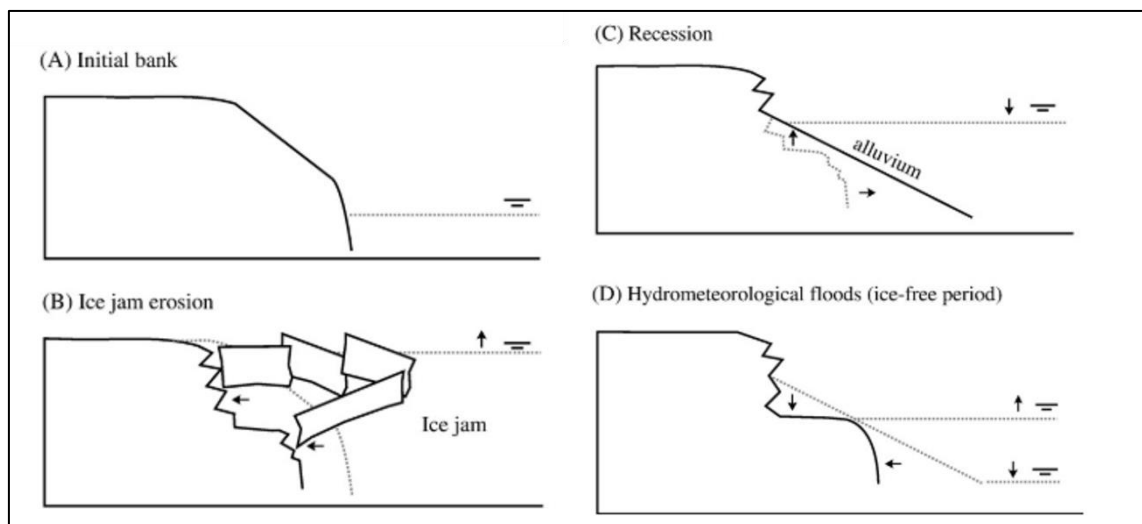


Figure 6. Processus de retrait des berges après un embâcle de glace. Sources : Boucher *et al.*, 2009

Les différents impacts des embâcles de glace sur la structure des berges soulignent le rôle morpho-dynamique de la glace et de fait son influence indirecte sur la végétation riveraine à travers des processus d'érosion ou de sédimentation (Ettema, 2004, Turcotte *et al.*, 2011). En Suède, Lind *et al.*, (2014) ont montré le rôle dominant de la glace dans la diversité de certaines plantes. Les auteurs observent une réduction des espèces arbustives naines, mais une plus grande diversité d'espèces herbacées. Du fait de la forte action d'érosion de la glace, certaines plantes s'installent plus rapidement sur les berges nouvellement mises à nue (Rood *et al.*, 2007).

Le rôle exercé par la glace tant sur les éléments biotiques et abiotiques des cours d'eau en milieux nordiques, nous invite à penser les embâcles de glace comme un facteur potentiellement majeur dans le transport du bois, au même titre que d'autres événements hydrologiques extrêmes.

2.4. LE ROLE DE LA DYNAMIQUE GLACIELLE SUR LE TRANSPORT LIGNEUX

Aujourd'hui, peu d'études s'intéressent à l'impact relatif des embâcles de glace sur le transport du bois en rivière (Boivin *et al.*, 2017a). Plusieurs évidences montrent que la glace joue un rôle certain sur la mobilité du bois en rivière. Les résultats de Boivin *et al.* (2017a) montrent une augmentation du volume de bois transporté pendant un embâcle de glace sur la rivière Saint-Jean pour des débits pleins-bord équivalant à une crue de récurrence deux ans. Les chercheurs ont en effet remarqué que lors d'une débâcle mécanique intense avec un débit de $66 \text{ m}^3/\text{s}$, une grande quantité de bois était transportée sur les blocs de glace avec des volumes supérieurs à des crues allant jusqu'à $282 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces résultats sont synthétisés sur un modèle conceptuel (Figure 7), comparant la mobilité du bois en rivière lors d'un épisode de débâcle mécanique des glaces à la mobilité liée à une crue de récurrence deux ans en eau libre.

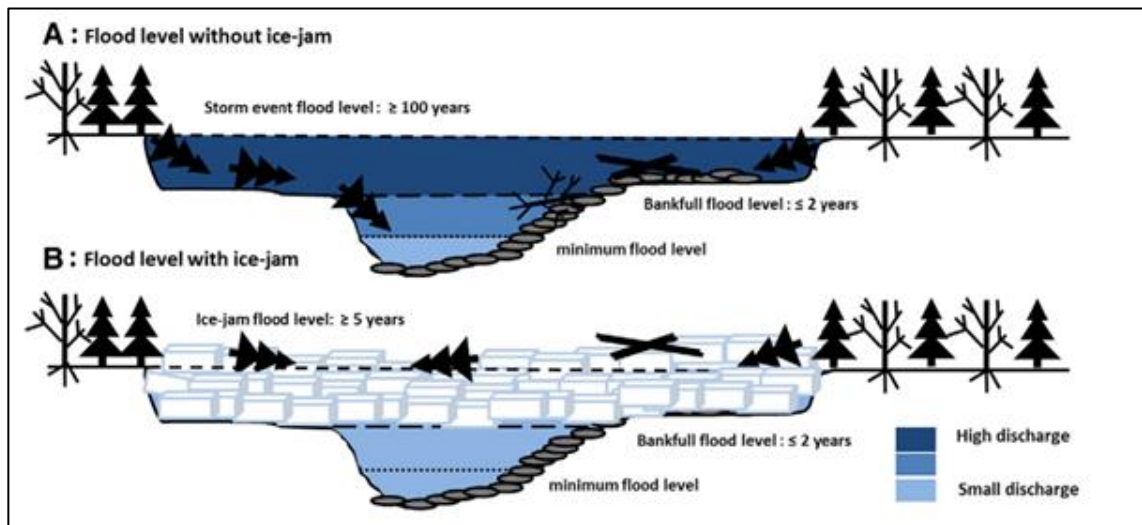


Figure 7. Modèle conceptuel de la mobilité du bois lors d'un évènement en eau libre et un évènement d'embâcle de glace. Boivin et al. (2017)

Kramer *et al.* (2017), sur la Slave River, remarquent que les bois recrutés récemment par érosion fluviale puis échoués par les eaux en fin d'été sont quasi systématiquement emportés par les glaces lors des fontes printanières. Elles notent aussi l'évacuation de certains amas de bois lors de débâcles des glaces mécaniques. Les résultats sur la Slave River montrent en effet une tendance à une évacuation importante du bois dans le chenal lors des épisodes d'embâcle de glace, tandis que les évènements de crues en eaux libres ont tendance à accumuler davantage de bois (Figure 8B). Cette tendance se distingue sur un pas de temps annuel par deux périodes de fortes mobilités du bois en mai associées aux ruptures mécaniques du couvert de glace d'abord puis de mi-juin à mi-juillet lors des crues nivales de printemps (Figure 8A).

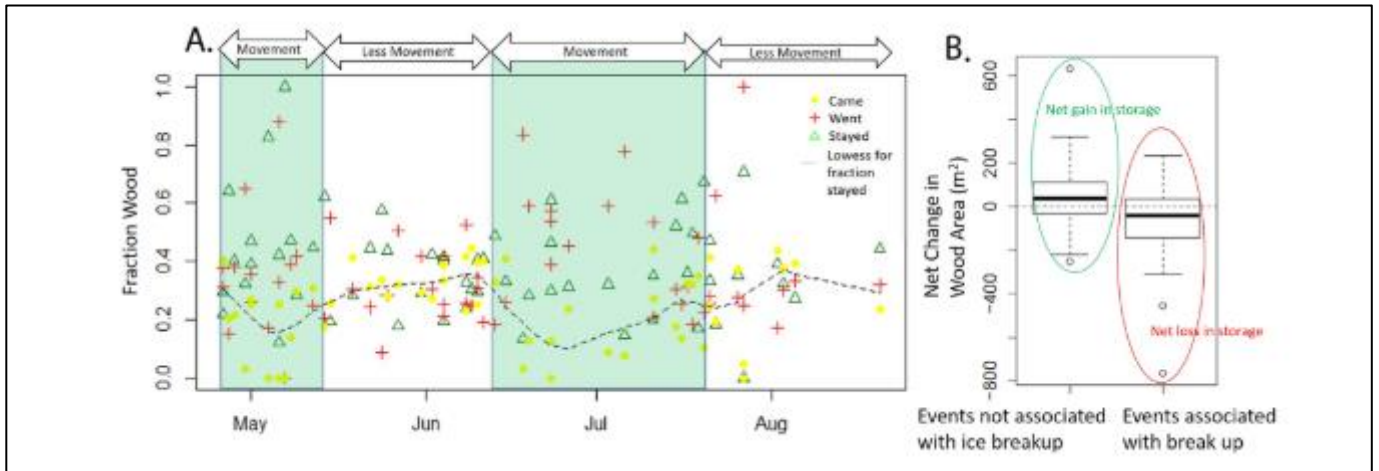


Figure 8. (A) Cycle saisonnier du stockage du bois (B) Variation des stocks de bois lors d'évènements associés à un embâcle de glace contre des évènements en eau libre. Kramer et al. (2017)

Ces premières évidences soulignent l'influence relative des embâcles de glace sur la mobilité du bois en rivière. Néanmoins, l'imprédictibilité de ces évènements et les difficultés liées à leur étude limitent les possibilités d'une recherche approfondie sur ces processus. Ce mémoire vise ainsi à trouver des pistes pour mieux comprendre les interactions entre la dynamique glacielle et la mobilité des embâcles de bois.

CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE

Dans ce chapitre sont détaillées les caractéristiques du terrain d'étude ainsi que les méthodes mises en place pour répondre aux enjeux de la présente recherche. La méthodologie est présentée par objet d'étude, de la récolte des données, au traitement et aux méthodes d'analyses spatiales. Les protocoles pour le bois et la glace sont répartis en deux volets distincts. L'analyse de la trajectoire morphologique de la Petite-Cascapédia sera d'abord détaillée. Puis seront présentés les recensements des embâcles de bois durant les campagnes de terrain des étés 2019 et 2020, ainsi que le traitement de ces données. Enfin, seront décrites les méthodes en lien avec l'inventaire des secteurs à embâcles de glaces. L'inventaire des cicatrices glacielles en 2020 ainsi que l'application du modèle de prédiction d'embâcle de glace de De Munck *et al.* (2017) sont approfondies. Les composantes d'un indice de prédiction de zones d'accumulation de bois mort sont détaillées. Finalement, un précis sur l'utilisation de caméra est également présenté à la fin du chapitre.

3.1. TERRITOIRE A L'ÉTUDE

La rivière Petite-Cascapédia se situe au sud de la Gaspésie et débouche dans la Baie des Chaleurs à New Richmond (

Figure 9). Elle possède un bassin versant de 1400 km². Son régime est nivo-pluvial, dans une zone au climat continental humide avec des débits d'étiage hivernaux et estivaux, un chenal prit par la glace quelques mois par année et des périodes de crues lors de la fonte

des neiges au printemps et des ondes de tempêtes à l'automne. La vallée est orientée du nord vers le sud et connaît régulièrement des redoux hivernaux. Il s'agit d'une zone bioclimatique mixte, avec une sapinière à bouleau blanc de type forêt boréal en amont puis en aval une sapinière à bouleau jaune.

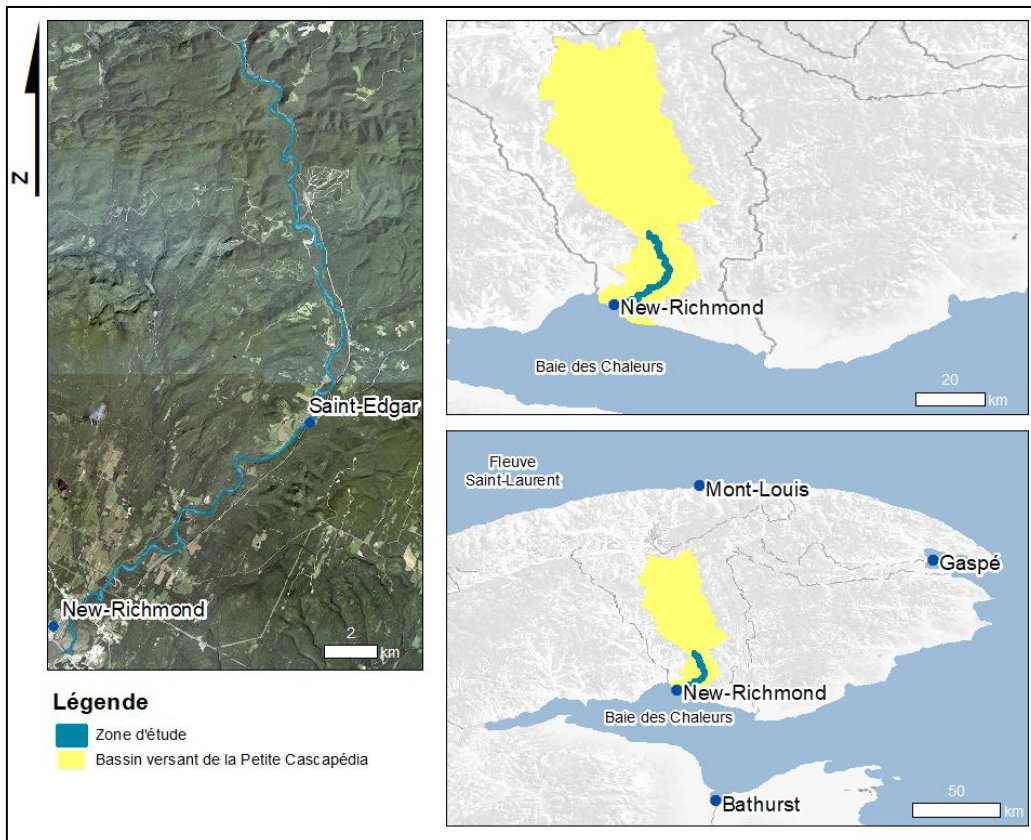


Figure 9. Localisation du secteur à l'étude

La confluence entre la branche est et ouest de la rivière Petite-Cascapédia se situe à trente kilomètres en amont de l'embouchure et correspond à la limite amont du site d'étude. La rivière s'incise dans un bas plateau correspondant à la pénéplaine appalachienne du Cénozoïque (Coulombe-Ponterbriand et Lapointe, 2004). Il s'agit d'une rivière graveleuse et semi-alluviale s'écoulant sur d'anciennes terrasses fluvio-glaciaires. Elle

est partiellement confinée dans certains secteurs par l’affleurement de blocs et des sections rocheuses. Ce contrôle lithologique limite localement la mobilité de la rivière.

Dans d’autres secteurs, la vallée s’élargit grandement (jusqu’à un kilomètre) avec des méandres dynamiques et la création de chenaux secondaires. Au niveau de la ville de Saint-Edgar, le débit moyen annuel est de $51.3 \text{ m}^3/\text{s}$ et la puissance spécifique de la rivière varie de 90 à 140 W/m^2 (Coulombe-Ponterbriand et Lapointe, 2004). Selon la classification de Ferguson (1987), la Petite-Cascapédia correspond à une rivière à haute énergie.

Les bassins versants des rivières affluentes sont majoritairement forestiers et de petites tailles. La forêt du bassin versant de la Petite-Cascapédia est exploitée uniquement dans ses parties hautes, plus en amont, dans le massif des Chic-chocs (Coulombe-Ponterbriand et Lapointe, 2004).

La rivière a connu plusieurs évènements d’embâcle de glace (

Figure 10). En avril 1994 (Ministère de la Sécurité Publique, MSP) lors de la débâcle du printemps, en aval de la rivière, un embâcle a généré une montée des eaux endommageant quatre bâtiments et les ponts de la 132. En janvier 2015, lors d’un redoux hivernal, puis en mars lors de la débâcle de printemps, un embâcle de 4 kilomètres s’est formé au centre de notre tronçon d’étude, ne causant cependant aucun dommage (MSP). Enfin, en 2018, un redoux fin décembre a entraîné la formation d’un embâcle avec une légère montée des eaux ne causant lui non plus aucun dommage (discussions avec les riverains).

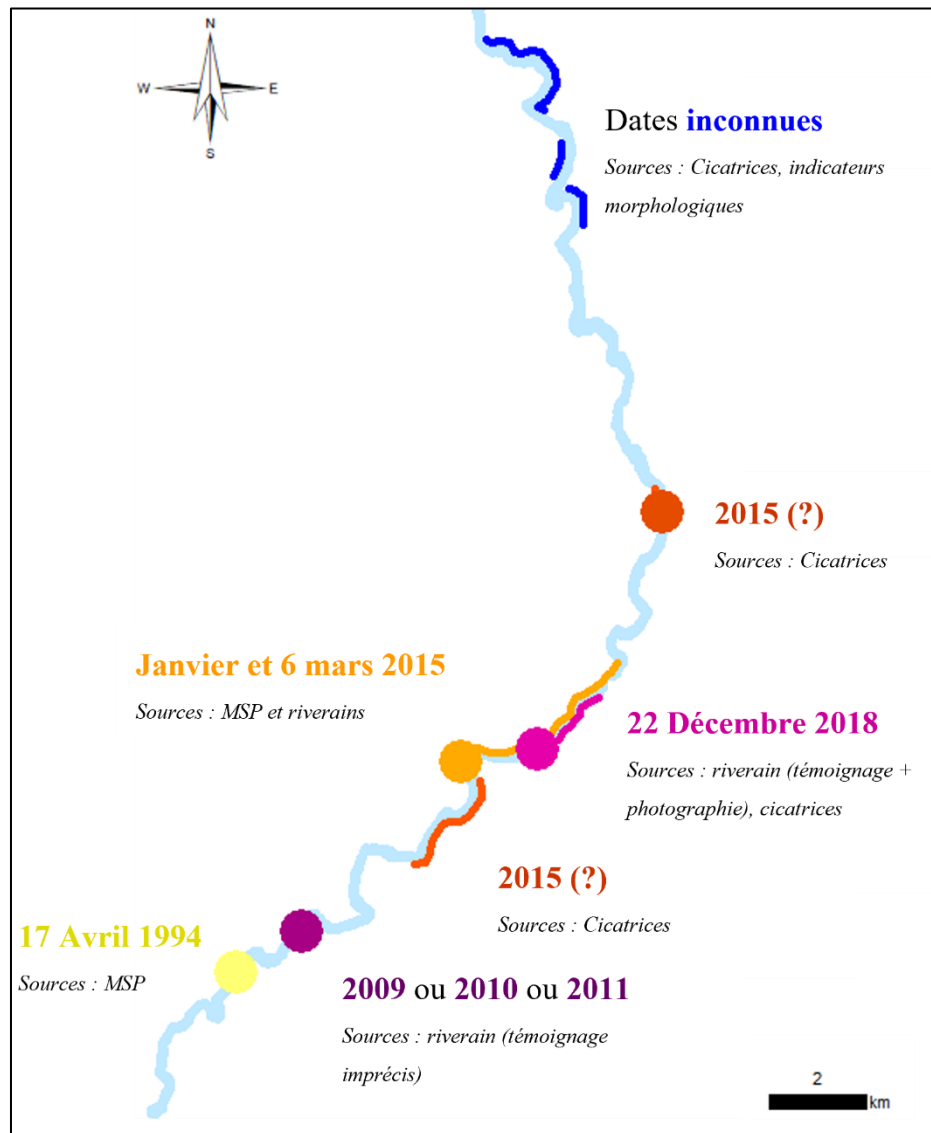


Figure 10. Localisation des évènements d'embâcles de glaces répertoriés sur la Petite-Cascapédia

Ces dernières années, la rivière a connu de grandes crues. La crue de 2017 a causé d'importants dommages ainsi que la crue de 2010 où le pont de Saint-Edgar avait gravement été endommagé par le passage du bois. Début décembre 2020, la rivière a également été touchée par une crue importante avec un pic à 623 m³/s. Les images de l'évènement montrent une importante mobilisation du bois en rivières (Figure 11) avec une évacuation de nombreuses pièces de bois. La rivière possède une abondance de bois en rivière avec de nombreux gros embâcles (Figure 12). Cette forte densité rend le chenal

de la rivière particulièrement exposé aux transports et à la congestion lors d'épisodes de hautes-eaux et de débordement.



Figure 11. Image drone des inondations à New Richmond en octobre 2020, sources : Drone Cowboy, Mr A. Douglas Shaw



Figure 12. Image drone d'embâcles en amont de la rivière, source : Maxime Boivin, 2019

3.2. TRAJECTOIRES HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES

La trajectoire des formes fluviales a été réalisée dans le cadre du projet de recherches HGM2 des cours d'eau de la Gaspésie du Laboratoire de Recherche en Géomorphologie Fluviale (UQAR). Sur les trente kilomètres, cinq grands tronçons homogènes ont été distingués (Figure 13). Ces différents tronçons se distinguent par leurs dynamiques géomorphologiques. Pour ces cinq secteurs, le dynamisme morphologique a été caractérisé. Dans le cadre du suivi HGM2 (Maltais *et al.*, 2021), l'évolution de la largeur du chenal ainsi que les taux d'érosion latérale ont été évalués pour 1963, 1975, 1986, 1992, 2004 et 2016. L'évolution des formes fluviales des secteurs dynamiques de chaque tronçon a été réalisée entre 2004 et 2016.

Les tronçons morphologiquement homogènes se distinguent ainsi par leur mobilité latérale (taux d'érosion), par leur caractéristique (largeur) et par leur style fluvial (bancs d'accumulation). Ainsi en amont on distingue le tronçon cinq, confiné dans une vallée étroite et où les berges rocheuses exercent un important contrôle sur la mobilité de

la rivière avec seulement quelques rares secteurs dynamiques. Le tronçon est ponctué d'affleurement rocheux constituant d'importants seuils et des fosses profondes.

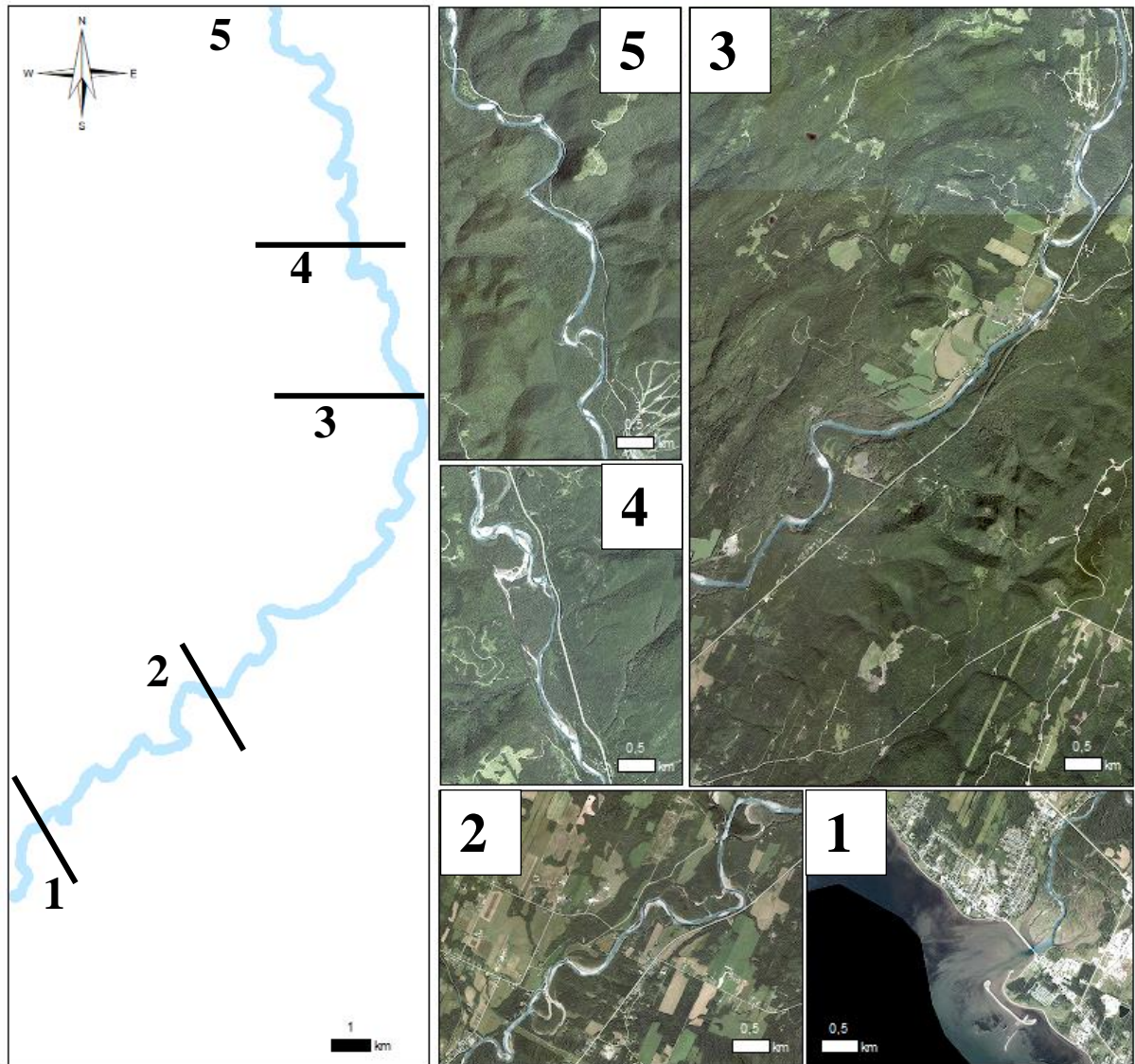


Figure 13. Segmentation de la rivière par tronçons homogènes

Le quatrième tronçon correspond à un élargissement important de la plaine alluviale. Dans ce secteur la rivière est particulièrement dynamique avec un style divagant multipliant les chenaux secondaires et les bancs d'accumulation. Le troisième tronçon est

une zone à méandres peu dynamiques. La rivière coule notamment sur le lit rocheux sur 4 kilomètres et la mobilité de la rivière est limitée par un contrôle lithologique sur toute la partie aval du tronçon. Hormis les bancs de convexités et quelques bancs d'accumulation centraux liés à un bref élargissement du chenal, le lit mineur est globalement composé uniquement d'un chenal principal en eau. Sur l'avant-dernier tronçon (tronçon 2), la rivière gagne en dynamisme, s'élargit et multiplie les chenaux secondaires. Il s'agit d'un tronçon très mobile qui a connu de nombreux changements avec des avulsions. Le dernier secteur correspond (tronçon 1) à l'embouchure et se distingue par sa dynamique estuarienne influencée par la marée jusqu'à plus de deux kilomètres en amont.

Le suivi est réalisé à partir d'images satellites et de photographies aériennes historiques (1983-2016), puis par vectorisation des formes fluviales sur ArcGIS. Les photographies historiques ont été géoréférencées à partir d'orthophotographies. La superposition des couches, qui correspondent au lit mineur (chenaux en eau et bancs d'accumulation) de chaque année, permet d'extraire les superficies érodées par le cours d'eau, mais aussi des zones abandonnées par ce dernier grâce aux outils de géotraitement.

Dans le cadre de la cartographie des zones inondables, une bathymétrie par DGPS du secteur aval (jusqu'à 16 kilomètres en amont) a été réalisée lors de la campagne d'été 2019. Les relevés topographiques ont été réalisés à l'aide d'une combinaison d'une station totale robotisée et d'un DGPS Trimble à partir de deux bornes géodésiques du Gouvernement du Québec à New Richmond le long de la rivière et à proximité du pont de Saint-Edgar. Ces relevés succèdent à ceux réalisés par le MSP en 2013 et ont été complétés par des relevés bathymétriques sur les huit derniers kilomètres avant l'embouchure grâce à l'échosondeur de marque Cee-Line. Les données du MSP puis celles obtenues par la bathymétrie de 2020 sont comparées pour évaluer la variation de la hauteur du lit en aval.

Pour obtenir le profil en long de la rivière, une ligne de points espacés de 25 mètres au centre du chenal a été projetée. Une hauteur a été attribuée à chaque point à partir d'un calcul de géométrie réalisé sur les données lidar de la Petite-Cascapédia.

3.3. CARACTERISATION DES VOLUMES DE BOIS

3.3.1. Inventaire interannuel des volumes de bois

La récolte des données a été faite sur les 30 derniers kilomètres de la Petite-Cascapédia, en aval de la confluence entre la branche est et ouest, à deux reprises lors des campagnes de terrain d'août 2019 et 2020. Les inventaires ont été réalisés à l'étiage pour faciliter la prise de données et éviter une potentielle remobilisation du bois durant la campagne. Sur le tronçon, chaque embâcle répondant à la description présentée ci-après a été inventorié à l'aide d'une fiche descriptive (annexe 1). Un embâcle est considéré comme un amas de trois morceaux de bois au minimum, supérieurs à 1 mètre de longueur et d'un diamètre de plus de 10 centimètres (Piégay et Gurnell, 1997). La longueur, la largeur et la hauteur sont mesurées à l'aide d'un ruban de 60 mètres et d'une règle télescopique en considérant l'embâcle comme un cube (Figure 14).



Figure 14. Représentation d'un cube pour calculer le volume

Pour chaque embâcle, un point GPS et une photographie sont enregistrés, puis sont notées les informations quantitatives et qualitatives. La position de l'embâcle est observée et classifiée, s'il est dans le chenal (en eau), sur un banc d'accumulation ou bien sur la plaine alluviale (zone végétalisée). L'obstruction du chenal est calculée approximativement, permettant d'évaluer la capacité de l'embâcle à retenir du bois. La densité de l'embâcle est prise en compte afin d'observer si la glace écrase et compacte les embâcles de bois ou si les embâcles compacts sont liés à d'autres processus tels que des appels d'eau (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2016). La provenance du bois correspond à une analyse de la distance potentiellement parcourue par le bois. Si les troncs portent des dommages liés au transport, racines ou branches arrachées par exemple, les arbres proviennent très certainement de l'amont. Au contraire, si la majorité des troncs ont encore les branches ou les racines, ils proviennent plutôt d'un site proche des zones relevées ou des berges à proximité. Une catégorie mixte inclut les arbres tombés de la berge retenant des bois qui ont transité. Enfin, la composition en troncs, racines et branches des embâcles est notée en pourcentage.

Les inventaires des embâcles de bois sont compilés dans un tableau Excel pour calculer les volumes totaux. La porosité des embâcles est à prendre en compte, car une

accumulation de bois est composée généralement de 90% de vide (Thévenet *et al.*, 1998). Pour avoir une meilleure appréciation du volume total d'un embâcle, la formule suivante est utilisée :

$$V_{emb\grave{a}cle} = (L * l * h) * 0,1 \quad (3)$$

Le volume est le produit de la longueur (L), la largeur (l), la hauteur (h) et de 0,1 correspondant à la proportion de bois dans l'embâcle.

Pour obtenir une meilleure vue d'ensemble des volumes de bois sur les trente kilomètres de tronçon, les embâcles sont additionnés sur des tronçons de 250 m. Ainsi, on peut distinguer des variations interannuelles et des tendances à l'accumulation ou à la remobilisation des embâcles.

3.3.2. Typologie des embâcles de bois

L'inventaire et l'observation des embâcles de bois de la Petite-Cascapédia permettent de décliner la typologie de Abbe et Montgomery (2003) en 6 catégories (Figure 15). Une première catégorie correspond aux embâcles *in situ* ou embâcles de berge formées suite à l'érosion de celle-ci (A). La chute de troncs dans le chenal piège parfois quelques troncs en transit et forme localement un embâcle de petite taille. Il s'agit d'embâcles composés de moins d'une dizaine de troncs. La deuxième catégorie (B) est liée au stockage du bois en transport sur les bancs d'accumulation. Ces embâcles ont des tailles très variées allant de quelques troncs à des structures plus complexes en amas de dix troncs et plus. La troisième catégorie (C) est également très fréquente dans un système fluvial comme la Petite-Cascapédia, à la plaine alluviale large en aval et aux chenaux secondaires multiples. Les embâcles de transport à l'entrée de chenaux secondaires sont liés à l'activation de ceux-ci qui génèrent d'importants appels d'eau obstruant leur entrée. La quatrième catégorie (D) diffère de la précédente, car ces embâcles, liés également un débordement du chenal principal, s'accumulent dans la plaine alluviale et sortent

partiellement du lit mineur. Ces embâcles sont des structures mixtes, maintenues contre la ripisylve lors des débordements, ils peuvent également se retrouver quelques mètres plus loin dans la plaine alluviale. On les distingue des embâcles de berge du fait de leur hauteur, ce sont souvent des embâcles témoin des hauteurs de crues. Les embâcles de transports en tête d'obstacle sont considérés dans une catégorie à part (E). D'origine naturelle (île, affleurements rocheux...) ou anthropique (pont), les obstacles au sein de chenal retiennent d'importantes quantités de bois. Enfin, le raft situé à l'embouchure (F) est compté dans une catégorie à part. Également liées au transport du bois, sa structure et sa taille le diffèrent des autres embâcles de bois. Partiellement en flottaison, le raft est susceptible d'évoluer rapidement et d'emporter avec lui des centaines de mètres cubes de bois en aval.

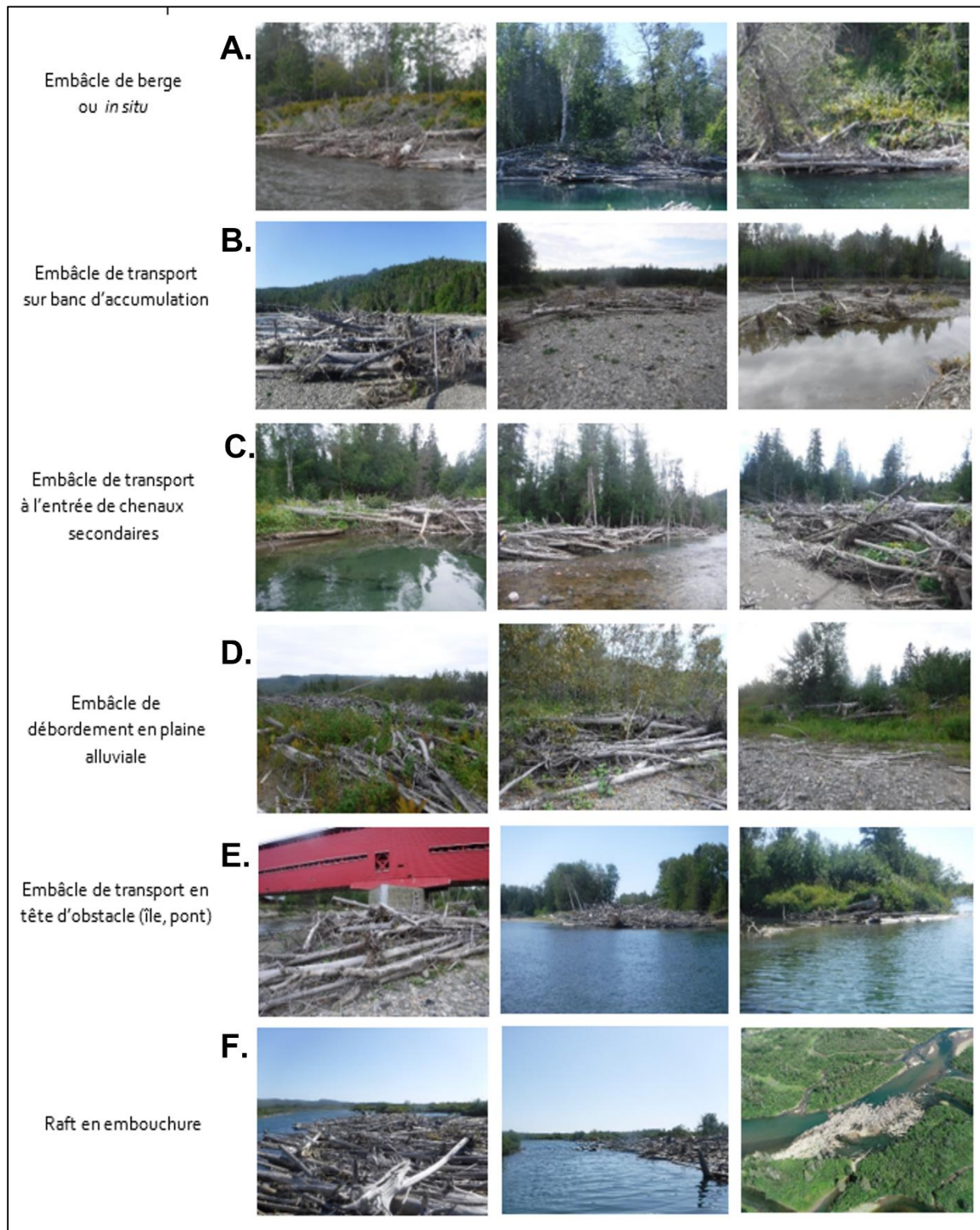


Figure 15. Typologie des embâcles de bois de la Petite-Cascapédia

3.4. CARACTERISATION DE LA DYNAMIQUE GLACIELLE

3.4.1. Choix des indices

L'enjeu principal de la caractérisation de la dynamique glacielle est la présence d'un indice qui permet de déterminer des secteurs où celle-ci est particulièrement active. Les embâcles de glace peuvent laisser de nombreuses traces lors de leur passage. Dans le chapitre 2, les différents impacts sur la morphologie des berges ont été décrits et ils représentent un premier indice de la récurrence de phénomène d'embâcle dans un secteur. Cependant, trop souvent ces évidences peuvent être trop anciennes ou liées à de multiples processus fluviaux qui ont façonné les berges.

Les témoignages et ressources historiques peuvent également permettre de déterminer la spatialité et la temporalité des embâcles de glace. Plusieurs témoignages ont ainsi permis de confirmer et dater des secteurs exposés aux embâcles. Toutefois, ces évidences sont limitées par la présence humaine sur la rivière et dans les zones peu accessibles, aucune information n'existe.



Figure 16. Exemples de cicatrices de glaces anciennes (gauche) et récentes (droite).

Enfin, l'indice le plus constant est celui des cicatrices laissées sur les arbres de la bande riveraine. Après une crue, on retrouve de nombreuses évidences de celle-ci dans la ripisylve : enfouissement, laisses de crue ou bien des cicatrices sur les troncs des arbres (Sigafos, 1964). Ces marques sur les arbres sont récurrentes sur les secteurs à embâcle de glace (Engström *et al.*, 2011, Lind *et al.*, 2014) et sont utilisées pour caractériser la dynamique glacielle (Lagadec *et al.*, 2015). Sur la Petite-Cascapédia, il s'agit de l'indice principal sur l'ensemble du tronçon à l'étude (Figure 16). Elles sont remarquables par leur répétition sur des arbres d'un même tronçon, signalant un évènement fluvio-glaciel plutôt que des évènements ponctuels comme du bois ou des traces d'animaux. Ces évidences ont également l'avantage de renseigner sur la hauteur des évènements ainsi que leur récurrence. Cependant, elles ne suffisent pas à elles-mêmes, car dépendent de l'état de la bande riveraine. Les zones en érosion sont des zones où l'information est perdue, car peu d'arbres anciens restent, ce qui peut conduire à sous-estimer le phénomène d'embâcle de glace dans ces secteurs (Figure 17). Au contraire, les zones stables avec une végétation dense possèdent plus d'évidences et peuvent conduire à surestimer les phénomènes d'embâcles de glace dans ces secteurs. C'est pourquoi, aux cicatrices de glace, ont été ajouté la prise en compte des témoignages ainsi que l'application d'un indice de prédisposition aux embâcles de glace de Munck *et al.* (2017).



Figure 17. Secteur à embâcle de glace avec berge érodée

3.4.2. Récolte des données.

Le recensement des cicatrices de glace a eu lieu lors de la campagne de l'été 2020 et a été effectué à partir des observations terrain de la campagne 2019 et des échanges avec les riverains. Ainsi, les zones à embâcle de glace étaient préalablement identifiées, leurs enjeux également (habitations, infrastructures ...). Pour chaque secteur, une cicatrice sur cinq est relevée, sa longueur verticale, son aspect et l'état de l'arbre sont notés sur une fiche de terrain (annexe 2). Ce protocole plus rapide permet d'obtenir une estimation précise du nombre de cicatrices. Les informations recueillies pourront permettre d'estimer l'intensité des événements d'embâcle de glace (taille ou densité des arbres touchés), mais aussi d'évaluer la récurrence de ces événements à partir de l'aspect de l'arbre si celui-ci a été marqué à plusieurs reprises. Les données sont prises sur la berge la plus stable, où l'information est plus dense.

Deux méthodes différentes ont été utilisées pour relever les cicatrices. La première est réalisée à l'aide d'un GPS et d'une règle télescopique. Ce protocole a été réalisé sur neuf sites des treize inventoriés (Figure 18). Ils correspondent aux sites les moins accessibles, essentiellement en amont du tronçon, mais aussi aux secteurs où les enjeux humains sont absents. Sur les quatre derniers secteurs, un protocole plus précis a été mis en place afin d'obtenir une hauteur précise des cicatrices de glace. À l'aide de la station totale robotisée Trimble, le point bas de la cicatrice est relevé puis géolocalisé à partir d'un DGPS Trimble. Ainsi, dans le but de spatialiser correctement les cicatrices dans un système d'information géographique, trois bornes temporaires par site ont été installées. La position de ces dernières a ensuite été relevée par le DGPS et la station totale robotisée puis elles ont été arrimées dans *Arcmap 10.6* grâce à l'outil *spatial adjustment*. L'erreur maximale est fixée à 0,06 mm. Le centre et le point le plus haut de la cicatrice sont calculés sur excel en ajoutant les longueurs mesurées sur le terrain. Ce protocole, réalisé dans les zones à enjeux pour les habitations et les infrastructures, a pour objectif de compléter la cartographie des zones inondables, mais aussi de mieux caractériser les

phénomènes d'embâcles de glace. Ces mesures précises permettent également de caractériser l'intensité des embâcles de glace à partir de l'estimation des zones inondées par celles-ci. Des embâcles de petite taille avec des hauteurs d'eau faible peuvent être considérés ainsi comme des phénomènes moins extrêmes dont l'impact potentiel sur le bois est limité.

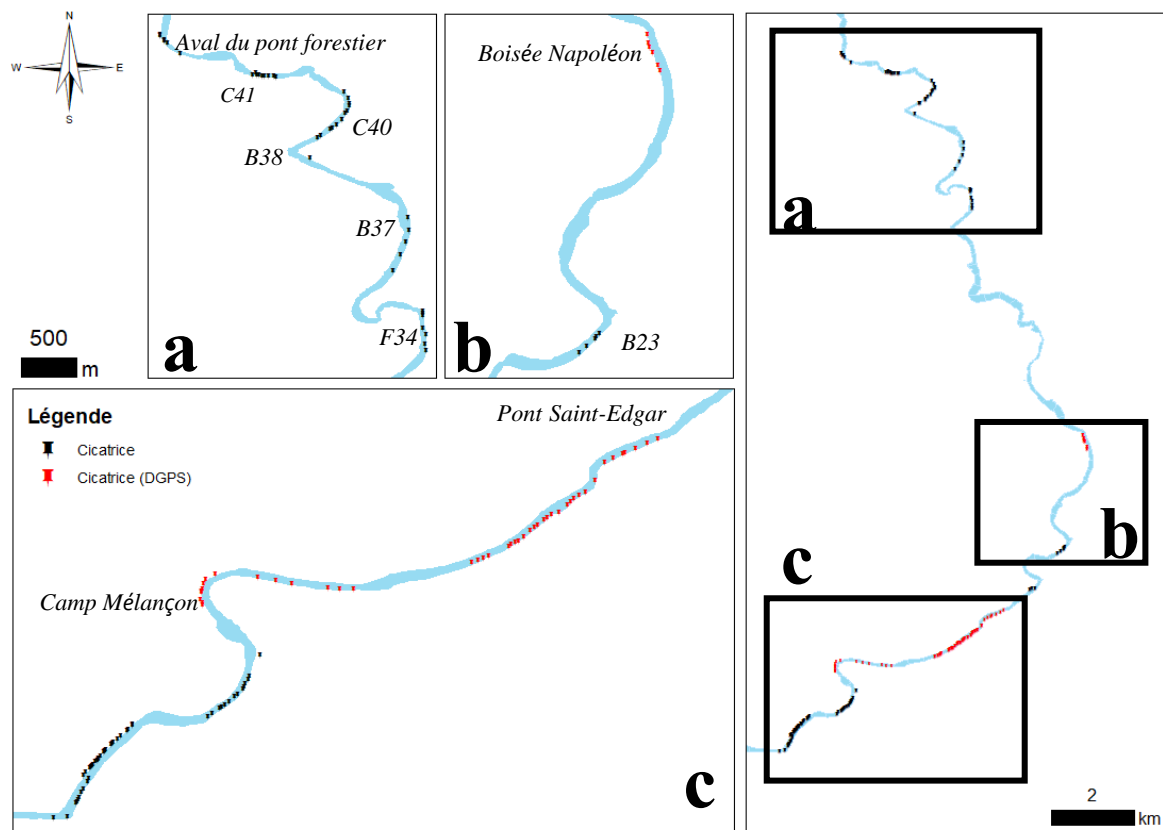


Figure 18. Localisation des secteurs relevés au GPS et au DGPS

3.4.3. Modèle de prédisposition aux embâcles de glace

Pour compléter les observations terrain et mieux localiser les secteurs à embâcles, le modèle de prédisposition de De Munck *et al.* (2017) a été appliqué sur l'ensemble du tronçon. Le modèle repose sur le calcul d'un indice intégrant la sinuosité et le rétrécissement comme facteurs géométriques de prédisposition aux embâcles, mais aussi les tributaires et les infrastructures. La sinuosité est calculée à partir de l'équation

proposée par Dutton (1999) et reprise par De Munck *et al.* (2017) et qui exprime une valeur de sinuosité comprise entre 0 et 1 et permet d'assurer une distribution des valeurs adaptées à de courts tronçons.

$$\text{Sinuosity}(S) = \sqrt{1 - \frac{1}{SV^2}} \quad (4)$$

Dans la formule SV correspond au rapport entre la distance curviligne entre deux points et la distance linéaire directe. Plus la valeur est proche de 1, plus la sinuosité est forte.

La mesure du rétrécissement (R) est réalisée à partir du rapport entre la largeur d'un segment et la largeur du segment en amont le plus large (Figure 19). Ce rapport s'effectue pour chaque segment dont la largeur est inférieure au segment en amont (section 1). Lorsque la largeur minimum est atteinte (section 4), et que le chenal s'élargit à nouveau, le prochain segment de référence pour le calcul du rétrécissement correspond au segment en aval précédant un nouveau rétrécissement (section 6). La valeur obtenue varie entre 0 et 1.

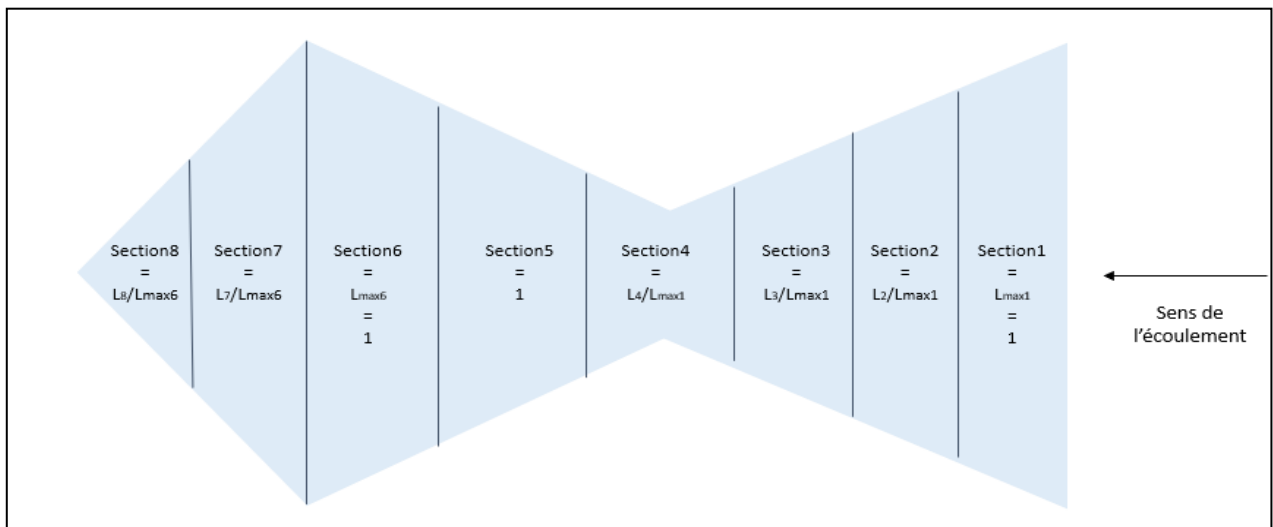


Figure 19. Schéma de l'approche utilisée pour calculer l'indice de rétrécissement, modifié à partir de Munck *et al.* (2017)

En complément, les auteurs ajoutent le rétrécissement associé aux tributaires et aux infrastructures. Pour la Petite-Cascapédia, les ponts de Saint-Edgar n'ont pas été

comptés, car ceux-ci disposent d'un pilier central aménagé pour diminuer le risque d'embâcle. D'ailleurs, depuis la réfection en 2010, aucune cicatrice récente n'a été observée sur le terrain. Le rétrécissement associé au tributaire est pris en compte en mesurant la largeur du tributaire puis en la reportant sur la largeur du segment dans lequel s'écoule le tributaire. De cette manière, une réduction de la largeur du chenal principal est appliquée, équivalente à la largeur du tributaire.

Pour le calcul de l'indice de prédisposition aux embâcles de glace (IPEG), les poids attribués par De Munck *et al.* (2017) ont été conservés. Ainsi la formule pour l'indice appliqué à chaque tronçon peut s'écrire de la manière suivante :

$$IPEG = (R_{0,6}) + (S_{0,4}) \quad (5)$$

Afin de simplifier la représentation des résultats, trois classes ont été distinguées en utilisant la valeur médiane et le troisième quartile. Ainsi, une forte prédisposition correspond à un indice supérieur à 0,30 ; entre 0,16 et 0,30 correspond à une prédisposition moyenne ; en dessous de 0,16 à une prédisposition faible.

3.5. OUVERTURE METHODOLOGIQUE : REALISATION D'UN MODELE DE PREDISPOSITION AUX EMBACLES DE BOIS

L'application du modèle De Munck *et al.* (2017) invite à transposer celui-ci pour évaluer la prédisposition des tronçons aux embâcles de bois. Cette réflexion est née grâce à la confrontation des méthodes pour les différents embâcles et d'une nécessité d'adapter la méthodologie pour évaluer les interdépendances des deux phénomènes d'embâcles avec les facteurs morphologiques.

La segmentation du chenal principal permet d'analyser les tronçons en fonction de variables environnementales et ainsi distinguer les facteurs favorables à l'accumulation de bois. À partir de l'observation des données et des résultats de Boivin *et al.* (2017b), un indice de prédisposition à l'accumulation du bois a été réalisé.

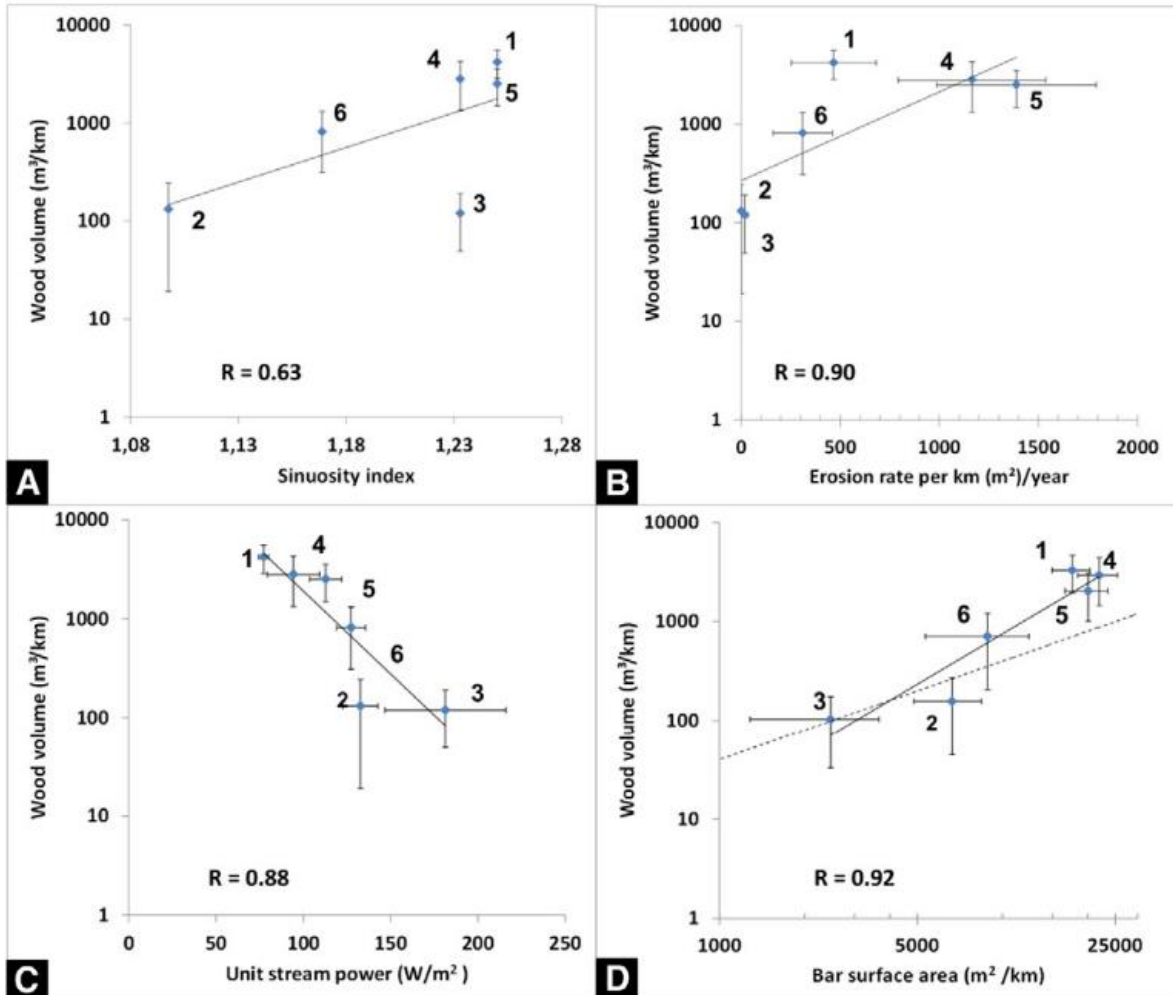


Figure 20. Relations entre la sinuosité (A), le taux d'érosion (B), la puissance spécifique (C) et la superficie des bancs (D) avec les volumes de bois. Source : Boivin et al. (2017b)

Sur la rivière Saint-Jean, les relations entre les volumes de bois et quatre paramètres géomorphologiques, la sinuosité (Figure 20A), les taux d'érosion (Figure 20B), la puissance spécifique (Figure 20C) et la surface des bancs d'accumulation (Figure 20D) ont été évaluées. Ces quatre facteurs environnementaux jouent un rôle prépondérant sur l'accumulation du bois (Boivin *et al.* 2017a). La relation négative avec la puissance spécifique souligne le rôle de la pente et de la largeur du lit sur l'accumulation du bois.

Le taux d'érosion correspond davantage à des zones de production du bois au sein de tronçons mobiles, avec de forts apports de bois.

L'indice est fondamentalement géométrique, à l'instar de l'indice de De Munck *et al.* (2017). Les composantes de l'indice sont calculées à partir d'informations extraites par photo-interprétation et digitalisation des formes fluviales. Ainsi, la superficie des bancs a été retenue comme critère dominant. La présence d'un banc d'accumulation signifie autant un élargissement associé à la formation du banc, mais aussi à une rupture de pente potentielle favorisant localement l'accumulation de sédiment. Pour éviter la répétition de variables dépendantes, la puissance spécifique n'a pas été prise en compte malgré sa forte relation. La volonté de réaliser un indice par photo-interprétation a amené à privilégier des variables telles que la surface des bancs, mais aussi la sinuosité du chenal. Malgré sa relation plus faible, la sinuosité demeure un facteur favorisant l'accumulation de bois (Piegay et Gurnell, 1997 ; Curran 2010).

La superficie des bancs (S_b) est extraite par vectorisation puis elle est mise en rapport avec la superficie totale (S_t) du tronçon afin d'obtenir un indice banc (IB) avec des valeurs comprises entre 0 et 1 :

$$IB = \frac{S_b}{S_t} \quad (6)$$

La sinuosité correspond aux valeurs extraites pour chaque tronçon lors de l'indice de prédisposition aux embâcles de glace de De Munck *et al.* (2017) à partir de l'équation suivante :

$$\text{Sinuosity}(S) = \sqrt{1 - \frac{1}{SV^2}} \quad (4)$$

Dans la formule SV correspond au rapport entre la distance curviligne entre deux points et la distance linéaire directe. Plus la valeur est proche de 1, plus la sinuosité est forte.

Du fait des relations identifiées par Boivin *et al.* (2017). Des poids différents ont été attribués à chacun des deux facteurs environnementaux. Ainsi, un poids de 0,6 pour les bancs d'accumulation, car il est considéré comme le facteur le plus discriminant, puis de 0,4 pour la sinuosité. L'étape finale revient à calculer la valeur de l'indice pour chacun des tronçons à partir de la formule suivante :

$$IPEBM = (IB_{0,6}) + (S_{0,4}) \quad (7)$$

Afin de simplifier la représentation des résultats, trois classes sont proposées en utilisant la valeur médiane et le troisième quartile. Ainsi, une forte prédisposition correspond à un indice supérieur à 0,43 ; entre 0,25 et 0,43 correspond à une prédisposition moyenne ; en dessous de 0,25 à une prédisposition faible. Il a été fait de même pour comparer les volumes de bois cumulés par segment de 250 mètres avec une valeur médiane de 17,15 et un troisième quartile de 69,11.

3.6. VIDEOGRAPHIE

Pour répondre aux questions sur l'impact relatif des embâcles de glace sur la mobilité événementielle du bois, un dispositif de trois caméras a été installé sur la rivière au niveau d'un tronçon sensible aux embâcles de glace (Figure 21). Un tel dispositif permet d'obtenir des débits ligneux en fonction des événements hydroclimatiques (Boivin *et al.*, 2017a). Une caméra de surveillance en continu a été installée en amont du tronçon, celle-ci enregistre des images 24h/7j. Puis en aval, deux autres caméras de chasses Reconyx enregistrent des images toutes les trente minutes. Une première caméra est focalisée sur le méandre et fait face au lit de la rivière tandis que le champ de la seconde est placé perpendiculairement au lit de la rivière. Le pas de temps a été choisi en fonction

des données collectées par Kramer et Wohl (2014) pour des évènements en eau libre. Les autrices ont en effet noté que des images prises toutes les quinze minutes permettent d'obtenir un débit ligneux représentatif pour une crue. Ainsi un pas de temps de 30 minutes a été choisi, car le rythme des embâcles de glace est plus lent que celui des évènements en eau libre. Cependant depuis l'installation du dispositif à l'automne 2019 et son exploitation jusqu'en avril 2021, aucun évènement d'embâcle de glace n'a été enregistré sur le tronçon surveillé.

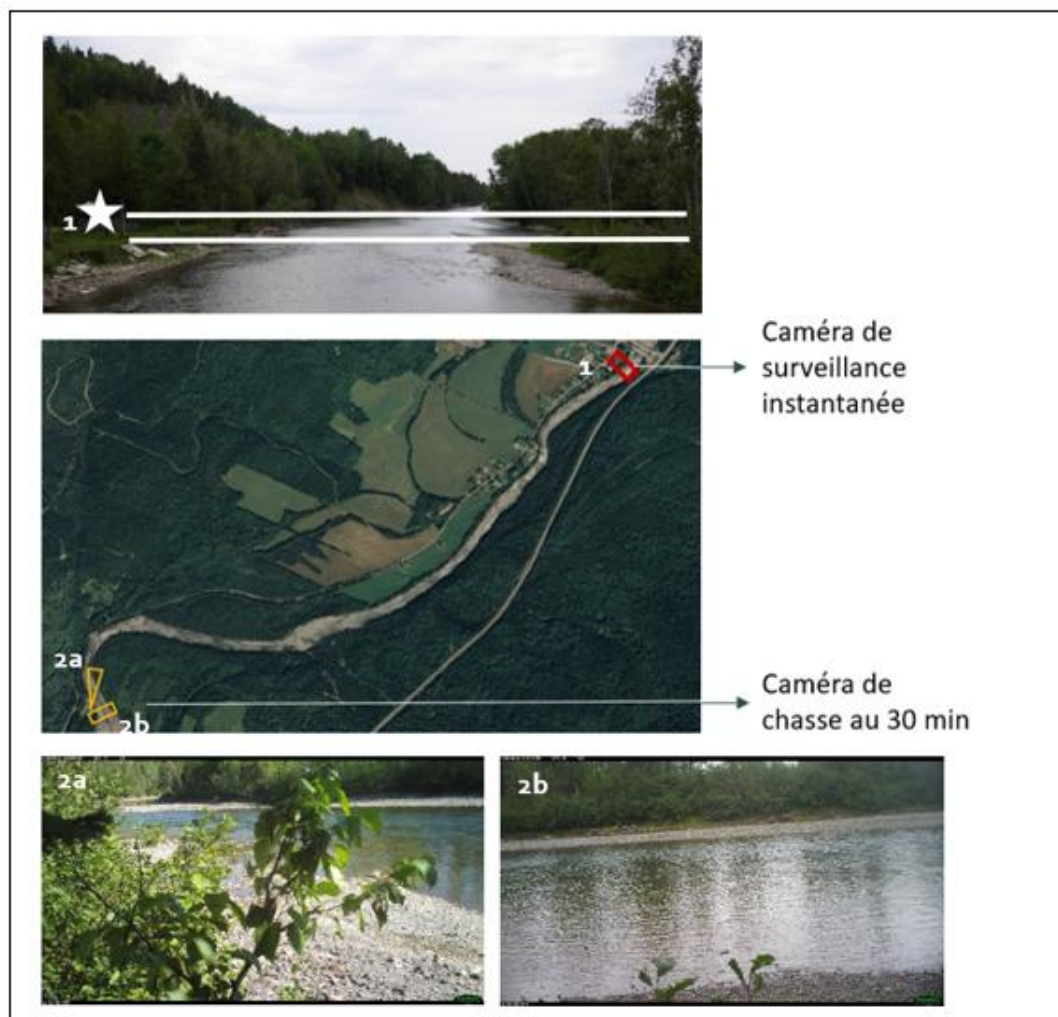


Figure 21. Position des caméras

CHAPITRE 4 : RESULTATS

Le chapitre décline les résultats visant à évaluer l'impact relatif des embâcles de glace sur la mobilité du bois face à l'influence des processus géomorphologiques et des crues en eaux libres. La première partie expose l'analyse des trajectoires morphologiques du cours d'eau, par tronçons homogènes, sur les soixante dernières années. Les résultats des relevés topographiques et des analyses par photo-interprétation pour les projets de cartographies des zones inondables et HGM2 sont détaillés, ainsi que l'évolution des débits maximaux. La seconde partie s'intéresse à la distribution spatiale du bois et à ses évolutions interannuelles. Elle est basée sur l'inventaire systématique des embâcles de bois en 2019 et 2020. Enfin, la troisième partie documente la dynamique glacielle de la rivière sur les trente kilomètres à l'étude. La distribution des cicatrices glacielles, ainsi que les résultats de l'indice de prédisposition aux embâcles de glace (De Munck *et al.*, 2017) y sont présentés, ainsi que la distribution des cicatrices glacielles.

4.1. TRAJECTOIRES HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES

4.1.1. Trajectoire hydrogéomorphologique longitudinale : le dynamisme de la rivière Petite-Cascapédia.

A l'échelle de l'ensemble de la rivière, la variabilité longitudinale des indicateurs morphologiques est contrastée. Les indices de sinuosité, de largeur ou encore d'érosion illustrent la réponse morphologique du cours d'eau. Entre 1963 et 2016, la sinuosité ne varie pas, avec seulement une diminution de 296 mètres du linéaire du talweg (Figure 22) sur plus de 30 kilomètres de linéaire.

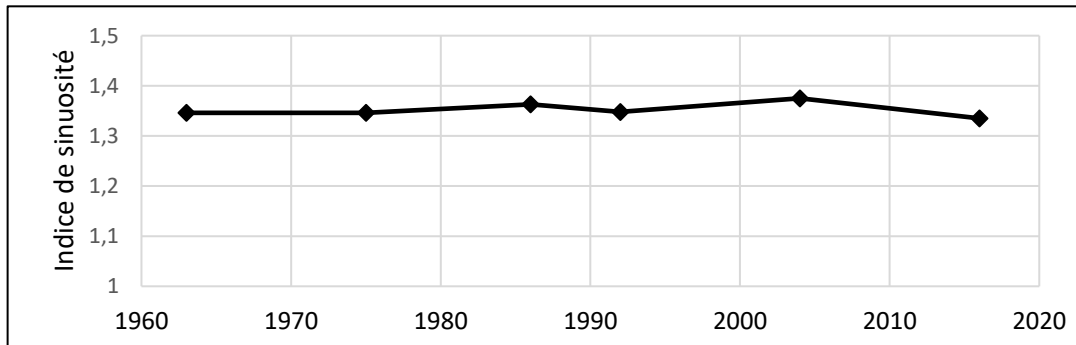


Figure 22. Evolution de l'indice de la sinuosité pour l'ensemble de la Petite-Cascapédia

La largeur moyenne sur l'ensemble du cours d'eau a quant à elle diminué au début de la période pour ensuite remonter et retrouver des niveaux plus proches de la situation en 1963. De 99,8 mètres en 1963, la largeur moyenne atteint 91,2 mètres en 2016 (Figure 23). En 1975, une diminution des largeurs a abaissé cette moyenne à 86,5 mètres. La largeur moyenne de la rivière augmente depuis avec l'élargissement de certains secteurs élevant la moyenne des largeurs à 92,28 en 1986, puis demeure stable entre 1992 et 2016.

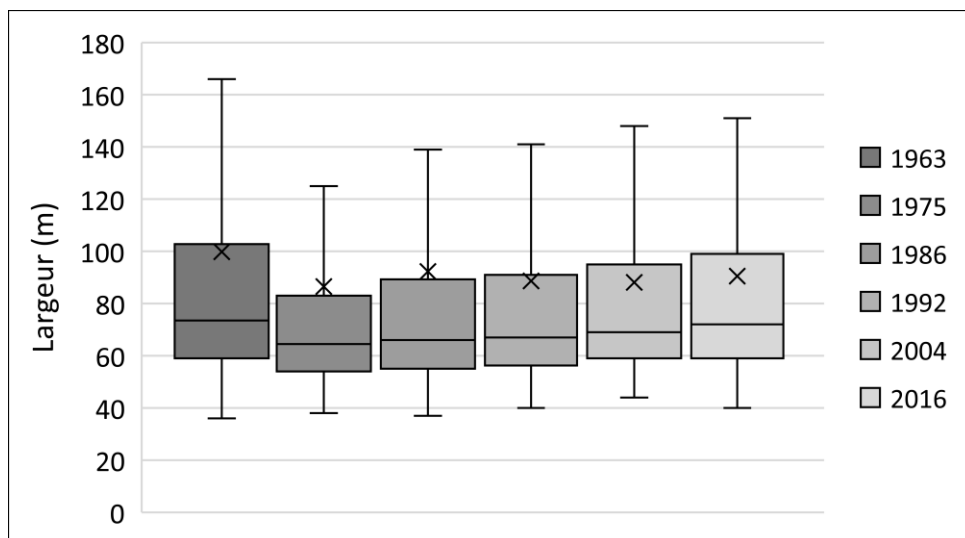


Figure 23. Largeurs du lit par année, entre 1963 et 2016

L'augmentation des largeurs se distingue dans des secteurs précis à l'intérieur des tronçons 4 et 2, puis dans le tronçon 1 dans l'estuaire (Figure 24). Ces secteurs ont la plus

forte variation de largeur entre 1963 et 2016. Ils se distinguent aussi par des valeurs plus élevées d'érosion latérale sur l'ensemble du profil longitudinal. Il s'agit de tronçons divaguant où la rivière est dynamique et multiplie les chenaux secondaires. L'analyse des trajectoires par tronçon homogène illustre mieux ces variabilités locales.

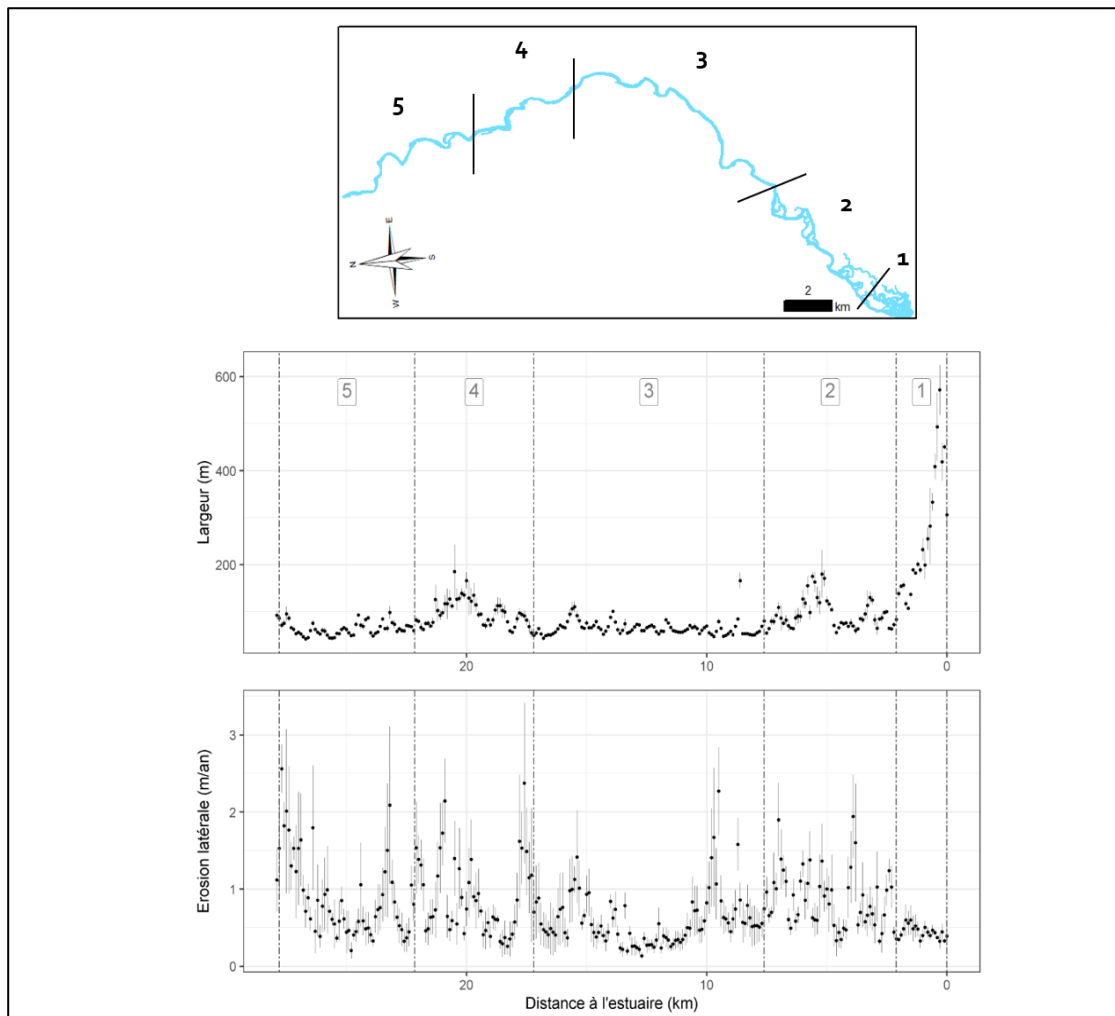


Figure 24. Variabilité longitudinale de la largeur et des taux d'érosion entre 1963 et 2016, adaptée de Maltais et al., 2021

4.1.2. Trajectoire hydrogéomorphologique des tronçons homogènes

Les tronçons homogènes identifiés ont des trajectoires différentes entre 1963 et 2016 (Figure 25). A une échelle plus fine, les tronçons se distinguent les uns des autres. Ainsi, la trajectoire historique du tronçon 5 est marquée par peu de changements significatifs. Les taux d'érosion sont stables avec cependant une augmentation entre 1975 et 1986 puis entre 1992 et 2004 pour passer légèrement au-dessus de 1 mètre par année au lieu de 0,6 entre 1963 et 1975. Le tronçon 3, avec des taux d'érosion inférieurs à 1 mètre par année sur l'ensemble de la période, dispose d'une trajectoire similaire, sans variation de ses largeurs. Pour ces deux secteurs confinés, les largeurs ne changent que de quelques mètres avec des variations très localisées.

Les tronçons divagants 4 et 2 ont une trajectoire historique plus contrastée (Figure 25). En amont, le tronçon 4 connaît des modifications de sa largeur avec une diminution en 1975 et une augmentation en 2004 pour retrouver les niveaux du début de la période. La réduction des largeurs est notamment suivie par une augmentation subite des taux d'érosion entre 1975 et 1986 à 2,5 mètres par an. Les taux redescendent par la suite, mais demeurent élevés, supérieurs à 1 mètre par année. Les taux d'érosion du tronçon 2 augmentent aussi sur la période de 1975 à 1986 pour atteindre 1,3 mètre par an puis se stabilisent à 90 centimètres par an entre 1992 et 2016. La largeur diminue en 1975 pour atteindre une moyenne d'environ 60 mètres contre 90 mètres. Contrairement au tronçon 4, les largeurs augmentent rapidement avec des variations importantes sur l'ensemble du tronçon en 1986 et 1992.

Enfin, le tronçon 1 montre une forte augmentation des taux d'érosion entre 1986 et 1992 avec un rythme de 70 centimètres par an, suivi d'une période de stabilité jusqu'en 2016 (Figure 25). Cependant, les taux d'érosion sont faibles sur toute la période, relativement aux taux observés en amont. Entre 1963 et 1975, puis entre 1992 et 2016, les taux sont inférieurs à 40 centimètres par an. Globalement, la largeur moyenne à l'embouchure demeure stable avec une réduction des maximums entre 1963 et 1975.

Ces tendances sont observables entre 2004 et 2016 en comparant localement, l'évolution des chenaux entre 2004 et 2016 (Figure 26). La superposition des deux permet d'identifier la part du chenal qui est demeurée stable entre les deux années, et la part qui a été érodée ou reprise par la végétation. Entre 2004 et 2016, sur le tronçon 4, la surface érodée par migration latérale représente 21% des surfaces du chenal en 2016. Il s'agit de zones érodées par le chenal qui n'étaient pas en eau en 2004.

Dans ce secteur, 25% du chenal en 2004 a été repris par la végétation et ne fait plus partie du chenal actif en 2016. Pour le tronçon 2, les valeurs sont sensiblement plus élevées. La migration latérale représente 28% du chenal actif en 2016 et 26% ont été repris par la végétation. Sur ce tronçon, seuls 46% du chenal est resté stable entre les deux dates. Comparativement, la surface stable du chenal représente 70% de la surface totale dans le tronçon 5, 84% dans le tronçon 3 et 73% dans l'estuaire. Les surfaces érodées entre les deux dates correspondent à des surfaces végétalisées et constituent des zones de production de bois mort.

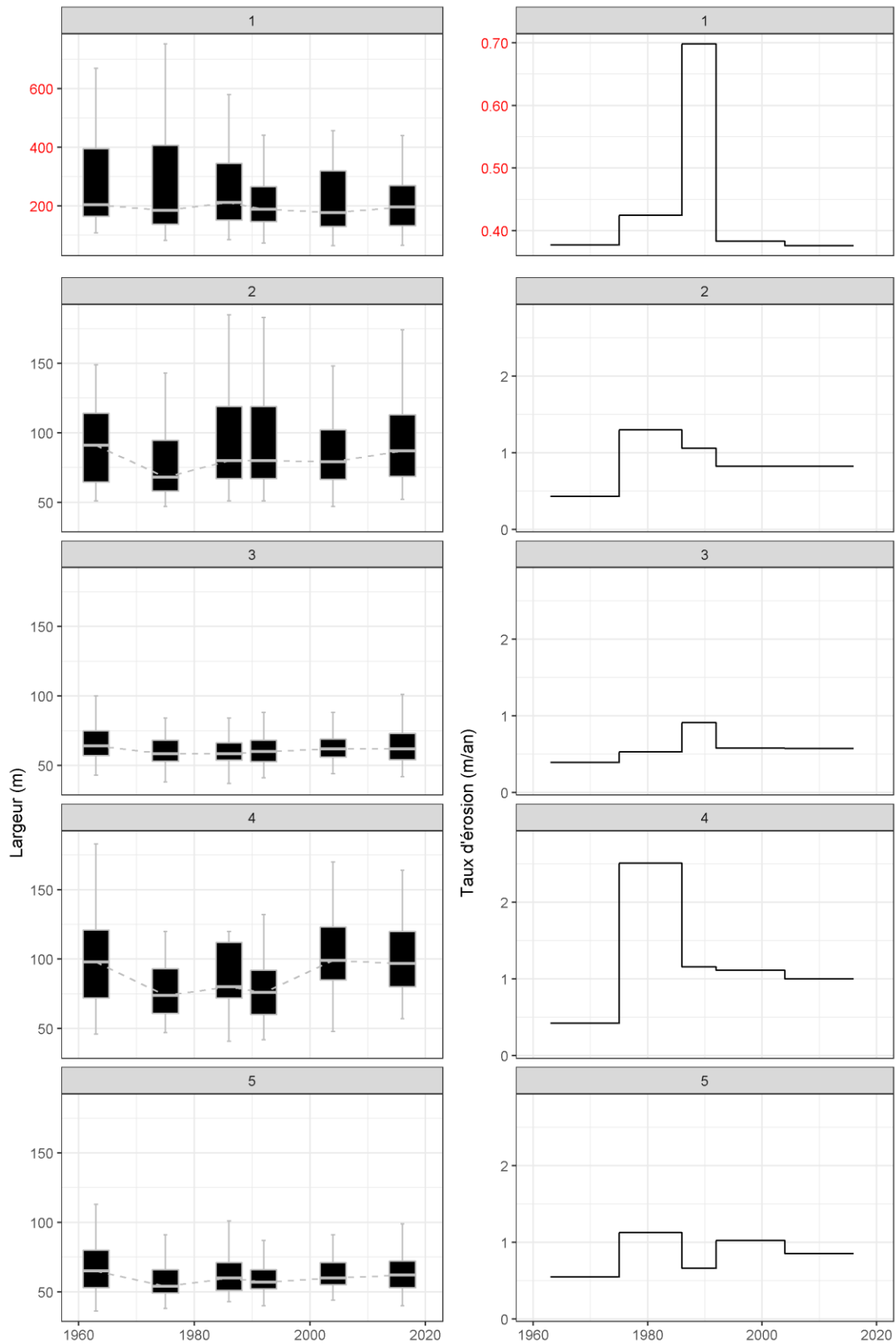


Figure 25. Variation de la largeur et des taux d'érosion par tronçon homogène entre 1963 et 2016. Adaptée de Maxime Maltais, 2021

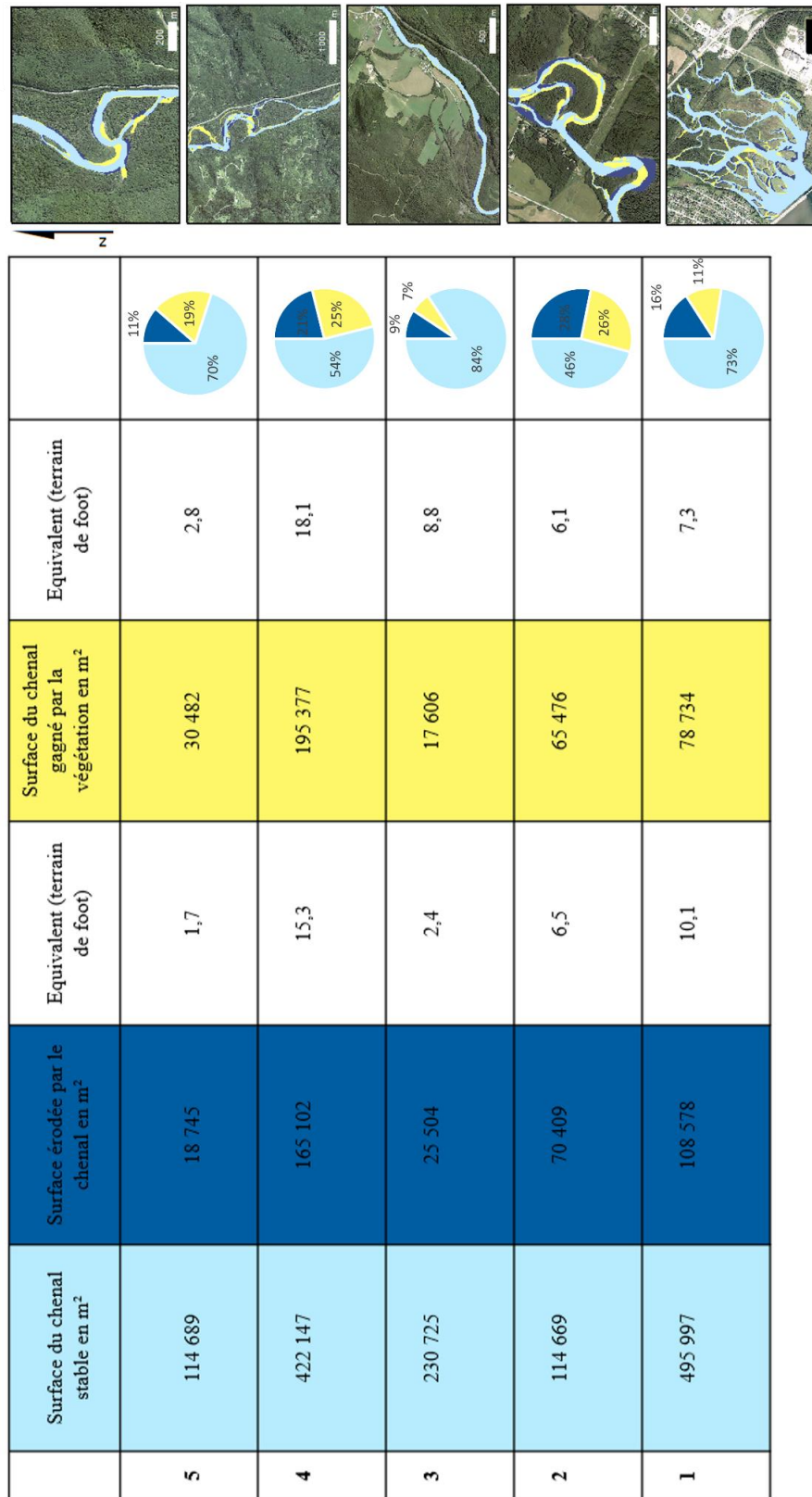


Figure 26. Evolution du chenal par secteur entre 2004 et 2016

Pour les tronçons 2 et 1, les relevés topographiques de 2013 et de 2020 montrent une tendance à l'incision sur le secteur aval de la rivière (Figure 27). Le taux d'incision atteint dans certains secteurs plus d'un mètre et jusqu'à 1,5 mètre. Il s'agit du changement morphologique le plus remarquable dans les secteurs du tronçon 4. L'impact d'une telle incision est une végétalisation du chenal plus importante, plus 26 % entre 2004 et 2016 dans le tronçon 2 et plus 11 % dans le tronçon 1 (Figure 26).

À l'embouchure, un secteur d'incision, de moins 1,5 mètre, entre 2013 et 2020 est associé au raft de bois. L'incision est suivie par une aggradation d'environ 0,5 mètre sur 300 mètres en aval. Le schéma incision puis aggradation se répète également 4 kilomètres en amont avec cette fois-ci un changement dans le positionnement du chenal principal, plus rectiligne et étroit, concentrant la majorité du débit. Source de sédiment, ce changement de chenal peut être lié à de l'aggradation quelques mètres en aval. Enfin, en amont, le secteur incisé de 1,5 mètre en 7 ans est associé à une fermeture d'un chenal secondaire par une mégastructure de bois entraînant une incision importante au pied de cet embâcle.

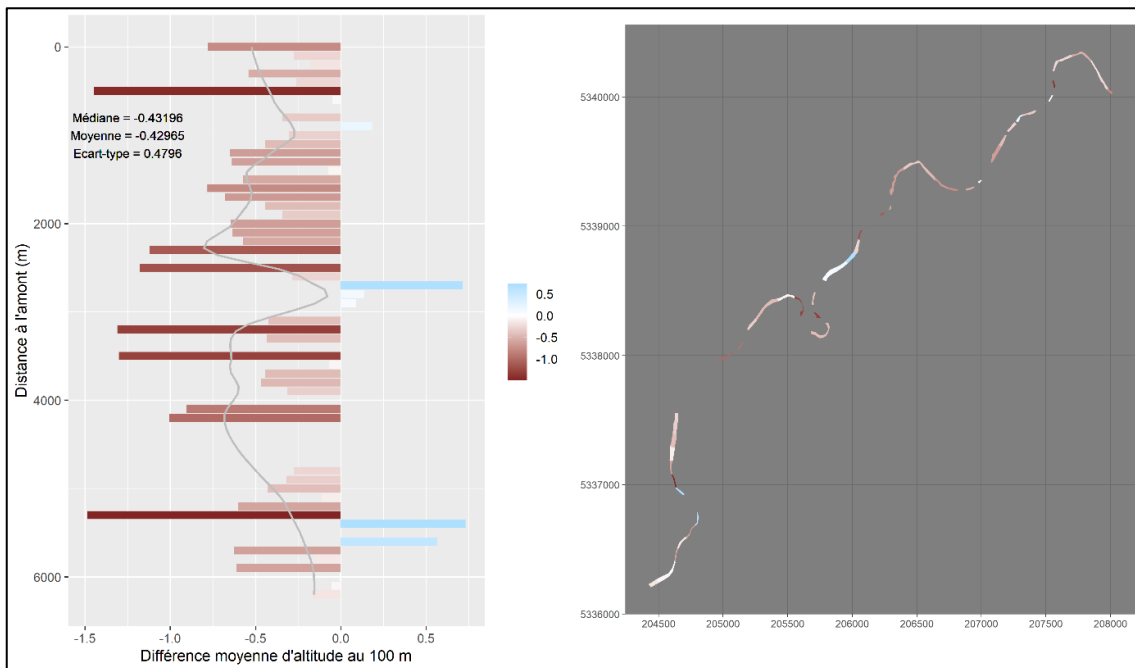


Figure 27. Différence altimétrique du lit mineur en aval de la Petite-Caspédia entre 2013 et 2020. Source J.F. Beaudoin

4.1.3. Trajectoire hydrologique.

Les débits maximums (Figure 28) permettent d'éclairer les trajectoires hydrogéomorphologiques. Ainsi, les périodes de 1975 à 1986 et de 2004 à 2016 ont connu une activité hydrologique plus importante avec les débits maximums élevés : 529 m³/s en 1979, 613 m³/s en 1981, 541 m³/s en 2004, 505 m³/s en 2007 et 518 m³/s en 2014. La période de 1975 à 1986 correspond à la période qui a connu les changements morphologiques les plus importants, avec notamment d'importants taux d'érosion. Les changements observés dans le tronçon 1 et 2 à partir des relevés topographiques ont lieu pendant une période d'activité hydrologique intense avec la crue de 2014 puis la crue de 2017 à 638 m³/s. Il pourrait donc être lié à ces débits élevés.

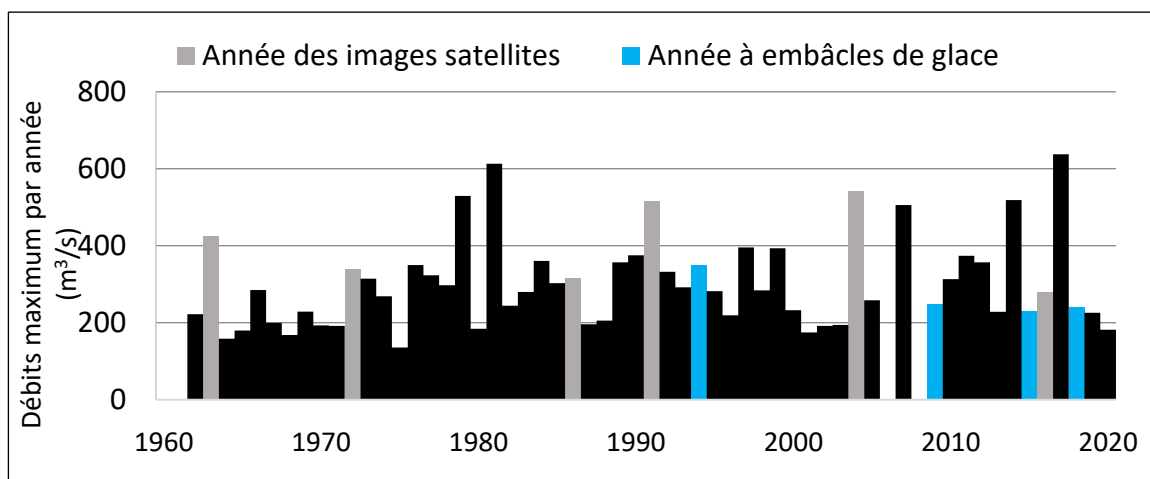


Figure 28. Débit maximal annuel entre 1962 et 2021

En 2020, entre les deux inventaires de bois, le débit maximal a été atteint en mai à 181,7 m³/s. Il s'agit de hautes eaux faibles, correspondantes à un niveau de 2/3 pleins bords, illustrés sur la photographie de caméra Reconyx le 22 mai 2020 (Figure 29). Les données de la crue de décembre n'ont pas été incluses, car hors du cadre temporel de la présente étude, mais avait atteint un pic de 623 m³/s.



Figure 29. Photographie Reckonyx du 22 mai 2020

4.2. CARACTÉRISATION DES EMBACLES DE BOIS

Les inventaires annuels ont pour objectif de mettre en lumière les patrons de distribution spatiale du bois dans la rivière Petite-Cascapédia et leur évolution dans le temps. Cette évolution permet notamment d'examiner et de caractériser les modes d'accumulations et de transports au sein du chenal selon les événements hydrométéorologiques, hydrologiques ou environnementaux survenant dans le bassin versant. Les résultats présentés ici exposent un portrait des embâcles de bois dans la Petite-Cascapédia, distinguent les zones d'accumulation de bois mort et détaillent les variations interannuelles de ces accumulations le long du corridor fluvial.

4.2.1. Portrait des embâcles

Les inventaires de bois documentent 553 embâcles en 2019 et 500 en 2020 avec un volume total de 12 325 m³ et de 12 138 m³ (Figure 30). Le nombre d'embâcles au sein de la rivière a diminué de 9,6% entre 2019 et 2020. Globalement, une légère augmentation du volume des embâcles peut être observée avec une moyenne de 22,49 m³ en 2019 contre

24,27 m³ en 2020 (Figure 31). Peu de variations se distinguent entre 2019 et 2020 sur les mesures morphométriques (longueur, largeur et hauteur). En 2019, 50% des embâcles avaient un volume inférieur à 3,49 m³ ; en 2020, la valeur médiane augmente à 4,68 m³. Seule la longueur des embâcles augmente sensiblement avec 75% des embâcles d'une longueur inférieure à 22,92 mètres en 2020 contre 17,8 mètres en 2019.

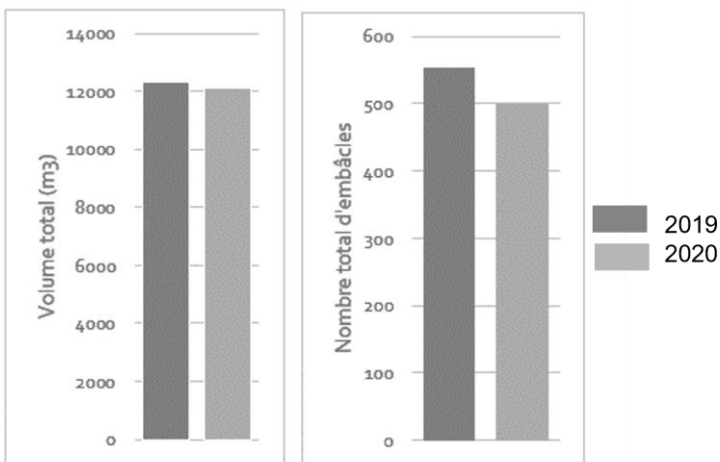


Figure 30. Evolution du volume total de bois et du nombre d'embâcles entre 2019 et 2020



Figure 31. Embâcle d'un volume équivalent au volume moyen des embâcles en 2020

Sur les 30 kilomètres, plus d'une dizaine d'embâcles supérieurs à un volume de 200 m³ ont été répertoriés. Sur la Figure 32, les dix plus imposants embâcles sont positionnés d'amont en aval, avec quatre de ces derniers obstruant complètement des chenaux secondaires majeures. Du fait de leur taille, ces embâcles sont aisés à suivre d'une année à l'autre, mais entre 2019 et 2020 le volume des embâcles de bois a peu évolué. Du fait de leur position en entrée de chenal secondaire plus ou moins actif, ces embâcles sont stables.

L'embâcle le plus en amont de 312 m³ correspond à un embâcle de méandre obstruant un ancien chenal secondaire encore en eau (Figure 32). L'appel d'eau généré

par les débordements dans celui-ci constitue un piège pour les embâcles de bois. Cette configuration se retrouve aussi en aval avec un embâcle de 243 m³ et un autre de 542 m³. L'embâcle de plus 500 m³ se situe à la frontière avec la plaine alluviale à l'entrée d'un ancien chenal. Le 4^e embâcle en partant de l'amont correspond à un embâcle de débordement situé au départ de la berge convexe du méandre. Plus en aval, la mégastructure de 1119 m³, obstruant de bout en bout un chenal secondaire de 100 mètres de long, a été comptée dans sa globalité. La structure de 636m³ en aval se situe dans le chenal, elle aussi à l'entrée d'un chenal secondaire sur une longueur de 148 mètres. Il s'enfonce dans le chenal sur une vingtaine de mètres. Plus bas, l'embâcle de 262 m³ se situe dans la concavité d'un méandre et est également associé à un débordement dans la plaine alluviale. Les deux suivants de 474 m³ et de 308 m³ sont quant à eux des embâcles en tête d'île végétalisée.

Dans l'ensemble, les embâcles ont tous augmenté de volume entre les deux inventaires, notamment en aval. Les deux embâcles d'obstacles en tête île (embâcles 8 et 9) ont augmenté de 9,1% et de 3,2%. Sur la partie amont de la rivière, seule la première structure a augmenté, passant de 312 m³ en 2019 à 366 m³ en 2020. Les trois structures suivantes ont respectivement diminué de 3,7%, 3,1% et de 21,2%. Partiellement divisé, l'embâcle de 339 m³ en 2019 a été compté comme une structure plus petite de 267 m³, individualisés d'autres embâcles, moins stables.

Enfin, la structure avec une forte augmentation est la mégastructure en aval. Entre 2019 et 2020, cet embâcle a gagné 197 m³, passant de 1019 m³ à 1216 m³, celui-ci obstrue désormais la totalité du chenal principal (Figure 33). De sa situation, et étant que partiellement ancrée, la structure dans l'embouche est la plus susceptible de se démanteler et se déplacer vers l'aval où se situe un pont.

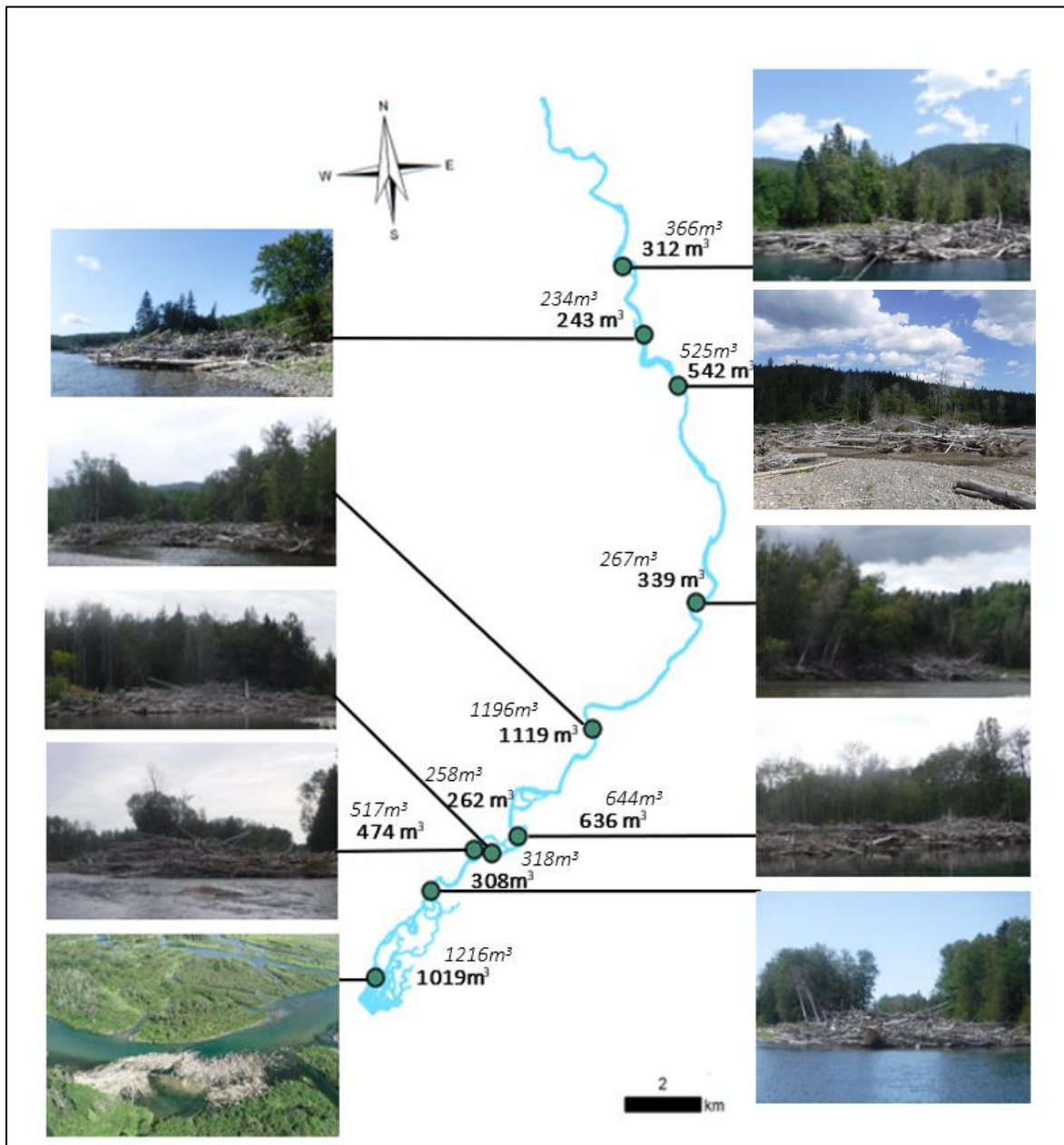


Figure 32. Localisation des plus gros embâcles et leur volume en 2019 (gras) et 2020 (italique)



Figure 33. Photographie drone du raft en aval, 2019 (gauche), 2020 (droite), source M.Boivin

Les embâcles de berges ou *in situ*, issus de l'érosion des berges et composé majoritairement de bois non mobilisés représentent 28% des embâcles en 2019 et 2020 (Figure 34). Généralement de petite taille, cela correspond à seulement 5% des volumes de bois en 2019 et 7% en 2020. Les accumulations de bois s'effectuent principalement sur les bancs. En 2019, 40% des embâcles étaient situés sur des bancs d'accumulation suite à leur transport vers l'aval, puis 52% en 2020. Il s'agit du mode d'accumulation principale avec des tailles très variées et correspond à 32% du volume de bois total en 2019 et 34% du volume en 2020. Contrairement au type précédent, les embâcles de transport à l'entrée de chenaux secondaires représentent seulement 5% des embâcles au total, mais du fait de leur taille imposante, ces embâcles représentent 26% du volume total. En effet, deux tiers des dix plus grandes structures sont associés à des chenaux secondaires. Les embâcles liés au débordement en plaine alluviale correspondent à 24% du nombre total d'embâcles en 2019. Perchés sur la partie supérieure des berges ou perdus dans les espaces récemment gagnés par la végétation, ces embâcles comptent pour 20% du volume total. Peu mobile, la diminution entre 2019 et 2020 de ce type d'embâcle s'explique par une différence d'inventaire des embâcles de bois entre les équipes. Souvent dissimulés sous la végétation, certains embâcles ont pu être jugés comme sortis à court terme du lit actif. Le nombre d'embâcles situés en tête d'obstacles est resté stable entre

2019 et 2020, mais la taille de ces derniers a augmenté passant de 9% du volume total à 11%.

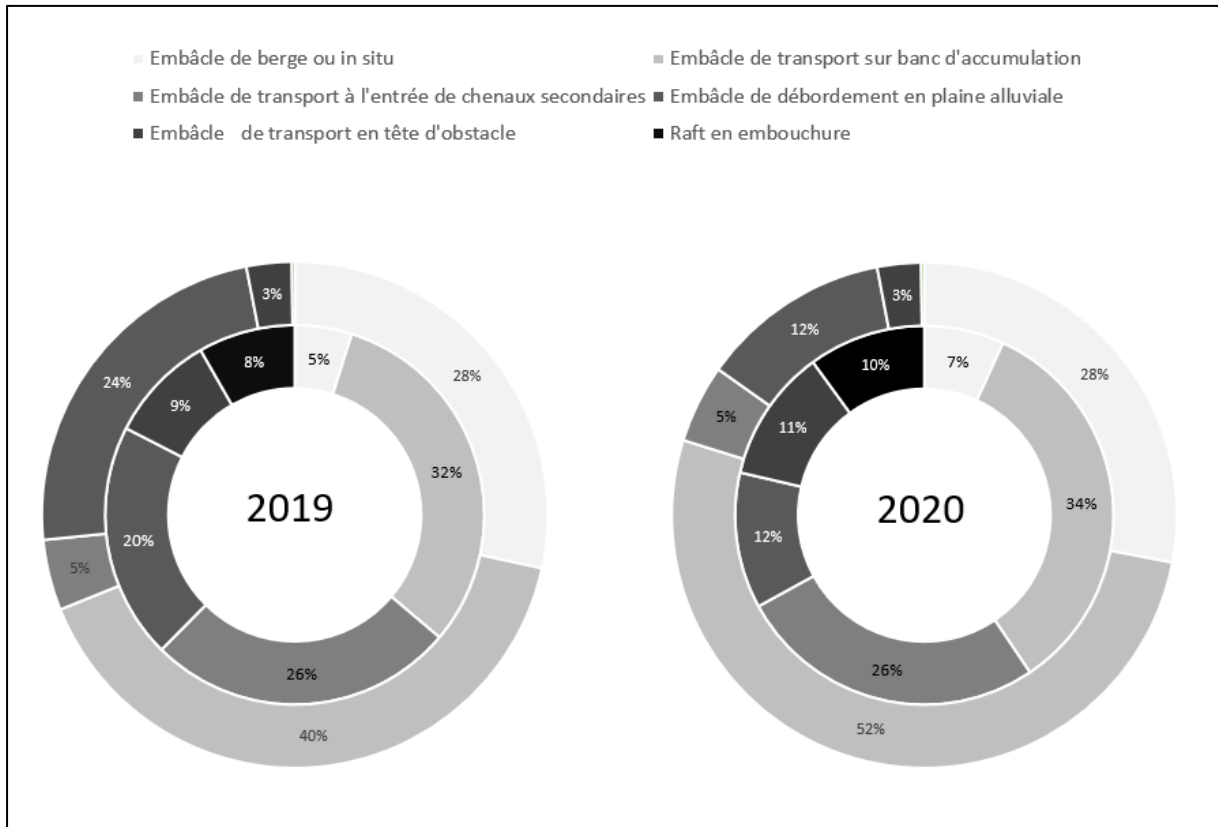


Figure 34. Part des différents types d'embâcles dans le nombre total d'embâcles (anneau extérieur) et dans le volume total (anneau intérieur)

4.2.2. Distribution spatiale du bois et évolution interannuelle

Sur les 30 kilomètres inventoriés, la distribution du bois est très hétérogène d'amont en aval (Figure 35). Le tronçon 5 contient environ 10% du volume total de bois, tandis que le tronçon 4 en contient plus de 30%, essentiellement sur quelques kilomètres. Le tronçon 3, plus long, contient un peu moins de 30% avec une répartition assez homogène sur toute sa longueur. Seulement la superstructure située en aval du tronçon représente à elle seule un tiers du volume total de bois. Le tronçon 2, plus court que les

précédents, contient lui 20% du volume. Enfin, l'embouchure avec le raft contient 10% sur les deux derniers kilomètres de la rivière.

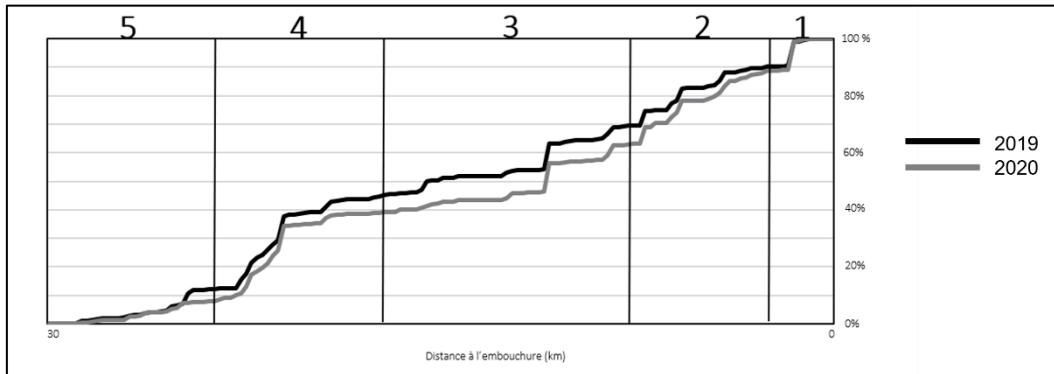


Figure 35. Volume cumulé d'amont en aval en 2019 et 2020

En termes d'évolution interannuelle (Figure 36), le tronçon 5 a connu le plus de changement entre 2019 et 2020 avec une diminution de l'ordre de 26% du volume de bois et une différence de 77 embâcles. Cette différence peut être reliée à la réduction du nombre d'embâcles de débordement et aussi à la diminution du nombre d'embâcles de petite taille. En 2019, la moyenne du volume des embâcles sur le tronçon 5 était de 9,17 m³ contre 14,49 m³ en 2020. Pour le tronçon 4, le volume de bois a diminué de 5% avec 20 embâcles en moins. Le tronçon trois ne connaît pas de forte variation des volumes de bois entre 2019 et 2020, mais le nombre d'embâcles augmente avec 11 embâcles supplémentaires recensés en 2020. Le volume de bois ainsi que le nombre d'embâcles augmentent davantage au sein du tronçon 2. Les volumes en 2019 sont de 3097 m³ contre 3920 m³ soit une augmentation de 27% pour 39 embâcles recensés en plus. L'augmentation des volumes dans l'embouchure est faible et correspond exclusivement à l'augmentation de la taille du raft en aval.

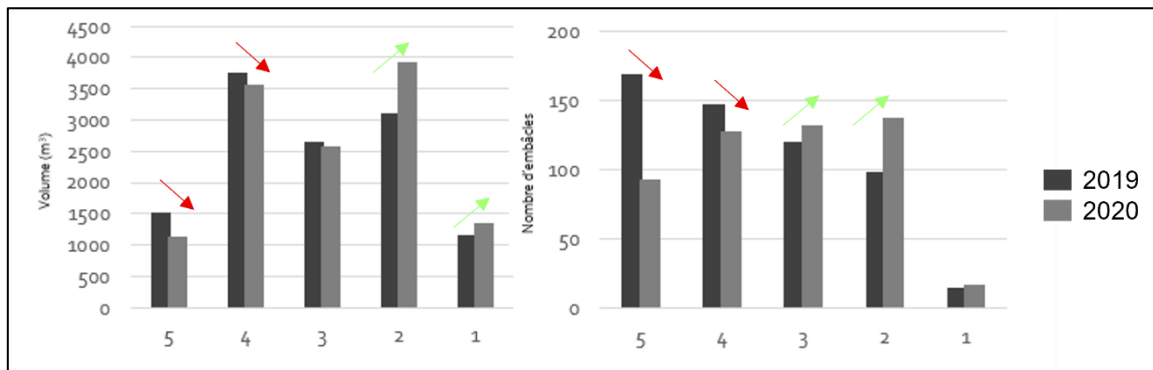


Figure 36. Évolution entre 2019 et 2020 des volumes et du nombre d'embâcles par tronçon homogène

Plus localement, au sein des différents tronçons, on remarque une augmentation des volumes dans les secteurs à méandres (Figure 37) notamment au sein des secteurs 5 et 2 avec plus de 100 m³ de bois accumulés entre les deux années. Autrement, les secteurs caractérisés par des bancs d'accumulation tels que le secteur 4 et certains secteurs du tronçon 3 et 2 voient leur volume total diminuer de plusieurs centaines de mètres cubes.

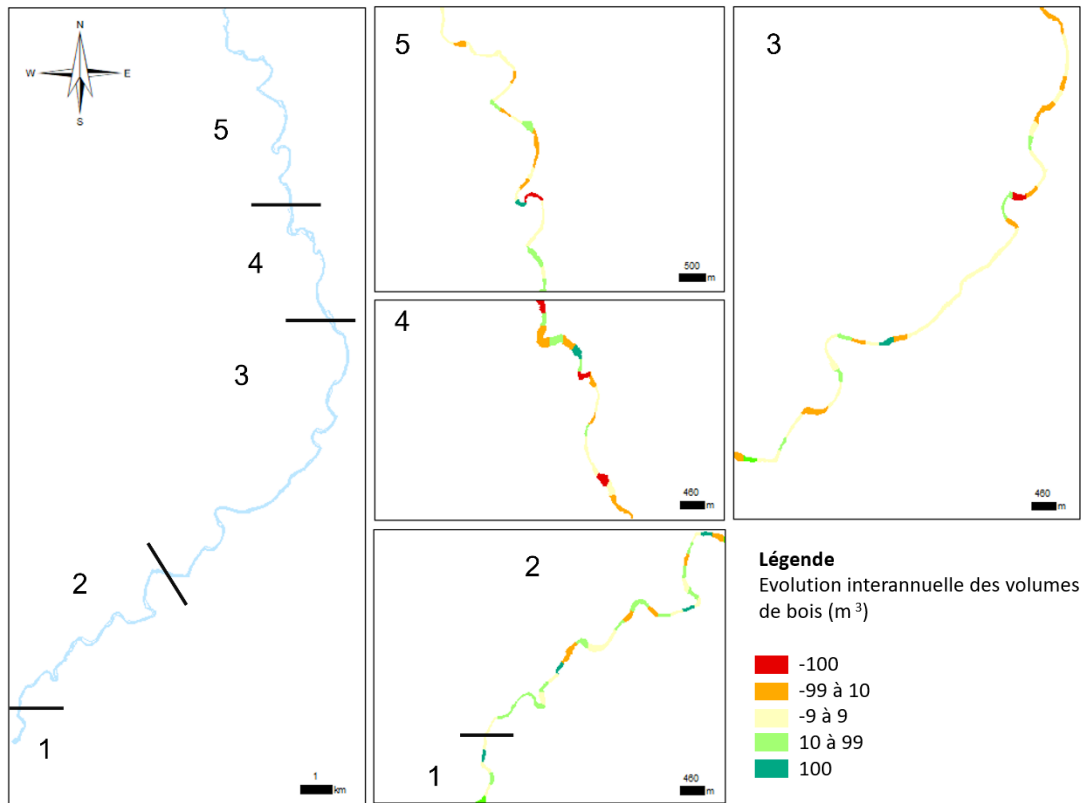


Figure 37. Evolution des volumes de bois par tronçon de 250m entre 2019 et 2020

4.3. CARACTÉRISATION DE LA DYNAMIQUE GLACIELLE

4.3.1. Inventaire des cicatrices

Les inventaires ont permis de mesurer 152 cicatrices soit un total de 760 cicatrices observées sur les 30 kilomètres de rivière. Les cicatrices sont réparties dans les tronçons 5 et 3 avec deux cicatrices isolées dans les secteurs 4 et 2, indice limité d'une dynamique glacielle active dans ces tronçons.

La taille des cicatrices par secteur permet d'estimer l'amplitude des embâcles de glace. La plus petite cicatrice mesurait 4 centimètres et la plus grande 196 cm, la moyenne globale est de 49 centimètres. Ainsi, sur les 9 kilomètres du tronçon 5, 2,2 kilomètres comptaient 220 cicatrices environ (44 recensées). La moyenne de la taille des cicatrices

dans le tronçon 5 est de 44,6 centimètres avec un maximum de 180 centimètres (Figure 38). La taille des cicatrices est assez homogène et a le même aspect suggérant un âge rapproché. Il y avait peu de cicatrices d'âges différents suggérant une dynamique glacielle peu active dans la période récente.

Les inventaires dans le tronçon 3 ont montré au contraire plus d'irrégularités. Sur 12 kilomètres, 5,8 kilomètres sont jalonnés de 530 cicatrices (106 mesurées). La moyenne des cicatrices dans ce tronçon est de 51 centimètres. Les indices sur l'âge et l'intensité des événements varient selon les secteurs. Les 4 premiers secteurs en amont ont des cicatrices anciennes, et des tailles moyennes inférieures ou égales à la moyenne du tronçon. Les cicatrices du cinquième secteur, situé en amont d'un méandre, mesurent en moyenne 62 centimètres avec un maximum de 196 centimètres. Les cicatrices situées dans ce secteur et les 4 kilomètres en amont sont récentes et correspondent aux événements de 2015 et 2018. En aval dans les deux derniers secteurs, la taille et le nombre de cicatrices sont aussi sensiblement plus haut que la moyenne avec des cicatrices d'aspects similaires à celles associées à l'évènement de 2015 en amont.

Les inventaires dans certains secteurs d'intérêt, réalisés par relevés DGPS et par station totale ont pour objectif principal de déterminer les zones potentiellement inondées par embâcles de glace à partir de la hauteur des cicatrices. Ces informations précises sur la hauteur permettent également de renseigner sur l'ampleur des événements et donc sur leur impact relatif sur la mobilité du bois.

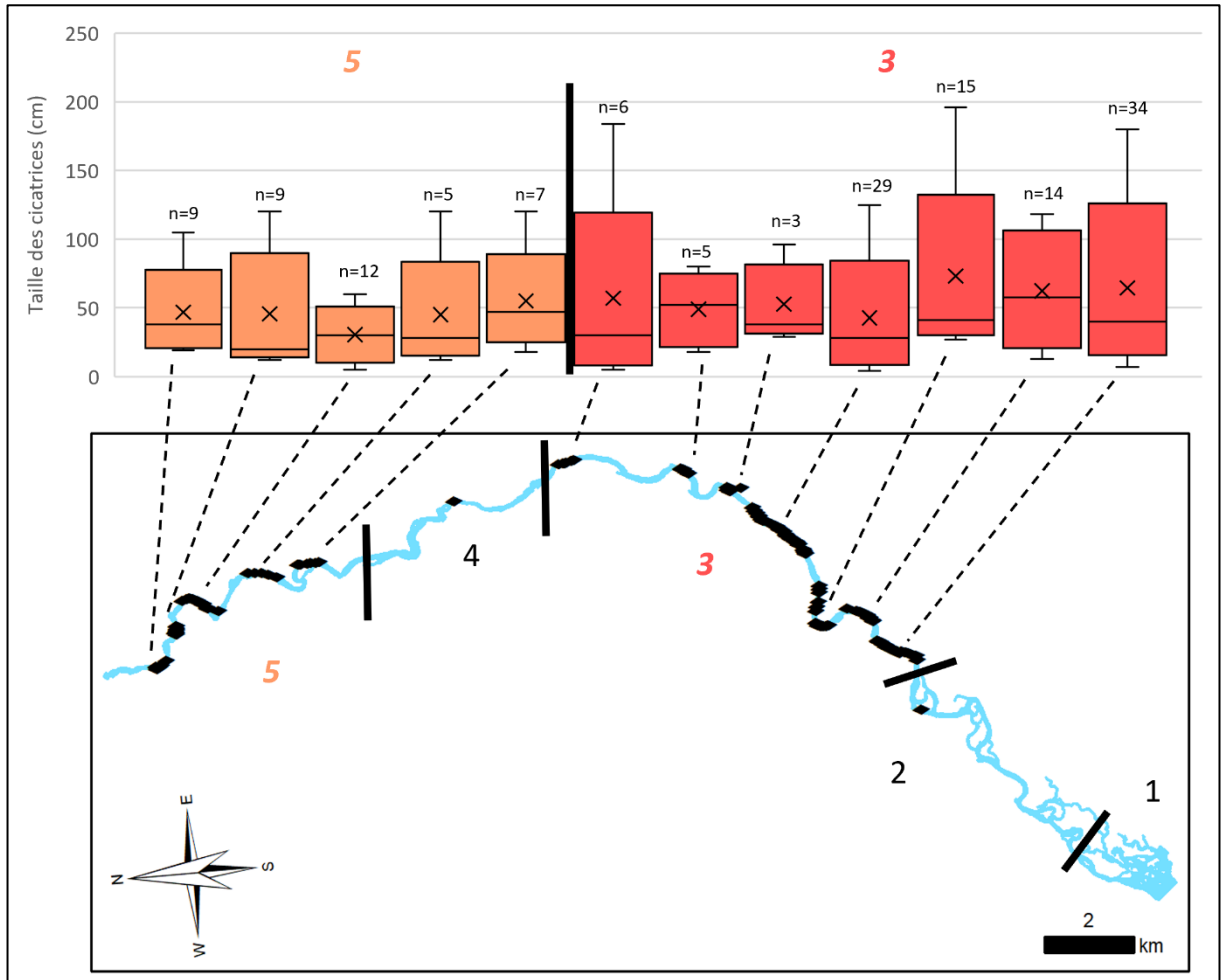


Figure 38. Taille des cicatrices par secteur inventorié en 2020

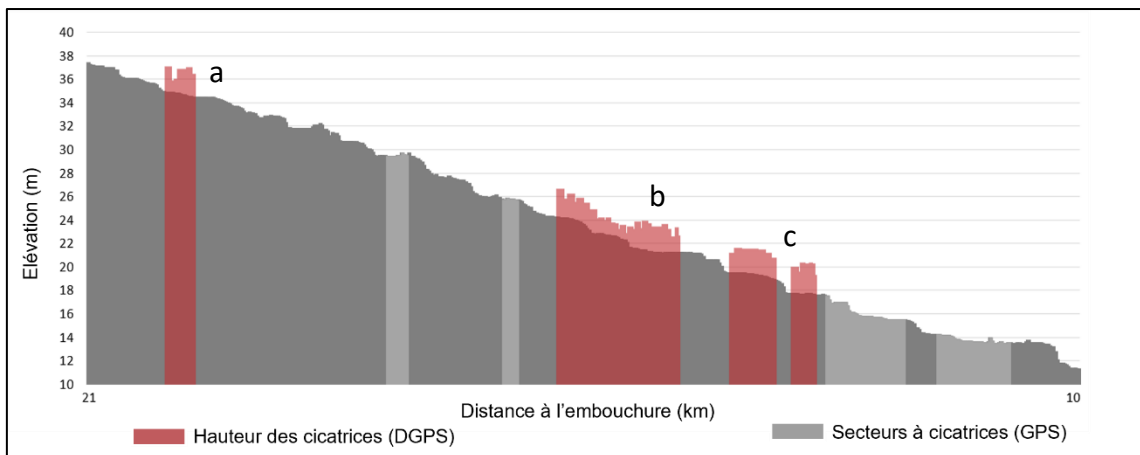


Figure 39. Profil en long de la hauteur des cicatrices

Pour les secteurs inventoriés au sein du tronçon 3 (Figure 39), la moyenne de la hauteur des cicatrices par rapport au lit mineur est de 1,88 mètre. Une moyenne qui varie d'amont en aval. Le premier secteur en amont a une moyenne équivalente à celle de l'ensemble des cicatrices et peu de variations. Le plus long secteur (b) en aval a une moyenne de 1,76 mètre avec des variations importantes. Une zone de refoulement apparaît en aval de ce secteur, avant un tronçon bref sans indice d'embâcle de glace. En amont de cette zone, la différence de hauteur entre le lit et les cicatrices augmente fortement (Figure 39). Des cicatrices ont été observées à une hauteur 0,5 mètre du chenal puis à 2,44 mètres. Les deux derniers secteurs (c) se distinguent par la hauteur des cicatrices avec une moyenne de 2,02 mètres supérieurs au lit de la rivière.

Les cartes, réalisée dans le cadre du projet de cartographie de zones inondables pour obtenir les zones potentiellement inondées par embâcles de glaces sont des indicateurs de l'ampleur des événements. En lien avec la taille des cicatrices (Figure 38) et la hauteur des cicatrices (Figure 39), le secteur c (Figure 40) apparaît comme le secteur ayant une dynamique glacielle importante avec des hauteurs d'eau associées élevées, recouvrant une bonne partie de la plaine alluviale. La taille des cicatrices, supérieure aux autres secteurs, influence l'étendue des zones inondées entre le bas et le haut de la cicatrice.

Les hauteurs d'eau dans les secteurs a et b ont une étendue assez conscrète avec des variations faibles entre le point bas et le point haut de la cicatrice. Ces résultats concordent avec le témoignage des riverains qui n'ont confirmé aucun dégât lié aux embâcles de glace. Les cicatrices du secteur a et c correspondent à l'évènement de décembre 2018, lors d'une hausse des températures qui a provoqué une rupture mécanique du couvert de glace. Cet évènement a engendré une montée des eaux limitée dans le secteur confiné et plus étendue en aval (c) du fait de berges plus basses dans la convexité du méandre.

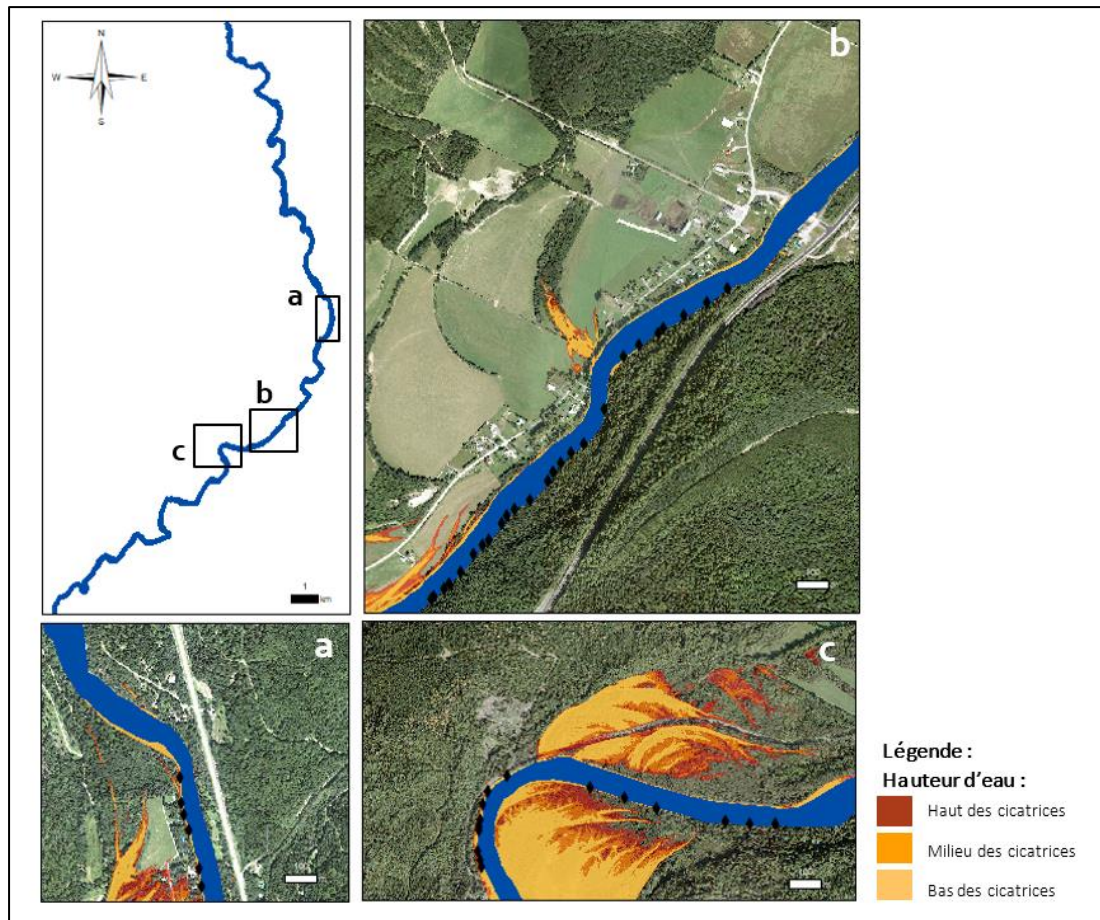


Figure 40. Hauteur d'eau liée à la congestion par embâcle de glace

4.3.2. Indice de prédispositions aux embâcles de glace

Les résultats obtenus à partir de l'indice de Munck *et al.* (2017) ont permis de faire suite aux observations de terrains réalisés en 2019 et précèdent les inventaires de 2020. Réalisé sur l'ensemble du secteur d'étude, l'indice de prédispositions aux embâcles de glaces permet d'identifier des secteurs susceptibles d'être influencés par la dynamique glacielle. Ainsi, les tronçons les plus prédisposés aux embâcles de glace sont les tronçons 2, 4 et 3 avec respectivement 37%, 35% et 23% des segments à risque élevé (Figure 41). Cependant, des cicatrices ont été identifiées seulement dans le secteur 5 et 3, et des

événements d'embâcles de glace sont répertoriés dans le tronçon deux, mais peu de cicatrices ont été observées.

Tronçon par tronçon la corrélation spatiale entre l'indice de prédisposition et les cicatrices varie. Dans le tronçon 5, cinq secteurs à cicatrices de glace ont été répertoriés, tous liés directement ou indirectement à une zone fortement prédisposée selon l'indice. Le premier secteur en amont suit un rétrécissement lié à la confluence entre la branche ouest et est. Les deux secteurs suivants se situent dans la concavité d'un méandre étroit bordé par des affleurements rocheux. Le quatrième secteur de cicatrices se situe dans une zone peu prédisposée, mais est associé à la forte sinuosité en aval pour laquelle l'indice attribue une valeur forte. Enfin, en aval de ce secteur se situe également un faux négatif avec des cicatrices. Sur le terrain, on observe que les cicatrices sont en fait associées à un îlot rocheux situé dans le lit du cours d'eau. Pour ce tronçon, l'indice est relativement faible, cela peut s'expliquer par le peu de variation de la largeur du chenal qui connaît des rétrécissements ponctuels avec peu d'amplitude.

Le tronçon 4, bien qu'identifié comme fortement prédisposé sur tout son long ne compte aucune marque du passage des embâcles de glace. Sa forte mobilité réduit le nombre d'arbres anciens bordant le chenal et pouvant servir de témoins historiques de la dynamique glacielle dans ce secteur.

Le tronçon 3 est celui où la dynamique glacielle est la plus active sur les dix dernières années. Les secteurs en amont à forte prédisposition sont peu associés avec des cicatrices de glaces contrairement aux deux derniers secteurs en aval. Au centre, un long secteur jalonné précède une forte sinuosité. Sur 4 kilomètres, on retrouve très régulièrement des cicatrices, néanmoins l'indice identifie seulement la sinuosité comme source de prédisposition aux embâcles de glace.

Enfin, le tronçon 2, identifié par l'indice comme étant le plus prédisposé aux embâcles de glace, comporte seulement quelques cicatrices isolées en amont. Alternant forte sinuosité et rétrécissement bref, c'est le tronçon le plus sensible selon l'indice de De Munck *et al.* (2017). Pour la validation de l'indice, il a été possible de croiser les données du MSP et

les témoignages de certains riverains recueillis lors des inventaires de bois sur la rivière. Ainsi les trois zones rouges en aval du tronçon 2 ont connu des événements d'embâcle par le passé. En 1976 pour la limite aval (MSP) et entre 2009 et 2011 (témoignages imprécis de riverains) pour les secteurs situés quelques kilomètres en amont.

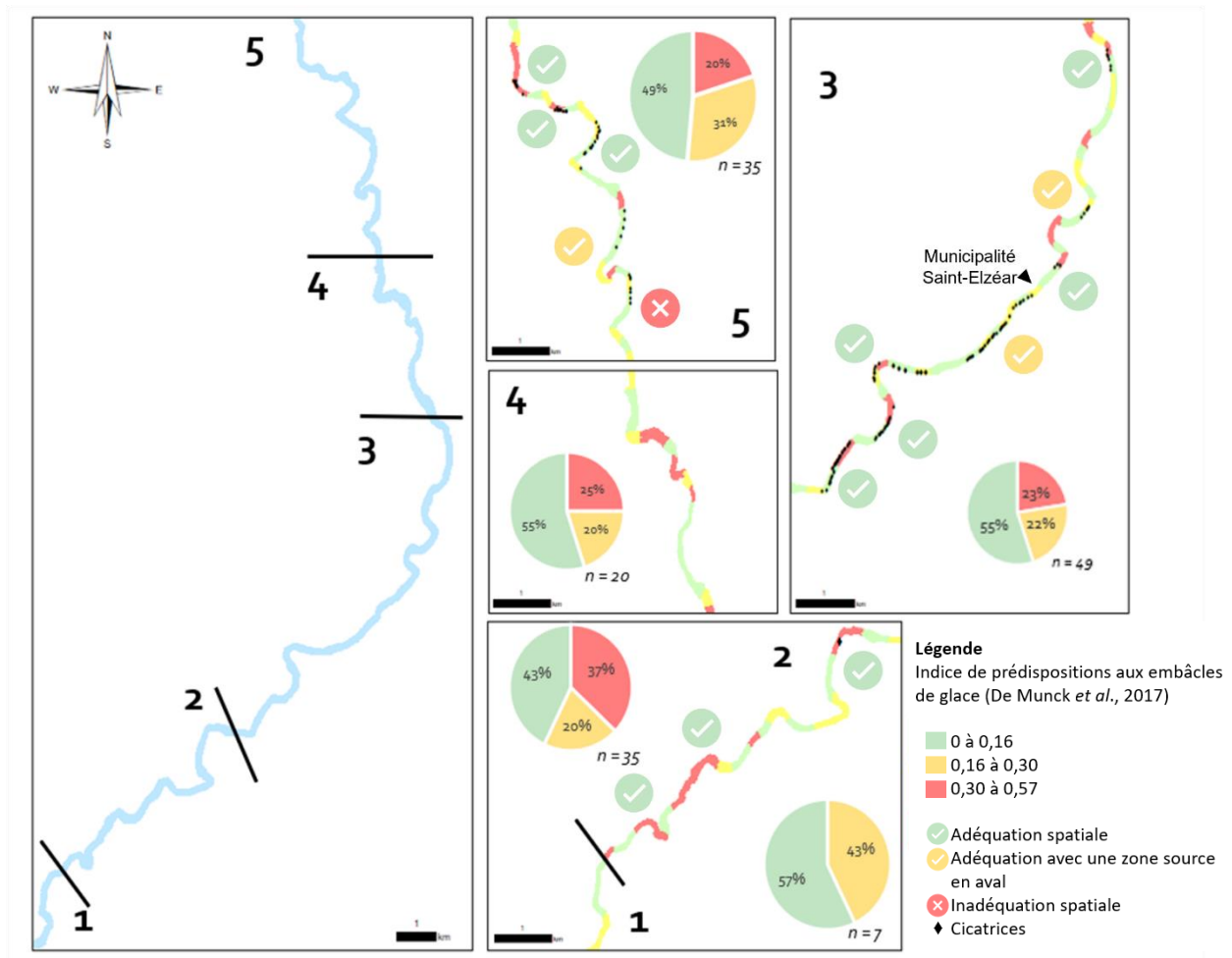


Figure 41. Carte de l'indice de prédisposition aux embâcles de glaces

L'indice de prédisposition des embâcles permet d'obtenir une vision d'ensemble de la dynamique glacielle sur toute la rivière. Néanmoins, en intégrant la sinuosité et le rétrécissement, la prédisposition de la rivière Petite-Cascapédia à l'indice est relativement faible. La valeur maximale est de 0,57 sur 1.

CHAPITRE 5 : DISCUSSION

Le présent chapitre met en relation les résultats décrits dans le chapitre précédent afin de déterminer l'impact de la dynamique glacielle sur la mobilité et la distribution du bois en rivière relativement à la morphologie. Ainsi, dans un premier temps sont analysés les relations entre les embâcles de bois et la morphologie de la Petite-Cascapédia, notamment à travers des cartes géomorphologiques et la réalisation d'un modèle de prédisposition aux embâcles de bois inspiré de De Munck *et al.* (2017). Il s'agit de mettre en évidence le rôle prédominant des paramètres géométriques et géomorphologiques du chenal et de la dynamique fluviale sur la mobilité du bois en rivière. Dans une deuxième partie, le portrait des zones à embâcles de glace est dressé afin de souligner l'impact des facteurs aggravants sur la congestion du chenal durant la saison hivernale. Des cartes et des photographies permettent d'identifier les éléments morphologiques à l'origine de la formation d'embâcles de glace. Puis les données récoltées pour le bois et la glace sont mises en relation pour définir le rôle relatif de la glace sur la distribution du bois et sa mobilité.

5.1. HYDROGEOMORPHOLOGIE ET MOBILITE DU BOIS

5.1.1. Paramètres morphologiques des zones d'accumulation

Sur la rivière Petite-Cascapédia, d'importantes zones d'accumulation de bois se distinguent au sein du profil longitudinal de la rivière. Ces disparités sur la distribution du bois sont liées à des paramètres morphologiques locaux. Les secteurs qui piègent un grand volume de bois possèdent des formes fluviales propices à la retenue des pièces de bois.

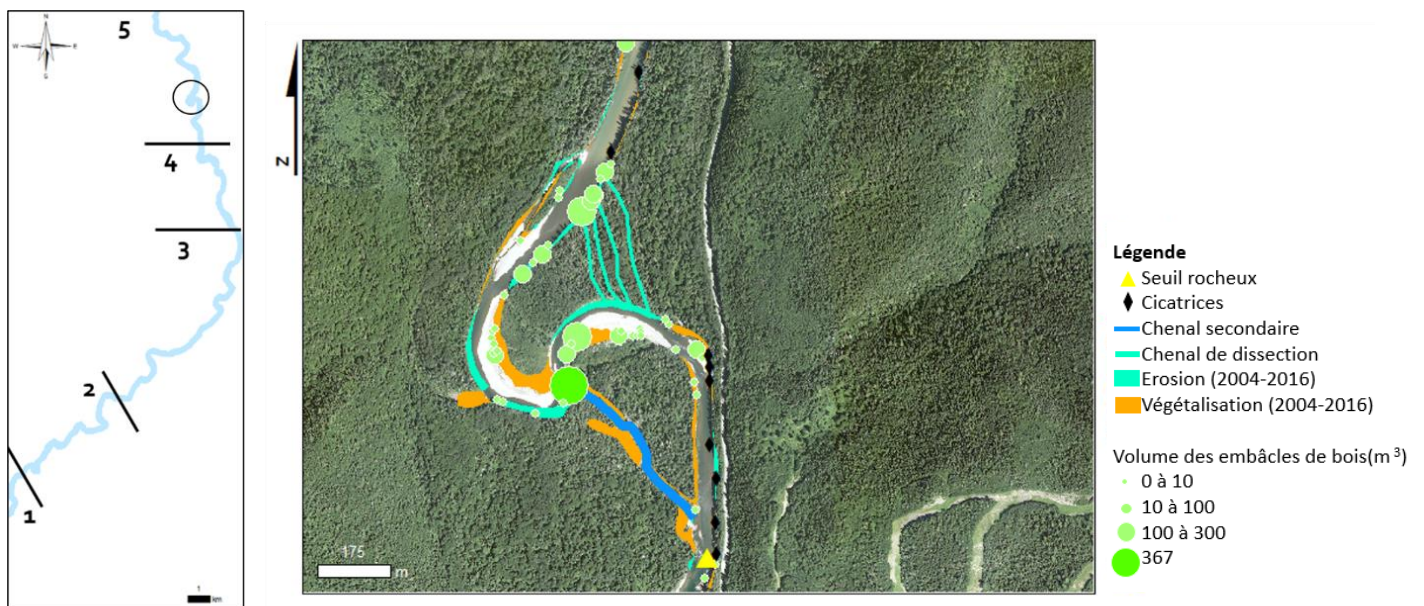


Figure 42. Carte géomorphologique d'un secteur à méandre dans le tronçon 5

Tout d'abord, les zones à méandres sont considérées comme des zones privilégiées de rétention du bois et constituent des obstacles à la mobilité (Piegay et Gurnell, 1997 ; Curran, 2010). En amont de la rivière Petite-Cascapédia, au sein du tronçon 5, la rivière forme une double boucle serrée contenant plusieurs embâcles de taille importante, dont un de 366 m³(Figure 42). L'embâcle le plus considérable est situé à l'entrée d'un chenal secondaire (Figure 43) et s'étend sur une longueur de 130 mètres dans la concavité d'un méandre. L'embâcle protège partiellement cette section du méandre de l'érosion, renforçant les processus d'érosion en amont et en aval, mais aussi les processus d'incision à son pied. Le banc de convexité connaît une végétalisation importante entre 2004 et 2016, il en est de même pour le chenal secondaire. La sinuosité du tronçon est très élevée, avec un rapport entre la longueur du chenal et la distance à vol d'oiseau de 2,09. Plus cette valeur de sinuosité est élevée, plus elle conduit à un processus d'avulsion potentiel (Hooke, 2004). Des marqueurs d'avulsion sont observables sur le

terrain avec l'apparition de chenaux de dissections et une érosion importante en aval de ces chenaux. En amont, ces derniers piègent d'importantes quantités de bois (Figure 44) du fait d'un appel d'eau généré par le débordement en plaine alluviale lors des épisodes de crue.

Ainsi, le méandre multiplie les pièges potentiels au transport du bois vers l'aval. La sinuosité correspond en elle-même à un obstacle (Curran, 2010), l'érosion latérale liée à la migration favorise la production du bois et le banc de convexité associé retient une partie du bois en transit. Enfin, la trajectoire d'un méandre conduit à l'apparition de zone de débordement du fait de berges plus basses. Cette configuration des berges abaisse la hauteur des « valves de sécurité » (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2016), réduisant la mobilité du bois puisque les pièces de bois sont évacuées dans la plaine lors des crues supérieures au niveau plein-bord.



Figure 43. Mosaïque de photographies de l'embâcle de 366 m³ (2019)



Figure 44. Embâcle de débordement lié à des chenaux de dissection

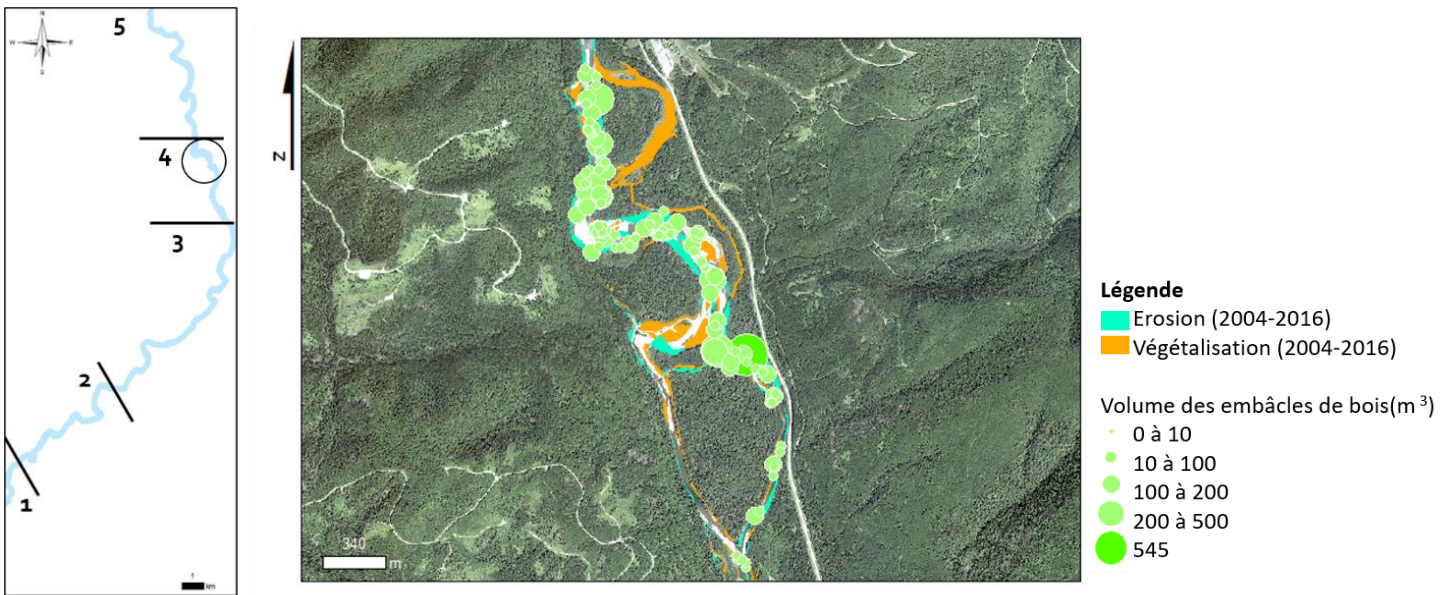


Figure 45. Carte géomorphologique d'un secteur divagant dans le tronçon 4

Les bancs d'accumulation constituent également une zone privilégiée de rétention de bois mort en rivière. Avec l'élargissement du chenal et la réduction des pentes, la puissance spécifique diminue favorisant le dépôt de bois (Kramer et Wohl, 2017 ; Boivin *et al.*, 2017a). Les pièces de bois transportées lors de crues se déposent souvent sur les bancs lors de l'amorce de la décrue (Ravazzolo, 2014). Ces zones peuvent constituer des lieux de transit rapide pour les pièces isolées, remobilisées par des crues ou alors des lieux de transit plus lent pour les pièces prises dans des embâcles de bois stables en apex d'îlots pionniers (Ravazzolo, 2014). Ces embâcles sont susceptibles de piéger d'importants volumes de bois lors d'évènements de haute magnitude (Picco *et al.*, 2014). Dans certaines rivières, les mégastructures peuvent rallonger le temps de résidences du bois en rivière de 25% (Wohl et Goode, 2008).

Le secteur situé en amont du tronçon 4 illustre la forte augmentation des volumes de bois cumulés sur un bref tronçon, en lien avec l'élargissement du lit et la multiplication des bancs d'accumulation (Figure 45). Sur une longueur de 2,7 kilomètres de rivière, 98 embâcles ont été inventoriés, dont 8 avec un volume supérieur à 100 m³ et une mégastructure de 541 m³ (Figure 46A) située sur un banc d'accumulation. À lui seul, ce tronçon de 2,7 kilomètres cumule 30% des volumes de bois compté sur les 30 kilomètres inventoriés. À ce niveau de la rivière, le chenal s'élargit pour atteindre des largeurs dépassant les 150 mètres, la rivière multiplie les chenaux secondaires, les îlots végétalisés et les bancs d'accumulation (Figure 46C), soit autant de zones susceptibles de piéger le bois en transit (Figure 46B, D).

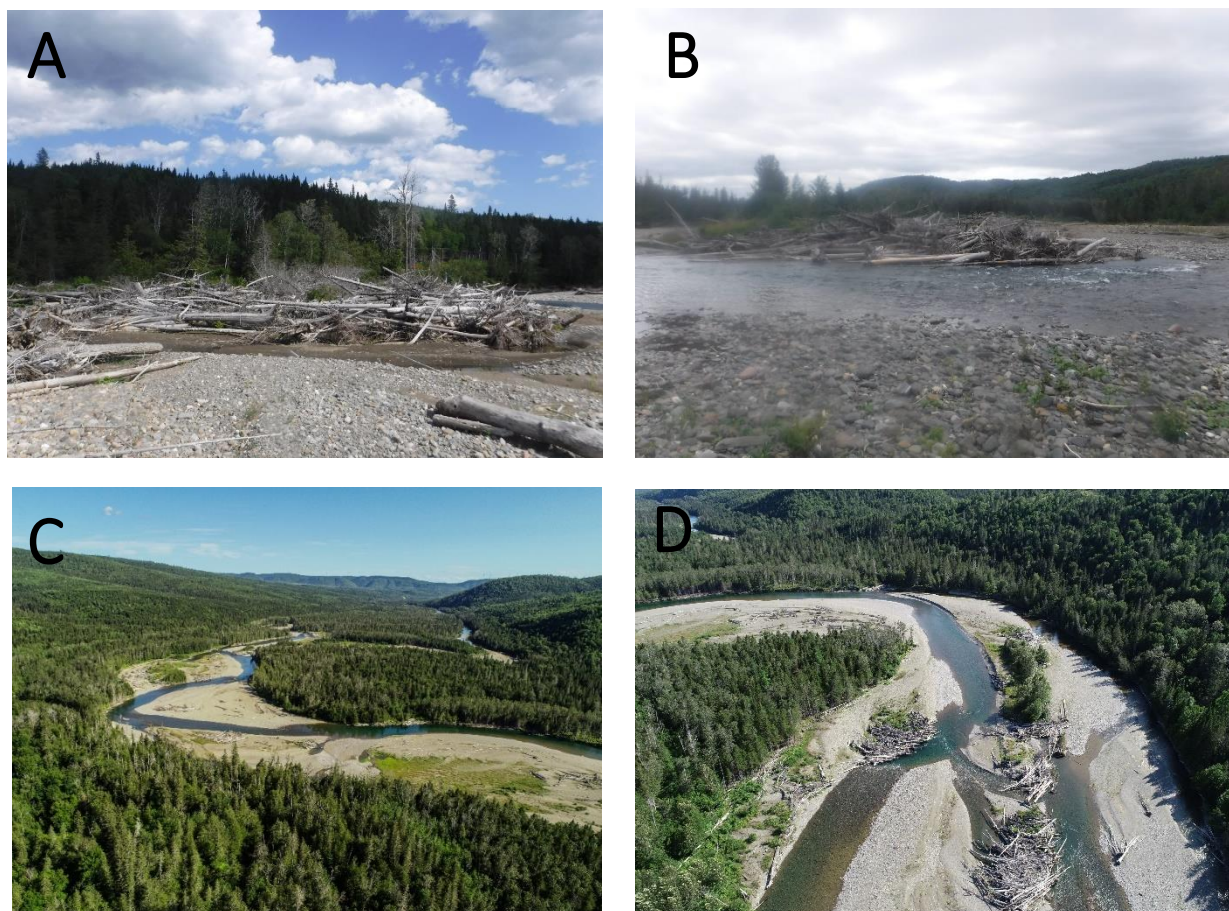


Figure 46. Photographies d'un embâcle de bois de 541m³ (A), d'un embâcle piégé en tête de banc (B), photographie drone du secteur (C) et d'embâcles (D)

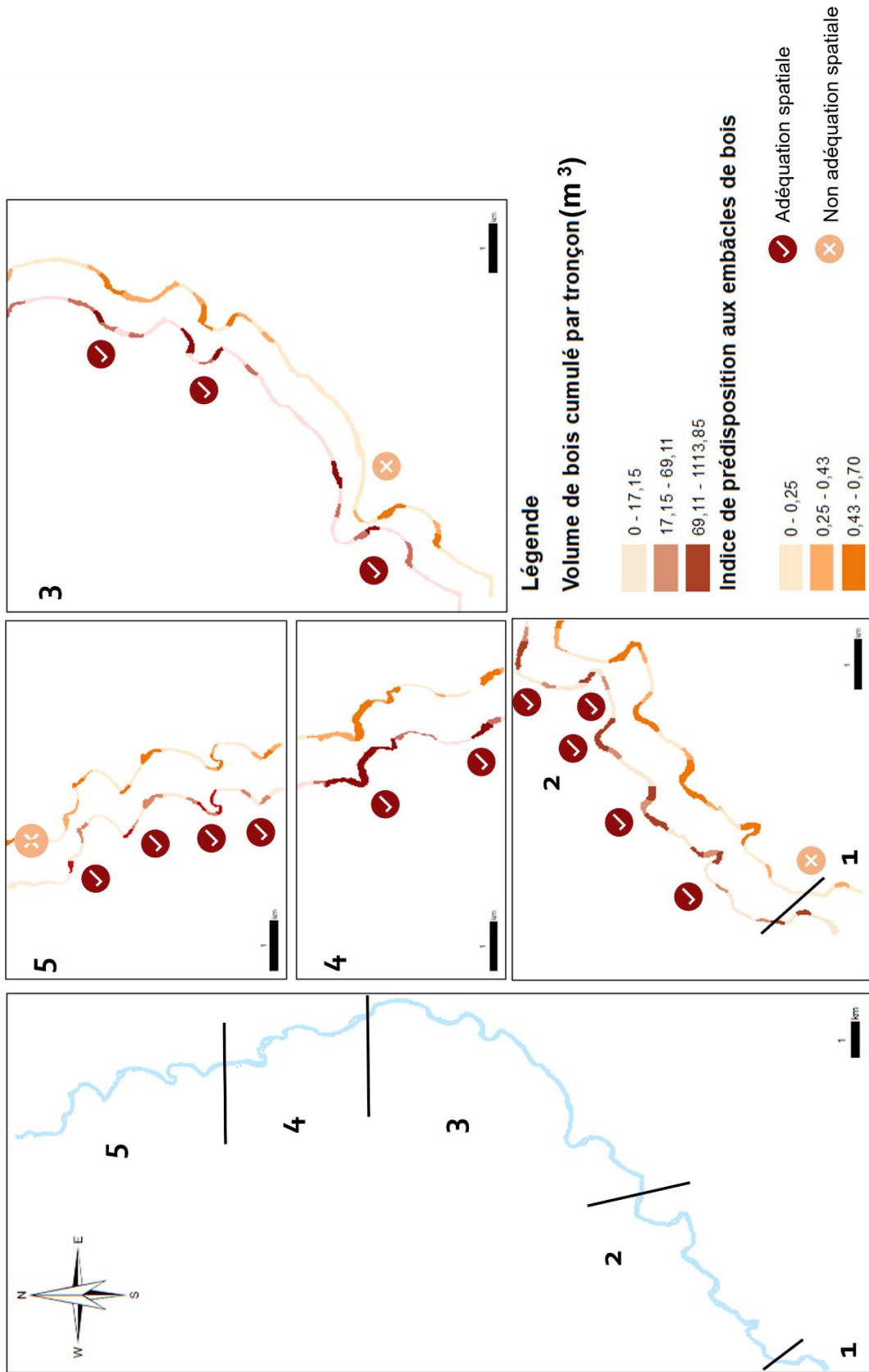


Figure 44. Indice de prédisposition aux embâcles de bois et volumes de bois cumulé en 2019

Les résultats de l'indice de prédisposition aux embâcles de bois révèlent ainsi les zones potentielles où des embâcles de bois peuvent être accumulés (Figure 44). Spatialement, la relation entre l'indice et les volumes est qualitative, avec une adéquation entre les zones fortement prédisposées et les zones d'accumulation. L'indice est positif pour la quasi-totalité des zones d'accumulations principales. La part des sections à fort indice par tronçon homogène permet de faire ressortir les tronçons les plus prédisposés (Figure 45). Ainsi les tronçons 4 et 2 émergent avec 40% de leur longueur fortement prédisposée, pour des tronçons qui représentent respectivement 30% et 20% des volumes totaux de bois. Néanmoins, trois secteurs ne concordent pas avec l'indice. Le premier secteur se situe au niveau de la confluence, en amont du tronçon à l'étude. Là la dynamique de la confluence entre la branche ouest et est de la Petite-Cascapédia augmente la valeur de l'indice du fait du nombre important de bancs d'accumulation. Le deuxième se trouve au sein du secteur 3 correspondant à une zone très courte d'élargissement dans un secteur confiné avec un banc central étroit. Le troisième secteur se situe en aval, dans l'embouchure, au niveau du raft. Du fait des dynamiques propres aux estuaires, l'indice ne permet pas de faire ressortir cette zone.

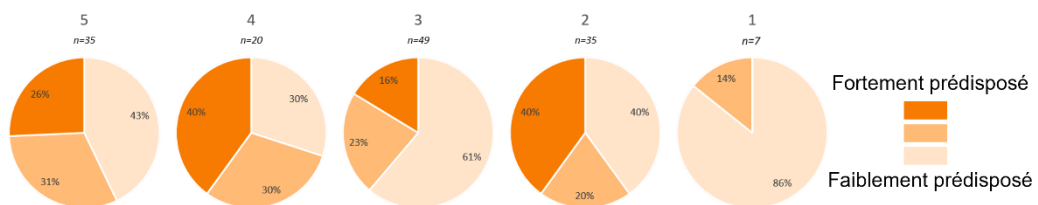


Figure 45. Part des sections prédisposées aux embâcles de bois par tronçon homogène

Ce premier indice sur les embâcles de bois, inspiré de la formule de De Munck *et al.* (2017) permet de poursuivre la réflexion sur l'influence des paramètres géomorphologiques sur la distribution du bois en rivière. En piégeant d'importantes quantités de bois, les obstacles constitués par les méandres ou les bancs d'accumulation sont des freins à la mobilité du bois en rivière. De la même manière que pour l'indice de De Munck *et al.* (2017), d'autres paramètres peuvent être considérés localement comme

des facteurs aggravants. À partir des observations faites sur la Petite-Cascapédia, la présence de chenaux secondaires ou de débordements ainsi que la présence de ponts sont des facteurs propices à des accumulations conséquentes de bois à l'origine d'embâcles de plusieurs centaines de mètres cubes.

Un tel indice peut être transposable à d'autres rivières à partir d'images satellites ou aériennes. Les paramètres pris en compte sont aisés à calculer et permettent d'obtenir une indication sur les zones piégeant potentiellement du bois en rivière. Il s'agit d'un outil supplémentaire pour assurer une gestion pragmatique du bois en rivière en identifiant les enjeux associés aux zones fortement prédisposées. Correspondent-elles à des zones anthropisées ? Dans tel cas, une action des gestionnaires peut être envisagée. Mais, s'il n'y a pas d'enjeux anthropiques, ces zones prédisposées peuvent être intégrées comme des zones assurant une plus grande diversité d'habitats au sein du chenal.

5.2. HYDROGEOMORPHOLOGIE ET EMBACLES DE GLACE

L'indice de prédisposition aux embâcles de glace de De Munck *et al.* (2017) met en lumière le rôle de la morphologie du cours d'eau sur le risque de congestion saisonnière du chenal. Les constriction du chenal liées à la sinuosité ou à la réduction de la largeur sont des facteurs dominants (Beltaos 2008). Sur la rivière du réservoir Votkinsk (Russie), le rétrécissement du chenal joue un rôle sur la formation de 90% des embâcles reportés et jusqu'à 70% des embâcles pour les méandres (Kalinin, 2008). Sur la Petite-Cascapédia, huit des treize zones à cicatrices sont associées directement à une forte sinuosité en aval, trois avec un rétrécissement de la bande active et deux à un obstacle dont un pont et un seuil rocheux (Figure 46A). Deux des zones associées principalement à un rétrécissement sont également associées à un tributaire. Ainsi, les paramètres clés identifiés, que sont la constriction du chenal par la sinuosité, la diminution de largeur ou encore les obstacles, s'appliquent à la Petite-Cascapédia.

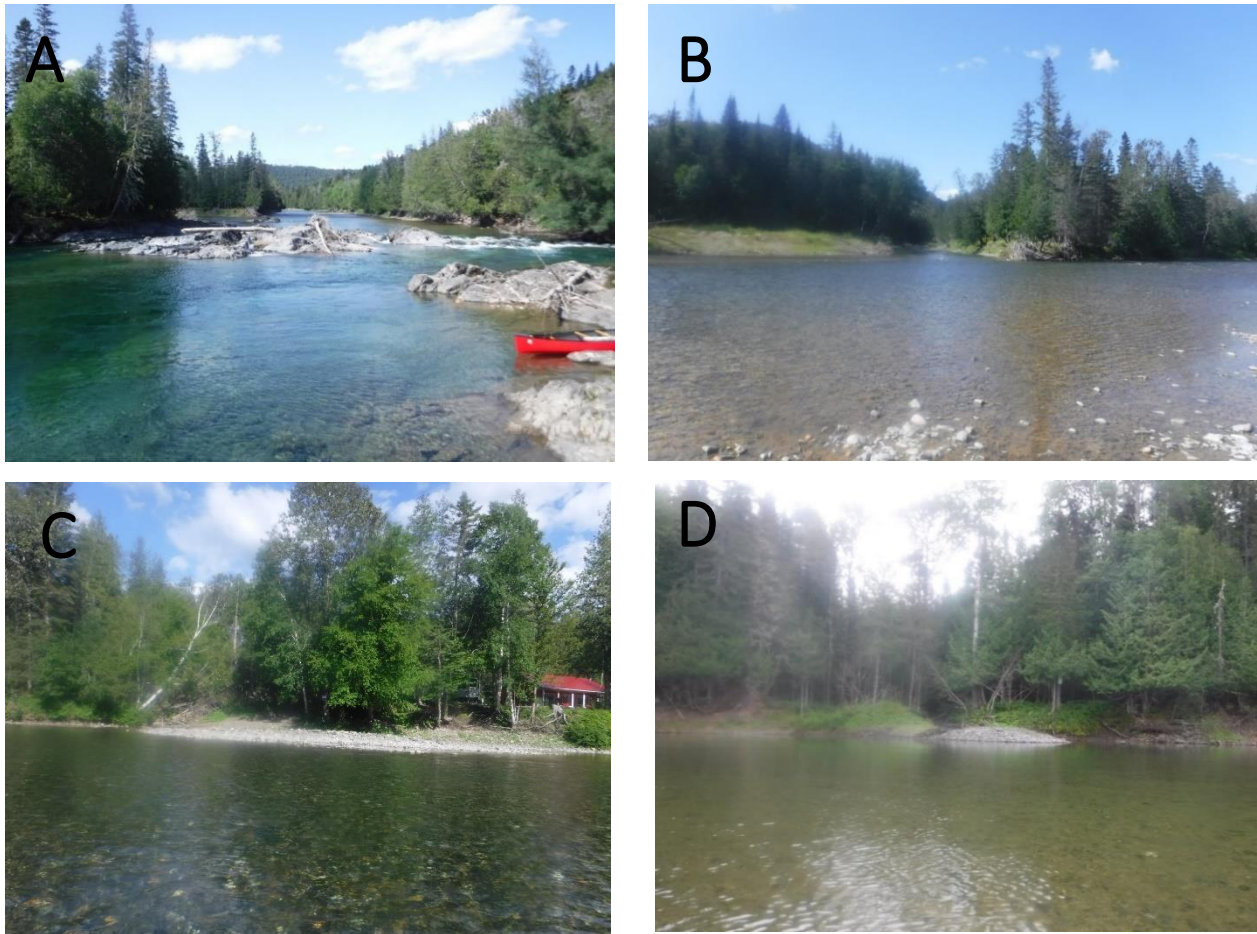


Figure 46. Mosaïque de photographies d'un seuil rocheux obstruant le chenal principal (A), d'un chenal secondaire vue aval (B), tributaires (C et D)

Le secteur à embâcle de glace situé en amont du tronçon 3 (Figure 47) illustre l'influence potentielle d'un tributaire (Figure 46C) sur la dynamique glacielle. Les relevés de cicatrices montrent en effet une accumulation de glace jusqu'à au moins 400 mètres en amont, puis en aval du tributaire plus aucun indice du passage d'un embâcle n'est visible. Dans l'indice de De Munck *et al.* (2017), la largeur des tributaires est intégrée au rétrécissement du chenal pour mettre en valeur les tributaires les plus larges. Plus un tributaire est large, plus le rétrécissement au niveau de la confluence est important. L'indice met l'emphase sur ces tributaires un peu plus larges, car ils peuvent correspondre à d'importantes sources de frasil, pouvant interagir avec la glace du chenal principal et

ainsi augmenter le risque de congestion. Les auteurs notent que les plus petits bassins versants répondent plus rapidement aux évènements hydroclimatiques et sont susceptibles de précipiter de la glace dans le chenal principal. Ces accumulations de glace peuvent alors créer un embâcle au niveau de la confluence. Du fait de la plus forte production de frasil, les tributaires peuvent notamment contribuer à la mise en place d'embâcle au début de l'hiver (Bergeron *et al.*, 2011).

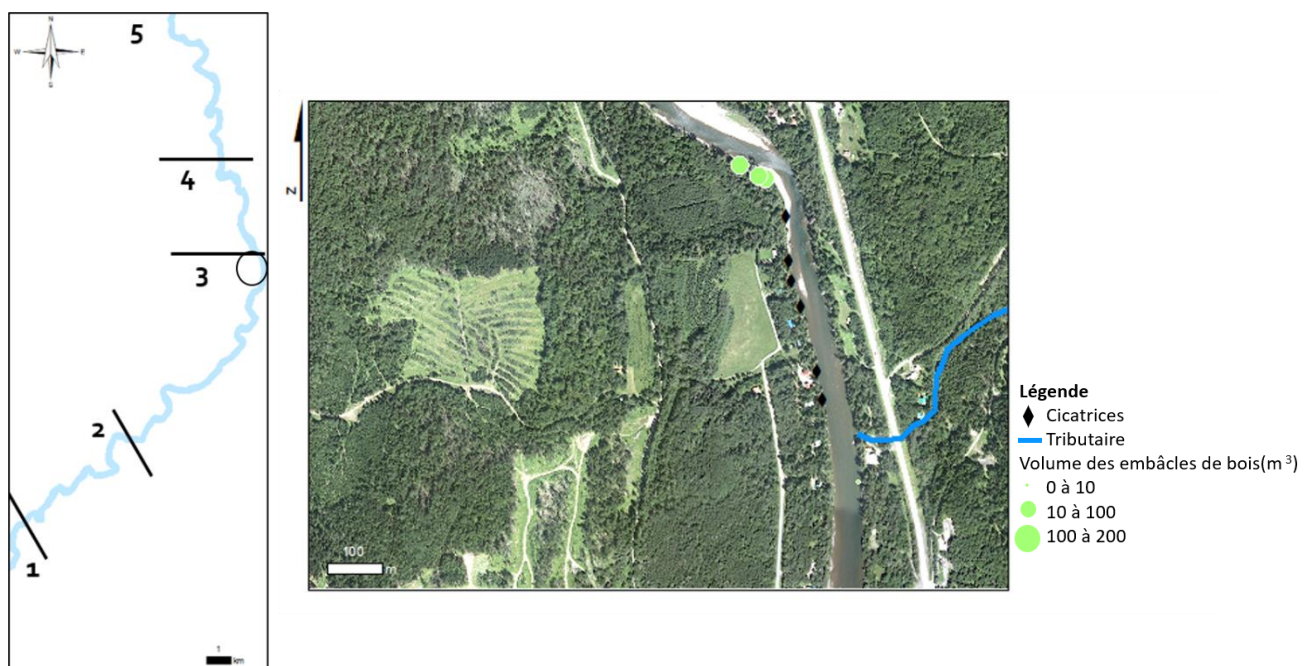


Figure 47. Carte hydrogéomorphologique d'un secteur à embâcle de glace en amont du tronçon 3

De ce fait, une première hypothèse est que les tributaires identifiés sur la Petite-Cascapédia, notamment ceux identifiés dans les Figure 46C et Figure 46D sont des facteurs aggravants du risque de congestion saisonnière. Cependant, les petits tributaires ne ressortent pas sur l'indice comme des zones fortement prédisposées. Il s'agit de petits tributaires, de moins de 10 mètres de largeur et dont le potentiel à produire suffisamment de glace pour obstruer le chenal principal est limité. L'impact des tributaires sur la dynamique glacielle peut aussi se porter sur leur activité sédimentaire. Les liens sédimentaires peuvent participer localement à la congestion du chenal (Bergeron *et al.*,

2011). Le modèle conceptuel ci-dessous (Figure 48) expose les impacts d'un lien sédimentaire de l'amont (0) vers l'aval (1) de ce dernier. D'abord, un lien sédimentaire influence la taille des sédiments ou encore l'élévation du lit. La rupture de pente associée à un lien sédimentaire ou un tributaire actif ainsi que la résistance accrue du fait de sédiments plus gros constituent deux facteurs aggravants. La Figure 48 montre l'impact d'un lien sédimentaire sur l'englacement du chenal avec une production abondante de frasil en amont et la présence de glace ancrée sur la surface du lit, tandis qu'en aval une succession de seuil et mouille favorise la formation d'un couvert de glace statique dans les zones plus calmes et profondes. Les processus de ruptures varient selon ce même gradient amont-aval. La rupture de pente en amont associée au lien sédimentaire favorise un embâcle mécanique lié à une plus forte vélocité de l'écoulement et à l'augmentation de la pression lors de pluies printanières. L'aval est plus exposé à des ruptures thermiques déplaçant de moins grandes quantités de blocs puisque la glace fond *in situ* dans les mouilles plus calmes. Cette configuration semble adaptée aux observations de terrains. La présence de cicatrices en amont des tributaires suggère des événements à grande ampleur déplaçant de grandes quantités de blocs tandis que leur absence en aval suggère des événements moins importants ou même l'absence d'évènements d'embâcle de glace.

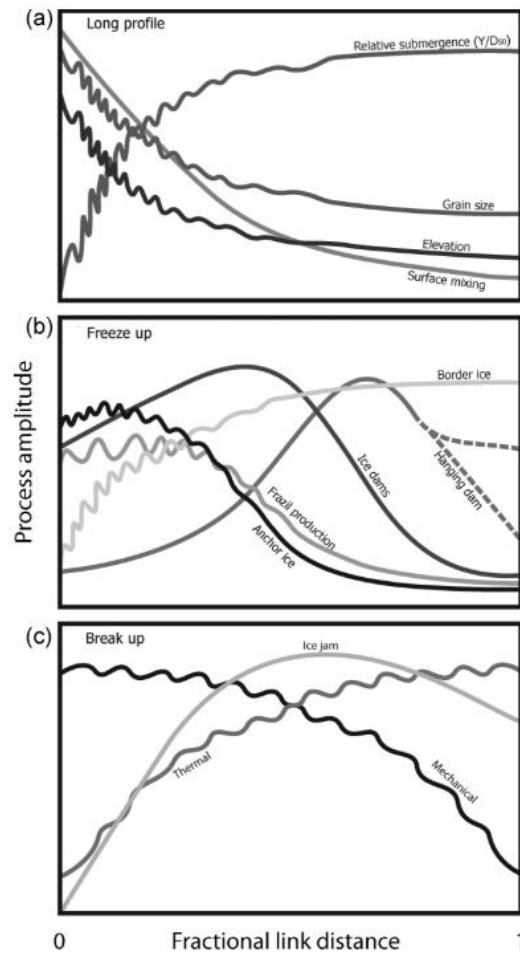


Figure 48. Modèle conceptuel reliant le concept de lien sédimentaire à l'occurrence et à l'intensité des processus de la dynamique glacielle en rivière, source : Bergeron et al., 2011

L'activité sédimentaire des différents tributaires peut être observée rapidement sur le terrain. Les secteurs de confluence avec les tributaires possèdent des bancs d'accumulation liée aux sédiments transportés par ces derniers (Figure 46 C,D). Ces indices d'une activité sédimentaire suggèrent donc que les tributaires, même de petites tailles, peuvent être considérés comme des facteurs aggravants. Néanmoins, l'hypothèse inverse est possible. Les zones à embâcles sont souvent associées à d'autres facteurs aggravants (sinuosité importante, rugosité du lit, rétrécissement) (Figure 49), mais à l'aval des tributaires les indices d'une dynamique glacielle sont plus sporadiques ou disparaissent complètement. La réponse hydrologique rapide de petits tributaires peut

donc être à l'origine d'une évacuation plus facile des blocs dans le chenal principal pris par des embâcles mécaniques.

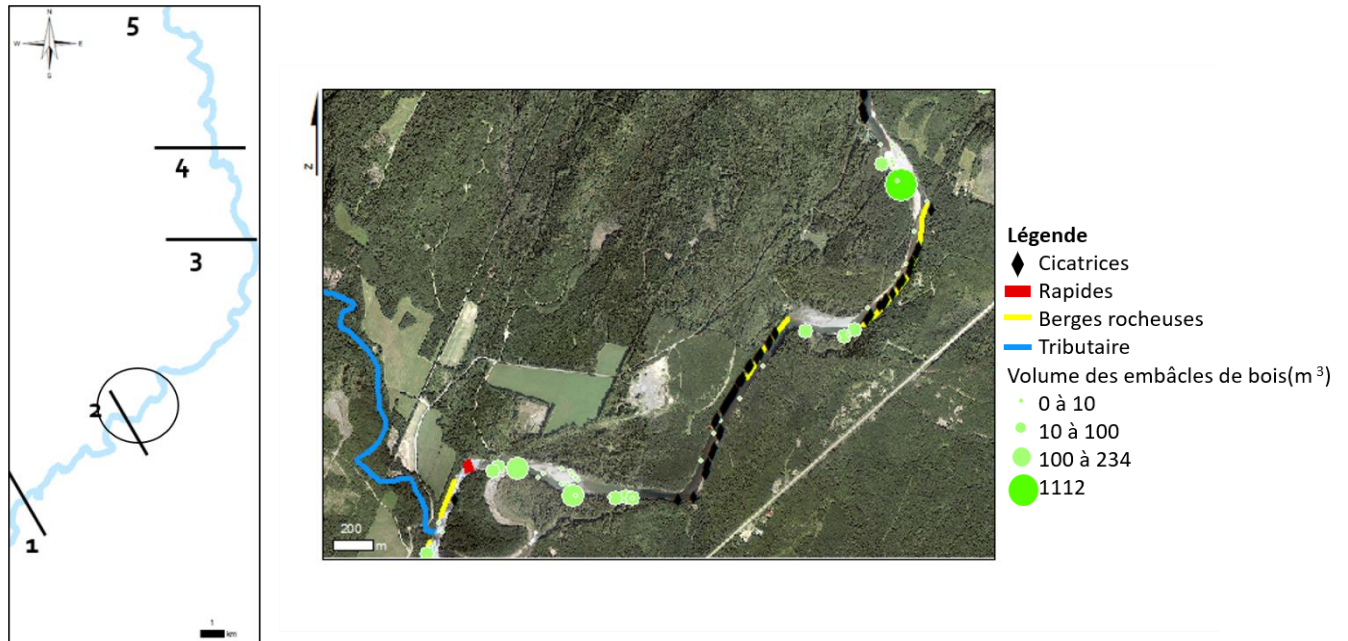


Figure 49. Carte hydrogéomorphologique d'un secteur à embâcle de glace en aval du tronçon 3

Sur la Petite-Cascapédia, les berges rocheuses (Figure 50) apparaissent comme un facteur aggravant dans neuf des treize secteurs inventoriés. La rugosité accrue par la présence d'un contrôle lithologique n'est pas prise en compte dans l'indice de De Munck *et al.* (2017), cette augmentation de la rugosité localement est pourtant systématiquement associée à la présence de cicatrice glacielle (Figure 49). Elle est liée à l'affleurement de la roche créant localement des obstacles à l'écoulement de la glace. Aussi, l'indice compte un faux négatif majeur au centre de la section 3, au niveau du pont Saint-Edgar (Figure 41) où de nombreuses cicatrices ont été inventoriées (29 mesurées, soit 145 répertoriées cicatrices au total), mais l'indice de prédisposition est faible sur cette zone. Il s'agit d'une zone peu profonde, propice à la formation d'un couvert de glace précoce et dense à l'origine d'embâcles d'hiver ou de printemps (Turcotte et Morse, 2013). Dans le cadre de projets futurs, des données bathymétriques pourraient être intégrées au modèle

pour en affiner les prédictions ou encore une analyse considérant la superficie des bancs, comme pour l'indice IPEB, pourrait être considérée.



Figure 50. Photographie d'une berge rocheuse sur la Petite-Cascapédia

Enfin, la faible sensibilité du modèle de prédisposition peut être attribuée aux conditions différentes entre le bassin versant de la rivière Saint-François pour laquelle a été réalisé le modèle de De Munck *et al.* (2017) et le bassin de la Petite-Cascapédia. Le bassin de la rivière Saint-François est orienté vers le nord, tandis que la Petite-Cascapédia coule du nord vers le sud. Cette différence d'orientation influence le mode de rupture en renforçant notamment les ruptures thermiques, source d'embâcles de moins grande ampleur (Bergeron *et al.*, 2011). Les deux rivières coulent également dans des contextes géologiques différents. Sur les 30 kilomètres étudiés, la Petite-Cascapédia ne rencontre pas d'affluents majeurs susceptibles d'augmenter fortement l'indice de rétrécissement localement. La rivière est également peu anthropisée avec un seul pont contre quatorze sur la rivière Saint-François. De Munck *et al.* (2017) notent que les ponts ont tendance à surestimer le risque. Sur la Petite-Cascapédia, le double pont de Saint-Edgar n'a pas été intégré au rétrécissement. D'abord, car celui-ci dispose d'un seul pilier central, il a également été refait suite à la crue de 2010 en prenant en compte le risque d'embâcle avec un pilier en forme triangulaire faisant face à l'amont. Les observations de terrain ont amené à ne pas considérer le pont comme un facteur aggravant, car les rares cicatrices

observées en amont du pont (3 mesurées soit moins de 15 répertoriées au total) étaient très anciennes.

L'indice, du fait de sa prise en compte de paramètres géomorphologiques, constitue un premier aperçu de la prédisposition d'une rivière aux embâcles de glace, la géomorphologie exerçant un contrôle important sur le risque de congestion.

5.3. RELATION ENTRE LA MOBILITE DU BOIS ET LA DYNAMIQUE FLUVIO-GLACIELLE

Dans les parties précédentes, les facteurs morphologiques à l'origine de la congestion du chenal par embâcles de bois ou par embâcles de glace ont été identifiés. Pour synthétiser, les zones où le chenal est plus pentu et rectiligne, celui-ci est susceptible d'engendrer l'écoulement de la glace (Lindeschmit et Das, 2015), mais aussi de transporter les pièces de bois vers l'aval (Gurnell, 2002). À l'inverse, les zones plus larges avec une pente faible favorisent la présence d'un couvert de glace solide et stable pouvant provoquer des embâcles en amont (Lindeschmit et Das, 2015). Ces mêmes zones plus larges multiplient aussi les bancs d'accumulation favorables à l'accumulation de bois (Kramer et Wohl, 2017).

Les hypothèses initiales émises portaient en premier lieu sur une mobilité interannuelle à partir de la distribution des embâcles de bois lors des inventaires. Il s'agissait d'observer si la distribution des embâcles de bois était dépendante des secteurs à cicatrices. Dans un second temps, les hypothèses portaient sur la mobilité événementielle à partir d'un suivi pluriannuel par vidéographie. Du fait des données récoltées, les résultats permettent d'approfondir notre compréhension de l'interaction entre la mobilité du bois et la dynamique glacielle à l'échelle de la mobilité interannuelle.

En conséquence, les embâcles de bois sont généralement absents des zones à embâcles de glace, ce que confirment les observations sur le terrain (Figure 51). Les zones

à cicatrices ont en effet très peu de bois avec des embâcles issus généralement du morphodynamisme de la rivière ou de reliques partiellement enfouies. Les seuls embâcles de bois inventoriés dans les secteurs avec cicatrices correspondaient à des embâcles de berge (Figure 52A) récemment tombés par érosion de la berge (Figure 52B), transportée et marquée par la glace, ou alors stable, mais brisé par le passage des embâcles de glace (Figure 52C). Les cicatrices ont quasiment toutes été retrouvées dans des secteurs rectilignes favorisant la mobilité des blocs de glace en débâcle, mais aussi des pièces de bois. Quelques rares secteurs plus larges avec des cicatrices et des bancs d'accumulation ne piègent aucun embâcle de bois (Figure 52D).

La Figure 51 met en lumière une distribution du bois irrégulière avec des secteurs d'accumulation et des secteurs de transit, sans embâcles de bois. L'amont de la rivière, caractérisé par une succession de secteurs à cicatrices, correspond à un secteur de transit du bois. Une première augmentation subite des volumes de bois entre deux secteurs de glace correspond à l'embâcle de bois identifié sur la Figure 43. Le tronçon 4 accumule un grand volume de bois, aucune cicatrice n'a été inventoriée malgré un indice de prédisposition élevé. La forte mobilité latérale du chenal dans ce secteur limite la mémoire des événements par les arbres présents sur les berges. Entre les kilomètres 10 et 20, des secteurs à embâcles de glace se succèdent avec de courts secteurs piégeant des embâcles de bois. Bien que la Figure 51 semble valider la première hypothèse que la distribution et les caractéristiques des embâcles de bois dépendent des zones d'occurrences d'embâcle de glaces, l'hypothèse qu'un chenal rectiligne suffit à lui seul pour évacuer le bois de ces tronçons apparaît plus probable à la lumière de la littérature et des observations de terrain. La présence de hautes berges rocheuses dans les secteurs à embâcles de glace peut aussi réduire le recrutement de pièces de bois expliquant une absence de bois dans ces secteurs. Ailleurs la présence de berges basses limite également le recrutement de bois par érosion latérale (Figure 49) (Moulin *et al.* 2011). Il semble donc que les secteurs à cicatrices correspondent autant à des secteurs de transport pour la glace que pour le bois. Les cicatrices signalant le passage des blocs de glace lié à une congestion du chenal dans les portions aval.

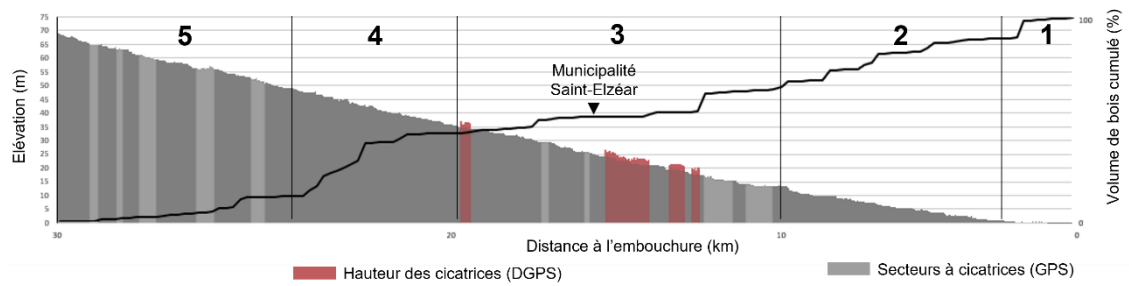


Figure 51. Profil en long de la rivière et des volumes cumulés de bois en rapport avec les secteurs à embâcles de glace

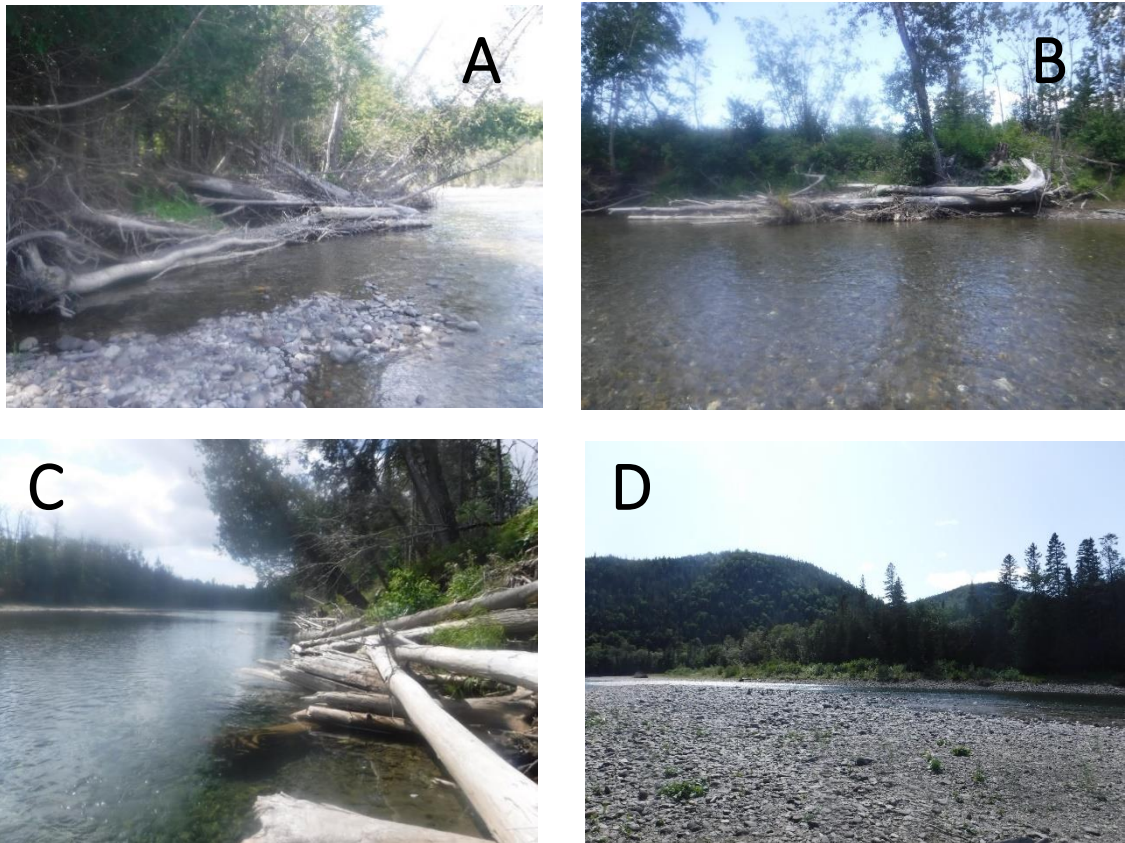


Figure 52 Mosaïque de photographies (2019) d'embâcle de berges en secteur à embâcles de glace (A,B,C) et d'un banc d'accumulation (D)

Malgré tout, l'interrogation demeure. Les embâcles de glaces transportent régulièrement du bois (*Figure 53*), comment donc confirmer ces observations de terrain ? Les études qui sont parvenues à identifier des évidences du rôle de la glace sur le transport des embâcles de bois sont des rivières dont les études ont une plus large échelle temporelle. Ainsi, les inventaires réguliers sur la Petite-Cascapédia, et l'enregistrement par vidéo des saisons d'hiver permettront d'obtenir un portrait plus fin de la rivière afin de mieux observer si la glace joue un rôle ou non. Cependant, la position de la Petite-Cascapédia, par rapport à d'autres rivières plus septentrionales et à la dynamique glacielle plus active, interroge. Le risque d'embâcle de glace apparaît mineur sur la rivière, la rendant moins intéressante pour un suivi caméra sur le long terme.



Figure 53. Photographie d'une débâcle mécanique mobilisant du bois sur la Petite Cascapédia (janvier 2015, ZEC de la Petite Cascapédia).

Durant la période à l'étude, de mai 2019 à mai 2021, aucun embâcle de glace n'a été observé, le dernier évènement datant de décembre 2018. La rivière Petite-Cascapédia dispose d'un important volume de bois et a été sélectionnée pour cette raison, néanmoins

la position et l'orientation du bassin versant rendent la rivière peu exposée au risque d'embâcle de glace. Des évènements ponctuels surviennent en fin d'hiver lors d'épisode exceptionnel de pluie comme en avril 1994 suite à un hiver rude (GNB, 2012). Autrement les autres évènements ont lieu en période hivernale lors de redoux entre décembre et janvier créant des débâcles thermiques de plus petites ampleurs. Ainsi, l'absence d'évènements rend impossible la confirmation de la seconde hypothèse sur l'influence des embâcles de glace sur les débits ligneux.

CONCLUSION GENERALE

L'influence des embâcles de glace sur la mobilité du bois est relativement peu documentée dans la littérature en comparaison à l'influence des crues en eaux libres. Pourtant, la glace joue un rôle majeur dans la géomorphologie et l'écologie des rivières nordiques des régions froides et les épisodes extrêmes d'embâcles de glace constituent de puissants facteurs d'érosion. C'est pourquoi ces épisodes suscitent des interrogations sur leurs interactions avec le bois mort présent dans le lit mineur. Cependant, les difficultés à prédire l'occurrence des événements d'embâcle les rendent difficiles à appréhender et limitent l'état des connaissances sur leur rôle dans la mobilité des embâcles de bois.

Les résultats ont permis d'analyser la mobilité du bois en rivière entre 2019 et 2020. Un événement d'embâcle de glace en décembre 2018 peut justifier des conclusions sur la distribution des embâcles de bois lors des relevés de terrains de 2019. En effet, dans le secteur touché par l'embâcle de 2018, aucun embâcle de bois n'a été répertorié. L'inventaire interannuel des embâcles de bois permet par la suite de suivre la mobilité des embâcles de bois stockés dans les différents secteurs, surtout ceux où ont été inventoriées des cicatrices glacielles. Or entre 2019 et 2020, l'évolution des volumes de bois dans ces secteurs est liée à l'apparition d'embâcles de berges, sporadiques, transportés de l'amont et piégés par des arbres localement tombés. Les résultats se heurtent à deux obstacles méthodologiques. Le premier est lié aux inventaires en eux-mêmes. Photographie annuelle des volumes de bois présent dans la rivière, les inventaires ne permettent pas de déterminer avec précision les facteurs de mobilité dans la mesure où une montée des eaux au printemps peut réarranger la distribution des embâcles suite à un embâcle de glace hivernal. Puis, le second obstacle correspond aux occurrences des événements. Le présent mémoire n'a pas échappé à cette contrainte, et l'absence d'événements limite la possibilité d'effectuer des rapports directs entre la mobilité événementielle du bois et la présence d'embâcle de glace.

D'ailleurs, la caractérisation des embâcles de glace a été une étape essentielle pour mieux comprendre la dynamique glacielle et son impact potentiel sur la mobilité du bois

dans la Petite-Cascapédia. Le relevé des cicatrices, de leur hauteur, de leur largeur et de leur aspect a permis de déterminer une chronologie relative aux évènements répertoriés et d'estimer l'ampleur de ces derniers. L'indice de prédisposition de Munck et al. (2017) permet de compléter l'inventaire en identifiant des zones de prédisposition où les cicatrices sont manquantes. Néanmoins, l'utilisation des cicatrices a révélé plusieurs limites lors de l'étude. D'abord, les zones où le chenal est particulièrement mobile, principalement dans le secteur 2, rendent caduque l'utilisation d'un tel indice puisque la mémoire de la ripisylve est fortement réduite par l'érosion et la disparition des arbres témoins. Ainsi l'indice fait bien ses preuves dans les tronçons amont, confinés avec des berges hautes et rocheuses, protégées de l'érosion. Une autre limite concerne la détermination de l'intensité des évènements. Le croisement de plusieurs informations (témoignages, tailles, âge, nombre et hauteur des cicatrices) nous aide à déterminer approximativement l'ampleur de la dynamique glacielle. De plus, la faible occurrence des évènements sur la Petite-Cascapédia ne permet pas de réaliser des conclusions sur le rôle de la glace dans la mobilité interannuelle du bois dans les secteurs à cicatrices. Le fait que ces secteurs soient rectilignes et confinés suffit sûrement à évacuer le bois sans l'action de la glace.

De ces faits, l'analyse de la trajectoire hydrogéomorphologique de la rivière met en lumière des facteurs favorisant le piégeage des embâcles de bois et la formation d'embâcles de glace. Sur la Petite-Cascapédia, les facteurs morphologiques apparaissent d'ailleurs comme le facteur déterminant la mobilité du bois en rivière. Bien que le bois soit absent des zones d'occurrences à embâcle de glace, les patrons de distribution soulignent davantage le fait que les deux phénomènes de congestions ont lieu dans des zones aux variables morphologiques différentes. Les embâcles de bois s'accumulent dans des zones où le chenal s'élargit, perd en compétence et multiplie les bancs sablo-graveleux, tandis que les cicatrices de glace ont été relevées dans les secteurs confinés aux largeurs réduites. Les boucles de méandre demeurent des zones d'accumulation préférentielles pour les embâcles de glace et piègent également du bois. Mais aucune évidence d'interactions entre les deux phénomènes n'a été observée.

Néanmoins, le grand intérêt des réflexions entreprises dans ce mémoire est la confrontation de deux arcs méthodologiques pour caractériser deux phénomènes d'embâcles. Les méthodes d'inventaires et d'analyses spatiales pour les embâcles de bois donnent de nouvelles perspectives pour l'analyse des embâcles de glace. A l'inverse, les méthodes de modélisation des embâcles de glace ont permis d'alimenter un important travail de conception autour d'un modèle similaire pour le bois. Ce sont l'ensemble de ces confrontations, mêlant des données sur les processus morphologiques, la mobilité du bois et la dynamique glacielle qui a permis d'établir un premier indice de prédisposition aux embâcles de bois performant. Information supplémentaire sur la mobilité, l'indice de prédisposition aux embâcles de bois permet de déterminer des zones préférentielles d'accumulation du bois en rivière à partir de la photo-interprétation des formes fluviales et d'indices géométriques. Rapide et facile à mettre en œuvre, il s'agit d'un outils prévisionnel intéressant et pragmatique pour la gestion de bois en rivière. En effet, les secteurs fortement prédisposés, dans des zones anthropisées, peuvent être considérés comme des zones d'actions à privilégier. Dans les zones non anthropisées, la forte prédisposition de certains secteurs permet de mettre en lumière des zones de biodiversité où la non-intervention des gestionnaires permet la conservation des habitats naturels et complexes.

BIBLIOGRAPHIE

- Abbe, T.B. et D. R. Montgomery, D.R. 1996. Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers. *Regulated Rivers Research and Management*, vol. 12, 201-221.
- Allan, J.D. 1978. Trout predation and the size composition of stream drift. *Limnology and Oceanography*, vol. 23, 1231–1237.
- Alix, C. 2005. Deciphering the impact of change on the driftwood cycle : contribution to the study of human use of wood in the Arctic. *Global and Planetary Change*, vol. 47, 83–98.
- Benacchio, V., Piegay, H., Buffin-Bélanger, T., Vaudor, L., Michel, K. 2016. A new methodology for monitoring wood fluxes in rivers using a ground camera: potential and limits. *Geomorphology*, vol. 279, 44-58
- Benda, L.E. et Sias, J.C. 2003. A quantitative framework for evaluating the mass balance of in-stream organic debris. *Forest Ecology and Management*, vol. 172, 1–16.
- Bergeron, N. E., Buffin-Bélanger, T. et Dubé, J. 2011. Conceptual model of river ice types and dynamics along sedimentary links. *River Research and Applications*, vol. 27, 1159–1167.
- Blauch, G. A. et Jefferson, A. J. 2019. If a tree falls in an urban stream , does it stick around ? Mobility , characteristics , and geomorphic influence of large wood in urban streams in northeastern Ohio , USA. *Geomorphology*, vol. 337, 1–14.

- Boivin, M., Buffin-Bélanger, T., Maltais, M., Massé, S., Briand, Y. et Biron, P. 2019. *Guide d'analyse de la dynamique du bois en rivière*.
- Boivin, M., Buffin-Bélanger, T., & Arseneault, D. 2018. Using tree-rings to determine large wood residence time and transport pulses in a gravel-bed river. *River Flow* 2016, E3S Web of Conferences, vol. 40, 1-8.
- Boivin, M., Buffin-Bélanger, T. et Piegay, H. 2017a. 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*, vol. 42, 2199–2213.
- Boivin, M., Buffin-Bélanger, T. et Piégay, H. 2017b. Interannual kinetics (2010 – 2013) of large wood in a river corridor exposed to a 50-year flood event and fluvial ice dynamics. *Geomorphology*, vol. 279, 59–73.
- Boucher, É., Bégin, Y. et Arseneault, D. 2009. Impacts of recurring ice jams on channel geometry and geomorphology in a small high-boreal watershed. *Geomorphology*, vol. 108, 273–281.
- Bunnell, F. L., et Houde, I. 2010. Down wood and biodiversity - Implications to forest practices. *Environmental Reviews*, vol. 181, 397–421.
- Bütler, R., Angelstam, P., Ekelund, P., Schlaepfer, R. 2004. Dead wood threshold values for the three-toed woodpecker presence in boreal and sub-Alpine forest. *Biological Conservation*, vol.119, 305–318
- Chartier, D., Rodary, E. 2016. *Manifeste pour une géographie environnementale*, Sciences Po, Les Presses. Paris, France. 425.
- Curran, J. C. 2010. Mobility of large woody debris (LWD) jams in a low gradient channel. *Geomorphology*, vol. 116, 320–329.
- Coulombe-Pontbriand, M., & Lapointe, M. 2004. Geomorphic controls, riffle substrate quality, and spawning site selection in two semi-alluvial salmon rivers in the Gaspé Peninsula, Canada. *River Research and Applications*, vol. 20, 577–590.
- Dahlström, N., & Nilsson, C. 2006. The dynamics of coarse woody debris in boreal Swedish forests are similar between stream channels and adjacent riparian forests, *Canadian Journal of Forest Research*, vol.1148, 1139–1148.
- Dahlström N., Jönsson K, & Nilsson, C. 2005. Long-term dynamics of large woody debris in a managed boreal forest stream. *Forest Ecology and Management*, vol. 210, 363–373.

- DeMaynadier, P.G., Hunter, M.L. 1995. The relationship between forest management and amphibian ecology: a review of the North American literature. *Environmental Review*, vol.3 , 230–261
- De Munck, S., Gauthier, Y., Bernier, M., Chokmani, K., & Légaré, S. 2017. River predisposition to ice jams : a simplified geospatial model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol.17, 1033–1045.
- Doyle, P. F. 1988. Damage resulting from a sudden river ice breakup. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol.15, 609–615.
- Ettema, R., Zabilansky, L., & Bledsoe, B. 2004. Ice-induced thalweg oscillations along the Fort Peck Reach of the Missouri River. *Water Resources*, vol.1, 1–10.
- Ettema, R., Zabilansky, L. 2004. Ice influences on channel stability: insights from Missouri's Fort Peck reach. *J. Hydraulics Engineering*, vol.130, 279–292
- Ettema, R. 2006. Ice effects on sediment transport in rivers. In: Garcia, M.H. (Ed.), *Sedimentation Engineering*. ASCE Publications, Reston, VA.
- Figarski, T., & Kajtoch, Ł. 2015. Alterations of riverine ecosystems adversely affect bird assemblages. *Hydrobiologia*, vol.744(1), 287–296.
- Francis, R. A., Tibaldeschi, P., & McDougal, L. 2008. Fluvially-deposited large wood and riparian plant diversity. *Wetlands Ecology Management*, vol.16, 371–382.
- Fryirs, K. A. 2017. River sensitivity : a lost foundation concept in fluvial geomorphology. *Eart Surface Processes and Landforms*, vol.42, 55–70.
- Gabriel, C. M., Clarke, D., & Campbell, C. E. 2010. Invertebrate communities in compensation creek, a man-made stream in boreal newfoundland : the influence of large woody debris, *River research and application*, vol.26, 1005–1018.
- Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2012. *Détails sur l'inondation – 1994-04-14 – 1994-04-26*, [En ligne]
<https://www.elgegl.gnb.ca/0001/fr/Inondation/D%C3%A9tails/126>, consultée le 28 mai 2021.
- Guschnitzer, T., Gems, B., Mazzorana, B., & Aufleger, M. 2017. Geomorphology Towards a robust assessment of bridge clogging processes in flood risk management. *Geomorphology*, vol.279, 128–140
- Gurnell, A. M., Piégay, H., Swanson, F. J., & Gregory, S. V. 2002. Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology*, vol.47(4), 601–619.

- Gustafsson, P., Greenberg, L., & Bergman, E. 2014. Effects of woody debris and the supply of terrestrial invertebrates on the diet and growth of brown trout (*Salmo trutta*) in a boreal stream. *Freshwater Biology*, vol.59, 2488–2501.
- Guyette, R.P., Dey, D.C., Stambaugh, M.C. 2008. The temporal distribution and carbon storage of large oak wood in streams and floodplain deposits. *Ecosystems* vol.11, 643–653
- Hamelin, L.E. 1979. The bechevnik: a river bank feature from Siberia. *The Musk Ox*, vol.25, 70–72
- He, Z., Wu, W. and Douglas Shields, F., Jr 2009, Numerical analysis of effects of large wood structures on channel morphology and fish habitat suitability in a Southern US sandy creek. *Ecohydrology*, vol.2: 370-380.
- Hooke, J.M. 2004. Cutoffs galore! : Occurrence and causes of multiple cutoffs on a meandering river. *Geomorphology*; vol 61, 225-238
- Iroumé, A., Mao, L., Andreoli, A., Ulloa, H., & Ardiles, M. P. 2015. Large wood mobility processes in low-order Chilean river channels. *Geomorphology*, vol.228, 681–693.
- Jasek, M. 2003. Ice jam release surges , ice runs , and breaking fronts : field measurements , physical descriptions , and research needs . *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol.127, 113–127.
- Jochner, M., Turowski, J. M., Badoux, A., Stoffel, M., & Rickli, C. 2015. The role of log jams and exceptional flood events in mobilizing coarse particulate organic matter in a steep headwater stream. *Earth Surface Dynamics*, vol.3(3), 311–320.
- Kajtoch, Ł., & Figarski, T. 2013. Short-term restoration of riverine bird assemblages after a severe flood. *Bird Study*, vol.60(3), 327–334.
- Kalogianni, E., Vardakas, L., Vourka, A., Koutsikos, N., Theodoropoulos, C., Galia, T., & Skoulikidis, N. 2020. Wood availability and habitat heterogeneity drive spatiotemporal habitat use by riverine cyprinids under flow intermittence. *River Research and Applications*, vol.36(5), 819–827.
- Kilpeläinen, A., Kellomäki, S., Strandman, H., & Venäläinen, A. 2010. Climate change impacts on forest fire potential in boreal conditions in Finland. *Climatic Change*, vol.103, 383–398.

- Kraft, C. E., Warren, D. R., & Keeton, W. S. 2011. Identifying the spatial pattern of wood distribution in northeastern North American streams. *Geomorphology*, vol.135, 1–7.
- Kramer, N., Wohl, E. 2017. Rules of the road: A qualitative and quantitative synthesis of large wood transport through drainage networks. *Geomorphology*, vol.279, 74–97.
- Kramer, N., Wohl, E., Hess-Homeier, B., & Leisz, S. 2017. The pulse of driftwood export from a very large forested river basin over multiple time scales, Slave River, Canada. *Water Resources Research*, vol.53, 1997–2015.
- Kramer, N., & Wohl, E. 2014. Estimating fluvial wood discharge using time-lapse photography with varying sampling intervals. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol.39(6), 844–852.
- Le Lay, Y. 2007. *Les hommes et le bois en rivière*. Université Jean Moulin-Lyon 3. Thèse de doctorat en Géographie et aménagement
- L’Hommedieu, W., Tullos, D., & Jones, J. 2020. Effects of an engineered log jam on spatial variability of the flow field across submergence depths. *River Research and Applications*, vol.36(3), 383–397.
- Lind, L., Nilsson, C., Polvi, L. E., & Weber, C. 2014. The role of ice dynamics in shaping vegetation in flowing waters. *Biological Reviews*, 89, 791–804.
- Lind, L., Nilsson, C., & Weber, C. 2014. Effects of ice and floods on vegetation in streams in cold regions : implications for climate change. *Ecology and Evolution*, vol.4(21), 4173–4184.
- Lindenschmidt, K.E. & Das, A. 2015. A geospatial model to determine patterns of ice cover breakup along the Slave River, *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol.42, 675–685.
- Lininger, K. B., Wohl, E., Sutfin, N. A., & Rose, J. R. 2017. Floodplain downed wood volumes : a comparison across three biomes. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol.42, 1248–1261.
- Lagadec, A., Boucher, É., & Germain, D. 2015. Tree ring analysis of hydro-climatic thresholds that trigger ice jams on the Mistassini River, Quebec. *Hydrological Processes*, vol.29(23), 4880–4890.
- Macvicar, B. J., Henderson, A., Comiti, F., Oberlin, C., & Pecorari, E. (2009). Quantifying the temporal dynamics of wood in large rivers : field trials of wood

- surveying , dating , tracking , and monitoring techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol.34, 2031–2046
- Maltais, M. 2019. *Evolution spatiale et temporelle de la dynamique du bois mort en rivière, Mont-Louis, Gaspésie*. Mémoire de maîtrise en géographie, Rimouski : Université du Québec à Rimouski, 190p
- Maltais, M, Jautzy, T, Buffin-Bélanger, T. 2021. *Développement de connaissances et d'outils pour l'analyse et la gestion des aléas hydrogéomorphologiques (HGM2)*. Rapport final remis au MSP. 176 pages
- Massé, S. 2014. *Analyse hydrogéomorphologique de la dynamique des embâcles de bois mort de la rivière Neigeitte, Bas-Saint-Laurent, Québec*. Mémoire de maîtrise en géographie, Rimouski : Université du Québec à Rimouski, 191p
- Maridet L., Piégay H., Gilard O. et Thévenet A., 1996. L'embâcle de bois en rivière : un habitat écologique ? un facteur de risques naturels ? La Houille Blanche. *Revue internationale de l'eau*, vol.5, 32-38.
- Mazzorana, B., Comiti, F., Scherer, C., & Fuchs, S. 2012. Developing consistent scenarios to assess flood hazards in mountain streams. *Journal of Environmental Management*, vol.94(1), 112–124.
- Mitchell, D. M. W., Entekin, S. A., Adams, G. L., Mitchell, D. M. W., Entekin, S. A., & Structure, G. L. A. 2012. Structure and function of large wood in Ozark headwater streams and its relationship to fish community structure. *Journal of Freshwater Ecology*, vol.27(3), 335–349.
- Morin, S., Boucher, E., & Buffin-Bélanger, T. 2015. The spatial variability of ice-jam bank morphologies along the Mistassini River (Quebec , Canada): an indicator of the ice-jam regime ? *Natural Hazards*, vol.77, 2117–2138.
- Moulin, B., Schenk, E. R., & Hupp, C. R. 2011. Distribution and characterization of in-channel large wood in relation to geomorphic patterns on a low - gradient river. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol.36, 1137–1151.
- Ministère de la Sécurité Publique, 2020. *Historique publique d'embâcles répertoriés au MSP* [En ligne] : <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/historique-publique-d-embacles-repertories-au-msp#>, page consultée le 10 mars, 2021.
- Nagayama, S., Nakamura, F., Kawaguchi, Y., & Nakano, D. 2012. Effects of configuration of instream wood on autumn and winter habitat use by fish in a large meandering reach. *Hydrobiologia*, vol.680, 159–170.

- Pettit, N.E., Naiman, R.J., Rogers, K.H., Little, J.E. 2005. Post-flooding distribution and characteristics of large woody debris piles along the semi-arid Sabie River South Africa. *River Research and Applications*, vol.21: 27–38.
- Picco, L., Bertoldi, W., & Comiti, F. 2016. Geomorphology Dynamics and ecology of wood in world rivers. *Geomorphology*, vol.279. 10–11.
- Price, D. T., Alfaro, R. I., Brown, K. J., Flannigan, M. D., Fleming, R. A., Hogg, E. H., ... Venier, L. A. 2013. Anticipating the consequences of climate change for Canada ' s boreal forest ecosystems 1. *Environmental Review*, vol.21, 322–365.
- Prowse, T. D., & Beltaos, S. 2002. Climatic control of river-ice hydrology : a review. *Hydrological Processes*, vol.16, 805–822.
- Ravazzolo, D., Mao, L., Picco, L., & Lenzi, M. A. 2014. Tracking log displacement during floods in the Tagliamento River using RFID and GPS tracker devices. *Geomorphology*, vol.228, 226–233.
- Reich, M., Kershner, J.L., Wilderman, R.C. 2003. Restoring streams with large wood : a synthesis. In Gregory, S.V., Boyer, K., Gurnel, A.M. (dir). *The Ecology and Management of Wood in World Rivers*. Bethesda : American Fisher Society, 355-366
- Rood,S.B., Goater,L.A., Mahoney,J.M., Pearce,C.M.& Smith,D.G. 2007. Floods, fire, and ice: disturbance ecology of riparian cottonwoods. *Canadian Journal of Botany* vol.85, 1019–1032
- Ruiz-Villanueva, V., Wyżga, B., Zawiejska, J., Hajdukiewicz, M., & Stoffel, M. 2016. Factors controlling large-wood transport in a mountain river. *Geomorphology*, vol.272, 21–31.
- Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J. M., Diez-Herrero, A., & Bladé, E. 2014. Large wood transport as significant influence on flood risk in a mountain village. *Natural Hazards*, vol.74, 967-987.
- Rokaya, P., Budhathoki, S., & Lindenschmidt, K. 2018. Ice-jam flood research : a scoping review. *Natural Hazards*, vol.94(3), 1457–1475.
- Schenk, E. R., Benthem, A. J., Dixon, M. D., Mittelman, M., Skalak, K. J., Hupp, C. R., ... Nustad, R. A. 2018. Large wood distribution, mobility, and recruitment in an inter-dam river reach: A comparison with geomorphic process on the Garrison Reach of the Missouri River pre and post the historical 2011 flood. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol.43(8), 1677–1688.

- Schneider, K. N., & Winemiller, K. O. 2008. Structural complexity of woody debris patches influences fish and macroinvertebrate species richness in a temperate floodplain-river system. *Hydrobiologia*, vol.610(1), 235–244.
- Smith, D. G. (1979). Effects of channel enlargement by river ice processes on bankfull discharge in Alberta, Canada. *Water Resource Research*, vol.15(2):469–475.
- Steel, A.E., Richards, W.H., Kelsey, K.A., 2003. Wood and wildlife: benefits of river wood to terrestrial and aquatic vertebrates. In: Gregory, S.V., Boyer, K.L., Gurnell, A.M. (Eds.), *The Ecology and Management of Wood in World Rivers, Symposium 37*. American Fisheries Society, Bethesda, MD, 235–247.
- Sullivan, T.P., Sullivan D.S. 2001. Influence of variable retention harvest on forest ecosystems. II Diversity and population dynamics of small mammals. *Journal of Applied Ecology*, vol.38:1234–1252
- Sutherland, A. W. J., Adams, W. M., Aronson, R. B., Aveling, R., Blackburn, T. M., Ceballos, G., ... Peck, L. S. 2009. One Hundred Questions of Importance to the Conservation of Global Biological Diversity Essay One Hundred Questions of Importance to the Conservation of Global Biological Diversity. *Conservation Biology*, vol.3, 557–567.
- Tonon, A., Iroumé, A., Picco, L., & Lenzi, M. A. 2017. Temporal variations of large wood abundance and mobility in the Blanco River affected by the Chaitén volcanic eruption, southern Chile. *Catena*, vol.156, 149–160.
- Turcotte, B., Morse, B., Bergeron, N. E., & Roy, A. G. 2011. Sediment transport in ice-affected rivers. *Journal of Hydrology*, vol.409(1–2), 561–577.
- Turcotte, B., & Morse, B. 2013. A global river ice classification model. *Journal of Hydrology*, vol.507, 134–148.
- Uunila, L., Church, M. 2015. Ice on Peace River: Effects on bank morphology and riparian vegetation, in *The Regulation of Peace River: A Case Study for River Management*, edited by M. Church, p. 296
- Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R., Cushing C.E., 1980. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, vol.37: 130-137.
- Wheeler, R., Alix, C., 2004. *Economic and Cultural Significance of Driftwood in Coastal Communities of South Western Alaska*. Report for the Cooperative Extension Services, University of Alaska Fairbanks.

- Wellburn, G., Kuhlberg, M., Exploitation forestière (2015). Dans *l'Encyclopédie Canadienne*. [en ligne] Consultée le 12 septembre 2020
<https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/exploitation-forestiere>
- Wohl, E., Kramer, N., Ruiz-villanueva, V., Scott, D. N., Comiti, F., Gurnell, A. M., ... Fausch, K. D. 2019. The Natural Wood Regime in Rivers. *BioScience*, vol.69(4), 259–273.
- Wohl, E. 2017. Bridging the gaps : An overview of wood across time and space in diverse rivers. *Geomorphology*, vol.279, 3–26.
- Wohl, E., Lininger, K. B., Fox, M., Baillie, B. R., Erskine, W. D. 2017. Forest Ecology and Management Instream large wood loads across bioclimatic regions. *Forest Ecology and Management*, vol.404, 370–380.
- Wohl, E., Bledsoe, B. P., Fausch, K. D., Kramer, N., Bestgen, K. R., Gooseff, M. N., ... Gooseff, M. N. 2016. Management of large wood in streams : overview and proposed framework for hazard evaluation. *Journal of the American Water Resources Association*, vol.52(2), 315–335.
- Wohl, E., Cadol, D. 2011. Neighborhood matters : Patterns and controls on wood distribution in old-growth forest streams of the Colorado Front Range , USA. *Geomorphology*, vol.125, 132–146.
- Wohl, E., Jaeger, K. 2009. A conceptual model for the longitudinal distribution of wood in mountain streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol.34, 329–344.

ANNEXES

ANNEXE 1 : FICHE DE CARACTERISATION DES EMBACLES DE BOIS

Nom:	GPS:
# Photos:	Date:

<u>CARACTÉRISTIQUES DE L'EMBÂCLE</u>		
Position:		
Obstruction du chenal (%):		
Provenance du BM:		
Longueur (m):		
Largeur (m):		
Hauteur (m):		
Densité:		
Composition (%):	Troncs	Branches
RC:	RD:	Racines
<hr/>		
<hr/>		
<hr/>		
<hr/>		

ANNEXE 2 FICHES DE CARACTERISATION DES CICATRICES DE GLACES

Nom:	GPS:
# Photos:	Date:
Niveau:	Localisation:

<u>CARACTÉRISTIQUES DE LA CICATRICES</u>	
Rive Gauche	Rive droite
Aspect :	
Nb de cicatrices s/ l'arbre :	
Longueur :	
Commentaires :	