



Université du Québec
à Rimouski

Évolution spatiale et temporelle de la dynamique du bois mort en rivière, Mont-Louis, Gaspésie

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

© **Maxime Maltais**

Décembre 2019

Composition du jury :

Guillaume Marie, 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

Bruce MacVicar, examinateur externe, University of Waterloo

Dépôt initial le 11 septembre 2018

Dépôt final le 10 décembre 2019

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

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Thomas. Tom, merci infiniment pour la confiance que tu m'as accordée au cours des dernières années. Le cours de biogéo durant lequel on s'est rencontré commence à dater, mais il marque le début d'un grand changement dans ma vie. Merci de m'avoir écouté et de m'avoir accepté au lab sans vraiment me connaître. J'admire la vision que tu as de la science et ta conception des études supérieures et c'est une des raisons qui m'ont motivé à travailler avec toi. Merci pour tes conseils et tes commentaires judicieux, ils ont grandement contribué à la réalisation de ce projet et j'envisage avec joie de continuer à travailler avec toi.

MaxB, merci pour le partage de ton expertise lors de mon arrivée au lab. C'est un peu contre intuitif pour moi d'élaborer un projet de recherche sans aucune connaissance préalable et l'expertise que tu as développée au lab a certainement percolé jusqu'à moi et j'en ai grandement bénéficié. Un gros merci d'avoir pris la codirection de mon projet en cours de route. Merci pour tes nombreux commentaires et conseils, ça représente un atout fondamental au projet.

Merci aussi à Simon Massé de m'avoir initié à la prise de mesure sur le bois mort avant mon premier été de terrain, alors que je me retrouvais parachuté dans la rivière Mont-Louis avant même d'avoir commencé ma maîtrise. Merci pour tes conseils et tes notes pour le traitement de données sur Arcmap.

Sylvio ! Une chance que tu étais là mon gars ! Je serais sûrement encore en train de chercher des solutions à mes problèmes de DGPS si je n'avais pas pu t'appeler quasiment quotidiennement pendant que j'étais en terrain. Merci pour toute l'expertise que tu te plais à partager, j'ai eu les meilleures discussions sur la géomorphologie fluviale et tu es en grande partie responsable de ma compréhension de la dynamique des rivières. Merci aussi pour les conversations informelles au Baro, pour les anecdotes, pour ton authenticité, merci d'être devenu un ami.

Merci aussi à toutes les personnes qui m'ont assisté sur le terrain ou au lab et qui ont permis la collecte de données. Le terrain ce n'est pas toujours facile, ni toujours agréable, mais ça fait du bien d'être avec des gens qu'on apprécie et avec qui on peut passer du bon temps le soir venu. Simon C., Alex, Constance, Fredo, Sophie, Étienne, Oli, merci.

Un immense merci aux amis que je me suis fait à Rimouski depuis mon arrivée. Vous avez été essentiel dans ce processus exigeant. Merci à tous les gens que j'ai côtoyés depuis 3 ans. Mention spéciale à Sophie, mon amie depuis le début de m'avoir tout appris sur la géomorpho. Une géomorphologue pure et dure en équipe avec un gars de l'UQAM qui s'interroge sur le sens des mots, ça peut être un défi, mais l'histoire nous a montré que ça marche !

Merci Fredo d'avoir été là tout le temps, dans les bons moments et dans les moins bons. La complicité qu'on a développée en faisant du karaoké dans la rivière avec un DGPS à moitié fonctionnel, en passant à travers des fins de sessions, en déambulant dans les rues de Barcelone se maintient et elle a été essentielle pour moi.

Mathieu, je ne sais pas ce que tu fais dans mes remerciements, parce qu'après deux semaines de la session du cours d'atelier, tu as ouvertement dit que tu ne t'attacherais à personne à Rimouski, que tu ne prendrais pas nos numéros de téléphone et que tu n'avais pas l'intention de nous revoir. Tout le monde sait maintenant que tu avais tort, tu es encore là. Merci d'avoir été là, pour tous les bons moments, ça fait changement d'avoir un ami un peu « redneck ».

Merci à Boubou et aux amis pûres pour une année pleine de délires, de rires, de malaise et de temps investi pour rien dans un faux projet qui n'existe pas. J'ai passé une super belle année avec vous

Gab, ça remonte à loin, mais ta présence dans ma vie a définitivement influencé la manière dont je travaille maintenant. Les longues nuits qu'on a passées ensemble à étudier dans les cafés de Montréal m'ont permis de développer une rigueur et un désir du travail bien fait. C'en est parfois handicapant, mais merci quand même. Merci d'avoir été là.

Merci à Val et Francis d'avoir été mes amis et mes partenaires pendant le Bacc. Ça remonte à loin ça aussi, mais vous avez grandement contribué au plaisir que j'ai eu à être à l'Université.

Merci au Conseil de l'eau du Nord de la Gaspésie d'avoir collaboré au projet sur la dynamique du bois mort de la rivière Mont-Louis et de m'avoir permis de travailler à partir de vos bureaux.

Je désire aussi adresser un énorme merci à l'ensemble de la communauté de Mont-Louis. Merci de m'avoir accueilli, merci de m'avoir intégré, merci d'avoir pris une place importante dans ma vie.

De manière plus large, je souhaite remercier toutes les personnes qui m'ont supporté au cours de ce processus. Il y a eu de beaux moments frénétiques et des périodes plus difficiles et votre appui m'a permis de continuer lorsque des défis se présentaient. Merci de m'avoir écouté parler de bois mort pendant trois ans, merci d'avoir essayé de comprendre malgré mon incapacité à vulgariser adéquatement. Merci aussi aux personnes qui m'ont épaulé lorsque la motivation diminuait ou qui ont partagé mon enthousiasme lorsque je leur parlais avec excitation de nouveaux résultats, sans trop comprendre ce que ça représente.

Pour terminer, merci au CRSNG pour l'appui financier qui a permis la réalisation des campagnes de terrain associées au projet de recherche.

RÉSUMÉ

Sur la rivière Mont-Louis, les volumes de bois mort semblent en augmentation depuis quelques décennies. La présence de bois mort en rivière est reconnue pour ses effets sur l'écoulement de l'eau, la dynamique sédimentaire et le développement de la morphologie fluviale. L'objectif général qui oriente cette recherche vise à documenter les effets mutuels de la dynamique fluviale et la dynamique du bois mort à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau d'environ 12 km. La distribution et l'évolution interannuelle des volumes de bois mort sont mises en relation avec la segmentation du cours d'eau en tronçons homogènes. Par la suite, les effets de trois embâcles géomorphologiquement actifs sur la topographie locale du lit du cours d'eau sont documentées afin de mettre en évidence les ajustements morphologiques mis en place par les rivières à lit graveleux en présence de bois mort. Enfin, la trajectoire hydrogéomorphologique du cours d'eau est analysée, et mise en relation avec la série temporelle des débits maximaux, l'occupation du sol et l'évolution des superficies boisées.

Les résultats mettent en évidence que la distribution du bois mort est largement conditionnée par le style fluvial du cours d'eau. Quatre tronçons homogènes ont été définis, de l'amont vers l'aval, des tronçons linéaire, divagant, à méandres stables et estuarien. Les volumes de bois produits et accumulés sont largement supérieurs au sein du tronçon divagant, alors que les autres agissent à titre de zone de transport. Les relevés topographiques ont permis de montrer que même les petits embâcles de bois peuvent influencer la dynamique sédimentaire. L'analyse des superficies boisées et des débits historiques montrent que les sources de bois sont en augmentation depuis les années 1980 et que des périodes de crues majeures sont généralement suivies de périodes de débits moyen ou faible. Il est donc proposé que de grands volumes de bois sont recrutés durant les périodes de crues et que les crues moyennes les dispersent en de nombreux embâcles de petits volumes et que l'effet morphologique du bois est maximal lors de ces périodes de débits moyens. L'utilisation de la trajectoire écotopographique est finalement mise de l'avant comme un nouvel indicateur permettant de projeter les ajustements morphologiques du cours d'eau en présence de bois mort.

Mots clés : Dynamique du bois mort, hydrogéomorphologie, trajectoire hydrogéomorphologique, rôle géomorphologique, style fluvial, trajectoire écotopographique, distribution du bois mort

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	vii
RÉSUMÉ.....	xi
TABLE DES MATIÈRES	xii
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
LISTE DES FIGURES.....	xvi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE	6
1.1 PROBLEMATIQUE	6
1.2 OBJECTIFS	8
1.3 TERRITOIRE A L'ETUDE.....	9
CHAPITRE 2 LA DYNAMIQUE DU BOIS MORT SOUS FORME DE BILAN LIGNEUX	13
2.1 LE BILAN LIGNEUX	13
2.1.1 Recrutement du bois mort	15
2.1.2 Transport du bois.....	19
2.1.3 Accumulation du bois mort	22
2.2 EFFETS DU BOIS MORT SUR LE MORPHODYNAMISME FLUVIAL	25
2.3 DYNAMISME DE LA RIPISYLVE ET NOTION D'ÉCHELLE	33
2.4 TRAJECTOIRE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE	37
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	39
3.1 RECOLTE DE DONNEES.....	39
3.1.1 Caractérisation des embâcles et de la ripisylve	39

3.1.2	Relevés topographiques	42
3.1.3	Mesure de débits	44
3.2	TRAITEMENT DES DONNEES.....	46
3.2.1	Spatialisation des photographies aériennes.....	46
3.2.2	Trajectoire hydrogéomorphologique	49
3.2.3	Segmentation du cours d'eau	58
3.2.4	Quantification des volumes de bois mort.....	61
3.2.5	Construction des modèles numériques de terrain	62
CHAPITRE 4 Présentation des résultats		67
4.1	SEGMENTATION DE LA RIVIERE MONT-LOUIS	67
4.2	LA DYNAMIQUE DU BOIS MORT DE LA RIVIERE MONT-LOUIS	75
4.2.1	Portrait des embâcles de bois mort	75
4.2.2	Recrutement du bois mort.....	84
4.2.3	Distribution du bois mort.....	86
4.3	INFLUENCE DU BOIS MORT SUR LE MORPHODYNAMISME FLUVIAL.....	92
4.4	ÉVOLUTION DE LA RIVIERE MONT-LOUIS, DE LA PLAINE ALLUVIALE ET DES DEBITS MAXIMAUX.....	98
4.4.1	Trajectoire hydrogéomorphologique	98
4.4.2	Évolution de la superficie boisée et de la bande riveraine.....	105
4.4.3	Trajectoire hydrologique.....	108
CHAPITRE 5 DISCUSSION		112
5.1	DISTRIBUTION DU BOIS MORT.....	112
5.1.1	Tronçon linéaire	114
5.1.2	Tronçon divagant	119
5.1.3	Tronçon à méandres stables	124
5.1.4	Tronçon estuarien.....	129
5.1.5	Dynamique du bois mort, style fluvial et opportunité de gestion	130
5.2	ÉVOLUTION INTERANNUELLE ET DECENNALE	135

5.3	EFFETS MORPHOLOGIQUES DES EMBACLES DE BOIS MORT	141
5.4	TRAJECTOIRE ECOHYDROGEORMOPHOLOGIQUE	154
5.4.1	L'influence du bois mort sur l'évolution du style fluvial.....	154
5.4.2	Rôle des interventions en cours d'eau sur la dynamique du bois mort et la trajectoire écohydrogéomorphologique.....	163
	CONCLUSION GÉNÉRALE	167
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	171
	ANNEXES	184

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Statut et période de fonction des stations hydrométriques.....	53
Tableau 2. Exemple d'ajustement de la valeur d'élévation des relevés topographiques faits à la station totale	65
Tableau 3. Correction des valeurs d'élévation des relevés topographiques interannuels.....	66
Tableau 4. Variabilité de la largeur du cours d'eau par tronçon homogène.....	70
Tableau 5. Densité de bois de la ripisylve par tronçon homogène	84
Tableau 6. Estimation des volumes de bois produits par tronçon homogène pour chaque période	86

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation du territoire à l'étude : a) territoire d'étude, b) localisation du tronçon, c) localisation du bassin versant.....	12
Figure 2. a) site amont (1), b) site médian (2), c) site aval (3).....	12
Figure 3. Évolution des mécanismes de recrutement de bois selon la position dans le bassin versant ; a) bassin versant ; b) mortalité naturelle ; c) mouvement de masse ; d) érosion des berges (quelques cm/an) ; d) migration latérale (plusieurs cm/an) (adapté de Charlton, 2008).....	17
Figure 4. Recrutement de bois par migration latérale du cours d'eau. a) position initiale du chenal ; b) érosion basal de la berge et racines exposées ; c) recrutement du bois ; d) migration du chenal et recrutement de bois (adapté de Abbe, 2000 par Boivin et Buffin-Bélanger, 2010)	18
Figure 5. Importance relative des paramètres hydrologiques, morphologiques et des caractéristiques du bois quant au transport, en fonction de la taille des cours d'eau (adapté de Gurnell <i>et al.</i> , 2002).....	20
Figure 6. a) formation d'un embâcle à partir d'un tronc clé, b) formation d'embâcle <i>in situ</i> dans un chenal de moins de 10 mètres, c) formation d'un embâcle de <i>transport</i> sur un banc d'accumulation, d) formation d'un embâcle de <i>transport</i> dans un méandre. Les flèches rouges représentent la direction de l'écoulement.....	23
Figure 7. Typologie des embâcles de bois mort selon Boivin et Buffin-Bélanger, 2010, adapté de Abbe et Montgomery (2003).....	24
Figure 8. Aggradation en amont d'un embâcle de bois, (Terrien, 1997)	27
Figure 9. Redistribution des forces hydrauliques associée à la présence d'un embâcle. Les flèches symbolisent la position de la ligne d'écoulement (adaptée de Abbe et Montgomery, 2003).....	28

Figure 10. Formation d'un îlot central suite à la formation d'un embâcle, a) diminution des vitesses en aval, b) formation d'un banc d'accumulation, c) végétalisation du banc d'accumulation, d) îlot annexé à la plaine (adapté de Abbe et Montgomery, 1996)	30
Figure 11. Cycle de la plaine alluviale (adapté de Collins <i>et al.</i> , 2012)	34
Figure 12. Coupe schématique d'une plaine alluviale où les embâcles permettent le développement de végétation mature (adaptée de Collins <i>et al.</i> , 2012)	35
Figure 13. Variation des mécanismes de production et d'exportation du bois mort en fonction de la position sur le bassin versant. (adapté de Keller et Swanson, 1979, dans Gurnell, 2013)	36
Figure 14. Évolution de la trajectoire hydrogéomorphologique en fonction des variables de contrôles (Piégay et Dumont, 2009)	38
Figure 15. Positionnement des relevés de végétations	42
Figure 16. Étendue des relevés topographiques et positionnement des bornes de références a) site amont b) site milieu c) site aval	44
Figure 17. Localisation des capteurs de pression	45
Figure 18. Localisation du tronçon d'étude et de la limite de l'image satellitaire de 2014, a) tronçon d'étude, b) limite de la photographie de 2014, c) décalage entre les orthophotos de 2001 et l'image satellite de 2014	48
Figure 19. Découpage des images aériennes pour le géoréférencement, a) photographie d'origine, b) sections d'images géoréférencées	49
Figure 20. Démonstration des limites typiques utilisées pour définir les tracés fluviaux a) en présence d'îlot végétalisé, b) avec bancs de convexité colonisé par la végétation, c) en présence de chenaux multiples, d) bancs partiellement végétalisés e) chenal linéaire	50
Figure 21. Localisation des bassins versants de référence.....	52
Figure 22. Analyse des débits spécifiques de la rivière Madeleine et de quatre rivières à proximité, s) York, b) Sainte-Anne, c) Darmouth, d) Cascapédia.....	54

Figure 23. Quantification des superficies érodées par le cours d'eau a) superposition des tracés de 1975 et 1981, b) identification des surfaces érodées	56
Figure 24. a) représentation du calcul de la largeur d'une parcelle, b) calcul des superficies érodées par parcelle de 100 m.....	59
Figure 25. Évolution de la sinuosité entre 1963 et 2014 et son effet sur le tracé central du cours d'eau. (a) sinuosité. Du cours d'eau en 1963, b) sinuosité du cours d'eau en 2014, c) tracé central considérant l'ensemble des tracés fluviaux.	60
Figure 26. Zones interpolées pour le krigeage. En bleu, la zone sélectionnée, en vert, la limite de la zone a) site amont, b) site médian, c) site aval.....	63
Figure 27. Jointure des relevés topographiques de la station totale à ceux du DGPS	64
Figure 28. Variabilité spatiale des indicateurs morphométriques, a) Largeur, b) superficies érodées, c) tressage, d) profil longitudinal	69
Figure 29. Segmentation de la rivière Mont-Louis, a) tronçon linéaire, b) tronçon divagant, c) tronçon à méandres, d) tronçon estuarien.....	73
Figure 30. Photographie des différents tronçons ; a) tronçon linéaire, b) tronçon divagant, c) tronçon à méandres stables, d) tronçon estuarien.....	74
Figure 31. Dimension des embâcles de bois mort, En blanc : 2015 ; En noir: 2016	76
Figure 32. Volume typique d'embâcles de bois mort sur la rivière Mont-Louis, a) photos du haut, embâcles de 4m ³ , b) photos du bas embâcle de 8 m ³	78
Figure 33. Distribution des embâcles de bois mort sur la rivière Mont-Louis en 2015.....	80
Figure 34. Distribution des embâcles de bois mort sur la rivière Mont-Louis en 2016.....	81
Figure 35. Relation entre les axes de mesure, Largeur, Longueur et Hauteur, Noir : 2015 ; Blanc : 2016	83
Figure 36. Volume de bois mort accumulé, a) par tronçon homogène, b) par 100 m linéaires pour chaque tronçon homogène.....	87
Figure 37. Distribution et évolution interannuelle des volumes de bois mort de la rivière Mont-Louis.....	88

Figure 38. Évolution interannuelle des volumes de bois mort par tronçon homogène	90
Figure 39. Sites d'accumulation préférentiels	91
Figure 40. Évolution interannuelle de la morphologie du lit du cours d'eau au site 1 ; a) modèle numérique de terrain en 2015, b) modèle numérique de terrain en 2016, c) Photographie du site lors d'un vol de drone en 2015, d) photographie terrain de l'embâcle en 2016, e) localisation du site ; la flèche en a) et b) représente le sens de l'écoulement.....	93
Figure 41. Évolution interannuelle de la morphologie du lit du cours d'eau au site 2 ; a) modèle numérique de terrain en 2015, b) modèle numérique de terrain en 2016, c) Photographie terrain en 2015, d) photographie terrain de l'embâcle en 2016, e) localisation du site ; la flèche en a) et b) représente le sens de l'écoulement.....	95
Figure 42. Évolution interannuelle de la morphologie du lit du cours d'eau au site 3 ; a) modèle numérique de terrain en 2015, b) modèle numérique de terrain en 2016, c) Photographie du site lors d'un vol de drone en 2015, d) photographie du site lors d'un vol de drone en 2016, e) localisation du site ; la flèche en a) et b) représente le sens de l'écoulement.....	97
Figure 43. Trajectoire géomorphologique de la rivière Mont-Louis, a) Indice de sinuosité, b) indice de tressage, c) taux d'érosion, d) largeurs	99
Figure 44. Évolution de la sinuosité par tronçon homogène	101
Figure 45. Évolution du tressage par tronçon homogène	102
Figure 46. Taux d'érosion par tronçon homogène, a) linéaire, b) divagant, c) à méandres, d) estuaire	103
Figure 47. Évolution des largeurs par tronçon homogène, a) linéaire, b) divagant, c) à méandres, d) estuaire	105
Figure 48. Évolution des superficies boisées de la plaine alluviale et de la bande riveraine, a) Plaine alluviale complète, b) Plaine alluviale partielle, c) proportion de bandes riveraines.....	106
Figure 49. a) série temporelle des débits maximaux de la rivière Mont-Louis estimée à partir des débits spécifiques de la rivière Madeleine et de la rivière York, b) écart à la moyenne des débits de la rivière Mont-Louis, en rouge : années des tracés fluviaux.....	109

Figure 50. Localisation du tronçon linéaire	114
Figure 51. Variations de largeur à la confluence	115
Figure 52. Coupe forestière en amont du tronçon d'étude	116
Figure 53. Embâcle d'apex, a) ilot amont, 2015, b) ilot aval, 2015	117
Figure 54. Localisation du tronçon divagant.....	119
Figure 55. Morphologie de plaine alluviale, a) embâcle, b) forêt mature protégée, c) migration du chenal et succession de végétation, d) chenal, e) forêt mature ; la flèche indique le sens de l'écoulement (adapté de Collins <i>et al.</i> , 2012).....	120
Figure 56. a) accumulation à l'amont d'un ilot végétalisé, b) accumulation sur un chenal secondaire.....	123
Figure 57. Tronçon à méandres stables, en jaune, le tracé de 1960, en bleu, le tracé de 2014.....	124
Figure 58. Volume de bois par tronçon homogène a) Volume total, b) volume par 100 m linéaires	125
Figure 59. Représentation du complexe de cônes coalescent de la vallée de Mont-Louis. La limite des cônes a été établie selon la description de Héту et Gray, (1980), *(positionnement et extension des cônes approximative).....	126
Figure 60. Ruisseau à Tremblay, a) dragage de sédiments lors de la crue de juin 2016, b) sédiments dragées suite à la crue de mai 2017 ; Le site de dragage est identifié sur la Figure 59.....	127
Figure 61. Localisation du tronçon estuarien	129
Figure 62. Localisation des ponts.....	133
Figure 63. Estimation du bilan ligneux partiel de la rivière Mont-Louis, entre 2004 et 2016 ; W_{an} : production annuelle moyenne ; V_{am} : volumes provenant de l'amont ; $\Delta S_{2015-2016}$ Variation interannuelle des volumes de bois stockés ; E : volumes exportés ...	140
Figure 64. Embâcle du site 1 ; la flèche indique l'embâcle ainsi que le sens de l'écoulement.....	142

Figure 65. Embâcle du site 2 ; la flèche indique l'embâcle ainsi que le sens de l'écoulement.....	143
Figure 66. Embâcle du site 2 a) 2015 ; b) 2016.....	144
Figure 67. Embâcle du site 3 ; la flèche indique l'embâcle ainsi que le sens de l'écoulement.....	146
Figure 68. Formation de chenaux secondaires sur le site 3	147
Figure 69. Densification de l'embâcle, a) 2015, b) 2016 ; en rouge, le secteur où le bois s'est concentré.....	148
Figure 70. Boucle de rétroaction de la dynamique du bois mort.....	150
Figure 71. Ajustements morphologiques potentiels du cours d'eau en présence de bois par tronçon homogène, le nombre de flèches indique l'ampleur des ajustements	152
Figure 72. Vallée de Mont-Louis, date estimée, 1894, source anonyme (tiré de Pelletier 2012)	155
Figure 73. Estimation de la production historique de bois en relation avec l'évolution des sources de bois et des débits maximaux annuels.....	156
Figure 74. Embâcles et bancs végétalisés	160
Figure 75. Synthèse de la trajectoire éco-géomorphologique.....	162
Figure 76. Drave sur la rivière Mont-Louis a) barrages en aval de l'estuaire (Jean, 1942) et ; b) bassin de rétention dans l'estuaire, années 1930 (musée de la Gaspésie).....	165

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis les années 1970, les effets du bois mort sur la dynamique des rivières et les écosystèmes fluviaux retiennent l'attention des scientifiques dans l'Ouest américain et canadien, où les cours d'eau ont été moins perturbés à cause de la colonisation plus tardive du territoire (Wohl, 2014). Selon Montgomery et Piégay (2003), en Amérique du Nord, ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle que des efforts visant à retirer le bois mort des cours d'eau ont été déployés jusque sur la côte Ouest américaine. Les motivations justifiant le démantèlement des embâcles et le retrait des bois morts varient, mais s'articulent autour d'aménagements permettant l'occupation d'un nouveau territoire tels que l'entretien des voies navigables ou l'exploitation des ressources naturelles, notamment par la pratique de la drave. À la fin du XX^e siècle, ce sont des écrits historiques témoignant de ces travaux d'entretien et des imposants volumes de bois présents dans les cours d'eau portent les scientifiques à s'interroger sur la dynamique naturelle du bois en rivière.

Les premières recherches sur le bois mort en milieu fluvial ont porté sur le rôle écosystémique des embâcles dans les cours d'eau et ont montré une forte relation entre la présence de bois mort et l'abondance et la diversité de poissons. Les géomorphologues ont permis d'établir un pont entre bois mort et habitat faunique en décrivant la manière dont les processus et les formes fluviales sont modifiés par la présence de bois mort et comment cette dynamique favorise la création de nouveaux habitats. Les recherches ont surtout été articulées autour des effets du bois mort sur la structure de l'écoulement, de la dynamique sédimentaire et de l'influence morphologique des embâcles (Gurnell *et al.*, 2002).

Depuis cette époque, l'étude de la dynamique du bois mort en rivière a gagné en popularité en Europe (Ravazzolo *et al.*, 2015 ; Moulin *et al.*, 2011 ; Kali, 2003 ;

Thévenet *et al.*, 1998 ; Piégay et Gurnell, 1997), au Japon (Nakamura *et al.*, 2017 ; Seo *et al.*, 2015 ; 2010 ; 2008 ; Nagayama *et al.*, 2012), en Australie (Webb et Eskrine, 2003) ainsi que dans le Nord canadien (Kramer, 2016). Malgré cet intérêt grandissant, un nombre insuffisant d'environnements ont fait l'objet d'études alors que les processus qui la régissent varient grandement selon la topographie, le contexte hydroclimatique, le style fluvial et l'occupation du territoire (Wohl, 2013 ; Seo *et al.*, 2010 ; Gurnell *et al.*, 2002). Très peu d'intérêt a été accordé au bois mort dans les systèmes fluviaux dans l'Est de l'Amérique et encore moins au Québec.

Le cas de la rivière Saint-Jean a toutefois permis d'ouvrir la voie à la recherche portant sur la dynamique du bois mort au sein de rivières québécoises. Dans ce dossier grandement médiatisé, un embâcle de 3 km de long formé dans l'estuaire de la rivière était montré du doigt comme la cause de la mortalité du saumon. L'idée de démanteler l'embâcle dans une optique de restauration de l'habitat a rapidement été mise de l'avant. Afin de déterminer l'efficacité d'une telle opération, il apparaissait toutefois nécessaire de documenter les processus qui ont mené à la formation de cet imposant embâcle. Ainsi, des recherches sur la dynamique du bois mort de la rivière Saint-Jean ont été entreprises et se sont conclues par un rapport de recherche (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010) et une thèse de doctorat (Boivin, 2016). Ces travaux ont permis au Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale de l'UQAR de développer une expertise en matière de bois mort dans l'est de la province et d'agir à titre de phare pour les recherches subséquentes.

Malgré ceci, les impacts associés à la présence d'embâcles de bois mort dans les cours d'eau demeurent très peu documentés au Québec (Boivin *et al.*, 2017a, 2017 b ; 2015 ; Massé, 2014 ; Boivin et Buffin-Bélanger, 2010) et le manque de connaissance engendre des défis au niveau de la gestion (i) des inondations, (ii) de l'érosion, (iii) de la sécurité des personnes et des infrastructures, (iv) de l'usage et (v) des services écosystémiques. En réponse à ces défis, il importe, en premier lieu, de développer une meilleure connaissance de la dynamique du bois mort selon les caractéristiques du système fluvial et en second lieu, d'adopter des outils

de gestion conséquents, qui permettent à l'ensemble des processus fluviaux de s'opérer, particulièrement lorsque ceux-ci sont influencés par la présence de bois mort.

Alors qu'à l'international, le maintien et la réintroduction de bois mort dans les rivières composent la stratégie de restauration des systèmes fluviaux (JFNew, 2007 ; Ledard *et al.*, 2001 ; OPSW, 1999), au Québec, la perception défavorable dont héritent les embâcles de bois mort ainsi que la Loi sur les compétences municipales (L.R.Q., C-47.1), incite les municipalités à retirer le bois des cours d'eau. Cette dernière stipule que « toute municipalité régionale de comté (MRC) doit réaliser les travaux requis pour rétablir l'écoulement normal des eaux d'un cours d'eau lorsqu'elle est informée de la présence d'une obstruction. » Ces interventions sont généralement réalisées sans considération pour le type d'embâcle et les rôles qu'il peut jouer sur la stabilisation des berges, la réduction des inondations, la création et le maintien d'habitats aquatiques et riverains. De plus, comme la présence de bois mort dans les milieux fluviaux résulte de processus naturels et favorise la création d'habitats (Gonzalez *et al.*, 2017 ; Hafs *et al.*, 2014 ; Nagayama *et al.*, 2012 ; Abbe et Montgomery, 1996), il est impératif que les initiatives prises en termes de gestion considèrent la dynamique du bois mort comme un élément structurant la prise de décision.

A cet effet, des opérations de démantèlement et d'aménagement d'embâcles ont été réalisées sur la rivière Mont-Louis, en Gaspésie, au cours des années 2000, et sont de nouveau envisagées. La municipalité de Saint-Maxime-du-Mont-Louis identifie la croissance du volume de bois comme une menace pour la sécurité de la population riveraine, un facteur aggravant l'érosion ainsi que les inondations. Avant d'entamer des actions qui peuvent avoir des répercussions non désirées sur le recul des berges et les écosystèmes, il importe de développer une meilleure compréhension des relations qui unissent la dynamique du bois mort et la dynamique fluviale à l'échelle locale ($\approx 500\text{m}$) et à celle du tronçon principal ($\approx 12\text{ km}$).

À travers son Plan directeur de l'eau (PDE), le Conseil de l'eau du Nord de la Gaspésie (CENG) reconnaît à la fois la nécessité d'acquérir des connaissances sur la dynamique des cours d'eau de son territoire et de faire le suivi des embâcles de bois mort sur

la rivière Mont-Louis, qui semblent être en augmentations depuis plusieurs années. C'est donc dans cet esprit que s'inscrit ce projet de recherche.

Ce mémoire met en lumière les interactions qui unissent la dynamique du bois mort et la dynamique fluviale de la rivière Mont-Louis. Des données originales sont soumises à une analyse portant sur la distribution et l'évolution des volumes de bois mort et de la bande riveraine le long du corridor fluvial, à des échelles temporelles interannuelles et décennales. De plus, les effets des embâcles sur la morphologie du lit sont présentés à une échelle interannuelle en vue de documenter leur interaction avec le transit sédimentaire. Enfin, la dynamique du bois mort est étudiée d'un point vu historique, par l'analyse de l'évolution des volumes de bois introduits au cours d'eau et sa mise en relation avec l'évolution de la morphologie de la rivière Mont-Louis.

Les résultats de ce mémoire permettront ainsi de documenter la dynamique du bois mort au sein de la rivière Mont-Louis, tant au niveau de sa mobilité interannuelle et décennale sur le tronçon fluvial que des effets morphologiques des embâcles. Conjointement aux travaux de Boivin (2016 ; 2010) et de Massé (2014), ils permettent d'amorcer la construction d'un portrait régional portant sur la dynamique du bois mort dans les rivières de l'est du Québec. De plus, ce mémoire permet de positionner la rivière Mont-Louis sur l'échiquier mondial et de créer un point de référence concernant les volumes de bois mort accumulés dans les rivières à lit graveleux.

Enfin, les relations entre la dynamique du bois mort et la dynamique sédimentaire ainsi que les répercussions sur le style fluvial sont décrites. La littérature scientifique regorge d'informations relative aux effets locaux du bois mort sur le transit sédimentaire, mais peu de recherches documentent le phénomène à l'échelle du tronçon, sur plusieurs décennies (Perker *et al.*, 2017 ; Wohl et Scott, 2016). Ce mémoire dresse donc un portrait évolutif de la quantité de bois introduit au chenal et de son influence sur le fonctionnement du cours d'eau.

Le premier chapitre expose la problématique de recherche, identifie les objectifs et présente le territoire à l'étude. Le second quant à lui fait l'état des connaissances portant sur la dynamique du bois mort en rivière afin d'appuyer et d'alimenter les réflexions proposées en discussion. Le troisième chapitre met de l'avant les méthodes utilisées pour la récolte ainsi que le traitement des données. La méthodologie utilisée est suffisamment détaillée pour être facilement reproductible, ce qui permet de procéder au suivi de l'évolution des volumes de bois sur la rivière en utilisant une démarche uniforme. Dans le chapitre 4, les résultats sont exposés et mis en relation dans une discussion soutenue au chapitre 5.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

1.1 PROBLEMATIQUE

Au cours des dernières décennies, la dynamique du bois mort est devenue un sujet d'étude d'intérêt chez les géomorphologues partout autour du globe à cause de l'influence des scientifiques américains. Ces derniers disposaient de registres décrivant les rivières à leur état naturel, avant l'occupation et l'exploitation intensive du territoire par les premiers colons (Montgomery et Piégay, 2003). Selon Wohl (2014), le bois mort a été retiré des cours d'eau pour faciliter la navigation des navires et la circulation des billes de bois issues de la drave. L'industrie forestière était en plein essor, et la coupe des arbres de la ripisylve était privilégiée, car la flottaison du bois vers l'aval est demeurée la façon la plus efficace d'assurer le transport du bois jusqu'à l'arrivée du chemin de fer. La pratique de la drave s'est étendue sur la quasi-totalité du territoire américain, et ce n'est que vers la fin du XX^e siècle que l'entretien des cours d'eau pour faciliter le transport des arbres a cessé.

Ainsi, des décennies, voire des siècles, d'artificialisation des chenaux se sont succédés, si bien que la perception des cours d'eau dans l'imaginaire collectif en a été altérée. Toujours selon Wohl (2014), l'absence de bois dans les rivières durant cette longue période a écarté l'importance de ses effets sur le fonctionnement géomorphologique et écosystémique des cours d'eau de l'esprit des scientifiques. Vers la fin du XX^e siècle, l'arrêt du « nettoyage » des cours d'eau et la gestion par bande riveraine ont permis la réintroduction du bois mort dans les systèmes fluviaux. Toutefois, la perception biaisée induite par une longue période de nettoyage systématique des cours d'eau- laisse croire que le bois mort en rivière est un phénomène nouveau et indésirable (Chin *et al.*, 2008). L'approfondissement des

connaissances sur la dynamique du bois mort devient donc essentiel afin de cerner la manière dont elle se manifeste en milieu fluvial et de valoriser son rôle tant au niveau des services écosystémiques que géomorphologiques. La réintroduction du bois dans les cours d'eau sur une période de plusieurs dizaines d'années est en effet susceptible de changer de façon marquée le style et la morphologie fluviale.

La rivière Mont-Louis a connu une histoire très similaire à celle décrite par Wohl (2014). La fin de la drave dans les années 1960-70 a permis au bois mort de réintégrer le chenal. La rivière se démarque aujourd'hui par la présence de grands volumes de bois au sein du chenal principal. Les constats issus du Plan directeur de l'eau suggèrent que certains embâcles de bois mort (EBM) obstruent complètement le chenal, limitent la montaison du saumon et provoquent des inondations sur certains secteurs (Arsenault et Fugère, 2003). Les autorités municipales ainsi que l'association de pêcheurs de Mont-Louis ont alors mis en place une série de travaux d'aménagements et de démantèlement d'embâcles qui visaient à optimiser la migration et l'habitat du poisson et à capter le bois en transit sur certains sites spécifiques où les inondations et l'érosion n'affectent pas la population riveraine (Hébert, 2004).

La firme Activa Environnement a par la suite été mandatée pour faire le suivi des travaux et ils ont répertorié 14 embâcles situés sur le tronçon principal de la rivière Mont-Louis (Hébert, 2006). À l'automne 2014, la caractérisation des embâcles a été effectuée dans un cadre académique pour le cours *Atelier pratique sur le terrain sur l'analyse et la prévention des risques naturels I* du diplôme d'études supérieures spécialisées (DESS) en analyse et prévention des risques naturels de l'UQAR. Au cours de cet exercice, 84 embâcles ont été recensés et mesurés au sein du même tronçon, soulignant une grande augmentation du nombre d'embâcles en 10 ans (Tremblay *et al.*, 2014).

Les cours d'eau du nord de la Gaspésie sont très réactifs aux perturbations et de telles accumulations de bois risquent d'affecter le morphodynamisme fluvial. Comme l'augmentation des taux d'érosion des berges et des superficies inondées sont parmi les effets associés à la présence de bois mort affectant la municipalité, le CENG fait état de la nécessité

de réaliser un suivi des embâcles et de la dynamique du bois mort afin d'orienter les stratégies d'actions.

L'intérêt accordé aux EBM par le CENG et la municipalité de Saint-Maxime-du-Mont-Louis témoigne de l'importance que revêt ce phénomène pour la localité et met l'accent sur la pertinence de mieux comprendre les facteurs conditionnant les interrelations entre la dynamique fluviale et celle du bois mort. En exacerbant ou en inhibant les processus qui régissent le cours d'eau, les embâcles de bois mort exercent un contrôle sur le style et la dynamique fluviale qui se traduit sur l'ensemble du tronçon principal de la rivière Mont-Louis. Le caractère imprévisible des ajustements morphologiques du cours d'eau en présence de bois mort souligne la nécessité de faire un suivi de l'évolution spatiale et temporelle des embâcles à de multiples échelles et d'intégrer leurs effets dans une réflexion portant sur la gestion du cours d'eau.

1.2 OBJECTIFS

L'objectif principal du projet de recherche sur la dynamique du bois mort de la rivière Mont-Louis vise à cerner les effets mutuels du bois mort et de la dynamique fluviale. Ce dernier s'articule autour de trois sous objectifs :

1. Décrire les interrelations entre la dynamique fluviale, la distribution spatiale et la mobilité des embâcles de bois mort à plusieurs échelles temporelles ;
2. Analyser l'évolution d'embâcles, leurs effets sur la topographie locale et la migration latérale du cours d'eau ;
3. Examiner l'influence du bois mort et de la ripisylve sur la trajectoire hydrogéomorphologique des rivières en fonction de leurs effets sur les processus d'érosion.

1.3 TERRITOIRE A L'ETUDE

La rivière Mont-Louis est une rivière à caractère divagant longue de 45,6 kilomètres qui se jette dans le golfe du Saint-Laurent, au sein de la municipalité de Saint-Maxime-du-Mont-Louis (figure 1). Le tronçon principal s'écoule vers le nord, à travers une vallée principalement composée de dépôts fluvioglaciaires et marins hérités de la dernière période glaciaire ainsi que de dépôts fluviaux contemporains (Hétu *et al.*, 1980). Son bassin versant d'environ 300 km², situé dans la MRC de la Haute-Gaspésie, prend sa source dans le massif montagneux des Chic-Chocs, et culmine à plus de 900 mètres d'altitude (Arsenault et Fugère, 2003). Le substrat rocheux, affleurant par endroits, est composé principalement de schistes argileux et ardoisiers, de grauwacks et de quelques lits calcaires (Hétu et Grey, 1980). Les précipitations annuelles moyennes à la station météorologique de Sainte-Anne-des-Monts, située à un peu plus de 50 km, indiquent un total annuel de 864 mm, dont le tiers tombe sous forme nivale (Environnement Canada, 2019). La station météo est toutefois située le long de la côte, où les précipitations sont moins grandes que dans la portion montagneuse des bassins versants.

Tel que décrit par Hébert (2006), le régime hydrologique est saisonnier, conditionné par les précipitations automnales, printanières ainsi que par la fonte du couvert neigeux accumulé sur les sommets des plateaux appalachiens. L'amont du bassin ainsi que les versants sont caractérisés par la présence de nombreux cours d'eau intermittents et de fortes pentes permettant un temps de concentration rapide des eaux. La forte torrencialité des tributaires fournit un grand volume de sédiments au cours d'eau principal et la saturation rapide de la nappe phréatique ainsi que les faibles pentes du fond de la vallée confère un mauvais drainage.

Selon le portrait dressé par Arsenault et Fugère (2003), le bassin versant est forestier dans une proportion de 90 % et composée à 62 % d'espèces résineuses, dont principalement le sapin baumier (*Abies balsamea*), l'épinette noire (*Picea mariana*) et l'épinette blanche (*Picea glauca*) ainsi que de thuya (*Thuja occidentalis*). Concentrés aux abords du cours d'eau et sur les versants de la vallée, les populations de feuillus et mixtes représentaient 13 % du couvert forestier du bassin versant, alors que des coupes en amont du bassin ont laissé place à près de 25 % d'espèces en voie de régénérescence.

La confluence entre les rivières Mont-Louis Ouest et Mont-Louis Est, à environ 12 kilomètres en amont de l'embouchure, représente la limite amont du territoire à l'étude. La limite aval quant à elle se trouve dans l'estuaire de la rivière et correspond au pont de la route 132 (figure 1). Dans un cadre académique, Tremblay *et al.*, (2014) ont identifié trois unités morphodynamiques homogènes au sein de ce même secteur. De l'amont vers l'aval, ils trouvent une unité divagante à chenaux multiples, une unité à méandres dynamiques et une unité à méandres stables mesurant respectivement 8,2 km, 2,5 km et 3 km. Cette analyse repose toutefois principalement sur la morphologie actuelle de la rivière et une analyse plus approfondie de la dynamique historique permettra de valider cette segmentation. Leur démarche souligne toutefois que la rivière Mont-Louis est dominée par un style divagant qui lui confère une grande mobilité, d'imposants bancs d'accumulations et l'occurrence d'avulsion. La portion aval de la rivière est occupée de manière permanente depuis 1689, alors que le Seigneur Denis Riverin, qui désirait développer l'industrie de la pêche, instaura un poste de traite au sein de la seigneurie qui lui avait été concédée. L'activité économique du village est donc centrée autour des pêches, jusqu'au XX^e siècle, alors que la *Mont-Louis Seigniorie* installe un moulin à scie qui exploite de bois de drave issue des activités forestières.

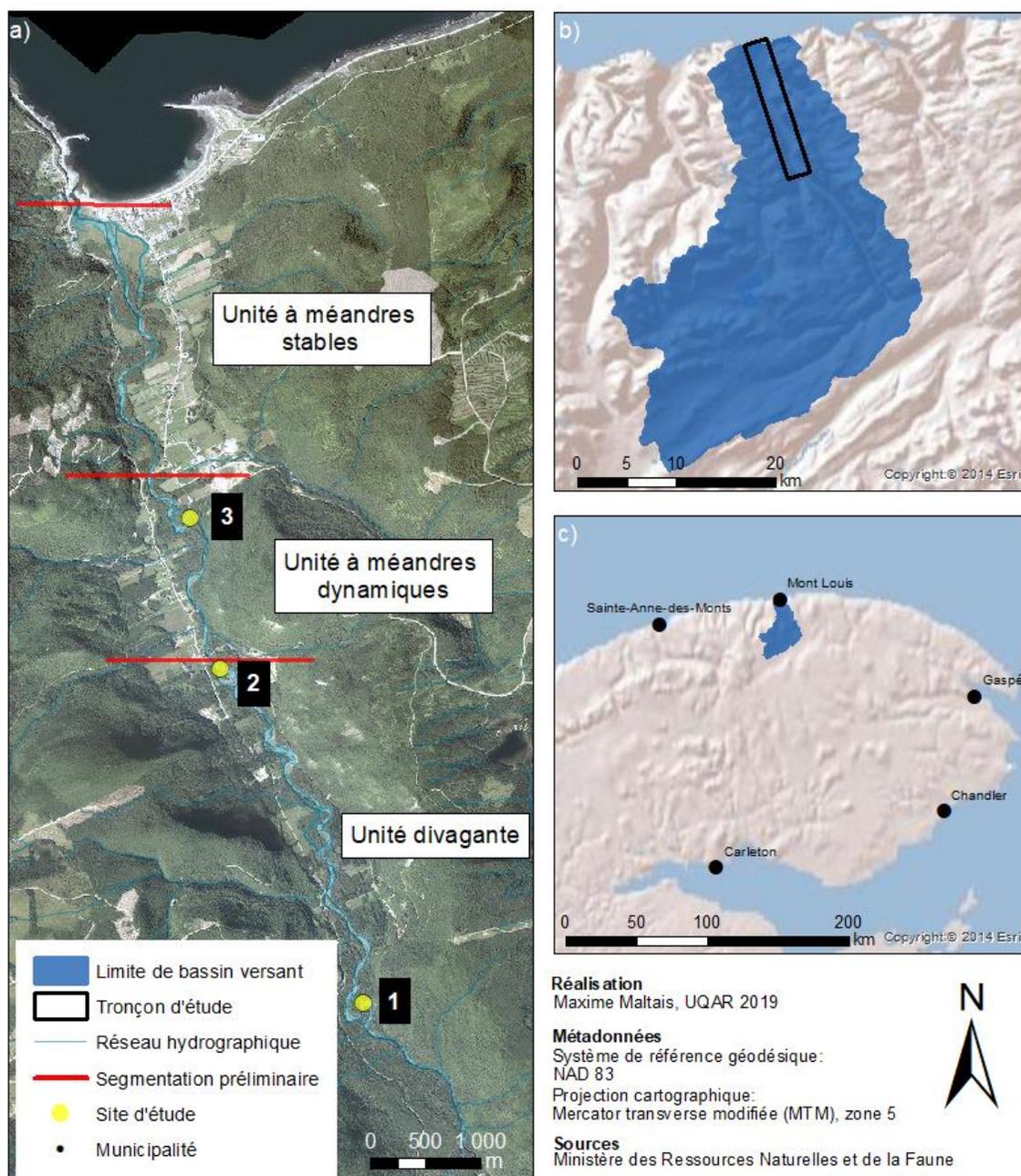


figure 1. Localisation du territoire à l'étude : a) territoire d'étude, b) localisation du tronçon, c) localisation du bassin versant

À une échelle plus locale, trois sites comprenant au moins un embâcle de bois mort morphologiquement actif ont été sélectionnés afin de qualifier leurs effets sur la topographie et la migration du chenal. Deux d'entre eux sont situés dans l'unité divagante à chenaux multiples et un dans l'unité à méandres dynamiques identifiés par Tremblay *et al.*, (2014) (figure 1). Le site 1 en amont se situe dans un environnement très peu anthropisé et les embâcles n'ont subi aucune intervention connue, alors que le second se trouve à quelques mètres d'un pont (figure 2 a et b). Le site 3 quant à lui se situe vers l'aval du tronçon et l'embâcle qui se trouve sur la berge concave du méandre est l'un de ceux qui inquiètent la municipalité due à son grand volume (figure 2 c).



figure 2. a) site amont (1), b) site médian (2), c) site aval (3)

CHAPITRE 2

LA DYNAMIQUE DU BOIS MORT SOUS FORME DE BILAN LIGNEUX

Ce chapitre permet de mettre en lumière les fondements théoriques sur lesquels repose la compréhension actuelle de la dynamique du bois mort dans les milieux fluviaux. Procéder à l'évaluation du bilan ligneux constitue la première étape d'une démarche visant à comprendre la dynamique du bois mort. Il est conditionné par la production de bois, son transport, son stockage au sein d'un système fluvial et ultimement, de son évacuation complète. Cette étape représente souvent un défi d'analyse, mais la compréhension et la quantification des premières composantes permettent d'identifier des tendances que suivent les cours d'eau à travers le temps. Dans un premier temps, le concept de bilan ligneux sera exposé ainsi que les mécanismes qui conditionnent la production, le transport et l'accumulation du bois. Dans un second temps, le rôle que peut jouer le bois mort sur le morphodynamisme de la rivière sera détaillé. Enfin, l'importance des caractéristiques de la ripisylve ainsi que la relation entre l'échelle spatiale et les processus régissant la dynamique de bois sont présentées.

2.1 LE BILAN LIGNEUX

En géomorphologie fluviale, la quantification des volumes de bois dans un système s'effectue par l'établissement d'un bilan ligneux (Benda *et al.*, 2003 ; Montgomery *et al.*, 2003 ; Keller et Swanson, 1979). De la même façon que les bilans sédimentaires, les bilans ligneux relèvent de l'équilibre entre trois sphères, soit les apports, le stockage et les exports (Wohl, 2013 ; Benda *et al.*, 2003 ; Martin et Benda, 2001 ; Keller

et Swanson, 1979). À l'échelle du bassin versant, on identifie donc des zones de production, de transit et d'accumulation. Keller et Swanson (1979) ont été les premiers à aborder la dynamique du bois mort sous forme de bilan, et Benda *et al.*, (2003) ont proposé un cadre quantitatif permettant d'évaluer avec plus d'exactitude le bilan ligneux. Plus récemment, Boivin *et al.* (2017b) ont proposé une adaptation de la formule de Benda *et al.*, (2003), soulevant que le bilan ligneux peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$W = E + D + \Delta S \quad (1)$$

Où W représente le volume de bois recruté, E représente les exports, D , la décomposition et ΔS , la variation du stockage. Toutefois, en milieu naturel, il s'avère ardu d'établir un bilan complet, parce que certaines composantes sont difficilement mesurables, particulièrement les exports (E) et la décomposition (D). Pour ce qui est de l'export (E), les bassins versants étant des systèmes ouverts, ils interagissent avec d'autres systèmes limitrophes par des échanges d'énergies et de matériel (Pasternack, 2013). L'exutoire d'un cours d'eau constitue la zone d'interaction entre deux systèmes, l'un fluvial, et l'autre fluvial, lacustre ou estuarien, où sont évacués les sédiments et les bois morts. À moins qu'il y ait une zone de blocage du transit d'un système à un autre, le transfert de matières peut rendre difficile la quantification des volumes de bois évacués et force ainsi l'édification d'un bilan ligneux partiel (Hassan *et al.*, 2005 ; Benda *et al.*, 2003). Pour ce qui est de la décomposition (D), le contexte bioclimatique tempéré, marqué par de longues périodes froides comme c'est le cas au Québec, minimise la décomposition du bois, cette variable apparaît alors insuffisante pour modifier significativement les volumes de bois mort aux échelles annuelle et décennale. La perte de volume de bois par décomposition est ainsi généralement considérée comme non significative pour la mise en place de bilan ligneux à des courtes périodes de temps dans les climats froids (Boivin *et al.*, 2017 b ; Wohl, 2013).

Selon l'équation (1), l'établissement du bilan ligneux partiel repose sur la quantification des volumes de bois produits et les variations de stockage au sein du corridor fluvial, car E est inconnu et D est nul. Le succès de cette démarche est donc dépendant de

l'identification des zones de production et d'accumulation du bois mort, des mécanismes qui régissent la mobilité et de la distribution des volumes de bois mort dans le corridor fluvial.

À l'échelle du bassin versant, le bois mort adopte une distribution spatiale conditionnée par la capacité de transport et la taille du cours d'eau. Les chenaux les plus étroits, généralement situés dans la portion amont du bassin versant, comptent un nombre plus important d'embâcles, car la taille du bois excède souvent la largeur du cours d'eau, permettant difficilement son transfert vers l'aval (Kraft *et al.*, 2011 ; Gurnell *et al.*, 2002 ; Marcus *et al.*, 2002). Ces accumulations formées sur place sont souvent de petite taille, peu structurées et distribuées aléatoirement le long du chenal (Wohl, 2013 ; Abbe et Montgomery, 2003 ; Webb et Erskine, 2003). Inversement, les accumulations de bois mort en aval sont moins nombreuses, mais plus volumineuses et respectent une certaine distribution spatiale, car l'élargissement progressif du chenal confère la capacité de transport nécessaire pour acheminer le bois vers des zones d'accumulations préférentielles (Montgomery *et al.*, 2003 ; Gurnell *et al.*, 2002 ; Piégay et Gurnell, 1997 ; Keller et Swanson, 1979). Ainsi, l'analyse de la dynamique du bois mort et l'établissement d'un bilan ligneux reposent avant toute chose sur la reconnaissance des principaux processus qui régissent la dynamique fluviale.

2.1.1 Recrutement du bois mort

Les mécanismes de recrutement qui permettent d'introduire les arbres dans des cours d'eau varient grandement selon la taille des cours d'eau et leur position au sein du bassin versant. Dans les cours d'eau de taille modeste en tête de bassin, généralement d'ordre 1 à 3, le contrôle lithologique et les fortes pentes favorisent le développement d'un style fluvial linéaire où la migration latérale est très faible, voire nulle (Hassan *et al.*, 2005 ; Nakamura et Swanson, 2003). Ainsi, à moins d'un élargissement spectaculaire du cours d'eau ou d'une avulsion torrentielle, la production du bois mort repose plutôt sur les processus de versant tels que les glissements de terrain ou les avalanches et sur la mortalité naturelle, les feux ou

les épidémies que sur les processus fluviaux (Lawrence *et al.*, 2013 ; Seo *et al.*, 2010 ; 2008 ; Hassan *et al.*, 2005 ; Benda, 1990). Les processus de versants, comme source de bois mort, sont plus limités dans l'espace et dans le temps, c'est-à-dire qu'ils se produisent peu fréquemment et de façon très localisée. Toutefois, lors d'un événement, ils peuvent introduire un très grand volume de bois dans le cours d'eau (Seo *et al.*, 2010).

Par ailleurs, dans ce type d'environnement, la hauteur des arbres est généralement supérieure à la largeur du cours d'eau. Ainsi, lorsqu'ils sont introduits au système fluvial, les arbres atteignent la berge opposée et n'interagissent que très peu ou pas du tout avec l'écoulement de l'eau, les rendant indisponibles pour le transport (Baillie *et al.*, 2008). Pour cette raison, les petits cours d'eau en tête de bassin versant peuvent retenir un grand volume de bois mort (Marcus *et al.*, 2002). Avec le temps, la décomposition et la fragmentation réduisent la taille du bois et permettent sa mobilisation. (Merten *et al.*, 2013 ; 2010 ; Seo *et al.*, 2008 ; Hassan *et al.*, 2005 ; Nakamura et Swanson, 1993).

Dans les chenaux d'ordre 3 ou 4, la hauteur des arbres correspond généralement à la largeur du cours d'eau (Marcus *et al.*, 2002). Leur position au sein du chenal est donc largement conditionnée par la force du courant, la profondeur d'eau et le rapport entre la hauteur de l'arbre et la largeur du chenal (Wohl, 2013 ; Gurnell *et al.*, 2002). Selon Marcus *et al.* (2002), les cours d'eau de cette taille produisent plus de bois mort que les autres, mais ont la capacité de les évacuer. Ils manifestent en fait des signes d'équilibre dynamique, alors qu'au fil des crues, la rivière a la capacité d'exporter des volumes de bois équivalents à ceux qu'elle produit.

Dans les chenaux d'ordre supérieur, la largeur et la profondeur du chenal ainsi que la capacité de transport du cours d'eau peuvent grandement varier, mais elles sont généralement suffisamment grandes pour transporter le bois mort recruté (Wohl, 2013). Une transition des modes de recrutement du bois mort se manifeste d'ailleurs avec l'augmentation de la superficie drainée. Alors que les apports en bois des petits bassins versants sont surtout conditionnés par la dynamique de versant ainsi que l'âge et la durée de vie des peuplements forestiers, les bassins plus vastes voient la contribution de ce type de recrutement diminuer

et les apports en bois mort se font principalement par érosion des berges (figure 3) (Seo *et al.*, 2010 ; Baillie *et al.*, 2008 ; Marcus *et al.*, 2002 ; Keller et Swanson, 1979).

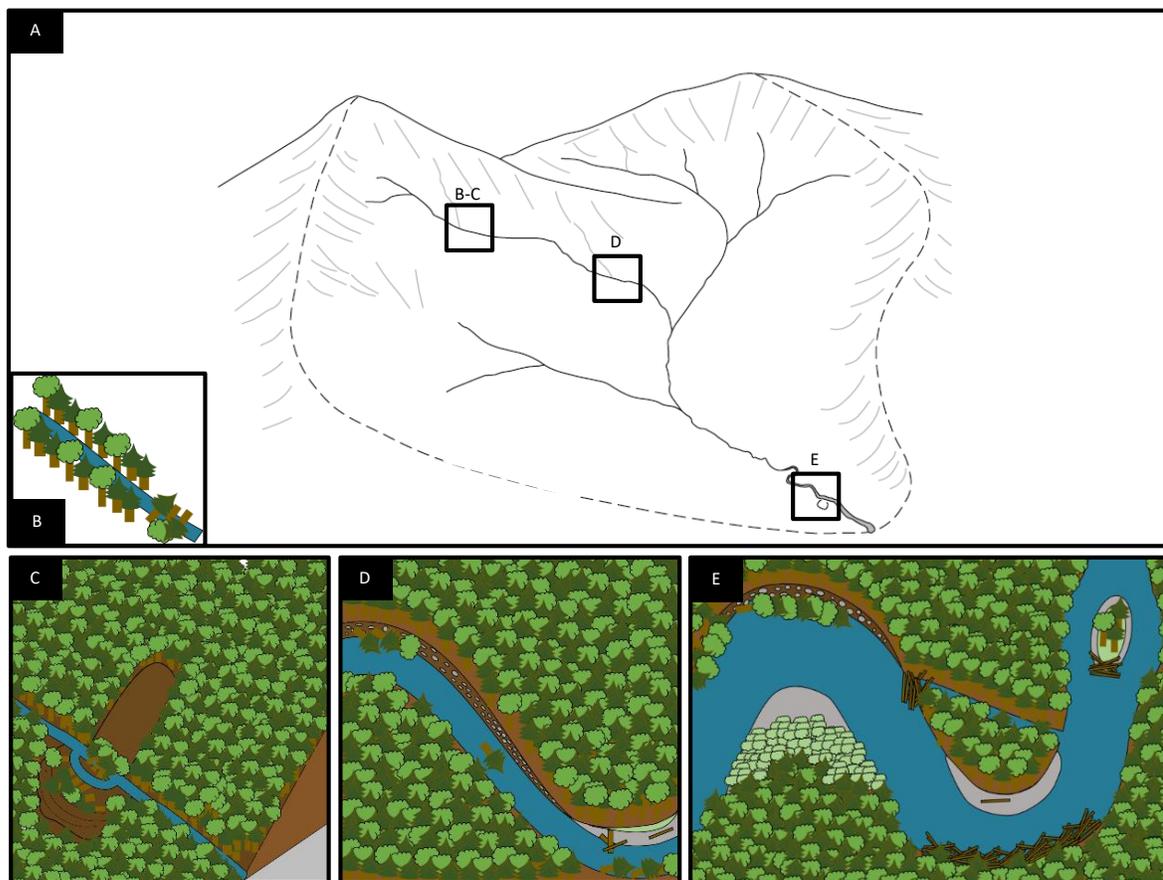


figure 3. Évolution des mécanismes de recrutement de bois selon la position dans le bassin versant ; a) bassin versant ; b) mortalité naturelle ; c) mouvement de masse ; d) érosion des berges (quelques cm/an) ; e) migration latérale (plusieurs cm/an) (adapté de Charlton, 2008)

La plaine alluviale constitue une vaste surface avec une pente trop faible pour que s'activent des processus de versants et bien que la mortalité naturelle de la ripisylve contribue toujours à introduire du bois dans le système, cet apport reste marginal lorsque les taux d'érosion sont grands (Lawrence *et al.*, 2013 ; Gurnell *et al.*, 2002). En présence de ripisylve, la migration du chenal devient le principal facteur qui détermine le taux de recrutement de bois dans les cours d'eau alluviaux, alors que les secteurs à forte mobilité recrutent plus de bois mort que les chenaux plus statiques (Seo *et al.*, 2010 ; Baillie *et al.*, 2008).

En période de crue, l'écoulement de l'eau exerce une grande pression à la base des berges concaves, déloge le matériel qui s'y trouve et déstabilise de surcroît la partie supérieure (Gurnell *et al.*, 2002). Ainsi, la portion de la berge dans laquelle s'ancrent les racines se retrouve perchée au-dessus du cours d'eau et cède en raison du manque de support, permettant aux arbres de basculer au sein du chenal (Wohl, 2013) (figure 4).

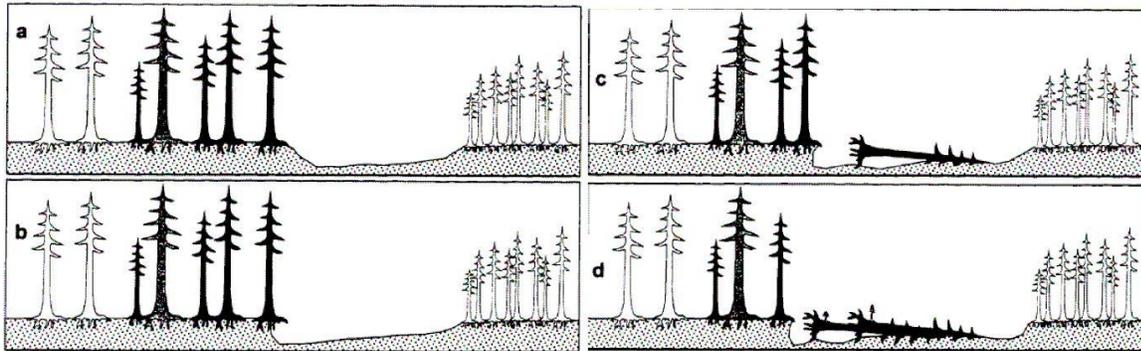


figure 4. Recrutement de bois par migration latérale du cours d'eau. a) position initiale du chenal ; b) érosion basal de la berge et racines exposées ; c) recrutement du bois ; d) migration du chenal et recrutement de bois (adapté de Abbe, 2000 par Boivin et Buffin-Bélanger, 2010)

Il est ainsi possible de distinguer, au sein d'un même corridor fluvial, les zones potentielles de production de transport et d'accumulation. Toutefois, la variabilité des configurations géométriques et hydrauliques des rivières amène des variations dans la distribution des zones de production et d'accumulation de bois. Il est donc impératif de procéder à une reconnaissance de la dynamique du cours d'eau et à l'identification d'un ou plusieurs styles fluviaux pour anticiper adéquatement les modes et taux de production du bois mort.

2.1.2 Transport du bois

La mobilité du bois mort en rivière repose sur trois paramètres fondamentaux : (i) les caractéristiques de la végétation riveraine, (ii) le régime hydrologique et (iii) la morphologie du chenal et, comme pour la production de bois mort, l'importance relative de chacun de ces paramètres varie en fonction de la taille des cours d'eau (figure 5). D'ailleurs, afin de réduire l'influence de l'échelle et de permettre la comparaison de données provenant de systèmes de différentes tailles, Gurnell *et al.* (2002) proposent d'utiliser le rapport entre la largeur du chenal et la hauteur des arbres de la ripisylve pour définir la taille relative des cours d'eau. Ainsi, les petits cours d'eau sont ceux dont la largeur est inférieure à la hauteur des arbres, les cours d'eau moyens sont ceux dont la largeur est similaire à la hauteur des arbres et les cours d'eau larges sont ceux dont la largeur excède la hauteur des arbres.

Dans les petits cours d'eau, les arbres tombés peuvent former une rampe entre les deux berges et n'entrer que peu ou pas en contact avec l'écoulement de l'eau. Les caractéristiques hydrologiques et morphologiques sont ainsi moins influentes (Gurnell *et al.*, 2002). Dans d'autre cas, les arbres obstruent complètement le chenal, mais ils sont trop gros pour être mobilisés. Ce sont plutôt les caractéristiques du bois lui-même qui gouvernent la mobilité du bois dans ces environnements. En fait, le rapport entre la taille du bois et la largeur du cours d'eau représente le premier facteur de contrôle du transport du bois mort (Merten *et al.*, 2010 ; Hassan *et al.*, 2005). Si la taille du bois est inférieure à la largeur du chenal, il peut être transporté plus facilement (Gurnell, 2003; Montgomery *et al.*, 2003 ; Martin et Benda, 2001 ; Piégay et Gurnell, 1997). Comme le continuum amont-aval des cours d'eau s'exprime en partie par l'élargissement du chenal, une proportion grandissante du bois entrant dans le système fluvial devient mobilisable à mesure que l'on progresse vers l'aval (Gurnell *et al.*, 2002 ; Martin et Benda, 2001). Toutefois, l'augmentation de la capacité de transport du cours d'eau indique aussi que des arbres de plus en plus gros sont mobilisables et seuls les plus imposants risquent de demeurer stables (Montgomery *et al.*, 2003).

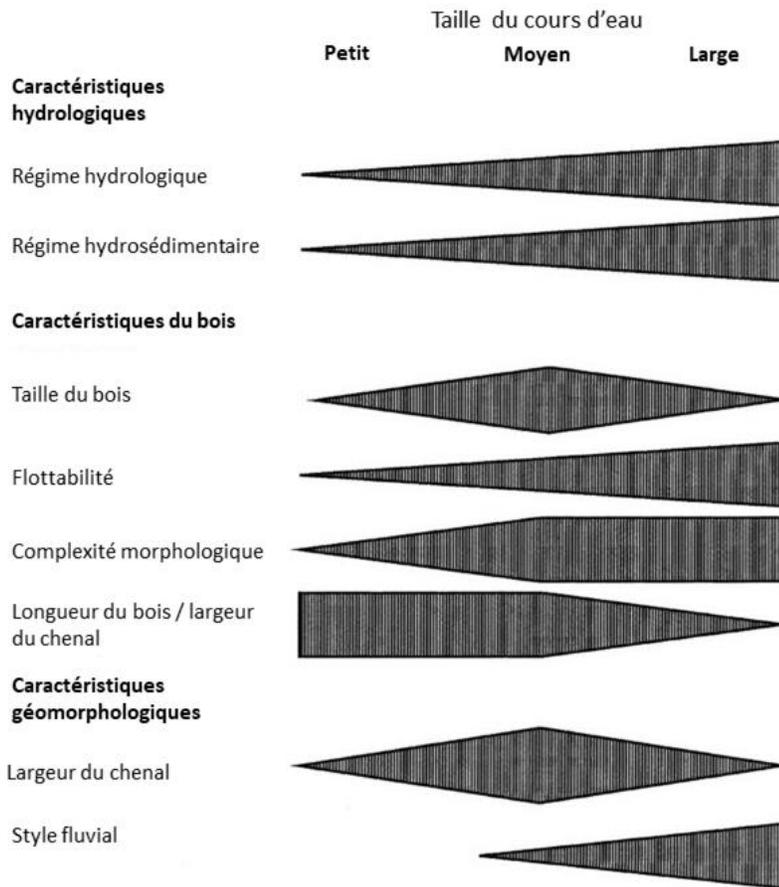


figure 5. Importance relative des paramètres hydrologiques, morphologiques et des caractéristiques du bois quant au transport, en fonction de la taille des cours d'eau (adapté de Gurnell et al., 2002)

Dans les rivières de taille moyenne, les caractéristiques hydrologiques gagnent en importance, mais la morphologie du bois et de la rivière sont tout de même les éléments qui influencent le plus le transport du bois mort (Gurnell *et al.*, 2002). Comme la hauteur des arbres et la largeur du chenal sont similaires, cette dernière est un élément crucial, alors qu'une faible différence de largeur peut faire en sorte qu'un arbre reste ancré sur le lit de la rivière ou qu'il soit transporté vers l'aval. De plus, alors que le rapport largeur/hauteur atteint un seuil critique dans les rivières de taille moyenne, la complexité morphologique des arbres s'impose comme un élément déterminant au transport. (Gurnell *et al.*, 2002). La présence de

branchage ou d'un réseau racinaire développé favorise l'ancrage des arbres aux berges ou au lit du chenal, ce qui confère au bois mort une stabilité accrue (Braudrick et Grant, 2000 ; Bisson *et al.*, 1987)

Dans les grandes rivières, les crues sont généralement suffisamment puissantes pour transporter le bois mort (Baillie *et al.*, 2008). C'est la puissance spécifique qui conditionne le transport sédimentaire, le style fluvial ainsi que le transport du bois mort et ces trois sphères sont intimement liées (Gurnell, 2013 ; Benda et Sias 2003 ; Benda et al. 2003 ; Montgomery *et al.*, 2003 ; Martin et Benda 2001 ; Piégay et Gurnell, 1997). En effet, les secteurs propices au transport sédimentaire le sont aussi ceux où le bois mort est mobile et les sites d'accumulation sédimentaires accumulent aussi du bois. Ainsi, certains secteurs plus pentus, où l'écoulement est confiné, agissent à titre de convoyeurs, alors que ceux où se forment d'importants bancs d'accumulations ou de grands méandres représentent des zones où le transport est limité (Boivin et al., 2017a ; Wohl, 2014). Les changements de styles fluviaux sont de surcroît des secteurs où la capacité de transport du bois mort est modifiée et il est nécessaire de les identifier avec précision pour distinguer les sites d'accumulation préférentiels des zones de mobilité. En plus des configurations géométriques et hydrauliques des cours d'eau, les propriétés physiques et géométriques du bois lui-même influencent la façon dont il est mobilisé. La flottaison et la traction sont les deux mécanismes qui permettent de transporter les bois dans un cours d'eau. La taille, la forme et la densité des troncs sont les principaux facteurs qui conditionnent ces 2 mécanismes (Montgomery *et al.*, 2003 ; Gurnell *et al.*, 2002).

Lorsque la densité des arbres est inférieure à celle de l'eau, les arbres se déplacent principalement par flottaison. Inversement, si elle est supérieure, le bois mort s'ancre plus facilement au lit de la rivière et migre plutôt par traction ou roulement (Benda *et al.*, 2003 ; Gurnell *et al.*, 2002 ; Piégay et Gurnell., 1997). À cet effet, Harmon *et al.* (1986) ont déterminé que la densité des conifères est 20 % plus petite que la densité de 0,5 Mg m⁻³, généralement utilisée dans les études traitant du bois en milieu aquatique, alors que celle des feuillus est 40 % plus grande. Cette variabilité influence ainsi le mode de transport en

fonction des espèces. De manière générale, les conifères seraient plutôt transportés par flottaison alors que les feuillus ont tendance à couler et à s'ancrer au lit (Webb et Erskine, 2003).

Par ailleurs, les conifères forment des troncs très droits qui concentrent la plus grande portion de leur masse et lors de la chute, les branches se cassent facilement, laissant des cylindres uniformes faciles à mobiliser (Wohl, 2013 ; Montgomery *et al.*, 2003 ; Gurnell *et al.*, 2002). Inversement, les feuillus se fragmentent plus aisément que les résineux, lors du recrutement ou du transport. Ils composent ainsi une plus grande proportion des petits fragments de bois qui s'accumulent dans les embâcles et qui réduisent leur porosité (Montgomery *et al.*, 2003). Lorsqu'ils demeurent entiers, les feuillus peuvent demeurer ancrer au lit et initier la formation d'embâcles de bois mort, dû à leur imposant réseau racinaire et à la complexité morphologique de leur tronc. Enfin, d'après Gurnell (2003), le grand volume et l'orientation des morceaux de bois mort individuel sont les meilleurs témoins de la dynamique du transport. La force appliquée sur la cime de l'arbre par l'écoulement peut initier un déplacement vers l'aval alors que le réseau racinaire reste ancré à la berge ou au fond du lit, ce qui a pour effet d'orienter le tronc parallèlement au cours d'eau. Les embâcles les plus volumineux sont généralement composés de bois de tailles variées, ce qui signifie que des troncs plus gros ont initié la formation d'un embâcle en captant du bois en transport provenant de différentes sources (Gurnell *et al.*, 2002).

2.1.3 Accumulation du bois mort

Tel que mentionné précédemment, le bilan ligneux s'établit par la mise en relation des volumes de bois produits, exportés et stockés et chacune de ces composantes est intrinsèquement liée aux autres. Le stockage du bois mort se fait lorsque la production ou l'apport de bois est supérieur au transport et qu'il se dépose au sein même du cours d'eau ou sur la plaine alluviale (Marcus *et al.*, 2002). Il peut être stocké individuellement ou accumulé avec plusieurs autres morceaux de bois mort pour ainsi former un embâcle (Piégay et Gurnell, 1997 ; Abbe et Montgomery, 1996). De façon générale, les embâcles se

structurent de l'aval vers l'amont, autour d'arbres clés suffisamment stables pour résister à l'effet des crues. Ce sont des éléments structurels qui en captent le bois mort en transit pour former des arrangements plus complexes (figure 6a) (Collins *et al.*, 2012 ; Abbe et Montgomery, 2003 ; Gurnell *et al.*, 2002 ; Piégay et Gurnell, 1997 ; Therrien, 1997). Parmi les embâcles on distingue les embâcles totaux, qui couvrent la largeur plein-bord du cours d'eau et les embâcles partiels, qui les obstruent seulement en partie (Therrien, 1997).



figure 6. a) formation d'un embâcle à partir d'un tronc clé, b) formation d'embâcle *in situ* dans un chenal de moins de 10 mètres, c) formation d'un embâcle de *transport* sur un banc d'accumulation, d) formation d'un embâcle de *transport* dans un méandre. Les flèches rouges représentent la direction de l'écoulement.

Comme c'est le cas pour la production et le transport, les processus qui gouvernent la composition, la structure et la distribution des embâcles varient en fonction de la taille du cours d'eau, de celle des arbres et du rapport hauteur/largeur (Abbe et Montgomery, 2003 ; Gurnell *et al.*, 2002). Abbe et Montgomery (2003) ont développé une typologie des embâcles qui traduit les patrons d'accumulation du bois dans les systèmes fluviaux. Ils y distinguent les accumulations selon trois types, qu'ils déterminent selon la provenance, la structure et l'organisation du bois (figure 7).

Les embâcles *in situ* se forment lorsque le bois demeure à l'endroit initial où il a été déposé à son entrée dans le système fluvial. Ils sont généralement composés de troncs et de racines de tailles suffisamment importantes pour empêcher le transit vers l'aval, ou encore d'arbres dont la longueur dépasse la largeur du chenal (figure 6b). Les embâcles de *combinaison* se forment lorsque des embâcles *in situ* agissent à titre de tronc clé et que d'autres morceaux de bois mort provenant de l'amont s'agglomèrent sur ceux-ci lors du transport. Les embâcles de *transport* sont composés de bois ayant été transporter par le cours d'eau et leur mise en place relève principalement des caractéristiques géométriques du chenal (largeur, profondeur, pente) et de la dynamique fluviale (érosion, bancs d'accumulations, zones de confinement) (figure 6c). Ils sont relativement stable et largement associé au chenal principal des cours d'eau, car ils ont généralement la capacité de mobiliser le bois mort.

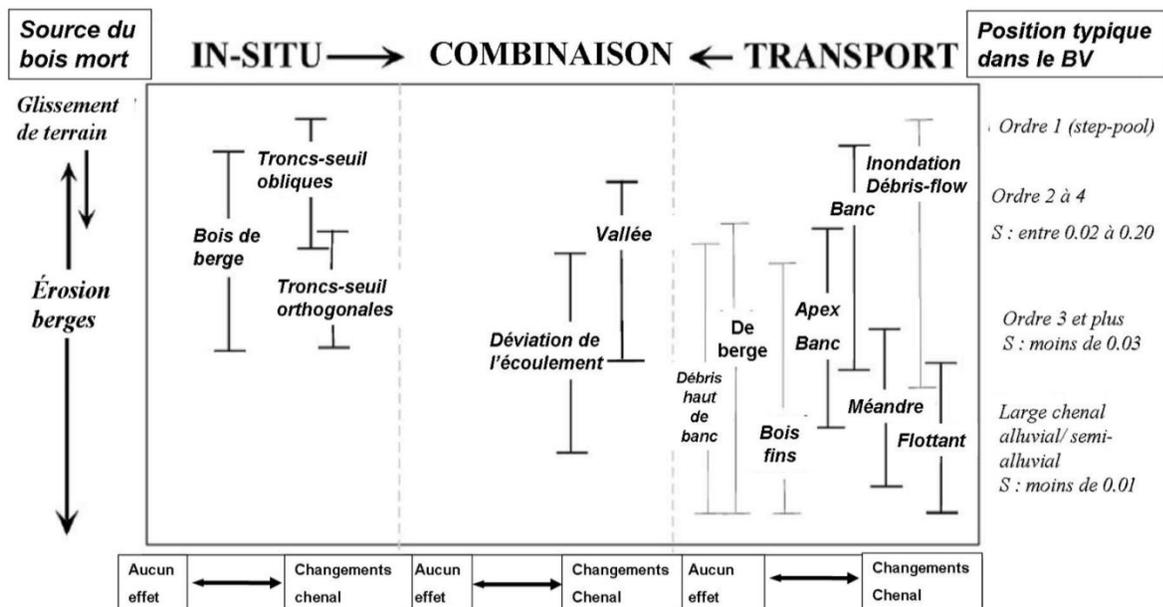


figure 7. Typologie des embâcles de bois mort selon Boivin et Buffin-Bélanger, 2010, adapté de Abbe et Montgomery (2003)

Dans les rivières divagantes de taille moyenne, les zones d'accumulation préférentielles de bois mort se situent sur les bancs d'accumulations et sur les berges, en marge de la plaine alluviale (Piégay et Gurnell, 1997). Les tronçons de moins de 10 mètres de large, les zones de confinement, de faibles pentes, les bifurcations brusques de méandres et l'amont de chenaux secondaires figurent aussi parmi les secteurs susceptibles d'accumuler le bois mort et de favoriser le développement d'embâcles (figure 6) (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010 ; Piégay et Gurnell, 1997). De plus, la présence d'embâcles dans ces secteurs amplifie l'effet d'accumulation et permet d'intercepter encore plus le bois lors du transport. Plus les embâcles sont volumineux, plus ils sont efficaces pour capter le bois. (Benda *et al.*, 2003 ; Piégay, 2003).

De façon générale, le bois plus dense ou à la morphologie plus complexe s'ancre plus facilement et s'accumule au sein du chenal et sur les bancs d'accumulation. Il agit plus facilement à titre de troncs clés pouvant initier la formation d'un embâcle, alors que celui qui a la capacité de flotter peut être déplacé sur la plaine alluviale même lorsque le débit est faible, car leur mobilisation requiert peu d'énergie (Collins *et al.*, 2012, Montgomery *et al.*, 2003 ; Gurnell *et al.*, 2002). En se formant ainsi au sein du chenal et sur les bancs d'accumulation, les embâcles interagissent avec l'écoulement de l'eau et contribuent à modeler la dynamique fluviale à l'échelle locale autant qu'à celle du bassin versant (Boivin *et al.*, 2017a ; 2015 ; Wohl, 2013 ; Seo *et al.*, 2010 ; 2008 ; Manners *et al.*, 2007 ; Gurnell *et al.*, 2002 ; Martin et Benda, 2001 ; Piégay et Gurnell, 1997 ; Abbe et Montgomery, 1996 ; Keller et Swanson, 1979).

2.2 EFFETS DU BOIS MORT SUR LE MORPHODYNAMISME FLUVIAL

En fonction de la géométrie de la rivière et de la position du bois, les EBM peuvent exacerber ou inhiber les processus d'érosion ou d'aggradation qui se produisent. L'ampleur de ces répercussions relève principalement de la proportion du chenal obstrué par le bois mort, de la position, de la dimension, de la stabilité et de la complexité des embâcles. Les

plus volumineux et les plus stables sont généralement ceux qui maintiennent leur influence à long terme, alors que les plus petits embâcles, parce qu'ils sont susceptibles d'être délogés, ont des répercussions moins durables sur la dynamique du cours d'eau (Collins *et al.*, 2012 ; Magilligan *et al.*, 2008 ; Montgomery *et al.*, 2003 ; Piégay, 2003).

Les effets morphologiques des embâcles de bois mort sont très facilement perceptibles à l'échelle locale et les signes d'accumulation sédimentaire ou d'érosion à proximité des structures de bois sont manifestes. Il convient donc de s'attarder aux effets morphologiques directs des embâcles à une échelle très localisée pour cerner la manière dont ils interagissent avec la dynamique fluviale. Toutefois, dans les rivières caractérisées par de grands volumes de bois mort, le cumul de ces interactions permet de modéliser la morphologie du cours d'eau à une échelle plus large et d'y définir un style fluvial associé au bois mort. En effet, l'élargissement du chenal ou le développement de chenaux secondaires sont des conséquences possibles associées à la présence de bois mort et ces configurations permettent au cours d'eau d'atténuer l'effet des crues en dissipant l'énergie de l'écoulement et en augmentant la rugosité au sein du chenal (Gurnell *et al.*, 2002). L'analyse des interactions entre les processus fluviaux et les embâcles de bois mort permet ainsi de comprendre la façon dont le bois mort est susceptible d'influencer l'évolution du cours d'eau à l'échelle d'un tronçon fluvial.

En se situant au sein d'un cours d'eau, les embâcles de bois mort agissent à titre de barrière physique et obstruent totalement ou partiellement l'écoulement de l'eau. Ces interactions modifient localement la puissance spécifique en modifiant la manière dont sont distribuées les forces hydrauliques au sein du chenal (Piégay et Gurnell, 1997). Ceci dit, les embâcles de bois mort ont la particularité de pouvoir exacerber ou d'inhiber certains processus fluviaux déjà en action au sein du chenal. Localement, la manière dont le bois mort influence la dynamique du cours d'eau relève de son niveau d'interaction avec l'écoulement de l'eau, la dynamique sédimentaire et les formes fluviales.

Au sein du chenal, le bois représente une surface de rugosité additionnelle causant le ralentissement de l'écoulement fluvial et l'élévation du niveau de l'eau en amont de l'obstruction (Wohl et Scott, 2016 ; Gippel *et al.*, 1996). La réduction des vitesses d'écoulement s'accompagne de la réduction de la compétence du cours d'eau et des zones de faibles courants sont créées, permettant l'accumulation de sédiments plus fins que ceux qui composent autrement le lit de la rivière (Faustini et Jones, 2003 ; Montgomery *et al.*, 2003 ; Piégay, 2003). À proximité d'embâcles de bois mort, au sein d'une rivière à lit graveleux, Skalak et Pizzuto (2010) ont même observés des zones d'accumulation où le calibre des sédiments varie entre le sable et l'argile. La présence de bois mort engendre ainsi une grande variabilité du faciès granulométrique au sein des cours d'eau (Piégay *et al.*, 2005 ; Abbe et Montgomery, 1996).

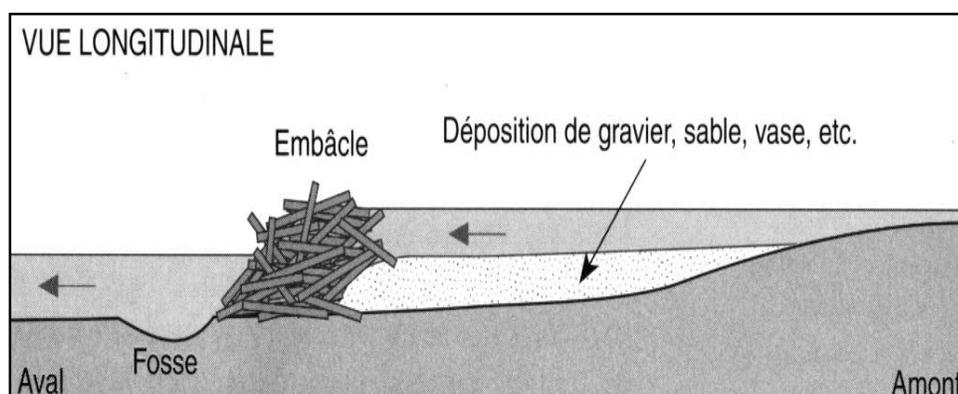


figure 8. Aggradation en amont d'un embâcle de bois, (Terrien, 1997)

Lorsque les sédiments se déposent de façon persistante, il est possible que le rehaussement du lit facilite les débordements au-dessus du niveau plein bord lors des crues (Wohl, 2013 ; Collins *et al.*, 2012 ; Piégay *et al.*, 2005 ; Abbe et Montgomery, 2003 ; Therrien, 1997). En amont des embâcles, la perte de vitesse de l'écoulement jumelée avec la barrière que représente l'embâcle favorise l'accumulation de sédiments (figure 8). De plus, les embâcles de bois mort, en déviant une partie de l'écoulement, servent à protéger les berges de l'érosion (figure 9). L'obstruction agit comme une barrière physique qui empêche une partie de l'eau de s'écouler le long de la berge, et la portion de l'eau qui s'écoule à travers

l'embâcle est suffisamment ralentie pour limiter la capacité à déloger les sédiments qui composent la berge (Wohl, 2013 ; Collins *et al.*, 2012 ; Abbe et Montgomery, 2003). Dans les chenaux non obstrués, les vitesses maximales se situent en marge de la berge concave, à l'aval de l'apex d'un méandre. C'est à cet endroit que le cisaillement atteint sa valeur maximale et que l'érosion de la berge est la plus efficace. En présence de bois mort, les vitesses maximales, plutôt que de longer la berge, se situent le long de l'obstruction vers le centre du chenal, ce qui réduit le cisaillement sur la berge et permet de limiter l'érosion (Daniels et Rhodes, 2003).

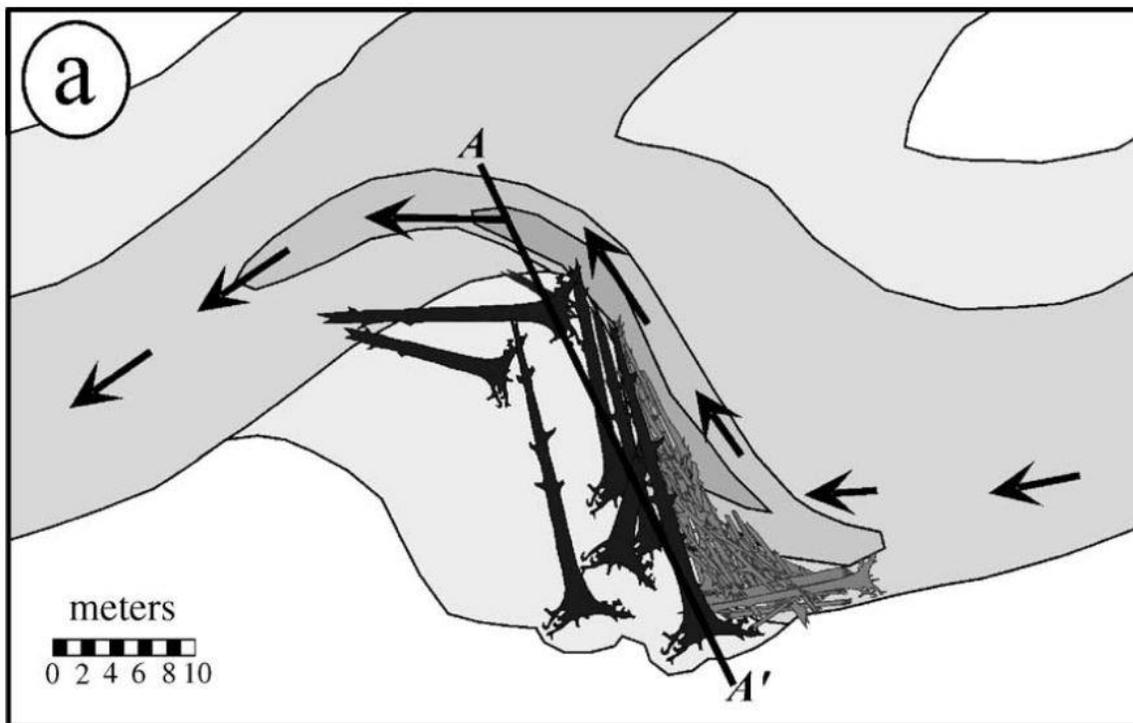


figure 9. Redistribution des forces hydrauliques associée à la présence d'un embâcle. Les flèches symbolisent la position de la ligne d'écoulement (adaptée de Abbe et Montgomery, 2003)

Dans un contexte comme celui-ci, il est fréquent que des zones de faible courant apparaissent directement en aval des embâcles, forçant encore une fois l'accumulation de sédiments. De façon similaire, les embâcles situés au centre du chenal modifient la distribution des forces hydrauliques et les patrons de sédimentations. Lorsqu'un tronc clé est

capable de s'ancrer solidement au lit, les vitesses d'écoulement en aval sont réduites et les sédiments s'y accumulent. Dans ce cas, la formation d'un banc d'accumulations central est le résultat de la déposition successive autour de l'embâcle, et a pour effet de diminuer localement la profondeur d'eau. (Abbe et Montgomery, 2003 ; 1996 ; Gurnell *et al.*, 2002 ; Keller et Swanson, 1979). Il est possible que les embâcles se forment à l'apex d'un banc central préalablement formé, dans quel cas, les processus de sédimentations en aval sont exacerbés par la présence de l'obstruction. Lorsque ces bancs sont suffisamment stables, ils sont colonisés par la végétation et forment un îlot central végétalisé (figure 10).

S'il est vrai que les embâcles ralentissent localement la circulation de l'eau au sein du chenal, il est aussi vrai que, par endroits, ils accélèrent la vitesse d'écoulement de l'eau. La présence de bois mort dans le chenal implique nécessairement la réduction, plus ou moins importante, de la section transversale sur le cours d'eau. Ainsi, une portion de l'eau qui s'écoule est déviée vers la partie non obstruée du cours d'eau. Cette concentration des forces hydrauliques confère une capacité de transport accrue permettant de mobiliser les sédiments qui composent le lit et engendrent la formation de fosses à l'extrémité des embâcles (Cherry et Beschta, 1989). C'est pour cette raison que les tronçons de rivières caractérisés par la présence d'embâcles de bois mort comptent un nombre de fosses généralement plus élevé que ceux qui ne comptent que peu ou pas d'embâcles (Montgomery *et al.*, 1995). À cet effet, il est globalement véhiculé que la distance moyenne entre chacune d'elle équivaut à cinq à sept fois la largeur plein bord du cours d'eau (Thompson, 2013 ; Gurnell *et al.*, 2002). Or, en présence de bois mort, l'espacement entre les fosses passe à environ deux à quatre fois la largeur plein bord selon Wyrick et Pasternack (2014), à trois à quatre fois selon Montgomery *et al.*, (1995) et à 0,8 fois en moyenne selon Webb et Eskrine (2003).

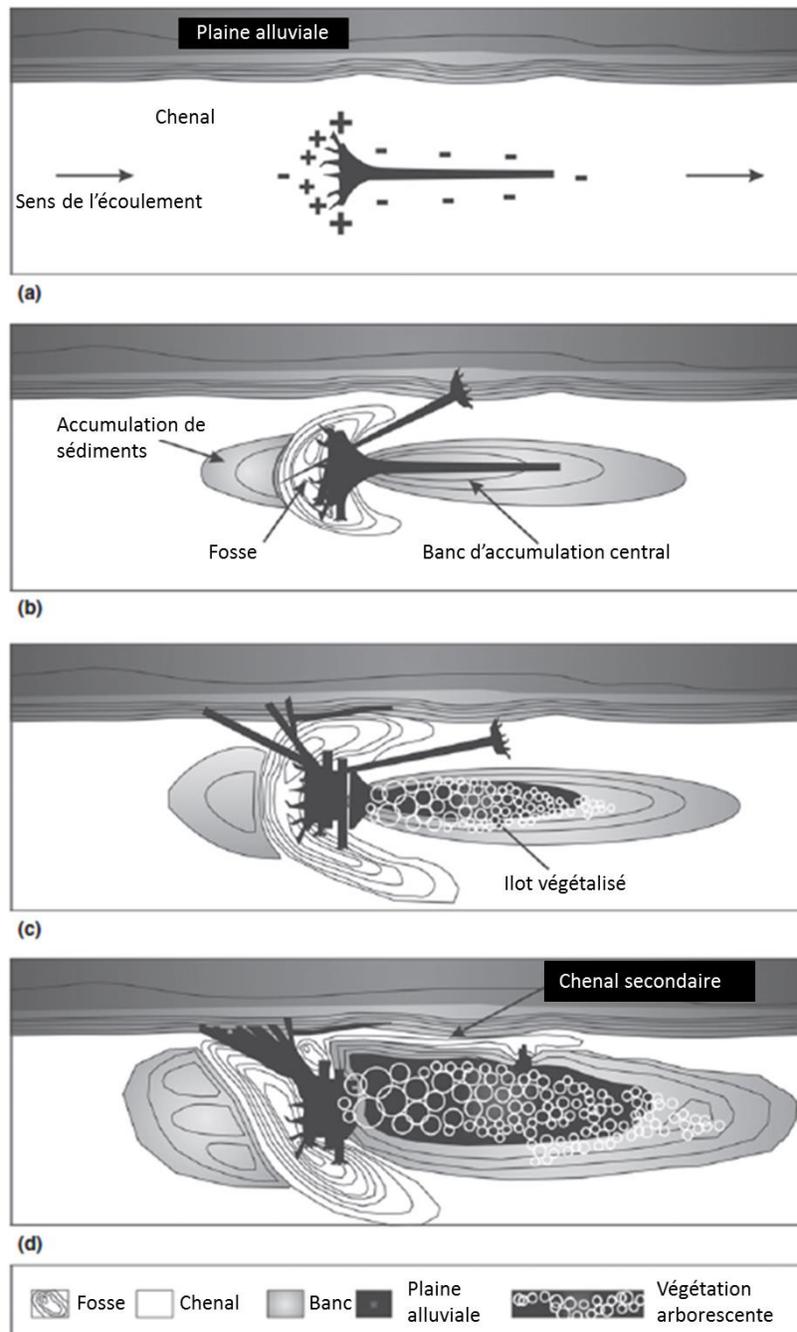


figure 10. Formation d'un îlot central suite à la formation d'un embâcle, a) diminution des vitesses en aval, b) formation d'un banc d'accumulation, c) végétalisation du banc d'accumulation, d) îlot annexé à la plaine (adapté de Abbe et Montgomery, 1996)

De plus, lorsque les embâcles redirigent l'écoulement vers une berge opposée, ils permettent d'augmenter localement l'érosion (Piégay *et al.*, 2005 ; Abbe et Montgomery, 2003, Keller et Swanson, 1979). C'est notamment le cas des embâcles situés à l'apex de bancs d'accumulations situés au centre du chenal. En obstruant une partie de la section transversale, ils repoussent l'écoulement vers les berges de part et d'autre du chenal. Ceci a pour effet d'éroder la berge, de favoriser la migration du cours d'eau, et de ce fait, de créer des zones de faible courant directement en aval de l'obstruction. Dans leur étude, Keller et Swanson (1979) ont montré que dans ce type de circonstances, l'élargissement peut atteindre plus de 50 % de la largeur initiale du chenal. Si l'obstruction cause un refoulement suffisamment important, le niveau de l'eau peut excéder celui des berges, ce qui cause des débordements sur la plaine alluviale, et, dans les cours d'eau les plus dynamiques, initier le recoupement de méandres ou le développement de chenaux d'avulsion (Abbe et Montgomery, 2003 ; Webb et Eskine, 2003 ; Gurnell *et al.*, 2002).

Ainsi, les embâcles représentent une barrière physique qui interfère avec l'écoulement de l'eau et le transit des sédiments vers l'aval. Toutefois, il est faux de les entrevoir comme des entités étanches qui freinent ou dévient en totalité l'eau et les sédiments. Ils agissent plutôt comme des obstructions poreuses qui laissent s'infiltrer une proportion plus ou moins grande de l'écoulement, de sédiments ou de nutriments (Daniels et Rhodes, 2003). Selon Manners *et al.* (2007), les embâcles les plus denses, ceux où l'espacement entre les troncs clés est réduit par la présence de plus petits morceaux de bois, de branchages, de feuilles et de matière organique particulière, obstruent plus efficacement l'écoulement et altèrent le plus la distribution des vitesses. Inversement, l'augmentation de la porosité laisse s'écouler une proportion plus grande d'eau et de sédiments au travers de l'embâcle. La spatialisation des zones de déposition et d'érosion dépend alors grandement de la configuration de l'embâcle, alors que l'écoulement se concentre dans les portions moins obstruées et que des fosses se forment à l'aval de l'embâcle. Ainsi, localement, les patrons d'érosion et de sédimentation associés à la présence de bois mort relèvent principalement du degré de porosité, lui-même associé à l'âge de la

structure, alors que les plus récents sont plus poreux et que les plus vieux ont eu suffisamment de temps pour accumuler du matériel.

On constate ainsi que les accumulations de bois mort ont la particularité à la fois de favoriser la sédimentation et le captage de sédiments, même les plus fins et d'exacerber les processus d'érosion déjà en action dans le cours d'eau. Le plus souvent, les embâcles jouent les deux rôles à la fois, c'est-à-dire qu'ils dévient l'écoulement, ce qui protège la berge derrière, donc l'écoulement est concentré le long de l'embâcle, ce qui favorise le développement de fosses ou l'érosion, plus loin en aval. De plus, comme le courant est dévié en amont de l'embâcle, seulement une fraction de l'écoulement passe au travers, ce qui crée une zone de faible vitesse à l'aval, où des sédiments fins sont libres de se déposer. S'il est possible de retrouver des processus si opposés dans un espace relativement restreint, c'est que les embâcles complexifient la structure de l'écoulement dans les cours d'eau en forçant la présence de zones de faible courant juxtaposées à des zones de très fortes vitesses. À cet effet, Shields et Smith (1992) ont montré que la vitesse d'écoulement de l'eau en aval d'un embâcle était à peu près nulle alors que les vitesses de l'eau déviée dépassaient 2 m/s. Suite au démantèlement, les vitesses maximales atteintes étaient de 1,6 m/s sur l'ensemble la section transversale. En l'absence d'obstruction, il est très rare de retrouver des zones où les vitesses d'écoulement sont si contrastées dans un environnement restreint. C'est cette diversité hydraulique qui permet le développement de formes fluviales variées et la création d'habitats variés au sein du chenal. L'ampleur du rôle que tient le bois mort varie en fonction de la taille du cours d'eau, du style fluvial, des formes, du débit et de la proportion du chenal obstrué, de l'orientation du bois mort et de la porosité de l'embâcle (Manners *et al.*, 2007 ; Gurnell *et al.*, 2002 ; Gippel, 1995). Toutefois, les embâcles de bois mort sont des entités dynamiques, qui par décomposition ou fragmentation du bois peuvent se démanteler naturellement (Merten *et al.*, 2013 Gurnell *et al.*, 2002). Lors d'un tel événement, les sédiments retenus par l'embâcle sont remis en circulation et sont disponibles au transport. De ce fait, le démantèlement d'un embâcle, qu'il soit naturel ou anthropique s'accompagne donc souvent d'un *pulse* de sédiments (Wohl, 2013).

2.3 DYNAMISME DE LA RIPISYLVE ET NOTION D'ÉCHELLE

Les caractéristiques de la végétation qui se développe sur la plaine alluviale jouent un rôle fondamental sur la dynamique du bois mort. La densité d'arbres, le type de végétation et l'âge du couvert forestier sont les paramètres les plus influents en termes de transport, d'accumulation et de rôle morphologique du bois en milieu fluvial (Collins *et al.*, 2012 ; Abbe et Montgomery, 2003 ; Gurnell *et al.*, 2002). Tel que souligné par Therrien (1997), les arbres en fin de vie sont généralement plus grands et représentent une source de bois mort significative de par leur taille et leur propension à être introduits au cours d'eau. En décrivant les liens qui unissent la ripisylve et la dynamique fluviale, Collins *et al.* (2012) proposent d'aborder la dynamique du bois mort sous la forme du cycle de la plaine alluviale, à des échelles pluridécennales, voire séculaires (figure 11).

En migrant latéralement, le cours d'eau fragilise les berges et introduit des arbres dans le système. Les arbres peuvent être transportés et évacués, ou accumulés au sein du chenal. Dans le second cas, deux scénarios opposés sont possibles. C'est-à-dire qu'en fonction de leur taille, de leur position, de leur orientation, ils peuvent rediriger l'écoulement vers la berge et exacerber l'érosion et accroître directement la production de bois mort. Dans le second scénario, le bois mort s'accumule et forme des embâcles qui protègent la berge, ralentissent l'écoulement et diminuent la capacité de transport sédimentaire de la rivière.

Il se crée donc au sein de la plaine alluviale, des lambeaux de plaine alluviale protégés de l'érosion par les embâcles. Lorsque les arbres qui se développent sur ces lambeaux arrivent en fin de vie, ils sont réintroduits dans le chenal à titre de tronc clé (figure 12). Ainsi, les processus qui gouvernent le cycle de Collins *et al.* (2012) décrivent une boucle de rétroaction qui se traduit par le développement et l'entretien d'une dynamique fluviale spécifique à ce type d'environnement.

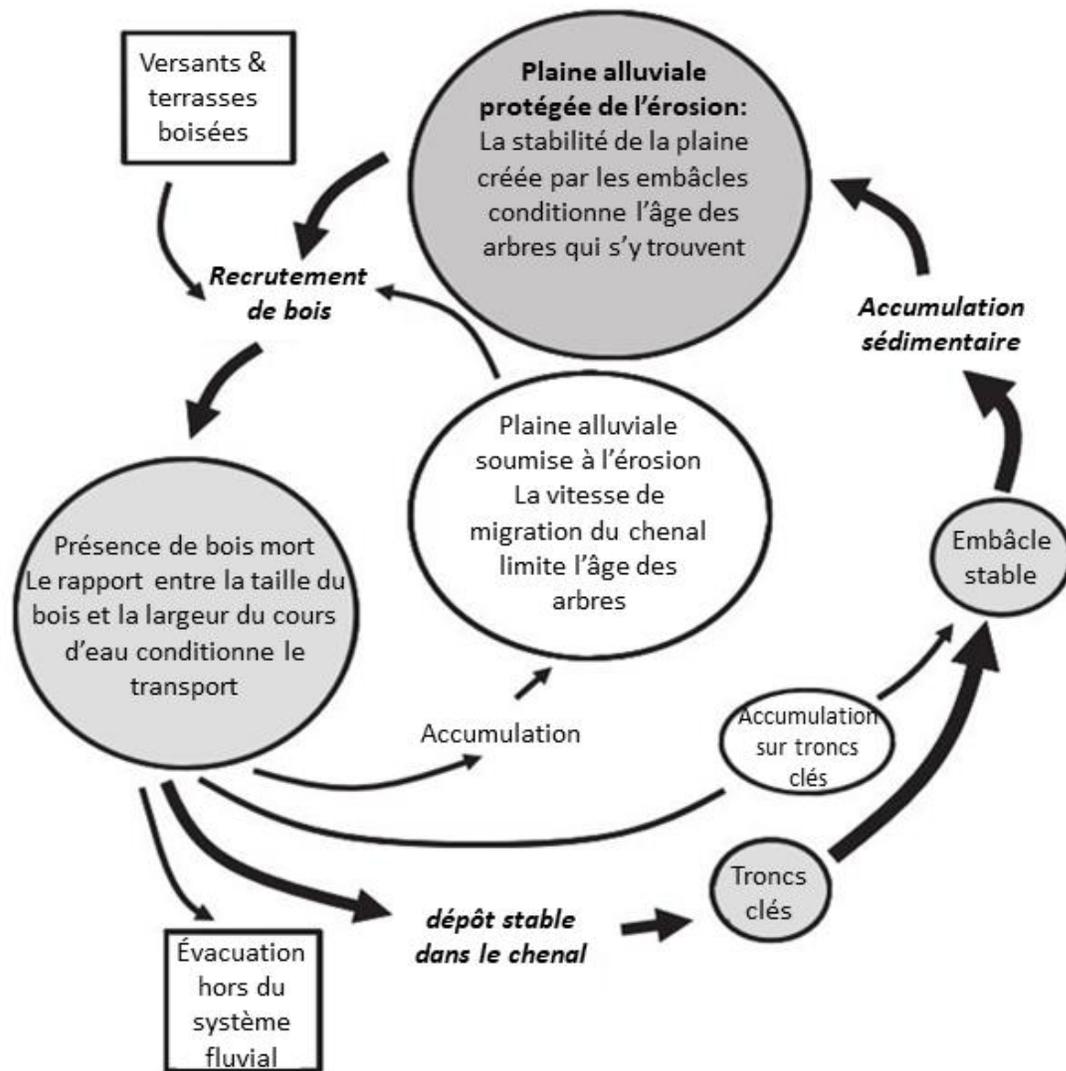


figure 11. Cycle de la plaine alluviale (adapté de Collins *et al.*, 2012)

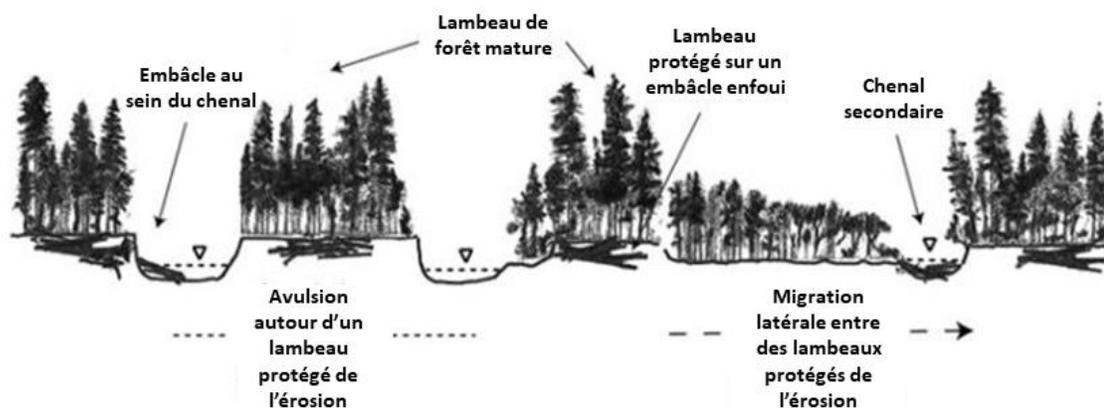


figure 12. Coupe schématique d'une plaine alluviale où les embâcles permettent le développement de végétation mature (adaptée de Collins *et al.*, 2012)

Les dernières pages ont permis de mettre en évidence que la dynamique du bois et les relations qu'elle entretient avec la dynamique fluviale reposent sur un ensemble d'interactions complexes qui varient en fonction de l'échelle d'analyse utilisée. Alors que la formation d'un embâcle à un endroit donné peut être perçue comme une perturbation aux effets indésirables tels que l'augmentation de l'érosion, il est aussi vrai que la présence de bois mort tend à stabiliser les cours d'eau. En effet, l'obstruction que représente l'embâcle peut forcer le développement d'un chenal secondaire, qui permet d'atténuer l'intensité des crues (Gurnell *et al.*, 2002).

Dans un effort de synthèse, Keller et Swanson (1979) mettent en évidence qu'en fonction de la position sur le bassin versant, les processus associés à la production, au transport et à l'accumulation du bois mort varient grandement et que certains mécanismes ne sont actifs que dans certains environnements précis (figure 13). Dans le même esprit, Gurnell *et al.*, (2002) soulèvent que selon la taille du cours d'eau, les caractéristiques appartenant à l'hydraulique, au dynamisme fluvial ou aux propriétés physiques des arbres varient en importance dans le transport du bois mort.

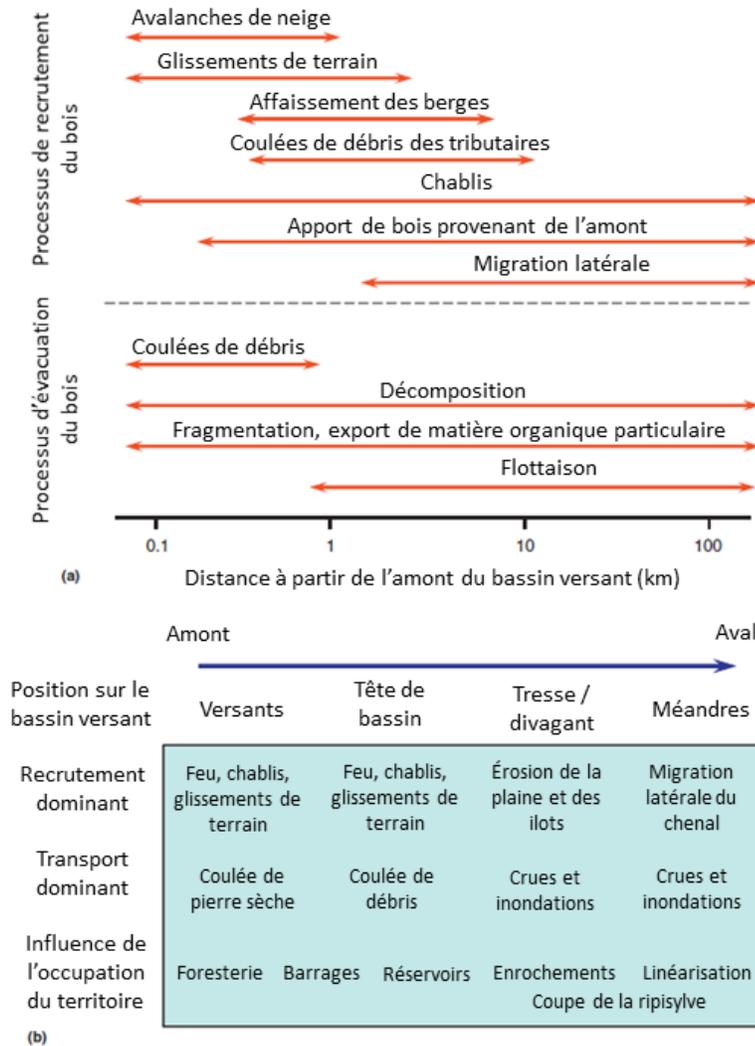


figure 13. Variation des mécanismes de production et d'exportation du bois mort en fonction de la position sur le bassin versant. (adapté de Keller et Swanson, 1979, dans Gurnell, 2013)

Enfin, la présentation que font Collins *et al.* (2012) du cycle de la plaine alluviale n'est envisageable que parce qu'ils utilisent une échelle d'analyse couvrant plusieurs centaines d'années. Inversement, les approches orientées vers la gestion ciblent plutôt des échelles pluriannuelles pour connaître les effets immédiats du bois mort ou des interventions réalisées. (Lawrence *et al.*, 2013). Pour répondre adéquatement aux objectifs de recherche, il est donc nécessaire de cibler les échelles spatiales et temporelles qui servent le mieux le type d'analyse effectuée.

2.4 TRAJECTOIRE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE

Le concept de trajectoire hydrogéomorphologique des cours d'eau repose sur la reconnaissance que les cours d'eau évoluent à travers le temps et que leur dynamique actuelle ne reflète pas nécessairement l'ensemble des processus qui caractérisaient ou qui caractériseront la rivière (Rinaldi *et al.*, 2015). Ainsi, la géométrie du chenal s'ajuste, en réponse à différentes perturbations, humaine ou naturelle. Dufour et Piégay (2009) mettent en évidence que la dynamique des cours d'eau se manifeste dans le temps par une série de fluctuations rapides au sein d'une trajectoire à long terme. L'analyse de la trajectoire hydrogéomorphologique est réalisée à partir de l'évolution d'une série d'indicateurs morphométriques sur une période de plusieurs décennies. Ces indicateurs peuvent être extraits à partir de tracés fluviaux et peuvent indiquer des tendances dans l'évolution du chenal. La sinuosité, les largeurs, les taux d'érosions et le nombre de chenaux secondaires sont des indicateurs faciles à quantifier à partir de photographies aériennes géoréférencées (Rinaldi *et al.*, 2015 ; Demers *et al.*, 2014).

La trajectoire hydrogéomorphologique est une analyse objective de l'évolution d'un cours d'eau. Toutefois, la mise en relation de cette évolution avec des perturbations, ponctuelles ou progressives, permet l'établissement d'un diagnostic hydrogéomorphologique (figure 14). Ces perturbations représentent des facteurs de contrôle qui conditionnent l'évolution du cours d'eau à long terme. Face à des événements perturbateurs ponctuels, le cours d'eau met en place une série d'ajustements rapide afin de pouvoir répondre aux variations des débits solides et liquides. Avec le temps, l'ampleur de ces ajustements peut s'atténuer graduellement jusqu'à ce que le cours d'eau retourne à son état antérieur. Dans le cas de perturbations progressives, les ajustements peuvent se faire sur une plus longue période et être plus subtils. Les perturbations peuvent être d'origines humaines ou naturelles et contribuent à altérer les apports en eau ou en sédiments.

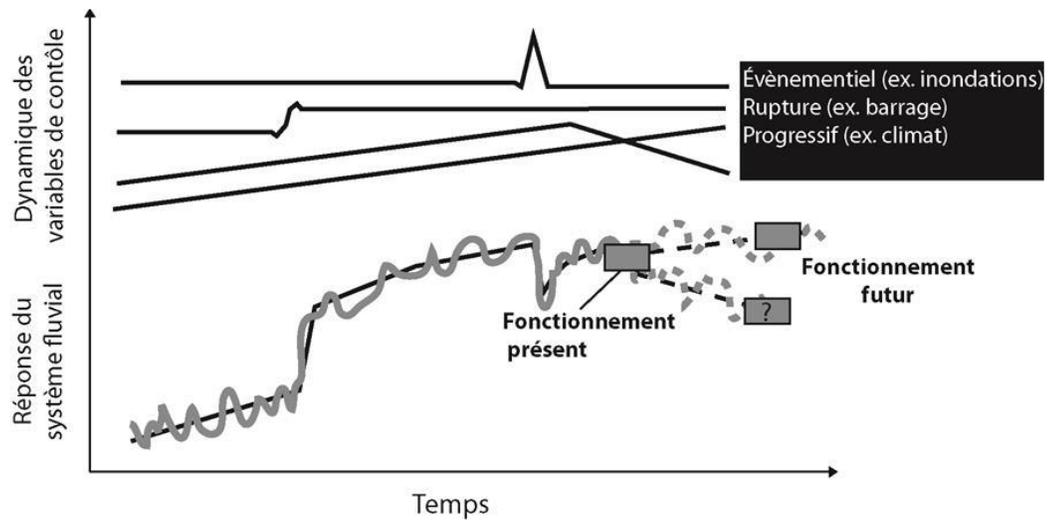


figure 14. Évolution de la trajectoire hydrogéomorphologique en fonction des variables de contrôles (Piégay et Dumont, 2009)

Il peut par exemple s'agir d'une augmentation modérée, mais soutenue des débits sur un cours d'eau ou encore, de la rupture d'un barrage par exemple. L'occupation du sol est d'ailleurs l'une des variables de contrôle à considérer. L'augmentation des débits peut être due à l'augmentation de la fréquence ou de l'intensité des précipitations, mais aussi à l'augmentation des surfaces aménagées ou à des coupes forestières qui augmentent le ruissellement de surface et accélèrent la réponse hydrologique d'un bassin versant.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre détaille les démarches méthodologiques adoptées lors de la récolte et du traitement des données, en vue d'atteindre les objectifs de la recherche. Le premier volet s'articule autour de la cueillette de données réalisée lors des campagnes de terrains tenues au cours des étés de 2015 et de 2016. Les méthodes de caractérisation des embâcles, de relevés topographiques, de quadra de végétation en bande riveraine y sont approfondies. Le second volet met l'emphase sur le traitement et l'analyse des données récoltées préalablement. Les processus d'identification de la trajectoire hydrogéomorphologique de la rivière Mont-Louis, de segmentation, de calcul de volumes de bois mort et de construction d'un modèle numérique de terrain y sont détaillés.

3.1 RECOLTE DE DONNEES

3.1.1 Caractérisation des embâcles et de la ripisylve

Chacun des embâcles sur le tronçon principal de la rivière Mont-Louis a été soigneusement caractérisé à l'aide de la fiche descriptive en annexe I. Les embâcles ont individuellement été identifiés, photographiés et positionnés à l'aide d'un GPS Garmin. Le type d'embâcle, total ou partiel, a été noté avec la position de la structure, c'est-à-dire au sein du lit mineur, sur les bancs d'accumulations ou sur la plaine alluviale en bordure du cours d'eau. La provenance du bois a aussi été évaluée. Les arbres provenant de l'amont sont identifiables par des dommages qu'ils ont connus au cours du transport. En percutant d'autres bois morts ou de la glace, des embâcles, des roches, les arbres de la bande riveraine ou des

infrastructures, l'écorce, les branches et le système racinaire sont souvent endommagés ou arrachés (Wohl, 2013 ; Abbe et Montgomery, 2003 ; Gurnell *et al.*, 2002). Inversement, les arbres qui s'accumulent près de leur position initiale sur la berge sont souvent intacts, les racines peuvent retenir une quantité plus ou moins grande de terre provenant de la berge érodée et les feuilles sont souvent toujours présentes. Enfin, les embâcles sont considérés comme des cubes dont les dimensions moyennes sont mesurées à l'aide d'un ruban de 60 m et d'une règle télescopique. De manière opérationnelle, un embâcle doit être composé d'un minimum de trois bois morts, d'une longueur minimale de 1 m et d'un diamètre minimal de 0,1 m (Piégay et Gurnell, 1997). La largeur d'un embâcle correspond en tout temps au côté perpendiculaire à l'écoulement de l'eau et la longueur au côté parallèle. Ces mesures permettent, dans un premier temps, de déterminer le pourcentage d'obstruction du chenal à son niveau plein bord et dans un deuxième temps, d'estimer le volume de bois contenu dans l'embâcle. Les embâcles sont généralement de formes irrégulières, mais sont considérés comme des boîtes lors de la prise de mesure. Une largeur moyenne de chacun des axes est utilisée comme valeur de référence ce qui peut mener à une erreur lors de l'estimation des volumes. Cette erreur est minimisée en n'ayant qu'un observateur lors des campagnes de terrain. Le biais d'interprétation est donc régulier

Les EBM situés au niveau de la plaine alluviale comptent ainsi pour 0 % d'obstruction et ceux sur les bancs et du chenal pour un minimum de 5 %. L'augmentation du pourcentage d'obstruction se fait par incrément de 5% . La densité de l'embâcle est évaluée arbitrairement selon quatre catégories : très faibles, faibles, moyennes, élevée, en fonction du niveau de porosité de l'embâcle et la proportion de racine, de troncs et de branches qui compose l'EBM est estimée de la même façon. Finalement, la berge sur laquelle se forment les EBM est notée. Les berges correspondent à la gauche ou à la droite du chenal lorsque le regard de l'observateur est porté vers l'aval. Pour faciliter la prise de mesure et accélérer la récolte de données, la caractérisation se fait en paire ou en trio alors qu'une ou deux personnes prennent les mesures et que l'individu restant note dans un cahier terrain où les fiches sont imprimées sur du papier hydrofuge. La démarche est réalisée d'un trait en période d'étiage pour éviter que le bois ne soit pas remobilisé par une crue, ce qui

compromettrait l'évaluation de la distribution des volumes de bois et la taille des embâcles. Pour 12 km de cours d'eau, la caractérisation des embâcles a été complétée en environ 5 jours pour 2015 et 2016. Lors de la caractérisation, 6 mesures de largeur, de longueur ou de hauteur ont été omises. Afin d'estimer une valeur adéquate pour le calcul des volumes, une relation allométrique entre chacun des axes a été construite.

Afin d'estimer les volumes de bois susceptibles d'être introduits dans la rivière par la migration passée et prochaine du chenal, des quadras de végétation ont été réalisés au sein de la bande riveraine. Un total de neuf secteurs a été retenu afin d'effectuer un inventaire forestier. Sur chacun d'eux, deux quadras de 15 m x 15 m ont été définis afin d'identifier, de mesurer la circonférence ainsi que la hauteur de chacun des arbres, vivants ou morts. De l'amont vers l'aval, les quadras sont positionnés avec un intervalle régulier afin de représenter la variabilité longitudinale des essences et des volumes de bois. Toutefois, pour des raisons d'accessibilité et de temps, aucune mesure n'a été réalisée sur environ 2 km au milieu du site d'étude (figure 15). Dans la majorité des cas, un quadra a été réalisé sur chacune des berges afin d'évaluer la variabilité latérale des volumes de bois mort. Toutefois, dans certains cas, la difficulté d'accès à certains sites ne permet qu'un seul quadra. Par convention, la circonférence des arbres a été mesurée avec un ruban à mesurer au diamètre à hauteur de poitrine (DHP). La hauteur des arbres a été estimée à l'aide d'un clinomètre, en utilisant les principes de trigonométrie.

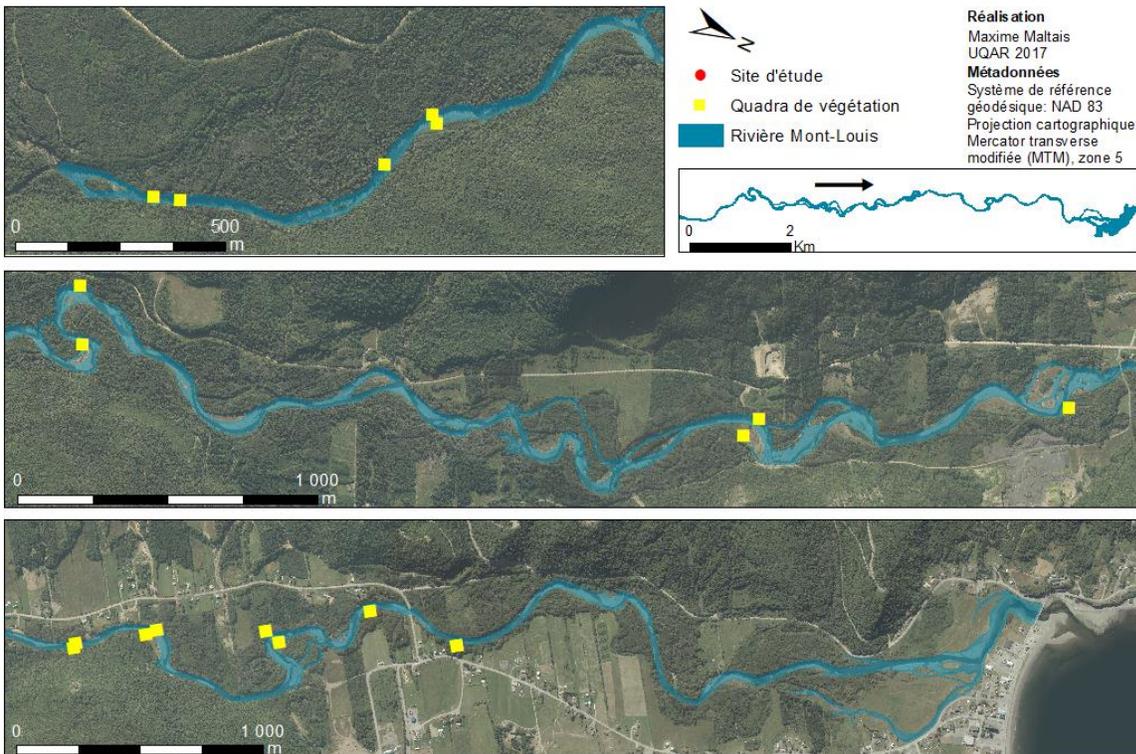


figure 15. Positionnement des relevés de végétations

3.1.2 Relevés topographiques

Des relevés topographiques ont été réalisés à l'aide d'un DGPS Trimble et d'une station totale robotisée Trimble. Il existe une borne géodésique du Gouvernement du Québec au cœur du village de Mont-Louis, mais la portée du DGPS (environ 10 km dans des conditions favorables) ne permet pas de l'utiliser pour effectuer des mesures au sein de la vallée. Ainsi, au cours de la campagne de terrain de 2015, une coordonnée de référence a été créée par la base du DGPS pour chacun des sites étudiés. La prise de données topographiques au site 3 s'est échelonnée sur deux jours et deux coordonnées de références ont été générées. La connaissance du terrain a permis, au cours de l'été 2016, d'identifier une position au centre de la vallée à partir de laquelle il est possible de créer une coordonnée de référence et où la portée

du DGPS couvre l'ensemble du tronçon d'étude. En vue de générer un modèle numérique de terrain pour chacune des années, des coordonnées (X, Y, Z) ont été relevées à chaque rupture de pente sur le terrain. La station totale robotisée enregistre des coordonnées relatives en fonction de sa propre position. Afin de spatialiser ces points dans un système d'information géographique, des bornes temporaires, entre 7 et 16 selon le cas, ont été installées sur chacun des sites, à chacune des années de relevé. Leur position a été relevée au DGPS ainsi qu'à la station totale robotisée et les bornes correspondantes ont été arrimées avec l'outil *spatial adjustment* dans le logiciel *Arcmap 10.4.1*. L'erreur de positionnement maximal lors des mesures avec le DGPS est de 0,06 m, au-dessus de quoi, la mesure n'a pas été enregistrée. À cet effet, parce que la précision diminue en présence de végétation dense, le DGPS est principalement utilisé pour relever la topographie du lit de la section mouillée et la station totale pour les bancs d'accumulation ainsi que les berges. Afin de s'assurer que les données traduiraient les effets des embâcles sur l'ensemble du lit, les relevés topographiques s'étendent sur plusieurs dizaines ou centaines de mètres en amont et en aval des structures de bois (figure 16).

Le profil d'élévation longitudinal de la rivière Mont-Louis est réalisé à l'aide du DGPS Trimble le long du tronçon principal. Afin d'obtenir la pente de surface de l'eau, des coordonnées (X, Y, Z) ont été relevées au contact entre les bancs d'accumulation et de la section mouillée du chenal approximativement aux 10 mètres et à chaque rupture de pente. En présence de multiples chenaux, les coordonnées ont été enregistrées seulement pour le chenal principal. La précision de chaque coordonnée est de l'ordre de 0,06 m, sans quoi elles ne sont pas enregistrées.

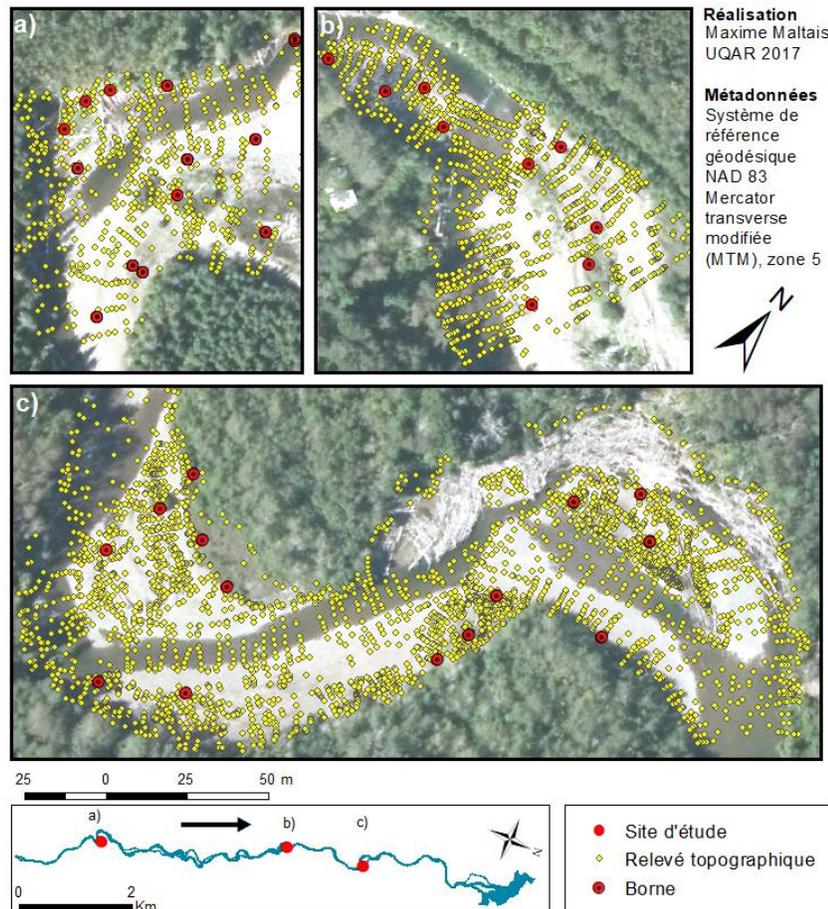


figure 16. Étendue des relevés topographiques et positionnement des bornes de références a) site amont b) site milieu c) site aval

3.1.3 Mesure de débits

Comme il n'existe pas de station hydrométrique sur la rivière Mont-Louis, il est nécessaire de construire une courbe de tarage afin de connaître les débits. Pour se faire, des sondes de pression HOBO ont été installées en aval du pont de la rue de l'église (figure 17). Chaque sonde est protégée par un tube de PVC dans lequel elle est suspendue par un câble d'acier fixé à un bouchon. La première des sondes est installée sur un arbre et a pour fonction d'enregistrer la pression atmosphérique. La deuxième quant à elle est installée de manière à

ce qu'elle soit immergée même en période d'étiage, tout en étant accessible pour que les données soient téléchargées ponctuellement. Cette sonde enregistre la somme de la pression atmosphérique et de la pression hydrostatique. Les mesures sont enregistrées par les capteurs HOBO toutes les 15 minutes, permettant 225 jours d'enregistrement consécutif. La différence des données enregistrées par les deux sondes correspond à la pression de l'eau. En définissant une relation entre les débits enregistrés ponctuellement et les niveaux d'eau, il devient possible d'estimer les débits en tout temps, grâce à la valeur des sondes de pressions. (Sivapragasam et Muttil, 2005)

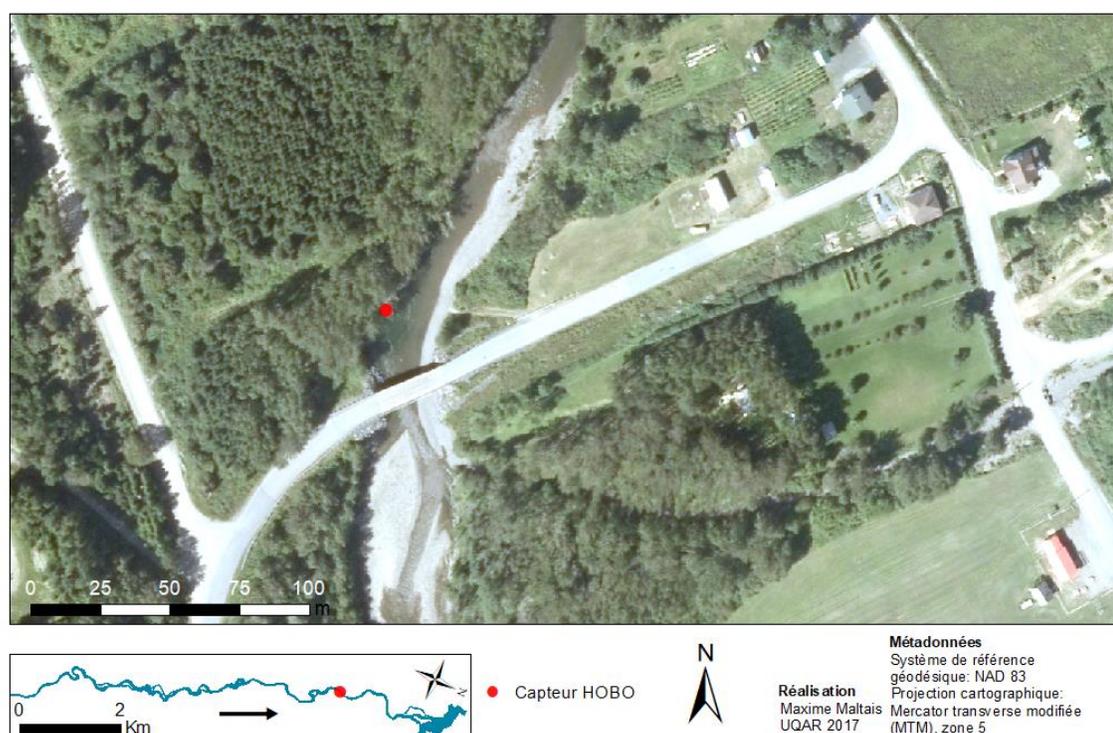


figure 17. Localisation des capteurs de pression

En fonction du niveau de l'eau, différentes méthodes ont été utilisées pour mesurer les débits de la rivière Mont-Louis. En période d'étiage, les mesures sont réalisées à partir du *Flowtracker* de Sontek, un courantomètre acoustique à effet Doppler, traduit librement de *acoustic Doppler velocimeter* (ADV). Sur une section transversale, la vitesse moyenne d'un

enregistrement est de 30 secondes. Chaque enregistrement est réalisé à 40 % de la profondeur du lit, sur chaque rupture de pente, pour mieux représenter la profondeur le long du transect. Cette méthode permet d'obtenir des débits parcellaires. À la fin du transect, l'instrument cumule l'ensemble des enregistrements et fournit le débit total automatiquement.

En période de crue, les mesures sont réalisées avec le *River Surveyor M9*, un profileur acoustique de courant à effet Doppler, traduit de *acoustic Doppler current profiler* (ADCP). Une sonde acoustique installée sur un trimaran enregistre les vitesses en continu le long d'une section transversale. À partir du pont de la rue de l'église, un opérateur effectue une série d'aller-retour en manipulant le bateau à l'aide de cordes. Afin de s'assurer que les mesures réalisées sont représentatives, une dizaine de transects est effectuée. La moyenne des débits obtenus représente ainsi la valeur de référence qui est associée au niveau d'eau enregistré par les capteurs HOBOT.

Un nombre insuffisant de mesures de débits ont été effectuées au cours de l'étude pour construire une courbe de tarage fiable. Les débits obtenus sont donc approximatifs et n'ont pas été utilisés pour ce mémoire. Toutefois, la courbe de tarage est toujours en cours de construction. De plus, bien que les débits ne puissent être associés au niveau d'eau, les données issues des capteurs de pression permettent de qualifier les crues et d'identifier les moments où les pics sont survenus.

3.2 TRAITEMENT DES DONNEES

3.2.1 Spatialisation des photographies aériennes

Le géoréférencement des photographies est une étape cruciale de la démarche. La rigueur et la précision avec laquelle le travail est accompli permettent de minimiser l'erreur des analyses subséquentes lorsque vient le temps de comparer les images de différentes années entre elles ou d'effectuer des mesures. Les photographies aériennes de 1963, 1975,

1981, 1992 et 2004 (1 :15 000 et 15 840 pour 1963) ont été géoréférencées à partir d'une image satellitaire partielle de la rivière Mont-Louis prise en 2014 et des orthophotos de 2001. L'image de 2014 a été préférée aux orthophotos bien qu'elle ne couvre que le 2/3 du tronçon d'étude (figure 18), car la qualité de la résolution (50 cm par pixel) permet une plus grande précision lors du processus de spatialisation. Les orthophotos ont été utilisées pour géoréférencer les photographies aériennes pour l'amont du tronçon d'étude. Toutefois, il existe un décalage d'environ 4,5 m entre l'image satellite et les orthophotos. Il est donc nécessaire que chaque photo soit utilisée pour extraire des données uniquement dans l'étendue de sa photo de référence afin d'éviter des erreurs de calcul et d'interprétation, notamment lorsque l'intérêt est porté sur la mobilité (figure 18).

Pour positionner une photographie aérienne, des points de contrôle au sol, qui se trouve à la fois sur l'image à spatialiser et sur une image de référence sont arrimés à partir de l'outil *georeferencing* dans Arcmap 10.4.1. Les points de contrôles utilisés sont des objets qui sont restés immobiles à travers les années, tels que des coins de bâtiments. Toutefois, en amont du tronçon d'étude ainsi que sur les photographies plus anciennes, certains secteurs sont dépourvus de tels points de contrôle. Dans de telles circonstances, des arbres isolés et facilement identifiables servent de référence spatiale, car l'utilisation de ce type de point de contrôle n'affecte que très peu la qualité du référencement (Hughes *et al.*, 2006)

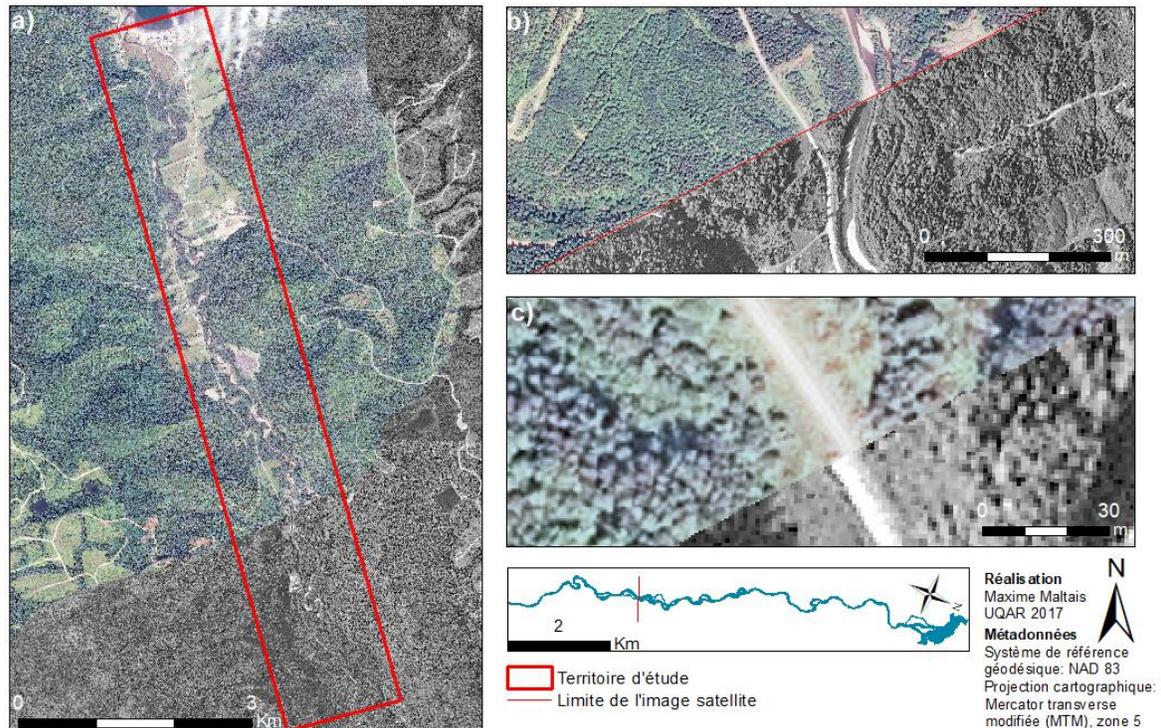


figure 18. Localisation du tronçon d'étude et de la limite de l'image satellitaire de 2014, a) tronçon d'étude, b) limite de la photographie de 2014, c) décalage entre les orthophotos de 2001 et l'image satellitaire de 2014

Afin d'augmenter la densité des points par image et ainsi d'obtenir une photographie géoréférencée avec une plus grande précision, les photographies ont été fractionnées en différentes sections (figure 19). Chaque portion d'image, en fonction de sa position sur le tronçon, de sa résolution et de sa taille est spatialisée en utilisant entre 7 et 16 points de contrôles. Ainsi, pour une image complète, on retrouve jusqu'à 23 points de référence.

Les points de contrôles utilisés pour spatialiser les photographies aériennes se situent tous au fond de la vallée, là où la variabilité topographique est minimisée. De cette manière, il est possible d'utiliser la transformation de 1^{re} polynomiale. Ce mode de transformation laisse une erreur quadratique moyenne (RMSE) supérieure à la 2^e polynomiale, mais aucune distorsion n'affecte la position de l'image. Lorsqu'un petit nombre de points de contrôle sont

utilisés, il est préférable de ne pas déformer la photo, car l'erreur induite est trop grande. L'utilisation de la transformation de 1^{ère} polynomiale s'avère donc pertinente pour analyser l'évolution d'un cours d'eau si peu de points de contrôle sont utilisés (7) et si ceux-ci se trouvent au sein de la plaine alluviale (Hughes *et al.*, 2006). Le RMSE demeure toutefois très faible, avec un maximum toléré de 2,09 m et une moyenne de 1,33 m pour la totalité des photos spatialisées.

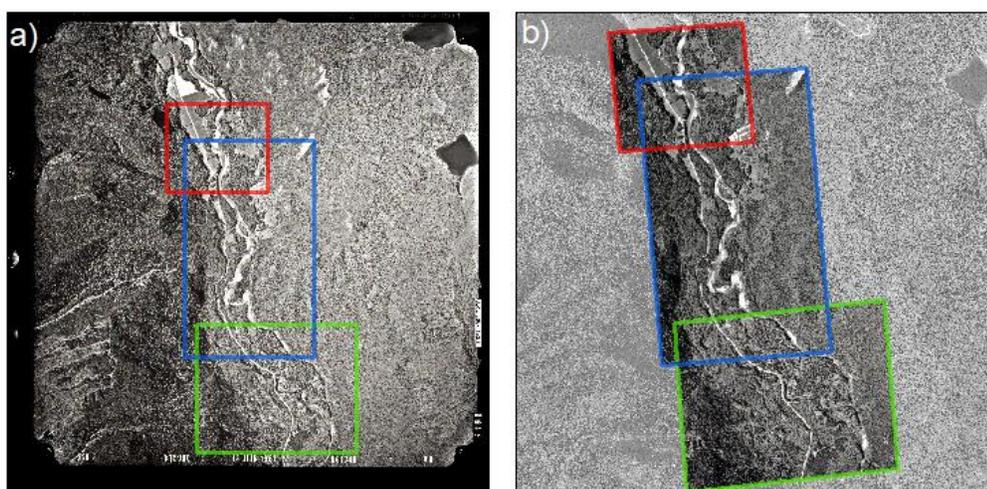


figure 19. Découpage des images aériennes pour le géoréférencement, a) photographie d'origine, b) sections d'images géoréférencées

3.2.2 Trajectoire hydrogéomorphologique

Les photographies aériennes historiques témoignent de la position, de la forme et de la taille d'un cours d'eau à un moment précis de son histoire. En cartographiant et en superposant le tracé de la rivière à chacun de ces moments, les changements survenus apparaissent de façon flagrante et il devient possible de quantifier l'évolution du cours d'eau en fonction d'indicateurs définis. Les tracés de rivières ont été réalisés pour chacune des années où les photos aériennes et satellitaires sont disponibles. Un total de 6 tracés a été cartographiés, soit un par décennie depuis les années 1960. La vectorisation est réalisée au

niveau plein bord du cours d'eau à une échelle variant entre 1 :1000 et 1 :300. Les îlots ainsi que les bancs d'accumulations colonisés par de la végétation, qu'elle soit herbacée ou arborescente, ont ainsi été exclus des tracés. Une grande proportion de la plaine alluviale se trouve en milieu forestier, si bien qu'il est parfois ardu de déterminer avec précision le sommet des berges se situant sous la canopée. Face à de telles circonstances, la limite du tracé est positionnée au centre des arbres qui bordent le cours d'eau, en assumant que leur tronc est ancré sur la berge, près de la marge avec le cours d'eau (figure 20). Le marais de l'estuaire de la rivière Mont-Louis a aussi été tracé à des fins de représentations ainsi que pour souligner au passage son importance écosystémique, mais les calculs dans ce secteur ont été réalisés uniquement à partir des chenaux d'écoulement et pas sur la largeur totale du marais.

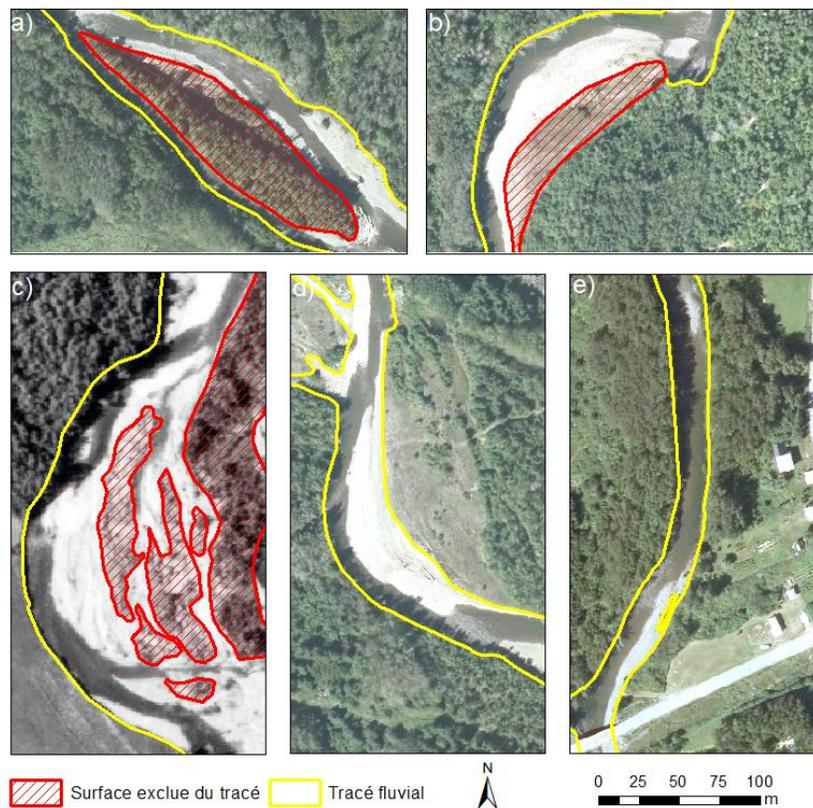


figure 20. Démonstration des limites typiques utilisées pour définir les tracés fluviaux a) en présence d'îlot végétalisé, b) avec bancs de convexité colonisé par la végétation, c) en présence de chenaux multiples, d) bancs partiellement végétalisés e) chenal linéaire

Sur la rivière Mont-Louis, aucune infrastructure ne permet de quantifier les débits passés ou actuels. Afin d'analyser la trajectoire hydrologique de ce cours d'eau, il est nécessaire de se référer aux débits spécifiques. Le débit spécifique correspond au rapport entre le débit d'un cours d'eau et la superficie de son bassin versant. Il permet d'obtenir un débit par unité de surface sur un bassin jaugé et d'estimer celui d'une rivière non-jaugée se situant dans la même région hydroclimatique. Benyahya *et al.*, (2009) ont montré que le coefficient de détermination qui unit les débits maximaux et la taille du bassin versant dans l'est du Québec varie entre 0,86 et 0,94. Cette forte relation suggère qu'il est possible d'estimer les débits d'un cours d'eau à partir de ceux enregistrés sur une rivière à proximité.

Le bassin versant de la rivière Madeleine est le plus proche voisin où un suivi hydrologique a été réalisé par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), entre 1955 et 1996. D'une superficie de 1232 km² il est adjacent à celui de la rivière Mont-Louis sur près de 50 km en tête de bassin et leur exutoire se situent à environ 30 km l'un de l'autre (figure 21) (CENG, 2014).

Les débits spécifiques de la rivière de Madeleine représentent ainsi la meilleure estimation des débits atteints à Mont-Louis. Pour les obtenir, il est nécessaire de procéder selon la formule :

$$Q_{sm} = Q_m/A_m \quad (2)$$

Où Q_{sm} est le débit spécifique, Q_m le débit mesuré à la station et A_m la superficie drainée à la station de jaugeage. Le produit du débit spécifique de la rivière Madeleine et de la superficie du bassin versant de Mont-Louis représente les débits de la rivière Mont-Louis. L'objectif ici est d'identifier les moments où des crues morphogènes sont survenues. Pour cette raison, seuls les débits mensuels maximaux ont été utilisés pour analyser la trajectoire hydrologique de la rivière Mont-Louis.

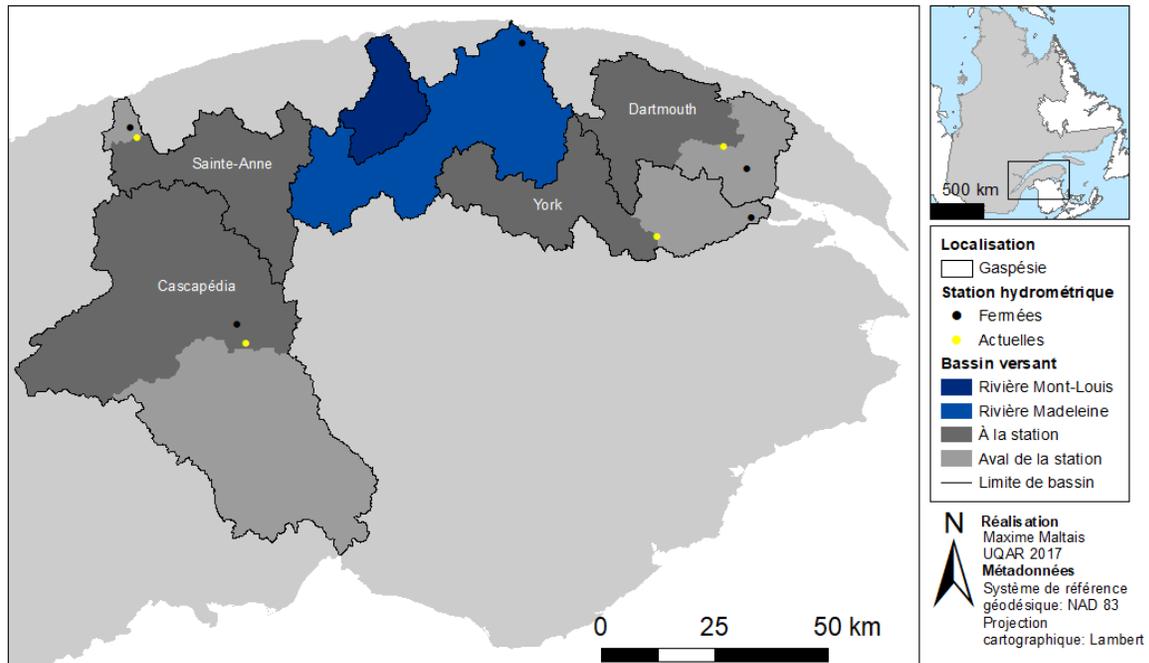


figure 21. Localisation des bassins versants de référence

Toutefois, la fermeture de la station hydrométrique de Madeleine laisse une période sans données entre 1997 et 2015. L'estimation des débits de la rivière Mont-Louis est donc réalisée à partir de stations de jaugeage à proximité toujours en fonction en 2017. Les rivières Sainte-Anne, Dartmouth, York et Cascapédia sont les 4 rivières actuellement munies d'une station hydrométrique du CEHQ dont la tête des bassins versants se situe au sein des haut-plateaux des Chic-Chocs (figure 21). Sur chacune de ces rivières, la station a été déplacée à une reprise depuis les années 1960, modifiant l'aire de drainage à la station. Pour intégrer ce changement, la relation entre les débits mensuels maximaux de chacune de ces rivières et ceux de Madeleine a été établie de deux manières. Dans un premier temps, les débits spécifiques ont été calculés à partir de l'aire de drainage respectif de chaque station, pour la période où elle a été en fonction (Tableau 1)

Tableau 1. Statut et période de fonction des stations hydrométriques

Bassin versant	Station	Statut	Superficie drainée (km²)	Période d'activité
Cascapédia	011001	Fermée	1480	1966 -1979
	011003	Ouverte	1690	1979 -2017
Dartmouth	020601	Fermée	748	1945 - 1969
	206020	Ouverte	626	1970 -2017
Madeleine	020802	Fermée	1200	1953 -1996
Sainte-Anne	021405	Fermée	786	1968 -1975
	021407	Ouverte	772	1973 -2017
York	020401	Fermée	1010	1945 -1981
	020404	Ouverte	647	1980 -2017

Dans un second temps, la relation a été établie à partir de la date à laquelle les stations actuelles ont été construites. La plus récente a été installée en 1980 et les données sont complètes depuis 1981. Cette date sert de référence commune à chacune des rivières et la relation est établie à partir des débits mensuels maximaux pour la période de 1981 à 1995 pour chacune d'elle. L'année 1996 a été exclue, car les données sont incomplètes. La rivière York, dont les débits correspondent le mieux à ceux de la rivière Madeleine est utilisé pour compléter la série temporelle (figure 22). Ainsi, les débits spécifiques de la rivière Madeleine, de 1955 à 1996 et ceux de la rivière York, de 1997 à 2015, ont été reportés sur la superficie du bassin versant de Mont-Louis (294 km²) afin d'obtenir l'estimation des débits maximaux de la rivière au cours de la période d'étude.

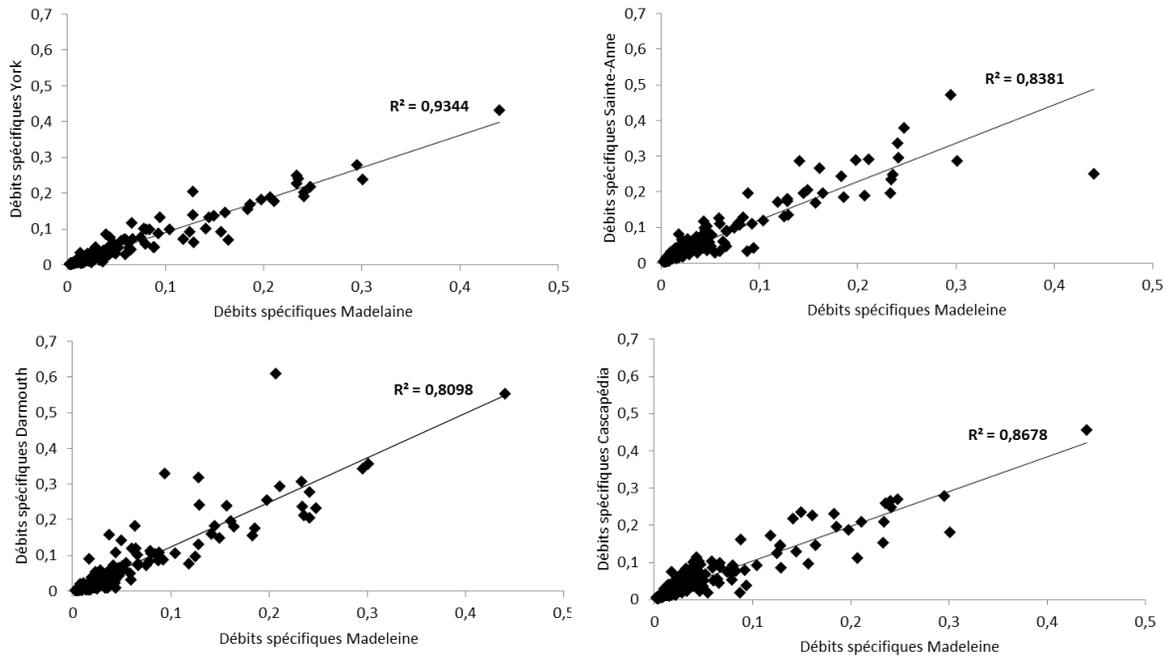


figure 22. Analyse des débits spécifiques de la rivière Madeleine et de quatre rivières à proximité, s) York, b) Sainte-Anne, c) Darmouth, d) Cascapédia

Par ailleurs, afin de cibler de façon adéquate la façon dont se sont manifestés les changements morphologiques au sein de la rivière Mont-Louis depuis les 50 dernières années, quatre variables ont été utilisées, soit l'indice de sinuosité, l'indice de tressage, les taux d'érosion et les largeurs du cours d'eau. La façon dont chacune d'elle a été calculée est décrite dans cette section.

L'indice de sinuosité (I_s) permet de rendre compte de l'évolution de la sinuosité d'un cours d'eau sans tenir compte de sa taille réelle et il est possible de le calculer sans connaître l'échelle de l'image de référence. Pour cette raison, l' I_s de la rivière Mont-Louis a pu être calculé dès 1927, malgré que la qualité des photos n'ait pas été suffisamment bonne pour en permettre le géoréférencement. La démarche réalisée sur la rivière Mont-Louis est inspirée de Rosgen (1994) et consiste à diviser la longueur du thalweg par la longueur à vol d'oiseau d'un tronçon d'intérêt. Une valeur de 1 indique un cours d'eau parfaitement linéaire et

l'augmentation de l' I_s indique que le cours d'eau s'allonge et que l'amplitude des méandres augmente. L' I_s a été calculé pour l'ensemble du tronçon d'étude, de la confluence à l'estuaire, au pont de la route 132 pour chacune des années à l'exception de 1927 et 2014. Dans ces cas, l' I_s calculé sur l'ensemble du tracé disponible à partir de la route 132.

De manière similaire à l'indice de sinuosité, l'indice de tressage (I_t) permet de rendre compte de l'évolution du nombre de chenaux actifs lors de crues plein-bord. Pour identifier la trajectoire hydrogéomorphologique de la rivière, il est préférable d'obtenir une seule valeur par année (1963, 1975, 1981, 1992, 2004, 2014). Pour cette raison, la méthode développée par Moseley (1981) a été préférée à d'autres, qui elles permettent toutefois de mieux spatialiser l'information (Chew et Ashmore, 2001 ; Hong et Davis, 1979). Ainsi, pour chaque tracé, un rapport entre la longueur de chacun des chenaux et la longueur du chenal principal est établi selon la formule suivante :

$$IT = \sum L_c / L_{cp} \quad (3)$$

Où I_t est l'indice de tressage, L_c la longueur de chacun des chenaux et L_{cp} la longueur du chenal principal. L' I_t témoigne ainsi de la longueur cumulée des chenaux secondaires de la rivière. Un indice de 1 correspond à un chenal unique sur l'ensemble du tronçon d'étude. Une augmentation de la valeur de l' I_t signifie qu'il y a une augmentation de la longueur totale des chenaux secondaires. Elle peut ainsi être due à l'apparition d'un chenal secondaire très long, ou de plusieurs courts chenaux.

La mobilité du chenal est souvent le plus grand témoin du dynamisme d'un cours d'eau et une des préoccupations principales des gestionnaires et des riverains. Elle est influencée par de nombreux facteurs géologiques, hydroclimatiques et anthropiques. C'est toutefois un indicateur incontournable de la trajectoire d'une rivière. La mobilité est évaluée à partir des surfaces érodées entre chaque période ou des photographies aériennes sont disponibles. Selon Demers *et al.* (2014) l'approche par superficie érodée est à privilégier afin d'évaluer la mobilité des cours d'eau dont la largeur excède 15m. Ainsi, les tracés des années qui se succèdent sont superposés, pour mettre en évidence les surfaces érodées par la rivière.

Les secteurs où seul le tracé le plus récent est présent correspondent à des surfaces érodées, alors que la superposition des tracés correspond à la position du cours d'eau. La présence du tracé le plus ancien seul indique que le chenal s'est déplacé et que la plaine alluviale est en construction, ce sont des surfaces d'accumulation (figure 23). Les surfaces érodées sont par la suite converties en polygones dont la superficie totale est calculée et divisée par la longueur du tronçon d'étude de manière à obtenir le déplacement moyen. Enfin, la distance de migration moyenne est divisée par l'intervalle de temps qui sépare chaque tracé de façon à obtenir le taux de migration annuel moyen de la rivière.

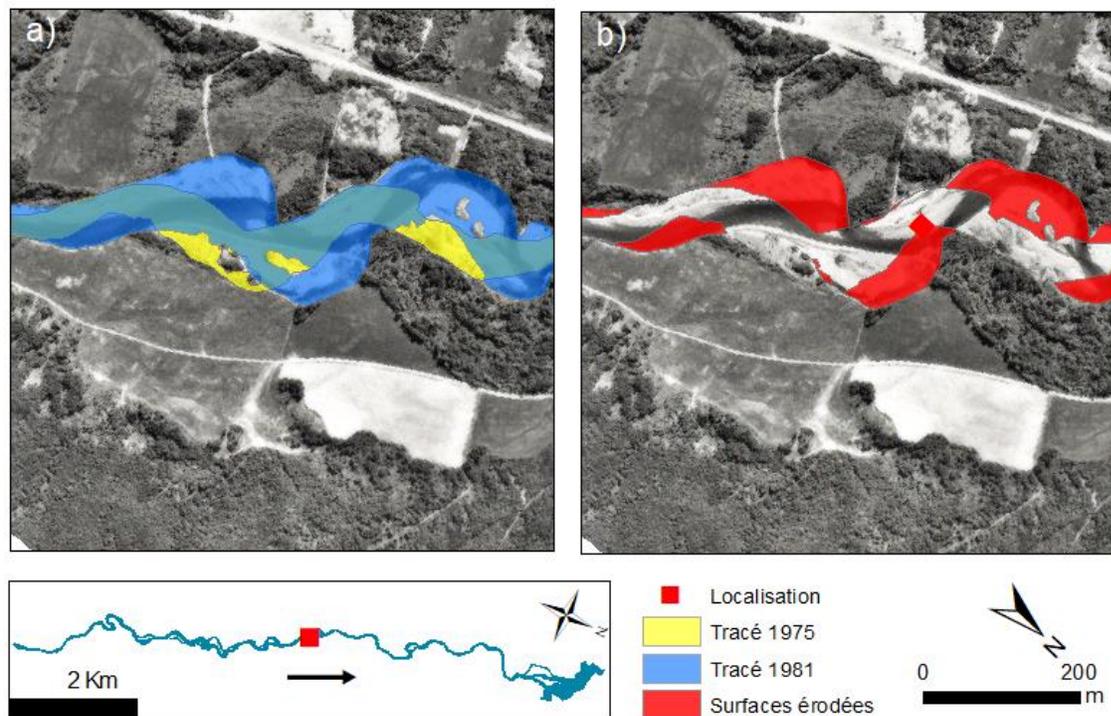


figure 23. Quantification des superficies érodées par le cours d'eau a) superposition des tracés de 1975 et 1981, b) identification des surfaces érodées

Enfin, la ripisylve a été délimitée afin d'analyser son évolution temporelle, au même titre que les indicateurs géomorphologiques présentés précédemment. La première étape permettant de mesurer la superficie de la ripisylve consiste à délimiter les limites de la plaine alluviale. Elle est le résultat de la déposition de sédiments forcée par la migration du cours d'eau et les inondations et son étendue témoigne du régime hydroclimatique actuel (Nanson et Croke, 1992). La limite de la plaine alluviale est identifiable par stéréoscopie, alors que des talus d'érosion perceptible marquent la transition entre le lit majeur du cours d'eau, inondé en cas de crues extrêmes et les terrasses héritées d'un régime hydroclimatique antérieur (Ballais *et al.*, 2005). Pour chacune des années, les surfaces où la végétation arborescente est dominante ont été numérisées sous forme de polygones sur l'ensemble de la plaine alluviale en utilisant la même approche que pour les tracés fluviaux en présence de berge végétalisée et la superficie a été calculée. De plus, la présence de bande riveraine a été notée pour chacune des années afin de documenter l'évolution de la bande riveraine au cours des 50 dernières années. En présence de végétation, les berges ont été catégorisées en trois groupes. Les berges « alluviales » sont celles où le cours d'eau est libre de se déplacer, les berges « non-alluviales » sont celles où la migration du chenal est limitée par un confinement naturel tel qu'un affleurement rocheux ou un versant et les berges « infrastructures » sont celles où des structures de protections ont été observées et dont la position de début et de fin a été enregistrée au GPS lors de la campagne de terrain de 2016. Cette classification permet d'évaluer la présence d'une bande riveraine sur l'ensemble du tronçon et de distinguer les sources de bois mort, car dans les secteurs confinés, l'apport en bois mort se fait plutôt par mortalité naturelle que par migration. Les apports en bois mort de ces secteurs sont moindres. Certaines structures n'étaient toutefois pas en place lors de l'acquisition des photographies aériennes entre 1963 et 1981. Il importe donc d'agir avec prudence lors de la caractérisation. Dans les secteurs où un déplacement du cours d'eau est observable ou que l'incertitude est trop grande, les berges végétalisées ont été considérées alluviales.

3.2.3 Segmentation du cours d'eau

À partir de l'examen de photographies aériennes, il est rapidement possible d'identifier des distinctions au niveau de la morphologie du cours d'eau le long d'un corridor fluvial. L'identification des zones où des transitions apparaissent permet la segmentation du cours d'eau. Chacun des tronçons qui en résultent manifeste un morphodynamisme homogène, c'est-à-dire qu'ils évoluent de façon similaire tant dans le temps que dans l'espace. Ce type d'observation repose sur une série d'indicateurs quantifiables tels que la largeur, la sinuosité, le nombre de chenaux, la mobilité, la superficie des bancs d'accumulations ou encore le confinement du cours d'eau (Demers *et al.*, 2011). Afin de procéder à une telle segmentation sur la rivière Mont-Louis, des transects perpendiculaires au cours d'eau ont été générés par intervalle de 100 m pour former de courts tronçons à partir desquels les largeurs, le nombre de chenaux et les taux d'érosions ont été extraits. Le choix de la longueur des tronçons est arbitraire, mais permet de raffiner l'échelle à laquelle l'information est traduite sans représenter des valeurs trop locales et de positionner la limite d'un tronçon homogène avec précision. Les cassures dans la distribution des données correspondent aux zones de transition de style fluvial.

Les transects générés permettent de diviser chaque tracé en portion de 100 m, dont la superficie a été calculée et divisée par la longueur afin d'extraire la largeur moyenne de la parcelle. Lorsque plusieurs chenaux sont numérisés, pour un même tronçon de 100 m, l'aire du chenal est égale à la somme de celle de chaque chenal (figure 24a).

$$A_t = (A_{c1} + A_{c2})/L_p \quad (4)$$

Où A_t est l'aire totale d'une parcelle, A_{c1} la superficie d'un chenal et A_{c2} la superficie du second et L_p sa longueur fixe de 100 m.

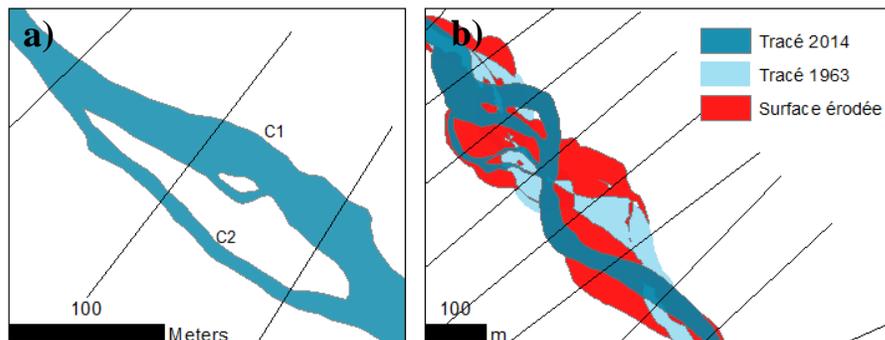


figure 24. a) représentation du calcul de la largeur d'une parcelle, b) calcul des superficies érodées par parcelle de 100 m

Pour procéder à la segmentation, une démarche différente de celle de la trajectoire a été employée pour refléter le tressage de la rivière Mont-Louis. Adoptant la démarche de Chew et Ashmore (2001) ; Ashmore (1991) et Hong et Davis (1979), le tracé est divisé par des transects à intervalle régulier (100m) afin d'identifier le nombre de chenaux actifs en période de crue. Pour chacune des parcelles, le nombre de chenaux numérisés est recensé manuellement et compilé dans une table d'attributs. En présence de confluences ou de diffluences au sein d'une parcelle, les chenaux sont comptabilisés s'ils représentent plus de 25 % de la distance entre 2 transects.

La mobilité du cours d'eau est l'une des variables permettant la segmentation du cours d'eau. Pour procéder à la segmentation, l'ensemble des surfaces érodées, pour chacun des tracés, a été divisé en tronçons de 100 m et spatialisés selon un gradient amont-aval (figure 24b). La superficie érodée est calculée pour chacune des parcelles et divisée par le nombre d'années qui séparent la plus récente et la plus ancienne des photos, afin d'obtenir la superficie moyenne érodée annuellement. Le taux de migration annuel moyen s'obtient en divisant à nouveau la superficie par la longueur du tronçon (100 m).

En fonction de la sinuosité du cours d'eau, la longueur de la rivière varie à travers le temps. Ainsi, un endroit précis sur le cours d'eau correspond à une distance de l'exutoire différente à travers les années, rendant la comparaison entre les valeurs de largeurs de tressage et d'érosion difficile. Afin de corriger cette situation, une ligne centrale à l'ensemble des tracés fluviaux a été utilisée comme référence commune permettant de spatialiser et comparer l'évolution des indicateurs (figure 25). Plusieurs mesures de largeur ou de tressage peuvent donc être associées à une même distance, mais cette démarche permet de représenter les limites des tronçons avec exactitude.

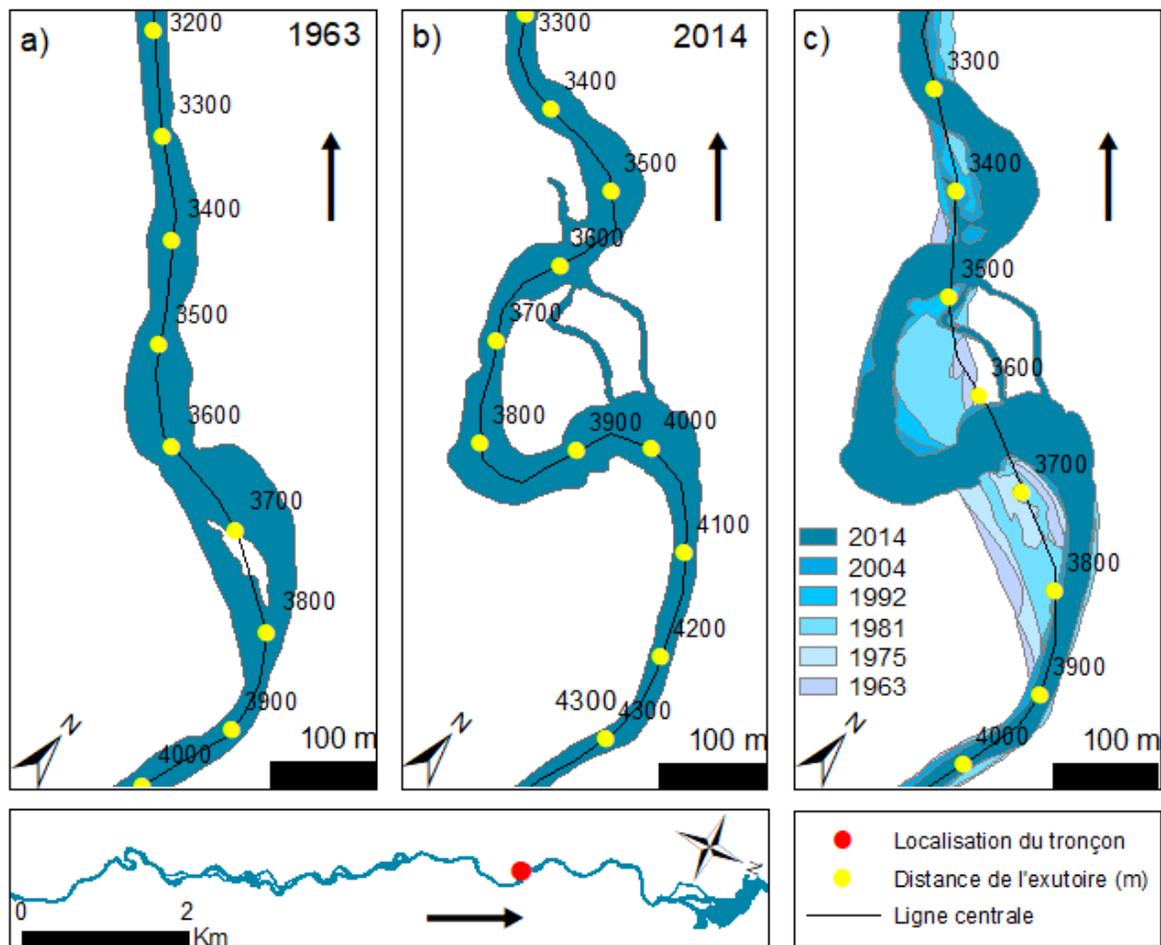


figure 25. Évolution de la sinuosité entre 1963 et 2014 et son effet sur le tracé central du cours d'eau. (a) sinuosité. Du cours d'eau en 1963, b) sinuosité du cours d'eau en 2014, c) tracé central considérant l'ensemble des tracés fluviaux.

3.2.4 Quantification des volumes de bois mort

Les données recueillies lors de la campagne de terrain sont compilées et intégrées dans une table d'attributs dans le logiciel *Arcmap 10.4.1* à des fins de spatialisation. Pour quantifier le volume de bois que représente un embâcle, il est primordial de considérer sa porosité. Thévenet *et al.*, (1998) ont démontré qu'une accumulation de bois est composée à 90 % d'air et qu'afin d'éliminer cet espace vide, le volume de chaque structure doit s'effectuer selon la formule suivante :

$$V_{bm} = (L * l * h) * 0.1 \quad (5)$$

Où V_{bm} est le volume de bois mort, L est la longueur, l est la largeur, h est la hauteur et 0.1, la proportion de bois que l'on retrouve dans l'embâcle. Le volume individuel de chacun des EBM caractérisés est calculé et regroupé selon les parcelles de 100m préalablement définies afin de synthétiser l'information et cibler des secteurs d'accumulation ou de transport de bois mort. De cette manière, il est aisé de reconnaître des tendances dans la distribution des volumes de bois et de spatialiser les variations interannuelles. Les volumes de bois par 100 m ont été comptabilisés en additionnant le volume de chaque embâcle au sein d'une parcelle de 100 m à partir de l'outil *spatial join* du logiciel *Arcmap 10.4.1*. Le tracé de 2004 a été préféré à celui de 2014 à cette étape, car c'est le tracé le plus récent qui couvre l'entièreté du secteur à l'étude.

Les volumes de bois mort ont aussi été calculés en fonction des tronçons homogènes. Toutefois, ces tronçons sont de longueur très variable et les volumes bruts ne permettent pas de procéder à une comparaison. Traduire l'information par une valeur adimensionnelle permet de mettre en relation les volumes de bois contenu dans chacun des tronçons homogènes. Ainsi, le volume de bois de chaque tronçon a été calculé selon la formule suivante :

$$V_m = V_t/L_t \quad (6)$$

Où V_m est le volume de bois moyen par mètres, V_t est le volume de bois total contenu dans un tronçon défini et L_t est la longueur de ce même tronçon.

3.2.5 Construction des modèles numériques de terrain

L'analyse de l'évolution interannuelle de la topographie locale est réalisée par la construction de modèle numérique de terrain pour les années 2015 et 2016. L'information traduite par les données recueillies est ponctuelle et il est nécessaire de procéder à une interpolation pour attribuer une valeur d'élévation à l'ensemble du site d'étude. Le krigeage ordinaire a été préconisé pour interpoler les relevés topographiques, car la méthode permet de représenter la réalité du terrain avec exactitude en minimisant les erreurs d'interpolations (Arun, 2013 ; Oliver et Webster, 1990). Pour éviter que des valeurs ne soient interpolées à l'extérieure de la zone d'étude, ou aucune information réelle n'est connue, un polygone a été tracé à la limite atteinte conjointement par les points des deux années et le krigeage réalisé uniquement à partir des données qui y sont contenues (figure 26).

Toutefois, des complications associées à l'interruption du signal satellitaire lors des campagnes de terrain ont altéré les fichiers T02 générés lorsque la base du DGPS créait une coordonnée de référence. Ce fichier est nécessaire afin d'obtenir la position exacte de chacun des points, sans quoi une erreur observée de l'ordre d'un mètre affecte les coordonnées planimétriques (X, Y) et de 5 m pour l'élévation (Z). Ainsi, les coordonnées de chaque mesure n'ont pu être spatialisées avec exactitude et les valeurs d'élévations sont inexactes. Toutefois, la position relative de chacun des points au sein d'une même étude est juste et la correction des valeurs d'élévations des points rend possible l'analyse qualitative des changements topographiques.

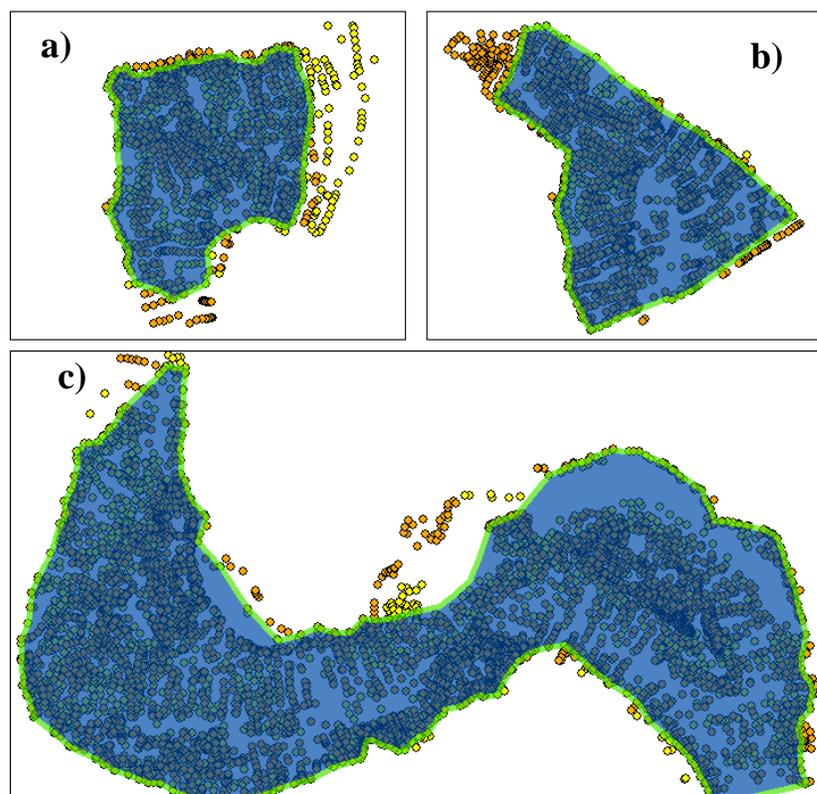


figure 26. Zones interpolées pour le krigeage. En bleu, la zone sélectionnée, en vert, la limite de la zone a) site amont, b) site médian, c) site aval

Lors des relevés terrain, les coordonnées d'une série de bornes ont été enregistrées à partir du DGPS ainsi que de la station. L'outil *spatial adjustment* permet d'associer la position des bornes de la station totale aux bornes correspondantes du DGPS en effectuant une rotation ainsi qu'une translation (figure 27). Ce déplacement est appliqué sur l'ensemble des points et la démarche est répétée pour chacune des études réalisées à la station totale.

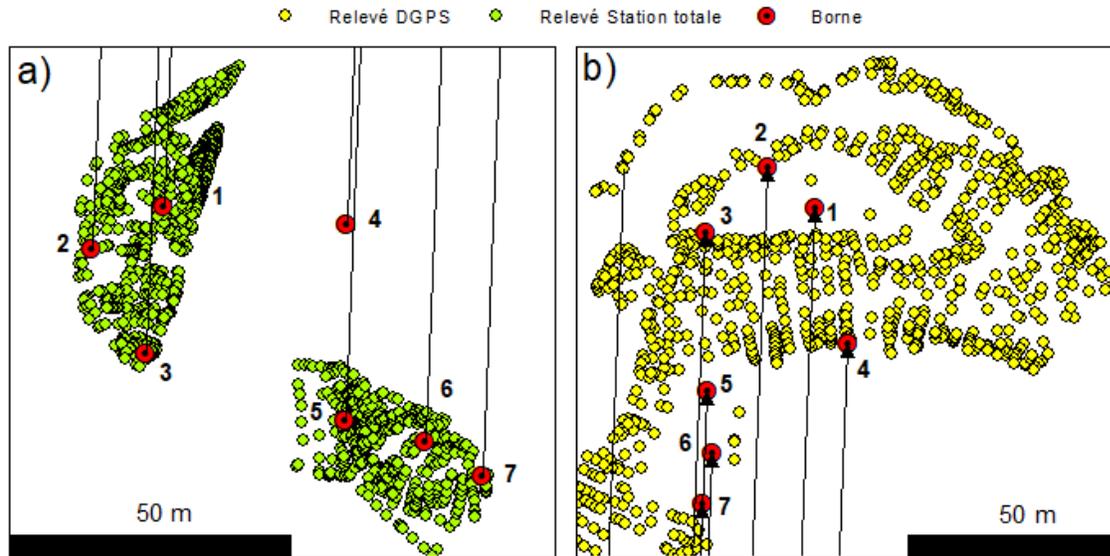


figure 27. Jointure des relevés topographiques de la station totale à ceux du DGPS

Sur le terrain, la valeur arbitraire de 100 m d'élévation a été attribuée à la station totale robotisée. Il est donc nécessaire de corriger l'élévation de chaque point afin qu'elle soit représentative de celle mesurée au DGPS en utilisant la formule suivante :

$$\Delta E = E_{bDGPS} - E_{bST} \quad (7)$$

Où ΔE représente la différence entre l'élévation de la station totale et l'élévation réelle, E_{bDGPS} représente l'élévation des bornes mesurées au DGPS et E_{bST} représente l'élévation des bornes mesurées à la station totale. La différence d'élévation de chacune des bornes est moyennée et cette valeur est soustraite à l'ensemble des points de l'étude dans un nouveau champ de la table d'attribut afin d'obtenir leur élévation (Tableau 2). De cette façon, chaque mesure réalisée à partir de la Station totale Trimble est spatialisée adéquatement.

Tableau 2. Exemple d'ajustement de la valeur d'élévation des relevés topographiques faits à la station totale

Nom de borne	Élévation DGPS (m)	Élévation Station Totale (m)	Différence d'élévation (m)
jack02	13,37	99,72	-86,36
jack08	13,33	99,71	-86,38
m6	13,10	99,46	-86,35
m7	13,14	99,50	-86,36
t5g	13,31	99,68	-86,36
m11	12,48	98,84	-86,36
m10	12,99	99,36	-86,36
m12	12,90	99,27	-86,37
m9	12,72	99,08	-86,36
			-86,36

Pour couvrir l'entièreté du site aval, les relevés topographiques ont été réalisés sur deux jours, la base du DGPS a été positionnée à deux endroits et 2 coordonnées de références ont été créées. Comme il existe une erreur de positionnement pour chaque coordonnée de référence, les deux fichiers ne peuvent être utilisés conjointement pour construire un modèle d'élévation numérique sans procéder à une correction manuelle. À chaque campagne de terrain, des bornes sont installées de façon temporaire au sein du lit moyen et sur les berges du cours d'eau. La position de trois bornes a été enregistrée à chacune des journées de relevé topographique pour ce site et elles ont été utilisées comme référence commune afin d'arrimer les deux fichiers de points à partir de l'outil *spatial adjustment* et d'obtenir un positionnement relatif juste. De la même façon que pour l'erreur de positionnement planimétrique, un écart dans les valeurs d'élévation est présent entre les deux journées de relevé de l'été 2015 pour le site 3. La différence d'élévation entre les 3 bornes communes est calculée et la valeur d'élévation de chaque point de l'étude est corrigée en fonction de cet écart. Ainsi, les valeurs d'élévation pour le site 3 sont erronées, mais la topographie est respectée et bien représentée.

Pour chacun des sites, pour chacune des années, les points de coordonnées sont désormais représentatifs du relief au sein du chenal. L'élévation relative est juste, mais les valeurs affichées entre les deux années de relevés ne sont pas équivalentes. À des fins de représentation et de comparaison interannuelle, il est nécessaire d'ajuster les valeurs altitudinales afin que l'échelle de référence soit identique. Pour se faire, les valeurs altitudinales des relevés de 2016 ont été retenues comme valeur de référence. À partir des

photos prises par les caméras RECONYX et d'une connaissance du terrain, des secteurs non affectés par la crue du printemps 2016 ont été identifiés comme zones stables ou aucun changement morphologique n'a été apporté. Pour les sites amont, médian et aval, respectivement 8, 9 et 21 points se trouvant dans un rayon maximal de 20 cm les uns des autres ont été utilisés comme référence de correction. La différence moyenne d'élévation entre ces points a été calculée et appliquée à l'ensemble des points pour chaque site afin d'obtenir une élévation relative correspondante entre les deux années (Tableau 3).

Tableau 3. Correction des valeurs d'élévation des relevés topographiques interannuels

2015		2016		différence d'élévation (m)	distance entre les points (m)	Correction d'élévation (m)
Nom de point	Élévation (m)	Nom de point	Élévation (m)			
Amont						
394	34,80	203	36,65	1,85	0,18	1,431625
121	34,63	165	36,02	1,40	0,17	
407	35,27	topo-a-0350	36,12	0,85	0,20	
121	34,64	165	36,02	1,39	0,17	
388	34,33	topo0025	35,82	1,50	0,17	
b8	34,76	topo0022	36,05	1,29	0,15	
1117	34,22	topo0052	35,82	1,61	0,12	
1110	34,57	topo-a-0052	36,15	1,58	0,13	
Médian						
237	11,63	324	13,28	1,65	0,12	1,45
235	11,85	244	13,27	1,42	0,13	
90	11,98	561	13,35	1,38	0,15	
231	11,67	263	13,10	1,43	0,12	
127	11,87	191	13,30	1,43	0,08	
232	11,43	260	12,87	1,44	0,04	
107	12,02	161	13,47	1,45	0,13	
84	11,94	116	13,35	1,41	0,12	
Aval						
336	7,101	777	11,679	4,578	0,23	4,4919
334	6,99	823	11,583	4,593	0,077	
612	6,989	1133	11,544	4,555	0,0597	
675	6,549	316	10,817	4,268	0,0297	
751	6,383	378	10,775	4,392	0,071	
737	6,939	52	11,232	4,293	0,0694	
1183	6,294	1429	10,994	4,7	0,699	
970	6,492	1521	11,127	4,635	0,096	
978	6,518	1576	11,162	4,644	0,463	
980	6,118	1577	10,759	4,641	-	
1035	6,673	585	11,048	4,375	0,0391	
1023	6,645	829	11,067	4,422	0,0565	
1176	6,948	m-3	11,336	4,388	0,0793	
1066	6,865	39	11,274	4,409	0,481	
1127	6,896	544	11,308	4,412	0,0791	
301	7,274	310	11,832	4,558	0,1	
358	7,285	935	11,794	4,509	0,0539	
629	7,218	1091	11,734	4,516	0,066	
528	5,954	1048	10,511	4,557	0,0579	
1048	6,869	608	11,262	4,393	0,0816	

CHAPITRE 4

PRESENTATION DES RESULTATS

Le chapitre suivant lève le voile sur l'interaction entre la dynamique fluviale et la dynamique du bois mort au sein de la rivière Mont-Louis. Dans un premier temps, une segmentation du cours d'eau en tronçon morphodynamiques homogène est proposée. Dans un second temps, la distribution des volumes de bois le long du corridor fluvial est mise en relation avec la segmentation du cours d'eau. Les effets morphologiques du bois mort sont ensuite présentés. Enfin, la trajectoire hydrogéomorphologique du cours d'eau est présentée, appuyée par l'analyse de la sinuosité, du tressage, des taux d'érosion et de la largeur du chenal au cours des 50 dernières années. Les superficies boisées de la plaine alluviale, le linéaire de bande riveraine et l'évolution historique des débits maximaux sont finalement présentées.

4.1 SEGMENTATION DE LA RIVIERE MONT-LOUIS

La segmentation d'un cours d'eau en unités morphodynamiques homogènes permet d'identifier des secteurs où la rivière adopte un comportement similaire afin d'anticiper les changements morphologiques à venir et de prévoir les enjeux relatifs au dynamisme du cours d'eau. La représentation des mesures de largeurs, de tressage et d'érosion de par parcelles de 100 m, selon un gradient amont-aval, permet d'identifier les cassures dans la distribution des données et par le fait même, des zones de transitions dans le style fluvial. Les indicateurs ont été calculés sur chacune des photographies aériennes afin de mettre en évidence le dynamisme du cours d'eau dans l'espace, mais aussi dans le temps. Cette perspective permet de confirmer la segmentation. Une photographie aérienne représente un cours d'eau dans un

état statique, pour déterminer le dynamisme il est nécessaire de s'intéresser à son évolution dans le temps. En effet, la variabilité spatiale de chacun de ces indicateurs permet de distinguer un tronçon d'un autre à cause de sa forme, mais n'indique pas son fonctionnement.

Une forte variabilité spatiale et temporelle renseigne sur l'ampleur et la fréquence des ajustements susceptibles de se produire et sur la réponse des différents tronçons face aux mêmes perturbations. À l'amont complètement du secteur d'étude se situe un tronçon linéaire qui affiche une stabilité plus marquée que les autres tronçons. La distribution des valeurs de largeur permet d'identifier une transition au point kilométrique (PK) 9 200. Du PK 10 700, à l'amont du territoire d'étude, au PK 9 200, la largeur du cours d'eau varie très peu dans l'espace, mais aussi dans le temps, révélant une grande stabilité (figure 28a). Les largeurs minimales enregistrées varient entre 15 m en 1975, 18 m en 1992 et 19 m en 1963, 1981 et 2004. Hormis une valeur isolée de 59 m de largeur en 1981, les valeurs de largeurs maximales atteintes sont de 40 m pour 1992 et 2004 ainsi que 42 m en 1981 (Tableau 4). La faible variabilité se traduit de manière spatiale, à l'échelle du tronçon, mais aussi dans le temps, alors que les largeurs demeurent assez constantes. De plus, la berge droite du cours d'eau est accolée au versant sur plus de 72 %, ce qui limite la migration latérale. De ce fait, les superficies érodées sont principalement dues à l'élargissement du cours d'eau sur la berge gauche et demeurent très faibles. En excluant la période de 1975 à 1981, durant laquelle les superficies érodées sont exceptionnellement grandes sur l'ensemble du cours d'eau, les surfaces érodées annuellement par 100 m linéaires sont relativement petites (figure 28b). Elles varient entre 0 m² et 92 m² et affichent une moyenne de 24 m² alors qu'entre 1975 et 1981 seulement, la plus petite surface d'érosion est de 32 m², la plus grande est de 561 m², pour une moyenne de 153 m². De façon générale, ce tronçon consiste en un chenal unique sur toute sa longueur (figure 28c). Deux îlots végétalisés long d'environ 50 m et 80 m au PK 10 000 et PK 10 600 sont toutefois présent en 1992, 2004, et probablement en 2014. La sinuosité du tronçon n'a pas été quantifiée, mais l'absence de méandres révèle la présence d'un tronçon linéaire.

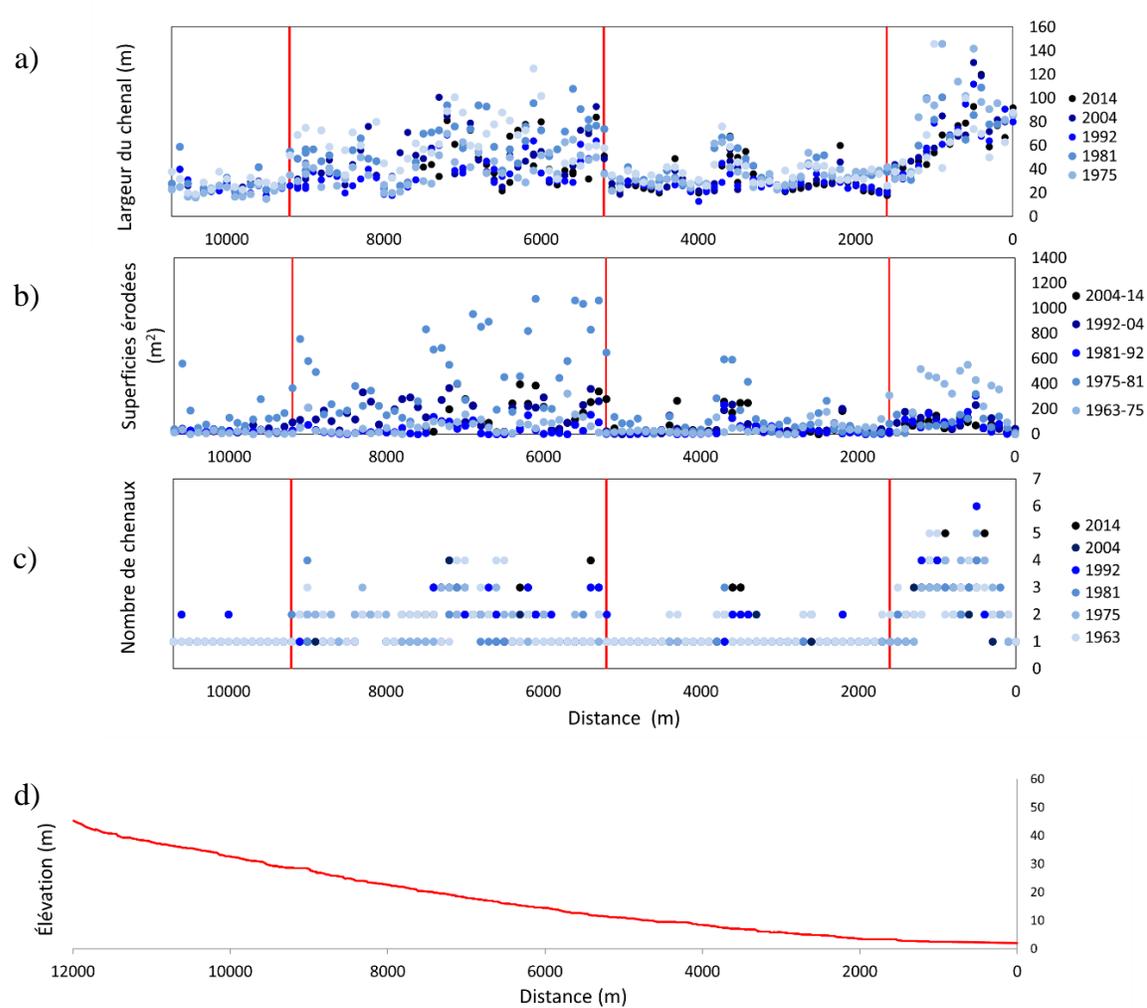


figure 28. Variabilité spatiale des indicateurs morphométriques, a) Largeur, b) superficies érodées, c) tressage, d) profil longitudinal

Tableau 4. Variabilité de la largeur du cours d'eau par tronçon homogène

Largeurs (m)					
Période	Maximale	Minimale	Étendue	Moyenne	Ecart-Type
Linéaire					
1963	38	19	19	28	6
1975	35	15	20	22	5
1981	59	18	41	30	12
1992	40	18	22	24	6
2004	40	19	21	27	5
2014	-	-	-	-	-
63-04	59	15	44	26	8
Divagant					
1963	125	32	93	64	20
1975	70	20	50	40	12
1981	108	18	90	53	23
1992	69	18	51	38	13
2004	101	19	82	47	19
2014	84	22	62	52	19
63-14	125	18	107	50	20
Méandres					
1963	76	24	52	37	10
1975	63	22	41	35	9
1981	67	24	43	38	11
1992	45	13	32	29	7
2004	57	19	38	29	8
2014	68	18	50	30	12
63-14	76	13	63	33	10
Estuaire					
1963	146	36	110	65	28
1975	146	32	114	87	33
1981	109	31	78	73	23
1992	112	32	80	65	23
2004	130	44	86	72	25
2014	120	35	85	66	23
63-14	146	31	115	72	27

Inversement, le second tronçon révèle un grand dynamisme tant au niveau de l'évolution des largeurs, des superficies érodées que du développement de multiples chenaux (figure 28). De 1963 à 2014, entre les PK 9200 et 5200, les largeurs varient entre 32 m et 125 m, 20 m et 70 m, 24 m et 108 m, 18 m et 69 m, 24 m et 101 m, ainsi qu'entre 22 m et 84 m, respectivement pour chaque année analysée (Tableau 4). Cet écart entre les extrêmes au cours d'une même année et la variabilité qui existe entre chacune de celles-ci témoigne des grands changements morphologiques qui surviennent au cours d'une décennie. De la même façon que pour le tronçon linéaire, les superficies érodées entre 1975 et 1981, au sein du second tronçon, sont largement supérieures à celles calculées pour les autres périodes. Elles varient entre 99 m² et 1075 m² et ont une moyenne de 499 m². Pour les autres périodes, sans distinctions, les surfaces érodées varient entre 0 m² et 399 m² avec pour moyenne 101 m² par 100 m linéaires. Toutefois, les secteurs où aucune superficie n'est érodée ne sont pas représentatifs de la dynamique globale du secteur divagant et n'existent qu'entre 1992 et 2004, une période caractérisée par une diminution de la largeur du chenal et la colonisation des bancs d'accumulation par la végétation. L'activité géomorphologique de ce tronçon se traduit aussi à travers le développement de multiples chenaux, alors que chaque tracé affiche trois ou quatre chenaux par endroits. Ceux-ci évoluent grandement dans le temps et l'espace, si bien que seuls les segments aux PK8600, PK8500, PK8200, PK8100, PK7900, PK5800 et PK5700 affichent le même nombre de chenaux entre 1963 et 2014 (figure 28c).

Entre le PK5100 et le PK1600, le cours d'eau affiche une grande stabilité au niveau de chaque indicateur, toutes années confondues. Il est toutefois possible de distinguer deux sous-secteurs plus dynamiques entre le PK3800 et le PK3300 et entre le PK2700 et le PK2400. Dans le premier, les largeurs varient entre 22 m en 2004 et 76 m en 1963 et dans le second, entre 24 m en 2014 et 54 m en 1975. Dans les deux cas, les valeurs les plus élevées sont issues des tracés les plus anciens et les plus basses relèvent des tracés récents, et ce constat est particulièrement marqué pour le second secteur. Ceci est reflété par les superficies érodées, qui sont largement plus grandes pour l'intervalle 1975-1981, atteignant jusqu'à 591 m² au maximum dans le sous-secteur amont et 275 m² dans le sous-secteur aval. Ces deux segments du tronçon à méandres stables sont aussi marqués par la présence de plusieurs

chenaux qui se sont développés, au sein d'un tronçon caractérisé par un chenal unique. En excluant chaque sous-secteur, les largeurs de ce tronçon varient entre 13 m en 1992 et 49 m en 2014 et sont en moyenne de 30 m et les surfaces érodées varient entre 0 m² pour la période de 1981-1992 et 308 m² pour 1963-1975. La superficie moyenne des surfaces érodée est de 40 m² par 100 m linéaires.

La portion estuarienne de la rivière Mont-Louis se démarque des autres secteurs au niveau des largeurs et du tressage. La largeur des chenaux est plus élevée et hétérogène que dans les autres secteurs, avec des valeurs minimales de 31 m en 1981 et maximale de 146 m en 1975 et une moyenne de 72 m. Ce tronçon est aussi caractérisé par de nombreux chenaux. Chacune des parcelles en compte au moins deux dans l'estuaire et il est possible d'en retrouver jusqu'à 6 en 1992. Les surfaces érodées ne suivent toutefois pas la même tendance que les largeurs ou le tressage. Alors que ces dernières augmentent vers l'aval, les superficies érodées restent relativement constantes au sein de ce tronçon. Entre 1963 et 1975, elles oscillent entre 0 m² et 552 m² avec pour moyenne 136 m² érodés annuellement, mais ces valeurs ne sont pas reflétées au cours des autres périodes. En excluant la période de 1963 à 1975, la valeur maximale atteinte de 318 m² est atteinte entre 1975 et 1981 et la superficie moyenne des surfaces érodées est de 94 m² pour chaque portion de 100 m. La figure 29 permet de traduire de manière cartographique l'ensemble des indicateurs analysés. Pour chacun d'eux, les limites sont identifiées aux mêmes endroits le long du corridor fluvial, ce qui confirme la présence de quatre tronçons homogènes sur la rivière Mont-Louis. De l'amont vers l'aval, on retrouve donc un tronçon linéaire, un tronçon divagant, un tronçon à méandres stables et un tronçon estuarien.

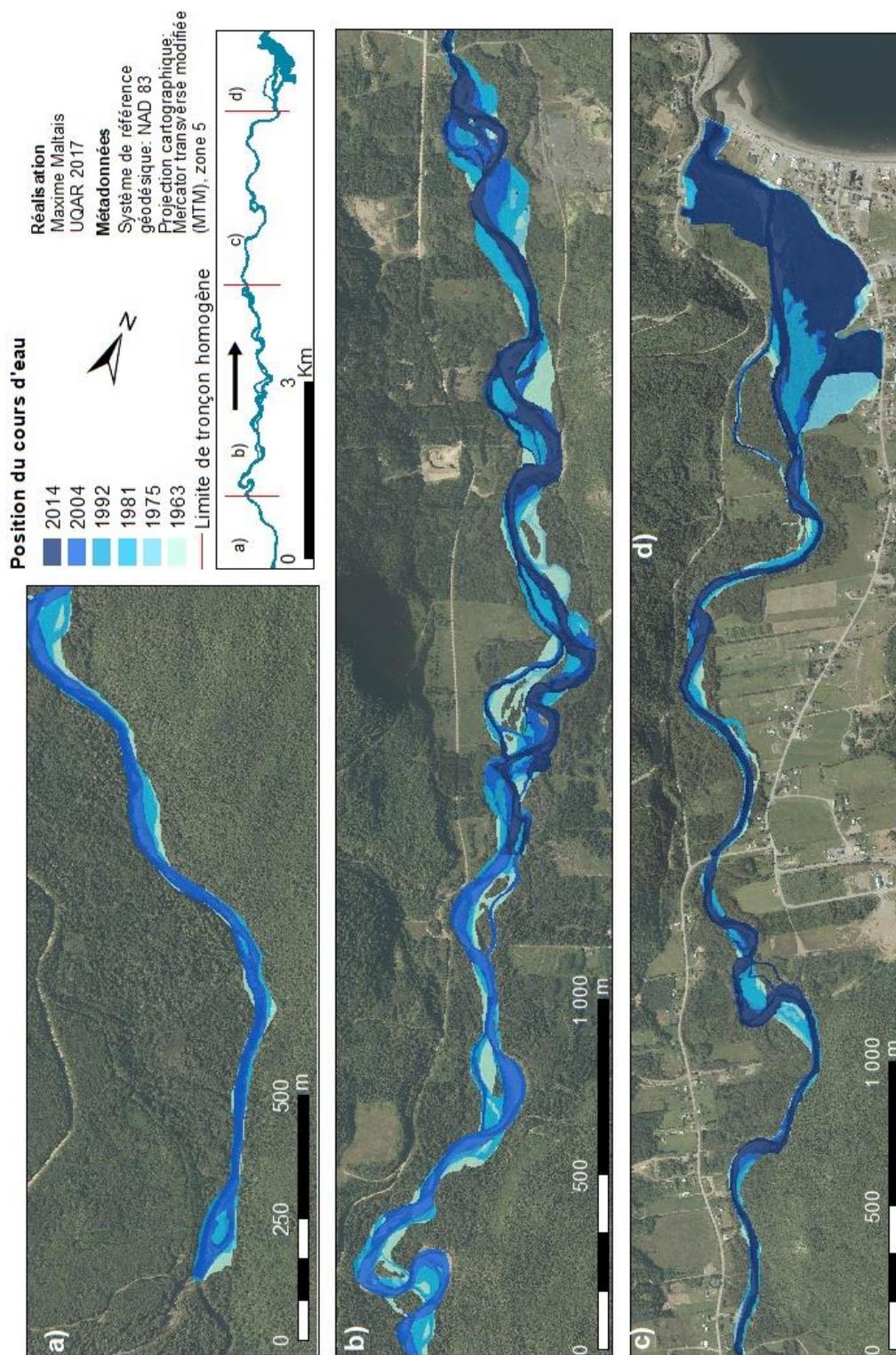


figure 29. Segmentation de la rivière Mont-Louis, a) tronçon linéaire, b) tronçon divagant, c) tronçon à méandres, d) tronçon estuarien

En somme, le tronçon linéaire (a) est confiné contre le versant, ce qui limite sa mobilité. Il est caractérisé par un chenal unique, relativement linéaire et étroit (figure 30a). Le tronçon divagant (b), au contraire, est très large, caractérisé par de nombreux bancs d'accumulations et affiche la plus grande sinuosité (figure 30b). Les tracés historiques montrent qu'il s'agit en effet d'un tronçon très mobile, le chenal principal a changé de position à de multiples reprises et que de nombreux chenaux secondaires se sont formés. Il est caractérisé par de grands taux d'érosion et la présence de plusieurs chenaux qui découpent la plaine alluviale. Le tronçon à méandres (c) est peu mobile sur presque toute sa longueur, excepté dans un sous-secteur caractérisé par d'imposants bancs d'accumulation, des taux d'érosion et des largeurs supérieurs au reste du tronçon (figure 30c). Ce sous-secteur se démarque aussi par la présence de deux chenaux secondaires en 2014, les seuls retrouvés dans le tronçon à méandres. Enfin, la portion estuarienne (d) est caractérisée par de nombreux chenaux qui traversent un milieu humide, avant de se jeter dans le Saint-Laurent (figure 30d).



figure 30. Photographie des différents tronçons ; a) tronçon linéaire, b) tronçon divagant, c) tronçon à méandres stables, d) tronçon estuarien

4.2 LA DYNAMIQUE DU BOIS MORT DE LA RIVIERE MONT-LOUIS

En 2015 et 2016, les campagnes de terrain visant à quantifier les volumes de bois au sein de la rivière Mont-Louis ont permis de mesurer individuellement chaque embâcle de bois mort, d'identifier leur position (chenal, banc, plaine), d'évaluer l'évolution interannuelle et décennale des volumes de bois et de cibler des foyers d'accumulation le long du corridor fluvial. Dans un premier temps, un portrait morphométrique des EBM sera présenté, après quoi la question de la production et de la distribution du bois mort est abordée. Par la suite, l'évolution interannuelle de trois embâcles et de la morphologie du lit mineur sur chacun des sites est présentée.

4.2.1 Portrait des embâcles de bois mort

Les campagnes de terrain réalisées aux étés 2015 et 2016 ont permis de caractériser, mesurer et localiser chacun des embâcles présents sur le tronçon principal de la rivière Mont-Louis. Au cours de la première année, un total de 211 embâcles (1800 m³) a été recensé alors que ce nombre s'élève à 254 (1543 m³) en 2016. Entre les deux années, 43 nouvelles structures se sont formées et il s'accumule en moyenne 2 embâcles de bois mort par 100 m linéaires de cours d'eau. Selon les critères utilisés pour définir un embâcle, des accumulations de bois relativement petites sont considérées comme des embâcles de bois mort au même titre que ceux ayant des dimensions atteignant plusieurs dizaines de mètres. Pour cette raison, l'accent est porté sur les volumes de bois mort qui se trouvent au sein de la rivière.

Afin de rendre compte plus adéquatement de l'évolution interannuelle et de la variation morphométrique entre chacun des tronçons, un embâcle surdimensionné du tronçon confiné a été exclu de cette analyse et fait l'objet d'une analyse indépendante à la section 4.3. En 2015 et 2016 respectivement, sa largeur était de 3 et 6 fois supérieures à la moyenne des embâcles du même tronçon fluvial alors que sa longueur l'était entre 9 et 11 fois. L'effet de ce surdimensionnement est décuplé lorsqu'il est question des volumes, alors qu'il est

respectivement 88 et 118 fois plus volumineux que les autres embâcles du tronçon à méandres stables. Sa présence dans la série de données a pour effet d'atténuer le signal relatif aux dimensions des autres embâcles, il a donc été retiré afin d'afficher une meilleure cohérence et favoriser une interprétation adéquate des données. Entre les deux années de suivi et les différents tronçons fluviaux, les valeurs de longueur, de largeur, de hauteur et de volumes appartiennent respectivement aux mêmes ordres de grandeur (figure 31).

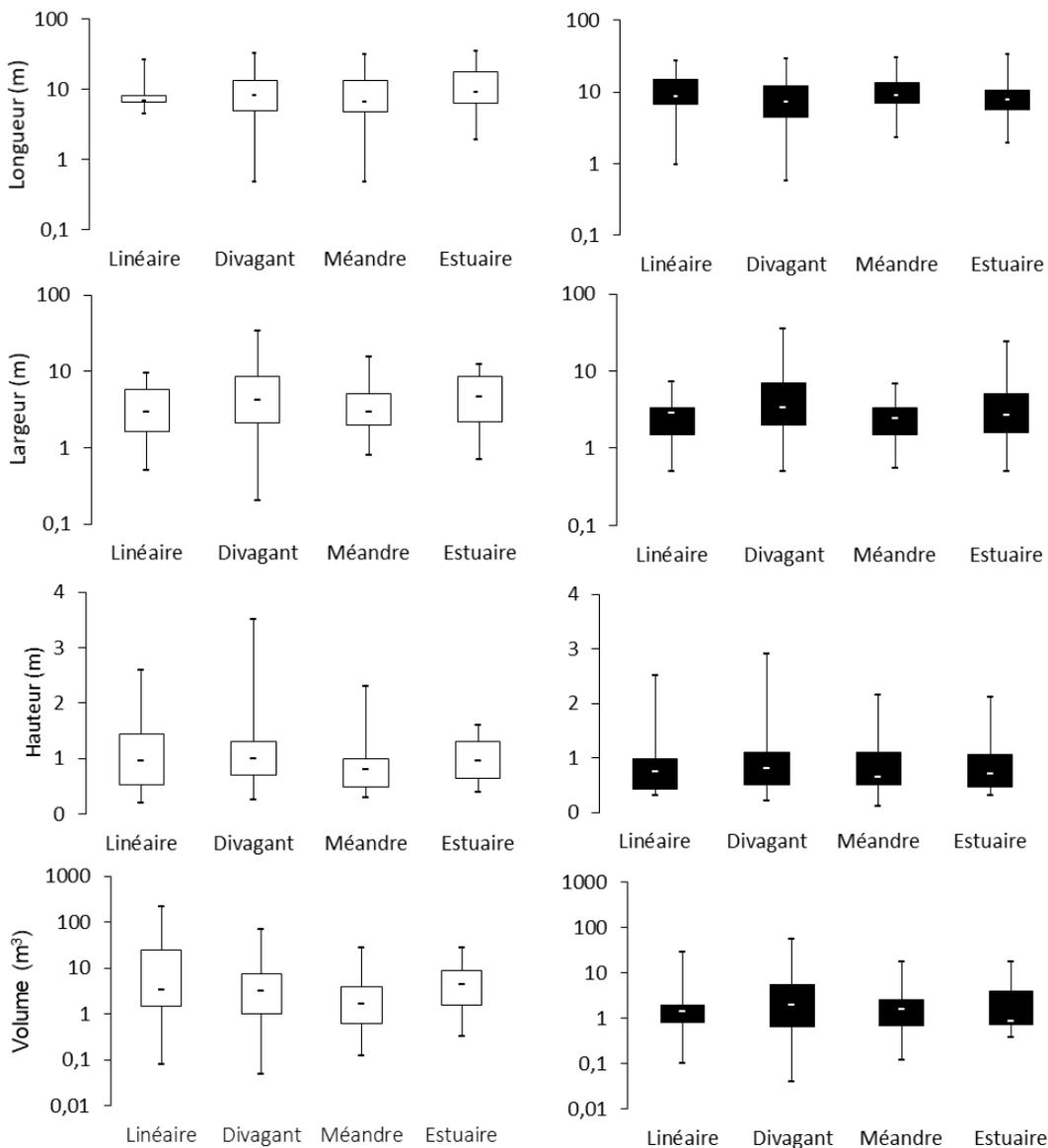


figure 31. Dimension des embâcles de bois mort, En blanc : 2015 ; En noir: 2016

Plus de la moitié des EBM sont compris entre 4,4 m et 17,8 m de longueur, et la longueur maximale de 36,5 m dans la portion estuarienne a été mesurée en 2015. Peu de changements sont survenus au sein des tronçons divagants et à méandres stables entre les deux années de mesures. La longueur des embâcles du 1^{er} et du 3^e quartile varient entre 1 et 7 et 9 m et 15 m respectivement, alors qu'en 2015, ils variaient entre 5 et 7 pour le 1^{er} et 7,15 m et 8,3 pour le 3^e. Le phénomène inverse se produit avec les embâcles de la portion estuarienne. Les longueurs minimales, du 1^{er} quartile, médianes et maximales sont demeurées relativement similaires, mais la limite supérieure du 3^e quartile est passée de 18 m à 11 m. Toutefois, ces changements doivent être interprétés avec prudence. En effet, les tronçons linéaires et estuariens sont relativement courts, ne mesurant que 1600 m et 1570 m respectivement et leurs configurations géomorphologiques favorisent peu l'accumulation du bois. Ainsi, un petit nombre d'embâcles ont été recensés dans ces secteurs, soit respectivement 10 et 12 embâcles pour 2015 et 18 et 15 pour 2016. Compte tenu du nombre restreint d'embâcles caractérisés sur ces tronçons, les erreurs associées à la prise de mesure peuvent aussi avoir une influence sur les extrêmes présentés.

Le même phénomène se produit avec les largeurs des embâcles. Entre 2015 et 2016, il y a peu de variation dans la distribution des valeurs de largeur pour les tronçons divagants et à méandres stables, bien qu'entre les deux années, la largeur maximale des embâcles du second tronçon soit passée de 26 m à 20 m. La largeur des embâcles des secteurs linéaires et estuariens a toutefois changé entre les deux années. La largeur maximale est passée de 10 m à 7 m et la limite du 3^e quartile de 6 m à 3m. Encore une fois, il est possible que cette variabilité soit due à l'erreur de la mesure. Dans la portion estuarienne, la largeur des embâcles a varié différemment. Les embâcles les plus larges mesuraient au maximum 12 m en 2015 et 24 m au cours de l'été 2016. Les limites supérieures du 3^e quartile sont passées de 9 et 5 à 5m et 3 m. Parmi les changements, il faut souligner que la largeur maximale des EBM du tronçon à méandres est passée de 16 m à 7 m, une mesure près de 2,5 fois inférieure.

Les valeurs de hauteur des embâcles sont beaucoup plus modestes que celles des longueurs et des largeurs. Elles varient entre 0,1 m, ce qui correspond aux dimensions

minimales des pièces qui composent les embâcles de bois, et 3,5 m, dans des cas où les embâcles sont partiellement immergés ou très élevés au-dessus de la plaine alluviale. Entre les différents tronçons, il existe peu de variabilité quant à la hauteur des embâcles.

Les mesures morphométriques des embâcles de bois mort ont permis d'estimer les volumes de bois mort qui les composent. Ce qui apparait clairement, c'est que pour chacun des tronçons, plus du trois quarts des embâcles ont un volume inférieur à $8,63 \text{ m}^3$. Sur l'ensemble du cours d'eau, pour l'année 2015, les trois premiers quartiles sont composés d'embâcles ayant un volume inférieur à 7 m^3 , alors qu'en 2016, où l'on retrouve 43 embâcles de plus, ces trois quartiles se situent sous 5 m^3 . À titre de référence la figure 32 illustre ce que représentent des embâcles de 4 m^3 (a) et 8 m^3 (b). Les figures 33 et 34 montrent la distribution des embâcles de bois mort le long du tronçon principal de la rivière Mont-Louis pour les années 2015 et 2016.



figure 32. Volume typique d'embâcles de bois mort sur la rivière Mont-Louis, a) photos du haut, embâcles de 4 m^3 , b) photos du bas embâcle de 8 m^3

En 2016, le nombre total d'embâcles a augmenté et le volume de bois mort au sein du cours d'eau a diminué de près de 260 m³. En 2015, on retrouve 159 embâcles avec un volume inférieur à 7,1 m³ et 52 embâcles contenant chacun entre 7,1 m³ et 67,67 m³. En 2016, il y a 190 embâcles avec un volume inférieur à 4,32 m³ et 64 embâcles avec un volume supérieur à 4,32 m³, allant jusqu'à 56 m³.

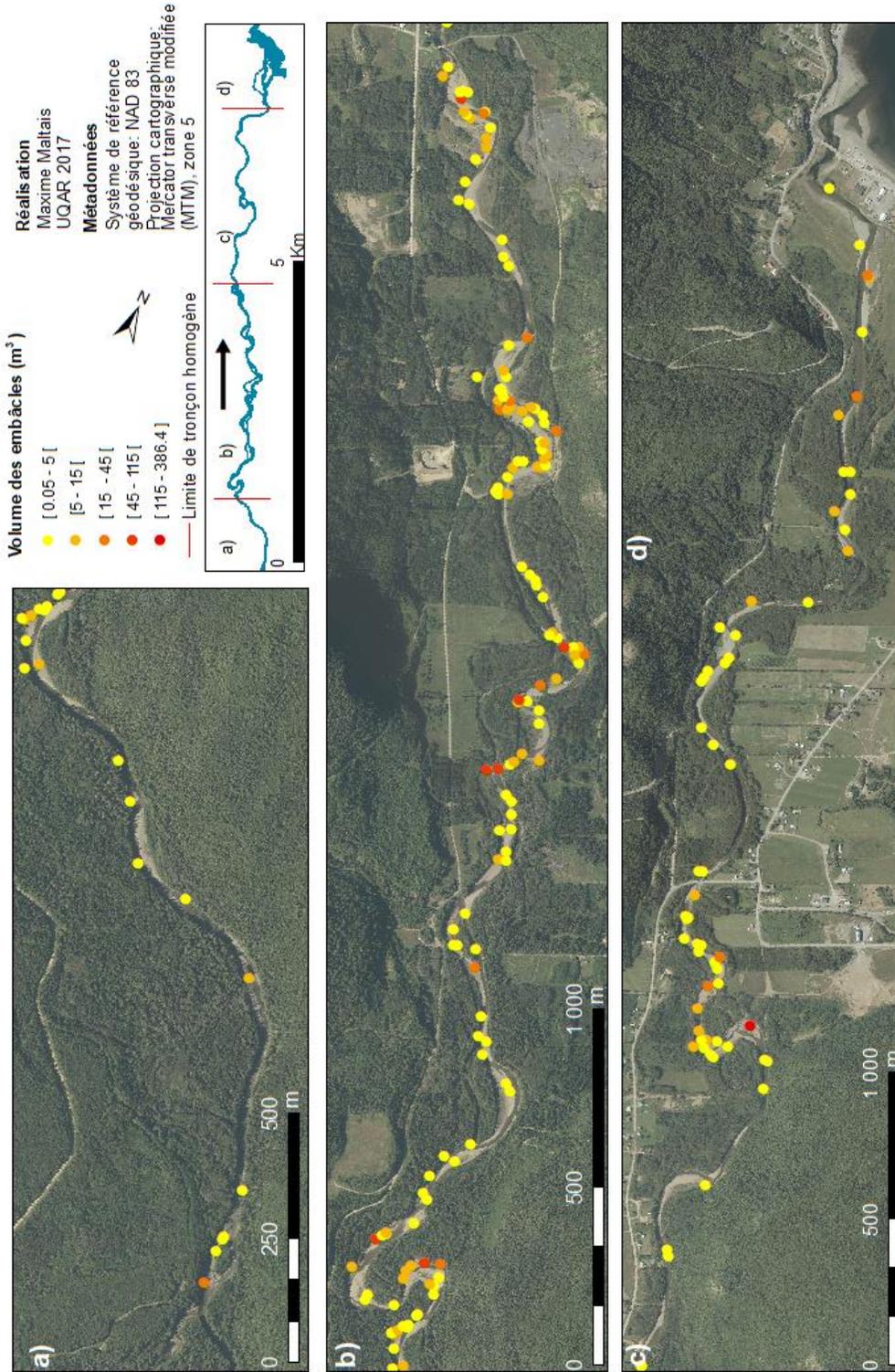


figure 33. Distribution des embâcles de bois mort sur la rivière Mont-Louis en 2015

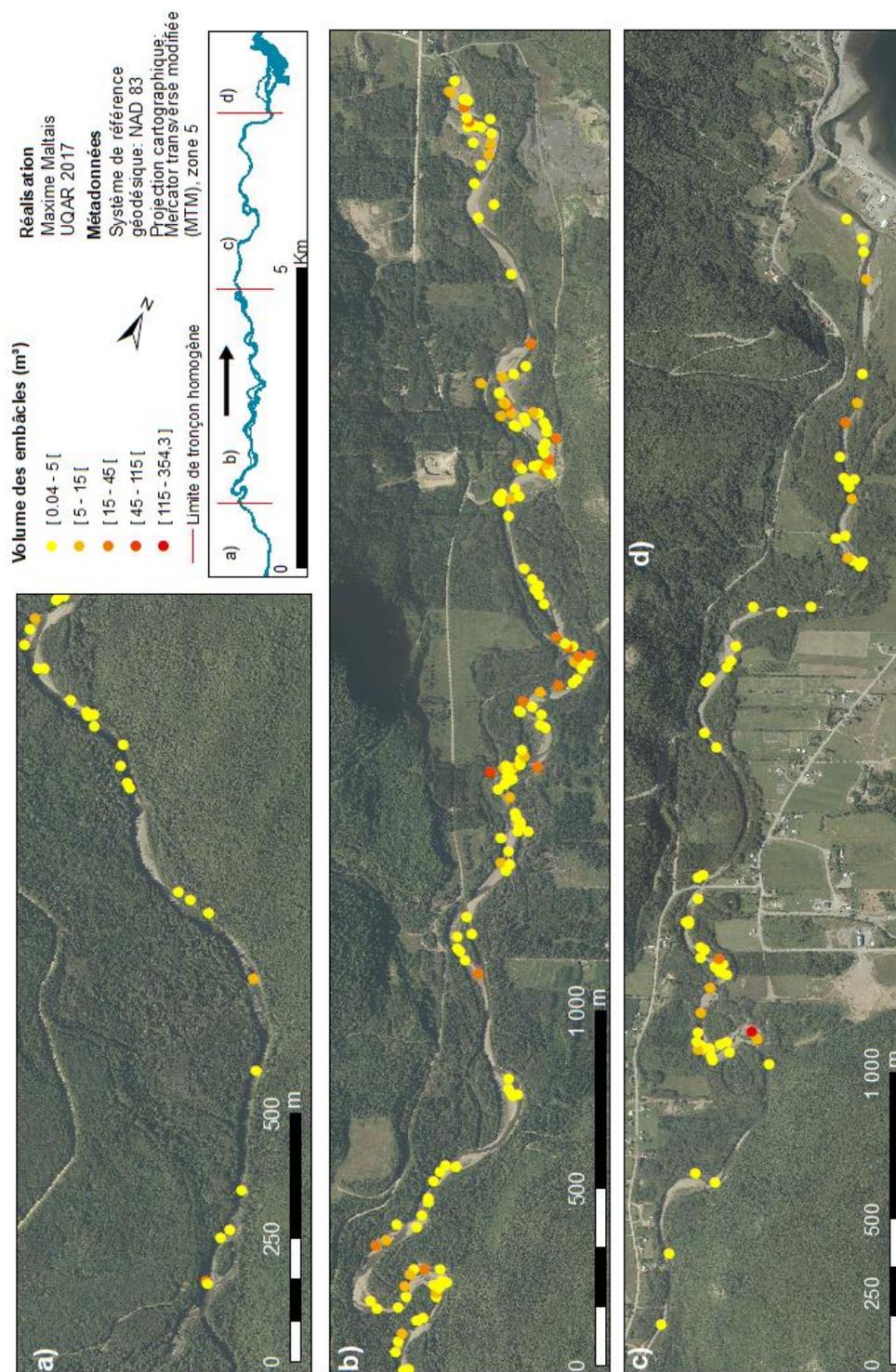


figure 34. Distribution des embâcles de bois mort sur la rivière Mont-Louis en 2016

Pour 2015 et 2016, les trois quarts des embâcles ont un volume inférieur à 7 m^3 et 4 m^3 , respectivement. Cette portion des embâcles compte toutefois pour une faible proportion du volume de bois total stocké au sein de la rivière Mont-Louis. En effet, la somme du volume de chacun de ces embâcles atteint 335 m^3 sur les 1800 m^3 en 2015, représentant seulement 19% alors que 1465 m^3 sont accumulés dans le quart des embâcles les plus volumineux. De façon similaire, en 2016, les trois quarts des embâcles cumulent 256 m^3 de bois mort, ce qui représente 16 % des 1543 m^3 qui ont été mesurés. La forte majorité du volume de bois qui se situe dans la rivière Mont-Louis se retrouve donc dans un nombre limité d'embâcles, malgré une grande quantité d'accumulation de bois.

L'analyse des données morphométriques des embâcles de bois révèle que les mesures de longueur sont généralement supérieures aux mesures de largeurs, mais que ces deux axes appartiennent au même ordre de grandeur, soit au plus quelques dizaines de mètres. Les hauteurs quant à elles sont beaucoup plus petites que les autres mesures, variant entre 10 centimètres au minimum et quelques mètres. La figure 35 met toutefois en évidence qu'il n'existe aucune relation entre les trois axes de mesures et que les embâcles de bois mort de la rivière Mont-Louis ne se forment pas de manière proportionnelle, c'est-à-dire que la longueur, la largeur et la hauteur sont des axes indépendants les uns des autres. Si une relation existait, il serait possible d'estimer la valeur de l'un des axes en fonction de celle des deux autres. Dans le cas présent, pour chacune des relations, le R^2 varie entre 0 au minimum et 0,15 au maximum. Ainsi, il est impossible d'estimer la mesure de l'un ou l'autre des axes d'un EBM à partir d'un seul d'entre eux. Face à une relation quasiment nulle entre les différents axes, les six mesures de hauteur manquante ont pu être estimées à partir de la valeur des hauteurs moyenne, soit 1 m pour les embâcles de 2015 et 0,9 m pour les embâcles de 2016.

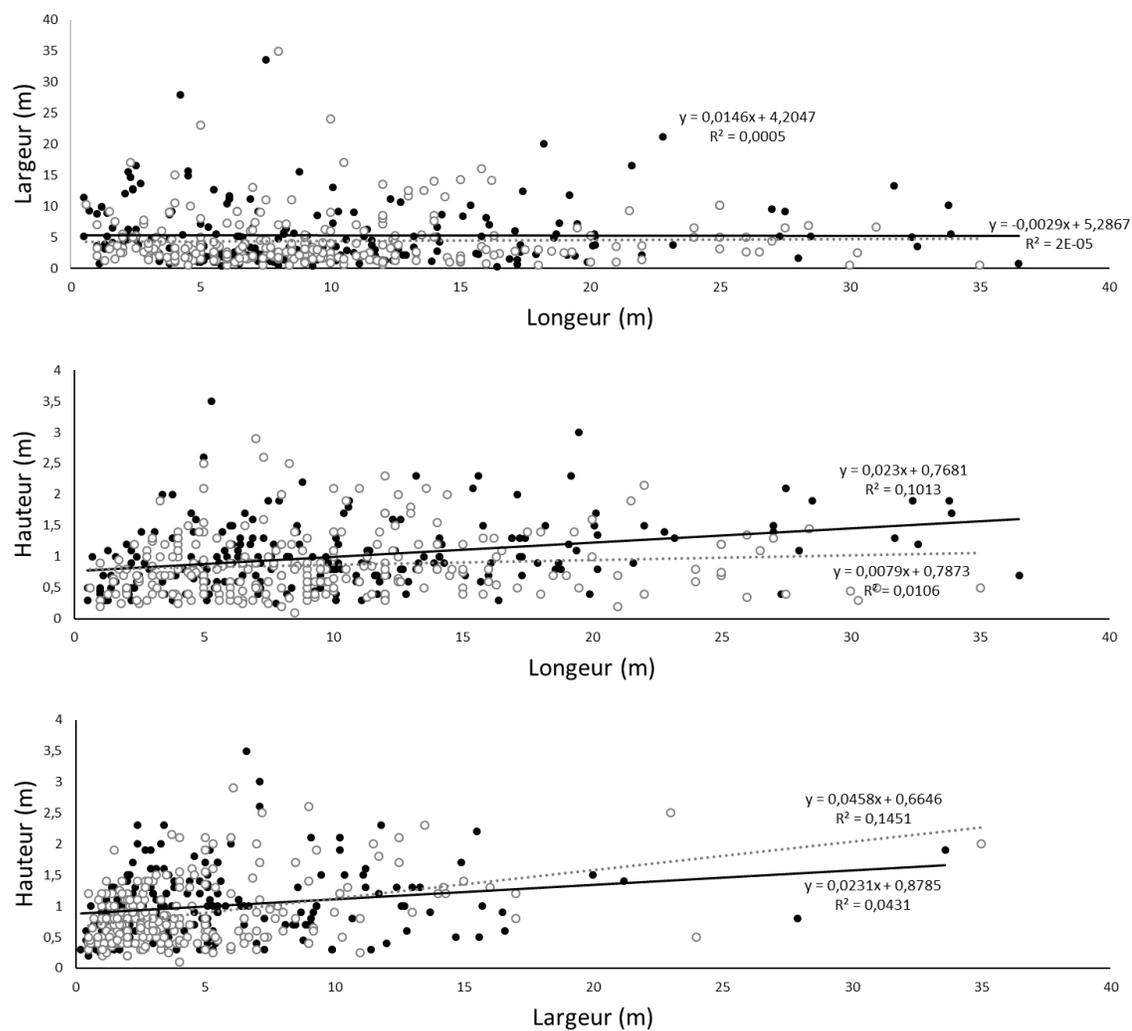


figure 35. Relation entre les axes de mesure, Largeur, Longueur et Hauteur, Noir : 2015 ; Blanc : 2016

4.2.2 Recrutement du bois mort

Les volumes de bois mort produits entre 1963 et 2014 ont été estimés à partir de la densité de bois de la ripisylve et les superficies forestières érodées. Respectivement, 47 254 m³, 110 104 m³, 30 209 m³, 74 631 m³ et 59 017 m³ de superficies boisées ont été érodés le long du corridor fluvial pour les périodes de 1963-75, 1975-81, 1981-92, 1992-2004 et 2004-14. Afin d'estimer le plus adéquatement possible les volumes de bois introduit au cours d'eau, ces superficies boisées ont été jumelées aux densités de bois de la ripisylve mesurée pour chacun des styles fluviaux (Tableau 5).

Tableau 5. Densité de bois de la ripisylve par tronçon homogène ; *

Tronçon	PK quadra	Volume (m ³)	Volume /m ²	Volume moyen	Vol. moyen / m ²
Linéaire	10 400	15,03	0,07	29,82	0,1325
	10 400	27,36	0,12		
	9 800	65,77	0,29		
	9600	27,64	0,12		
	9600	13,31	0,06		
Divagant	8 900	3,53	0,02	13,4	0,0595
	8 900	26,39	0,12		
	6 400	2,07	0,01		
	5 300	23,99	0,11		
	6 400	11,02	0,05		
Divagant*	8 900	26,39	0,12	20,5	0,0910
	6 400	11,02	0,05		
	5 300	23,99	0,11		
Méandre	4 700	3,03	0,01	9,05	0,0402
	4 700	5,3	0,02		
	4 400	1,19	0,01		
	4 400	3,49	0,02		
	3 600	11,93	0,05		
	3 600	4,72	0,02		
	3 200	5,41	0,02		
	2 800	13,27	0,06		
	2 800	33,08	0,15		
Estuaire	-	-	-	-	-

*Les densités utilisées pour le tronçon divagant ne tiennent compte que de la densité des berges en érosion

Les valeurs de densité de bande riveraine au sein du tronçon divagant affichent un grand contraste, avec des valeurs variant entre 2 m^3 et 26 m^3 . L'analyse montre que les fortes densités correspondent à des quadrats effectués sur des berges en érosion et que les faibles correspondent à une plaine alluviale en construction. Pour mieux estimer la production de bois mort, seuls les quadrats situés sur des berges en érosion ont été utilisés afin de déterminer le volume de bois par m^2 au sein du tronçon divagant. Ainsi, pour ce tronçon, la ripisylve en érosion compte une densité de bois équivalente à $0,091 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Comme aucun patron de distribution des volumes de bois en bande riveraine n'a été observé au sein des autres tronçons, les données de chaque quadra ont été considérées. De plus, aucun quadra n'a été effectué dans la portion estuarienne. En raison de la proximité et aux similitudes des perturbations anthropiques qu'ont connues les tronçons à méandres et estuariens, les valeurs du tronçon à méandres ont été utilisées pour estimer les apports en bois de l'estuaire.

Au total, entre 1963 et 2014, il est estimé que $24\,138 \text{ m}^3$ de bois ont été introduits au cours d'eau, ce qui représente une production annuelle moyenne de 483 m^3 de bois, mais chacun des tronçons contribue de manière inégale à la production de bois (Tableau 6). Dans le tronçon linéaire, c'est au cours de la période de 1975 à 1981 que le plus grand volume de bois fut introduit au cours d'eau, avec un total de 636 m^3 en 6 ans, pour un taux annuel moyen de 106 m^3 . Le tronçon divagant est celui qui apporte le plus de bois au cours d'eau. Toutes périodes confondues, la contribution de ce tronçon représente entre 51 % et 83 % de la production de bois totale et il a recruté 75 % du bois entre 1963 et 2014 ($18\,097 \text{ m}^3$). Entre 1975 et 1981, $7\,435 \text{ m}^3$ de bois ont été acheminés au cours d'eau à partir de ce tronçon et à lui seul, il a recruté trois fois plus de bois au cours de cette période que l'ensemble du cours d'eau entre 1963 et 1975 et entre 1981 et 1992. La contribution du tronçon à méandres stables demeure modeste, avec un maximum de 848 m^3 pour la même période. De manière générale, le tronçon estuarien contribue peu au chargement en bois, mais entre 1963 et 1975, plus de 800 m^3 de bois ont été introduits au cours d'eau. Ce volume de bois ne peut toutefois qu'être stocké dans l'estuaire ou évacué directement du système fluvial. Depuis 1963, 75 % des apports en bois proviennent du tronçon divagant, bien que sa longueur soit inférieure à 45 % de la longueur totale du cours d'eau.

Tableau 6. Estimation des volumes de bois produits par tronçon homogène pour chaque période *

Tronçon	Volumes de bois produits (m ³)					Total
	1963-75	1975-81	1981-92	1992-04	2004-14	
Linéaire	292	636	306	423	-	1 656
Divagant	1 513	7 435	1 184	4 663	3 303	18 097
Méandre	331	848	318	469	768	2 734
Estuaire	809	88	278	335	140	1 651
Total	2 945	9 007	2 086	5 890	4 210	24 138
Prod. annuelle moyenne (m ³)	245	1 501	190	491	421	483

* les volumes produits dans le tronçon divagant sont sous-estimés et celles du tronçon linéaire absents à cause de l'image partielle de 2014

4.2.3 Distribution du bois mort

Les volumes de bois mesurés se situent tous au sein du chenal principal de la rivière Mont-Louis, mais sont distribués de manière inégale le long du corridor fluvial. La segmentation du cours d'eau en tronçons homogènes permet de mettre en évidence que la spatialisation des volumes de bois mort au sein du cours d'eau est influencée par le style fluvial. Le tronçon divagant compte 1097 m³ et 947 m³ et le tronçon à méandres compte 552 m³ et 377 m³ de bois mort pour 2015 et 2016 respectivement, alors que le tronçon linéaire a accumulé 60 m³ et 63 m³ et la portion estuarienne est caractérisée par 89 m³ et 57 m³ de bois mort (figure 36a). Or, les deux premiers tronçons ont des longueurs respectives de plus de 5000 m et 4000 m alors que les deux seconds n'atteignent pas les 1500 m. Afin d'éliminer l'influence de la longueur des tronçons de cours d'eau, les volumes de bois ont été reportés sur 100 m (figure 36b). Une dynamique similaire apparaît, alors que les tronçons divagants accumulent entre 18 m³ et 21 m³ par 100 m et entre 9 m³ et 13 m³ pour la portion à méandres. Le tronçon linéaire a accumulé 4 m³ par 100 m au cours des deux années et le tronçon estuarien a accumulé entre 4 m³ et 6 m³ par 100 m.

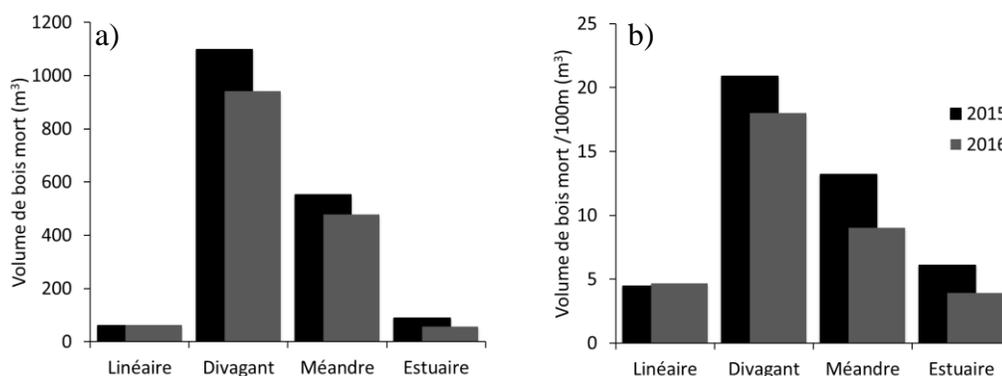


figure 36. Volume de bois mort accumulé, a) par tronçon homogène, b) par 100 m linéaires pour chaque tronçon homogène

À l'exception du tronçon linéaire, tous les tronçons issus de la segmentation du cours d'eau ont connu une diminution des volumes de bois qu'ils accumulent. Or, l'ensemble des tronçons ont connu une augmentation du nombre d'embâcles. La plus grande variation se produit au sein du tronçon divagant, tant au niveau du nombre d'embâcles que du volume. En effet, il est possible de dénombrer 29 embâcles supplémentaires dans cette section du cours d'eau, ce qui représente une augmentation de 20 %, pour une perte de volume de bois de plus de 154 m³, une diminution de 14 %. De façon similaire, le tronçon à méandres comporte trois embâcles de plus en 2016 qu'en 2015 (+6 %), mais une perte en volume de 73 m³ (-13 %). Le long du corridor fluvial, la variabilité interannuelle des volumes de bois mort se manifeste principalement dans trois secteurs, à la fois par des pertes et des gains de volumes (figure 37). Le premier se situe à l'amont du tronçon divagant, entre le PK 10 000 et le PK 9 100 et le second se situe aussi dans le tronçon divagant, entre les PK 7 900 et PK 5 300. Dans le tronçon à méandres, très peu de variabilité des volumes de bois n'a été mesurée, à l'exception du troisième secteur, qui se situe entre les PK 4 000 et PK 3 100. Il s'agit du sous-secteur non confiné où les berges rocheuses et les infrastructures laissent place à un court segment alluvial marqué par des berges meubles et un élargissement ponctuel du chenal.

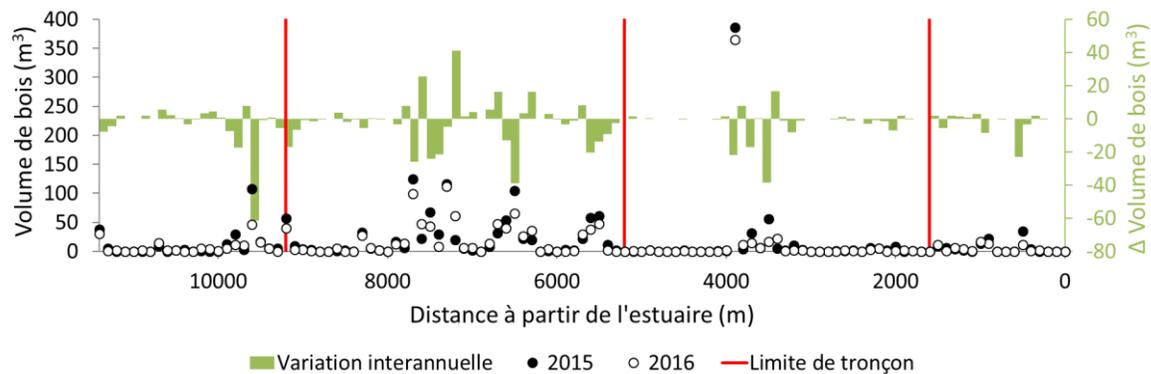


figure 37. Distribution et évolution interannuelle des volumes de bois mort de la rivière Mont-Louis

Le découpage du cours d'eau en courts segments de 100 m permet de rendre compte de la mobilité du bois. D'une part, la majorité des segments ayant connu une variation de leur volume de bois se situent dans le tronçon divagant ainsi que dans le sous-secteur alluvial du tronçon à méandres stables identifié lors de la segmentation du cours d'eau (figure 38). Le plus grand gain de bois s'est produit au PK 7 200, avec une augmentation de 41 m³ de bois et la plus grande perte de volume se situe au PK 9 600, avec 61 m³ en moins. Sur l'ensemble du cours d'eau, 22 segments sur 115 ont connu une diminution de leur volume en bois de plus de 5 m³, alors que seulement 11 segments ont connu une augmentation supérieure à 5 m³. La perte de bois de ces 22 segments représente un volume total de 460 m³ de bois. La caractérisation des embâcles a permis de déterminer que de ce volume, 257 m³ ont été évacués du système et les 203 m³ restants ont été redistribués au sein du cours d'eau, principalement dans le tronçon divagant.

La division du cours d'eau en segments de 100 m permet aussi d'identifier des foyers d'accumulations le long du corridor fluvial. La figure 39 montre les lieux d'accumulation préférentiels présents dans le cours d'eau, ils correspondent à des secteurs larges, où l'érosion des berges est rapide et où la superficie des bancs d'accumulations est grande. Dans le tronçon linéaire, les largeurs et les taux d'érosion sont faibles, les bancs d'accumulations sont rares et peu de bois se dépose au sein du chenal. Inversement, dans le tronçon divagant, la

rivière devient beaucoup plus mobile, d'imposants bancs d'accumulations se forment et forcent l'élargissement du cours d'eau, comme c'est le cas pour le sous-secteur non confiné du tronçon à méandres stables. Ces environnements sont aussi ceux qui comportent le plus grand volume de bois par segments de 100 m et ceux au sein desquels la variabilité interannuelle des volumes de bois est la plus grande. Dans la portion estuarienne, les taux d'érosion et la largeur des chenaux sont très grands, mais peu de bois s'y accumule. Il s'agit du seul tronçon fluvial qui présente de grands sites d'accumulation préférentiels sans accumuler une grande quantité de bois.

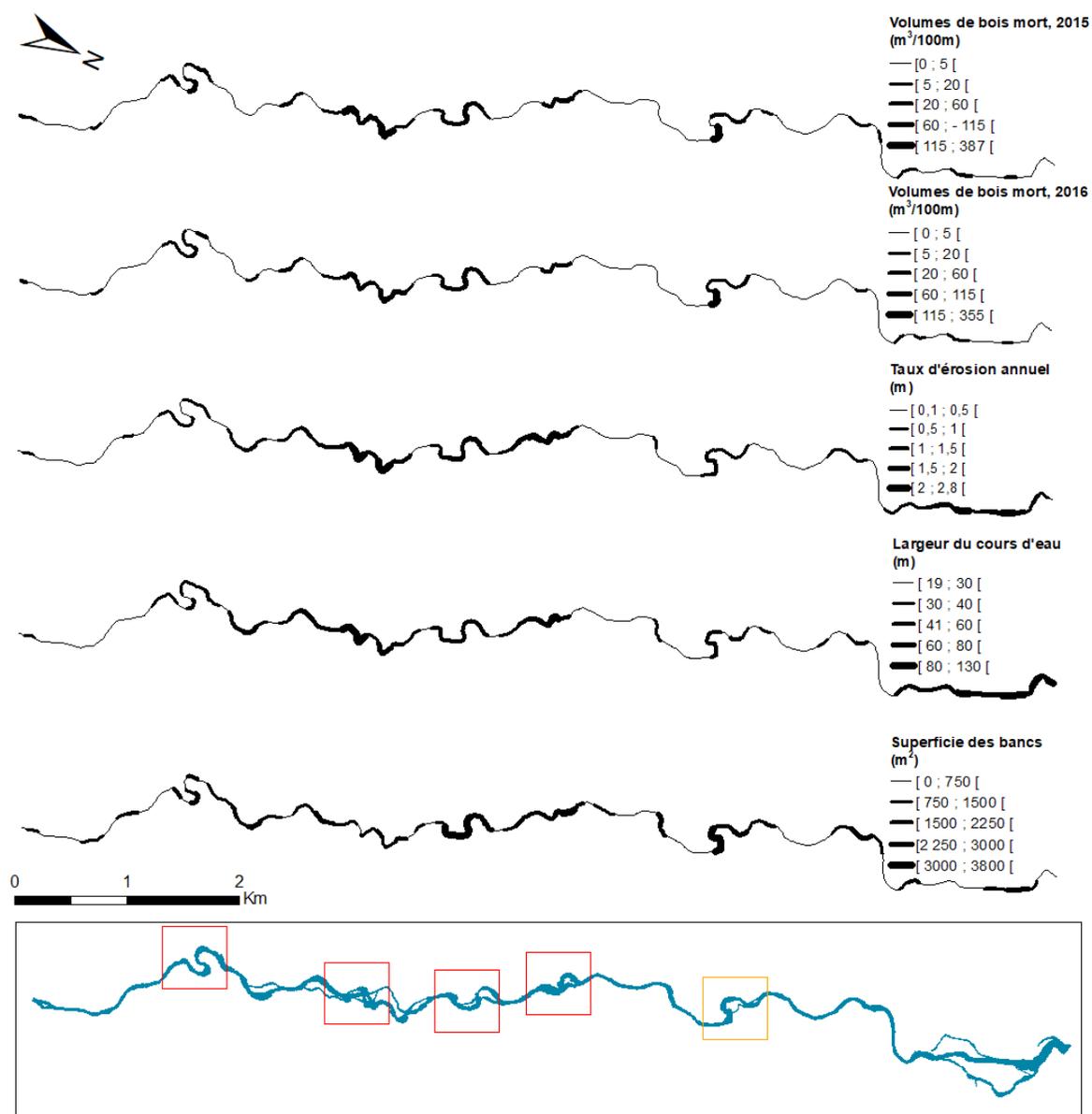


figure 39. Sites d'accumulation préférentiels

Secteurs d'accumulation du tronçon divagant, Secteurs d'accumulation du sous-secteur alluvial

4.3 INFLUENCE DU BOIS MORT SUR LE MORPHODYNAMISME FLUVIAL

Le long du corridor fluvial, trois secteurs ont été sélectionnés afin d'effectuer un suivi interannuel (2015-2016), portant sur l'évolution d'embâcles de bois morphologiquement actifs et sur celle de la topographie locale. Une analyse qualitative est réalisée pour chacun des sites afin de déterminer la manière dont l'embâcle de bois mort a évolué entre les deux années de suivi et la manière dont les changements se répercutent sur la morphologie fluviale.

Le site 1 se situe à l'amont du territoire d'étude. Le segment de 100 m dans lequel se situe l'embâcle comptait 107 m^3 de bois et l'embâcle lui-même représentait 52 m^3 en 2015. En 2016, ces mesures sont respectivement passées à 46 m^3 et 30 m^3 , ce qui représente une perte en bois de $60,94 \text{ m}^3$ (57 %) pour le segment et de 22 m^3 (42 %) pour l'embâcle. L'analyse des modèles numériques de terrain pour chaque années permet de constater que des zones d'accumulations et d'érosion se forment à proximité du bois mort, mais que celles-ci sont de faible envergure (figure 40). Entre 2015 et 2016, le banc d'accumulation situé en aval de l'embâcle a connu un faible changement au niveau de sa forme, mais il demeure de taille équivalente. Une portion de l'eau s'écoule au nord de l'embâcle a permis d'élargir cette portion du chenal. La pointe sud du banc, elle, a été partiellement érodée entre les deux années, mais aucun changement significatif n'est répertorié. De plus une fosse est située en aval de l'embâcle en 2015 ainsi qu'en 2016. Cette fosse ne semble pas avoir connu de grands changements, ni en termes de profondeur, ni en termes de superficie. Sur ce site, le changement morphologique le plus apparent se situe en aval de l'embâcle étudié. En 2015, une fosse était localisée près de la berge gauche, à proximité d'un autre embâcle de bois en partie immergé. Le relevé topographique de 2016 indique que la fosse associée à cet embâcle a été partiellement comblée entre les deux années. Outre ces changements, la morphologie du site d'étude est demeurée relativement stable entre les deux années, malgré la diminution des volumes de bois.

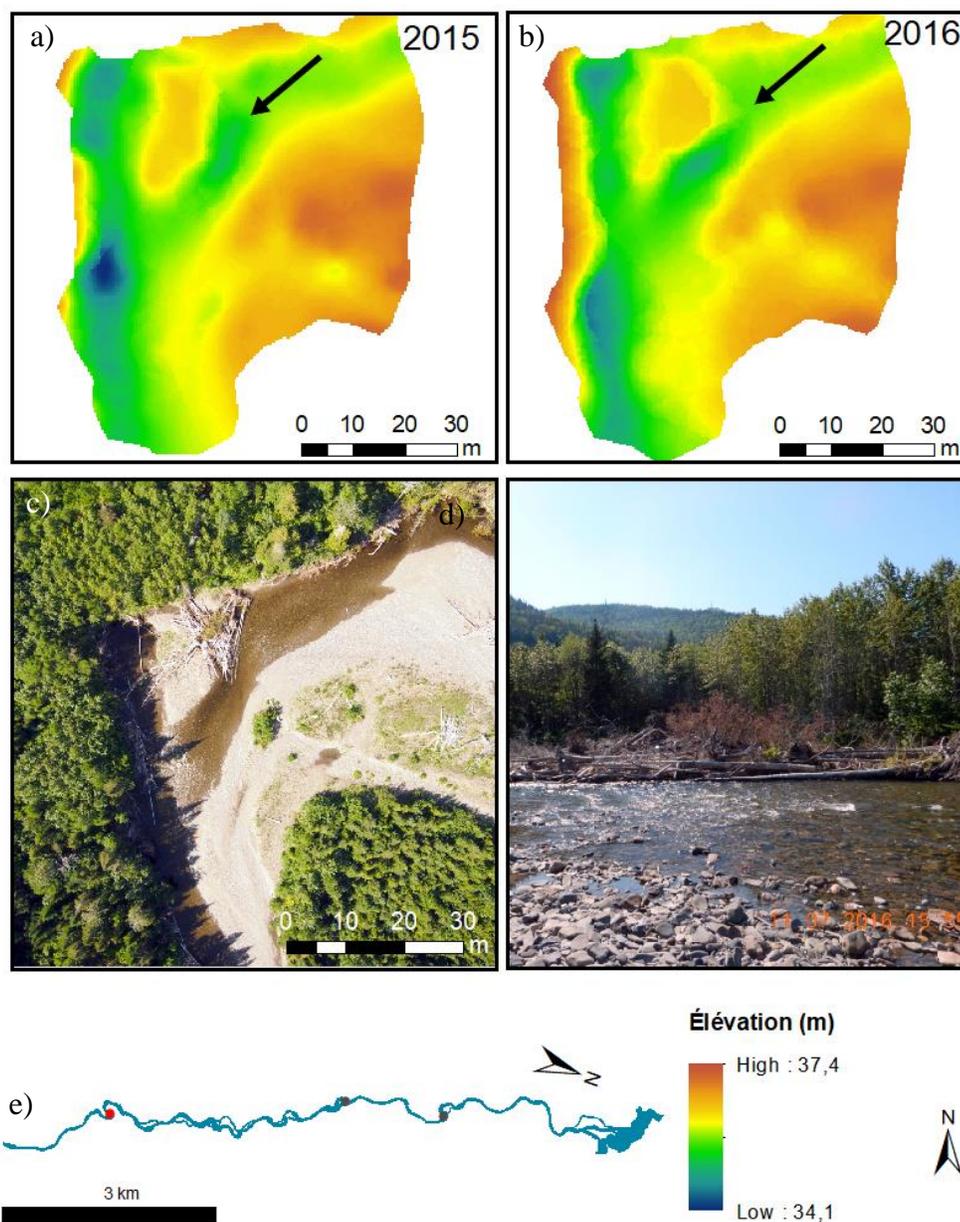


figure 40. Évolution interannuelle de la morphologie du lit du cours d'eau au site 1 ; a) modèle numérique de terrain en 2015, b) modèle numérique de terrain en 2016, c) Photographie du site lors d'un vol de drone en 2015, d) photographie terrain de l'embâcle en 2016, e) localisation du site ; la flèche en a) et b) représente le sens de l'écoulement

Les volumes de bois sur le site 2 sont passés de 61 m³ en 2015 à 47 m³ en 2016, pour une diminution totale de 14 m³. Sur ce secteur, l'embâcle étudié était de 7 m³ de bois au cours de la première année de terrain. Il s'agit donc d'un embâcle de petite taille, qui est passé à 5 m³ en 2016. Cette perte de volume, maigre en apparence, correspond toutefois à plus de 25 % du volume initial de cet embâcle de bois mort. Cette perte de volume a été provoquée par le démantèlement partiel de l'embâcle lors de la crue du 13 juin 2016 et a occasionné des changements morphologiques au sein du chenal. La figure 41 montre qu'en amont de l'embâcle, le thalweg s'est incisé et qu'il s'est élargi entre les deux années de suivi. De plus, la fosse présente sous l'embâcle en 2015 a été partiellement comblée de sédiments, car le relevé de 2016 indique une élévation supérieure à celle de l'année précédente. En aval du site, un banc d'accumulation occupe plus de la moitié du chenal. Le relevé de 2016 met en évidence une dépression formée entre celui-ci et la berge gauche. Cette dépression était présente en 2015, mais semble s'être creusée davantage à l'amont ainsi qu'à l'aval du banc entre les deux relevés.

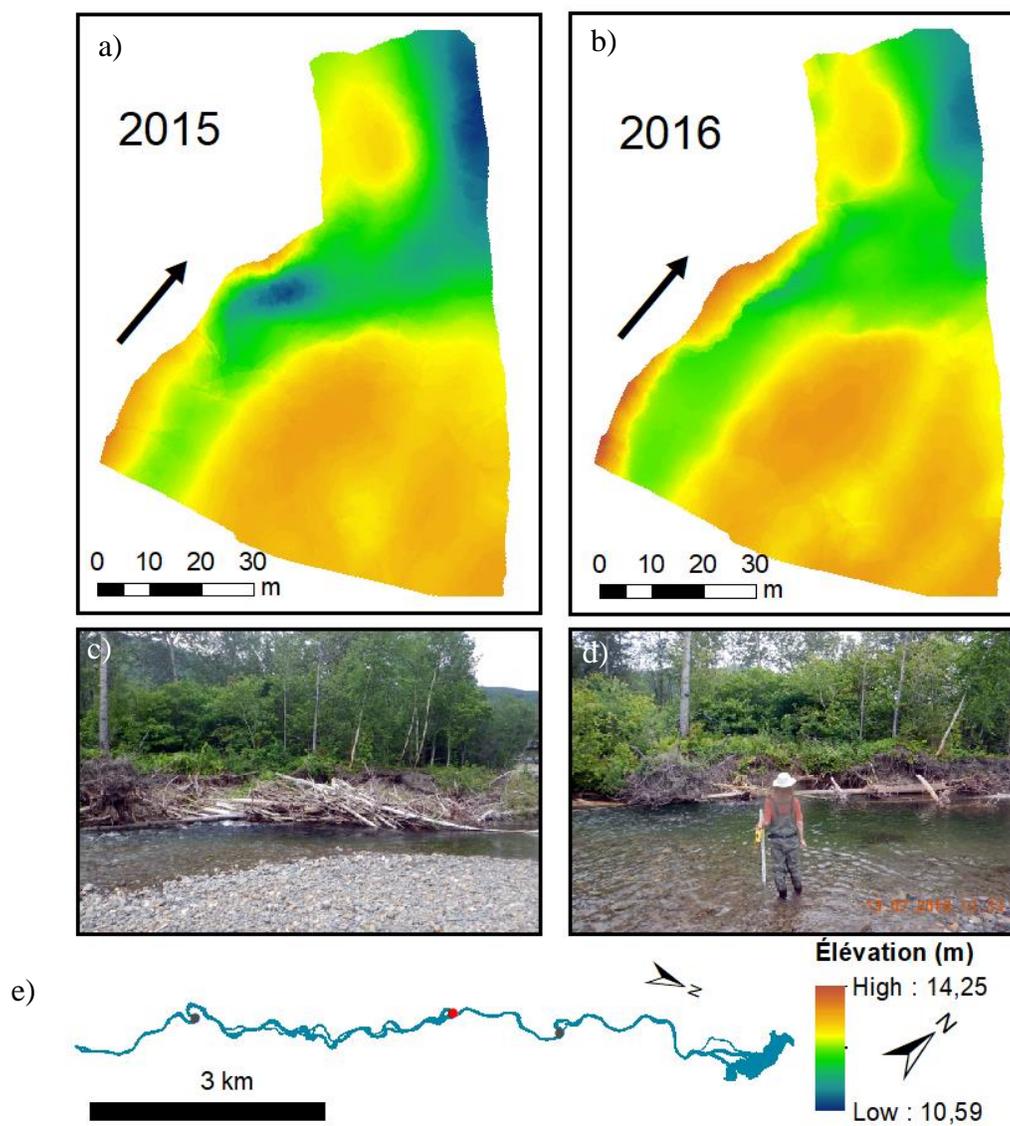


figure 41. Évolution interannuelle de la morphologie du lit du cours d'eau au site 2 ; a) modèle numérique de terrain en 2015, b) modèle numérique de terrain en 2016, c) Photographie terrain en 2015, d) photographie terrain de l'embâcle en 2016, e) localisation du site ; la flèche en a) et b) représente le sens de l'écoulement

Le site 3 mesure plus de 300 m, si bien qu'il comporte 3 segments de 100 m en entier. Au total, il comptait respectivement 422 m³ en 2015 et 391 m³ en 2016. Les longueur, largeur et hauteur de cet embâcle étaient de 140m, 14m, 2m et 115m, 40m, 1,8m en 2015 et 2016, respectivement. À lui seul, l'embâcle de bois à l'étude représentait 384 m³ et 354 m³ pour chacune des années de suivi. Il s'agit de l'embâcle de bois le plus volumineux répertorié au sein de la rivière Mont-Louis. La perte de volume de 29 m³ représente 8 % du volume initial de l'embâcle. Cette diminution du volume de bois représente l'essentiel du volume perdu au sein des trois segments. En 2015, la plus grande partie de l'écoulement longeait l'embâcle le long de la berge droite. Entre les deux années de suivi, la profondeur de ce segment du cours d'eau a diminué et l'écoulement de l'eau emprunte une portion du chenal située entre le banc central et la berge gauche en 2016 (figure 42). Ce banc d'accumulation a d'ailleurs gagné en superficie dans sa portion amont. La diminution de la compétence de l'écoulement a provoqué l'accumulation de sédiments et l'engraissement du banc. À l'aval complètement du site, une fosse est présente en 2015, mais semble s'être comblée de sédiments lors du relevé de 2016. Toutefois, la densité de points de relevés topographiques est faible dans ce secteur en 2016. La disparition de la fosse est possiblement due à l'interpolation d'une faible densité de points. Les mesures n'ont pas pu être relevées dans ce secteur, car la profondeur d'eau était trop grande. La fosse est donc toujours présente en 2016, mais les niveaux d'eau étaient supérieurs à 2015, ce qui a limité la récolte des données.

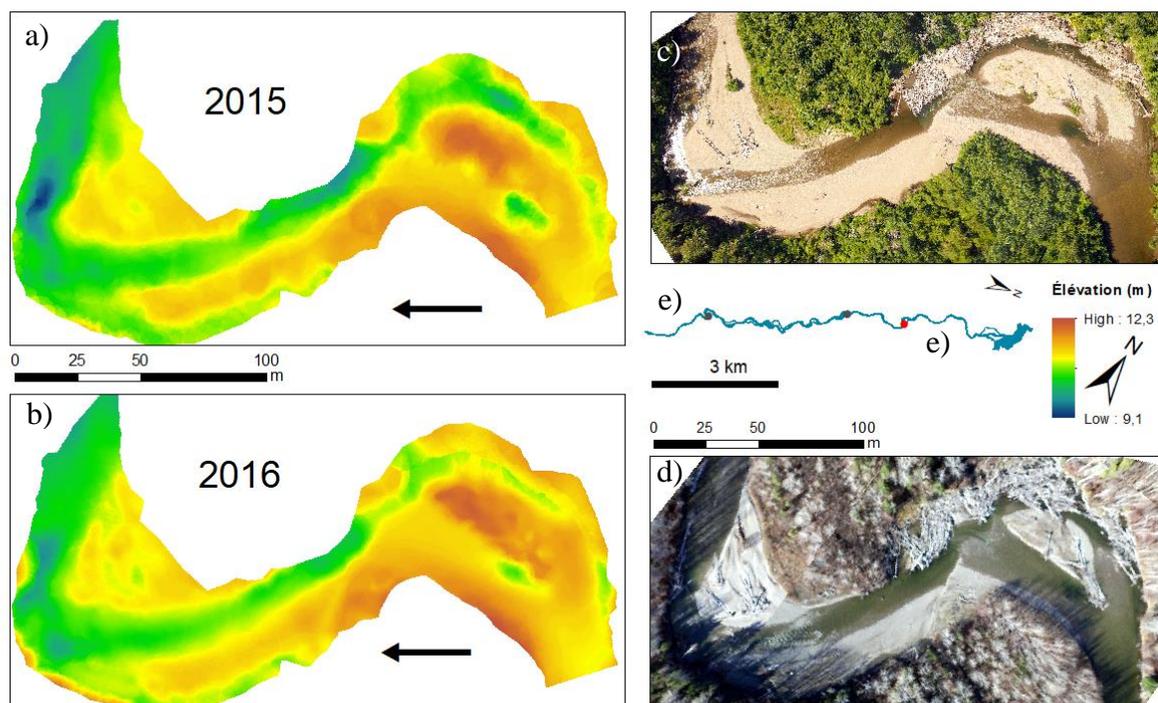


figure 42. Évolution interannuelle de la morphologie du lit du cours d'eau au site 3 ; a) modèle numérique de terrain en 2015, b) modèle numérique de terrain en 2016, c) Photographie du site lors d'un vol de drone en 2015, d) photographie du site lors d'un vol de drone en 2016, e) localisation du site ; la flèche en a) et b) représente le sens de l'écoulement

4.4 ÉVOLUTION DE LA RIVIERE MONT-LOUIS, DE LA PLAINE ALLUVIALE ET DES DEBITS MAXIMAUX

Derrière le concept de trajectoire hydrogéomorphologique se cache l'idée que les indicateurs hydrologiques et morphométriques témoignent de la manière dont le cours d'eau s'est comporté à travers le temps et qu'il est possible d'identifier des tendances ou des ruptures dans les caractéristiques du cours d'eau. La trajectoire hydrogéomorphologique de la rivière Mont-Louis est analysée à partir de la sinuosité, du tressage, des taux d'érosion et des mesures de largeur. Par la suite, l'intérêt est posé sur l'évolution des superficies boisées et sur la trajectoire hydrologique, c'est-à-dire les variations de débits maximaux atteints entre 1955 et 2016.

4.4.1 Trajectoire hydrogéomorphologique

Au cours de la période allant de 1927 à 2014, la sinuosité de la rivière Mont-Louis a connu de grandes variations. Une phase de diminution de la sinuosité apparaît entre 1927 et 1963, alors que l' I_s de 1927 est de 1,41 celui de 1963 est de 1,25 (figure 43a). Cette évolution témoigne d'ailleurs du tracé le plus court et le plus linéaire de la période d'étude en 1963. À partir de cette date, l' I_s de la rivière demeure en augmentation constante. Sur le terrain, cette évolution se traduit par le prolongement du thalweg et du linéaire de berges, qui, lorsqu'elles sont végétalisées, représentent une source de bois.

En 1981, le thalweg était long de 11 709 m pour 12 055 m en 1992, représentant un prolongement de 346 m, la plus grande augmentation mesurée. Dû à l'image partielle de 2014, il est impossible de quantifier l'évolution de la longueur du thalweg dans sa totalité pour la dernière période, mais il apparaît qu'entre 1963 et 2004, il s'est allongé de 739 m, ce qui se traduit par une augmentation du linéaire de berge de 1 592 m, le long du cours d'eau. Depuis les années 1960, la sinuosité de la rivière Mont-Louis est donc en augmentation, alors qu'elle atteint sa valeur maximale en 2014 et sa valeur minimale en 1963.

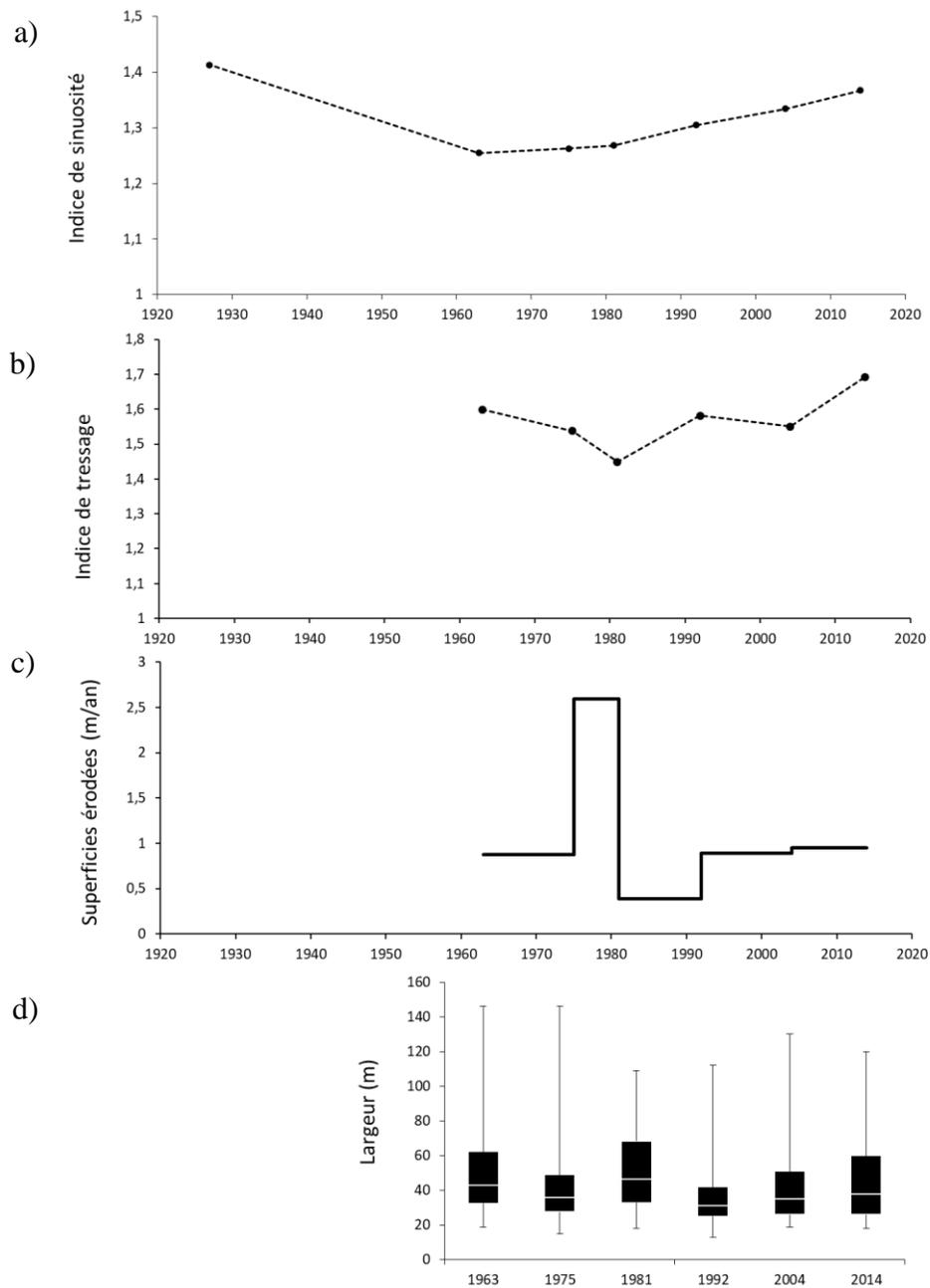


figure 43. Trajectoire géomorphologique de la rivière Mont-Louis, a) Indice de sinuosité, b) indice de tressage, c) taux d'érosion, d) largeurs

Entre 1963 et 1981, le tressage de la rivière diminue considérablement, passant de 1,60 à 1,45 (figure 43b). En 1992, l' I_t remonte à une valeur presque égale à celle de 1963, soit 1,58 pour redescendre à 1,55 en 2004 et atteindre 1,69 en 2014. Il apparaît ainsi que la présence de chenaux secondaires varie grandement entre chacune des années de la série temporelle, ayant comme I_t minimale 1,45 en 1981 et maximale, 1,69 en 2014.

D'autre part, l'analyse des taux d'érosion annuels révèle un pic de mobilité entre 1981 et 1992, avec un recul moyen de 2,45 m. C'est au cours de cette période que les taux d'érosion sont les plus élevés, ce qui se traduit par une grande activité géomorphologique (figure 43c). Inversement, le plus faible taux de mobilité est mesuré de 1992 à 2004, avec un taux d'érosion moyen de 0,36 m par année. Les périodes de 1963 à 1975, de 1992 à 2004 et de 2004 à 2014 révèlent des taux d'érosion respectifs de 0,83 m, 0,83 m et 0,85 m en moyenne par année. Toutefois, il est possible que, pour la dernière période, la valeur de 0,85 m par année représente une sous-estimation des taux d'érosion réels, car une portion significative du secteur non couvert par l'image satellitaire de 2014 se démarque par sa grande mobilité et la présence d'avulsions.

De la même manière, l'analyse de l'évolution des largeurs sur l'ensemble du tronçon d'étude permet d'identifier qu'en 1963 et en 1975, le cours d'eau a atteint des largeurs historiques maximales, avec 146 m. La rivière a aussi atteint des largeurs de 109 m, 112 m, 130 m et 120 m pour les années 1981, 1992, 2004 et 2014 respectivement. Ces valeurs sont toutefois enregistrées dans la portion estuarienne de la rivière. Dans un tel environnement, la morphologie du cours d'eau est soumise aux interactions entre les environnements fluviaux et littoraux et est peu représentative de la dynamique spécifique au reste de la rivière Mont-Louis. Pour cette raison, l'accent est mis sur la distribution des valeurs de largeurs et sur les mesures de tendances centrales (figure 43d). L'année 1981 est celle où la largeur moyenne du cours d'eau est la plus élevée, avec 51 m, suivi de 1963 avec 50 m. En 2004 et 2014, la largeur moyenne de la rivière était respectivement de 42 m et 44 m, une augmentation inférieure à la marge d'erreur de 3 m. Dans le premier cas, les valeurs du 3^e quartile sont comprises entre 35 m et 51 m et dans le second, entre 38 et 60 m, soulignant

que de nombreux tronçons de la rivière Mont-Louis ont connu un élargissement de plusieurs mètres au cours des dernières décennies.

Toutefois, la segmentation du cours d'eau a mis en évidence que la rivière adopte des comportements différents le long du corridor fluvial. Il convient donc de s'intéresser à la trajectoire hydrogéomorphologique de chaque tronçon afin de spatialiser les changements et les tendances observés. Un grand contraste apparaît dans l'évolution de la sinuosité entre les tronçons (figure 44). Les tronçons linéaire et estuarien affichent les plus faibles I_s , et varient respectivement entre 1,12 et 1,13 pour le premier, une différence négligeable et entre 1,07 et 1,13 pour le second. Au contraire, les tronçons divagant et à méandres sont en augmentation soutenus. Le tronçon divagant est celui où I_s est le plus élevé de tous, avec 1,31 en 1963 et 1,46 en 2014. À partir de 1981, la croissance de I_s se fait de manière constante. De la même manière, I_s du tronçon à méandres est de 1,27 en 1963 et de 1,43 en 2014 et suit la même trajectoire que celle du tronçon divagant à partir de 1981. Ces deux tronçons sont donc responsables de l'augmentation de la sinuosité sur l'ensemble du cours d'eau.

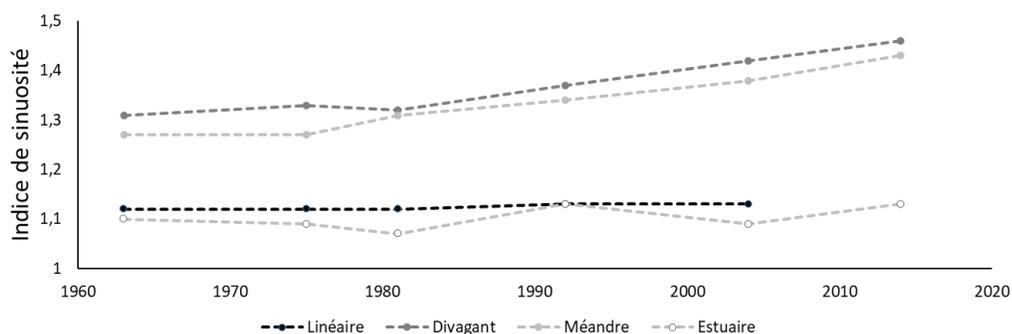


figure 44. Évolution de la sinuosité par tronçon homogène

L' I_t du tronçon linéaire est de 1, jusqu'en 1992, lorsque deux ilots se sont formés au sein du chenal, mais demeure très faible (figure 45). L' I_t du tronçon divagant lui affiche une valeur variant entre 1,44 et 1,74. Une diminution du tressage est survenue en 1981, ou la valeur minimum a été atteinte et il est en augmentation constante depuis, pour atteindre la valeur maximale en 2014. Le tronçon à méandres lui affiche un I_t de 1,24 en 1963, s'abaisse à 1,04 en 1975 et remonte à 1,3 en 1981. Pour les années 1992, 2004 et 2014, il est respectivement de 1,1, 1,08 et 1,2. C'est au sein du tronçon estuarien que le tressage est le plus grand et c'est aussi celui affichant le plus de variabilité, atteignant son minimum en 1981 avec 2,77 et son maximum en 1992, avec 3,29, mais aucune tendance n'apparaît.

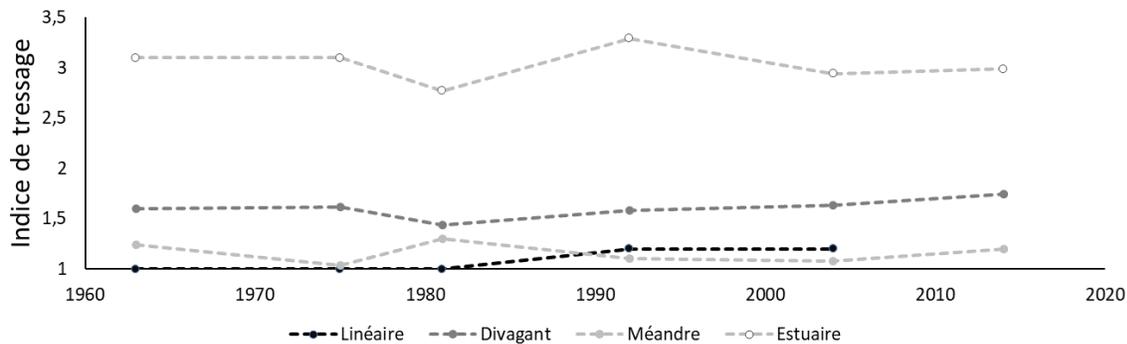


figure 45. Évolution du tressage par tronçon homogène

La figure 46 montre de grandes différences de mobilité entre chacun des tronçons. Les taux de migration dans le tronçon linéaire sont très faibles et varient entre 0,13 m et 0,27 m par an, sauf pour la période de 1975 à 1981, lors de laquelle les superficies érodées ont atteint 1,5 m. Les taux d'érosion du tronçon divagant varient beaucoup plus et les taux d'érosion sont beaucoup plus grands. Entre 1963 et 1975, les berges reculent en moyenne de 0,57 m par an et cette valeur passe à 4,48 m par an pour la période de 1975 à 1981. Entre 1981 et 1992, le taux d'érosion diminue à 0,30 m par an et au cours des périodes de 1992 à 2004 et de 2004 à 2014, ils sont respectivement de 1,26 m et 1,21 m par an. Le tronçon à méandres présente une évolution similaire au tronçon divagant. Les taux d'érosion sont plus faibles entre 1963 et 1975 ainsi qu'entre 1981 et 1992 et plus élevés au cours des autres

périodes, mais sont largement inférieurs à ceux mesurés sur le tronçon divagant. Ils varient entre 0,29 m par an entre 1981 et 1992 et 1,25 m par an entre 1975 et 1981. Le tronçon estuarien lui évolue de manière différente dans le temps. Il est marqué par une très grande mobilité du chenal au sein de l'estuaire pour la période de 1963 à 1975, avec 3,65 m par an, mais demeure très constant au cours des périodes suivantes et varie entre 0,77 m par an et 1,22 m par an.

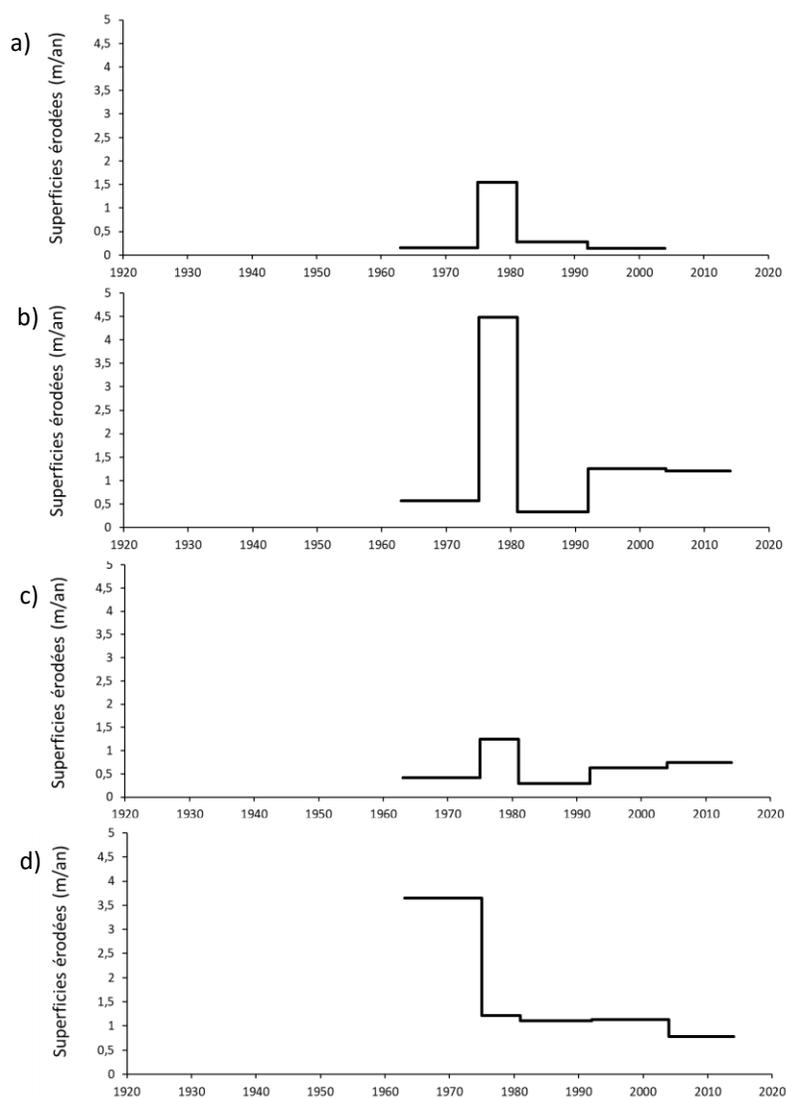


figure 46. Taux d'érosion par tronçon homogène, a) linéaire, b) divagant, c) à méandres, d) estuaire

Enfin, les largeurs du chenal ont aussi évolué de manière distincte en fonction des différents tronçons (figure 47). Au sein du tronçon linéaire, il existe très peu de variabilité dans le temps. Les valeurs de largeurs sont comprises entre 15 m au minimum et 40 au maximum, hormis pour l'année 1981, où elles atteignent 59 m. Inversement, au sein du tronçon divagant, les largeurs varient beaucoup. Les années 1963, 1981 et 2014 sont caractérisées par un élargissement du chenal au sein du tronçon. Les valeurs de largeurs sont comprises entre 22 m et 125 m au cours de ces trois années, et 50 % des valeurs de largeurs sont comprises entre 51 m et 74 m, 47 m et 74 m et 37 m et 72 m pour les années 1963, 1981 et 2014 respectivement. Pour les années 1975, 1992 et 2004, la moitié des valeurs de largeurs 32 m et 50 m, 29 m et 43 m et 35 m et 54 m respectivement, mais atteignent plus de 100 m par endroits en 2004. Dans le tronçon à méandres, les largeurs demeurent constantes dans le temps. La valeur minimale du 2^e quartile varie entre 22 et 30 m au cours de chacune des années et la valeur maximale du 3^e quartile varie entre 32 et 42 m. Les valeurs de largeur maximales sont passées de 76 m en 1963 à 45 m 1992 pour remonter à 68 m en 2014. Au sein du tronçon estuarien, les largeurs sont très élevées, il existe une grande variabilité dans les largeurs et il n'y a pas de tendance apparente hormis une certaine stabilité entre 1992 et 2014. Les valeurs de largeurs étaient plus faibles en 1963, variant entre 45 m et 72 m, pour les quartiles 2 et 3, mais un élargissement s'est produit en 1975, alors que pour ces mêmes quartiles, les valeurs de largeurs sont de 77 m et 100 m. Toutefois, les valeurs maximales demeurent les mêmes et atteignent 146 m. En 1981, la valeur inférieure du 2^e quartile est de 67 m et la valeur supérieure du 3^e quartile est de 87 m avec un maximum de 109 m. Pour les années 1992 à 2014, les valeurs inférieures du 2^e quartile varient entre 46 m et 53 m et les valeurs supérieures du 3^e quartile varient entre 78 m et 83 m avec des largeurs maximales variant entre 112 m et 130 m.

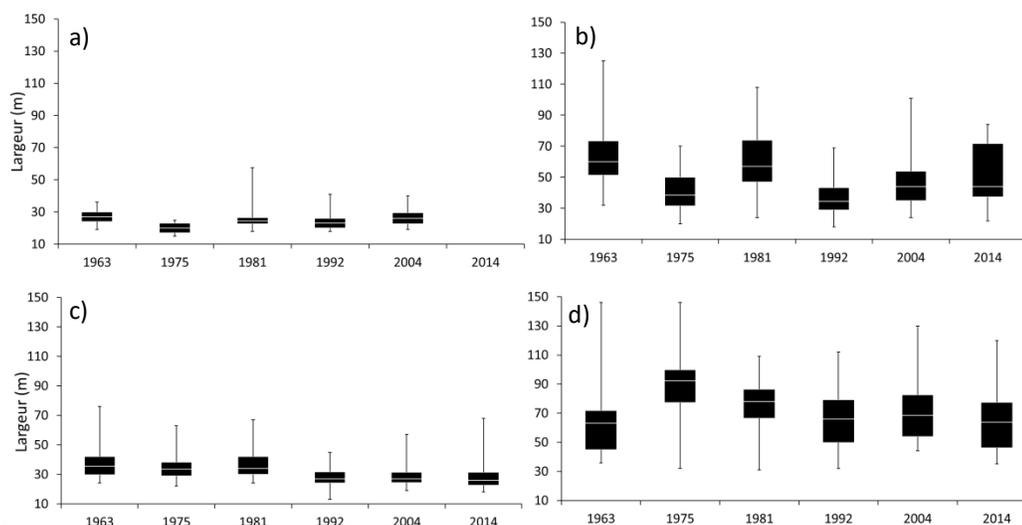


figure 47. Évolution des largeurs par tronçon homogène, a) linéaire, b) divagant, c) à méandres, d) estuaire

4.4.2 Évolution de la superficie boisée et de la bande riveraine

L'étude de l'évolution de la couverture forestière au sein de la plaine alluviale de la rivière Mont-Louis révèle que les superficies des surfaces boisées ainsi que la longueur de la bande riveraine sont en augmentation et atteignent aujourd'hui des valeurs historiques depuis 1963. La ripisylve correspond à la forêt de la plaine alluviale et la bande riveraine à une bande de 15 mètres mesurée en marge du cours d'eau. En raison de l'image incomplète de 2014, l'information est chaque fois traduite de deux façons, soit pour l'ensemble de la plaine alluviale complète (PAC), de 1963 à 2004 et pour la plaine alluviale partielle (PAP) de 1963 à 2014. Malgré cette nuance, la superficie de la ripisylve évolue de façon très similaire, avec une couverture forestière minimale en 1963, alors que respectivement 32 % et 21% de la PAC et de la PAP sont boisés (figure 48a et 48b). Entre 1963 et 1975, une augmentation de trois points de pourcentages de la ripisylve est constatée sur la PAC, alors qu'elle est légèrement plus importante lorsque la PAP est considérée, avec une augmentation de 8 points de pourcentages indiquant que c'est plutôt au sein de la portion aval de la rivière que le gain de superficies boisées se manifeste.

Entre 1975 et 1981, des pertes de l'ordre de 3 et 4 points de pourcentages pour la PAC et la PAP respectivement font passer la proportion boisée de la plaine alluviale à 32 % 25 %. À partir de ce moment, les superficies boisées de la plaine alluviale sont en constante augmentation, avec une croissance plus marquée entre 1992 et 2004, alors que 48 % et 39 % des PAC et PAP sont couvertes de végétation arborescente. En 2014, 42 % de la PAP est couverte par une forêt mature, atteignant la couverture maximale.

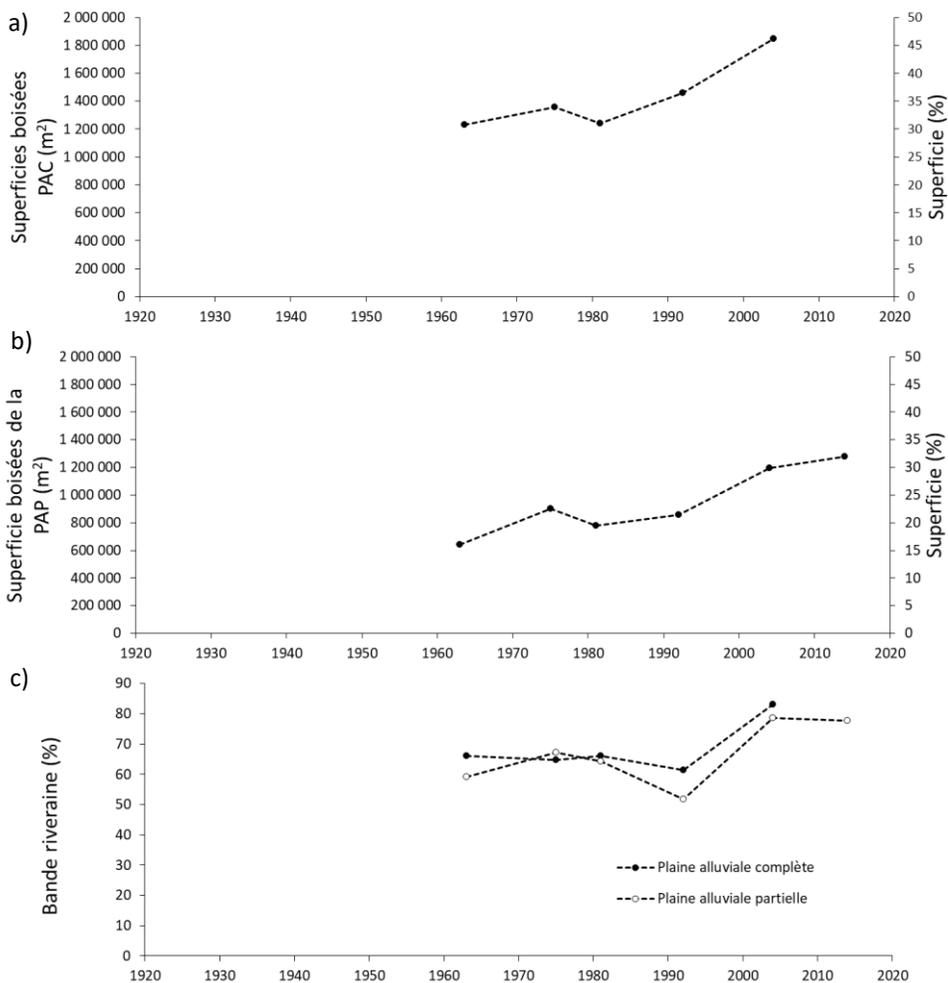


figure 48. Évolution des superficies boisées de la plaine alluviale et de la bande riveraine, a) Plaine alluviale complète, b) Plaine alluviale partielle, c) proportion de bandes riveraines

Il est impossible de déterminer avec exactitude dans quelle proportion la partie non couverte par l'image satellitaire de 2014 est caractérisée par une forêt alluviale, mais les campagnes de reconnaissance terrain de 2015 et 2016 permettent d'affirmer que cette portion de la plaine alluviale est très peu perturbée. De ce fait, il est raisonnable de croire que la superficie boisée de la PAC atteint aussi son maximum en 2014. Ainsi, l'évolution de la ripisylve se fait de manière similaire au sein de la PAC et de la PAP, mais il existe un écart de superficie et de pourcentage couvert entre les deux. L'amont du tronçon d'étude est forestier en quasi-totalité et très peu anthropisé, ce qui laisse place à de grandes superficies boisées. Inversement, la portion aval est plus densément occupée par la population et une grande partie de la plaine alluviale y est défrichée, réduisant la proportion de forêts au sein de la PAP.

La bande riveraine quant à elle suit une trajectoire différente de celle de la forêt alluviale dans son ensemble, mais une tendance à l'augmentation est aussi perceptible (figure 48c). Ici, la PAC et la PAP sont toujours considérées. L'évolution du linéaire de bande riveraine se manifeste de façon similaire au sien de ces deux entités, mais une plus forte variabilité est perceptible au sein de la PAP, car les aménagements réalisés sur les berges représentent un plus grand pourcentage du linéaire de cours d'eau dans la portion aval. Au sein de ces deux divisions, l'évolution de la bande riveraine totale et de la bande riveraine en milieu alluvial est analysée. La nuance est soulignée, car la bande riveraine en milieu alluvial représente une source de bois mort plus grande que la bande riveraine dans des secteurs confinés par des infrastructures ou des berges rocheuses. Dans le premier cas, le recrutement relève principalement de la migration du chenal alors que dans le second, elle dépend de la mortalité naturelle des arbres.

Tant dans le cas de la PAC que de la PAP, la bande riveraine totale et la bande riveraine alluviale évoluent de façon très similaire. En fonction de la sinuosité du cours d'eau et du linéaire de berges la longueur de la bande riveraine varie. Pour en analyser l'évolution à travers le temps, il convient donc de se référer au pourcentage du linéaire de berge sur lequel une bande riveraine est présente.

Pour la période de 1963 à 1992, 66 % et 59 % des berges de la PAC et de la PAP respectivement sont caractérisées par la présence d'une bande riveraine, dont 60 % et 55 %, en milieu alluvial, sans confinement ni infrastructure. Une augmentation respective de 23 et 20 points de pourcentages entre 1992 et 2004 mène à la présence d'une bande riveraine totale sur 83 % du cours d'eau et de bande riveraine en milieu alluvial de 75 % sur la PAC, les plus hautes proportions mesurables depuis 51 ans.

En ne considérant que la PAP, pour la période de 1963 à 1992, la proportion du linéaire de berge caractérisée par la présence d'une bande riveraine varie entre 67 % et 52 % dont entre 63 % et 48 % en milieu alluvial. Tant pour la PAC que la PAP, les plus bas pourcentages sont atteints en 1992. De la même manière que pour la PAC, une augmentation drastique de la longueur de la bande riveraine est survenue entre 1992 et 2004 alors qu'elle est passée de 52 % à 79 % affichant une augmentation de 27 points de pourcentages. En 2014, la proportion de berges en présence d'une bande riveraine était de 78 % soit une proportion très similaire à celle de 2004. Comme très peu ou pas de perturbations ne semblent avoir affecté la végétation alluviale dans la portion amont de la rivière, il est encore une fois raisonnable de croire que l'importance de la bande riveraine de 2014 au sein de la PAC est très similaire à celle de 2004.

4.4.3 Trajectoire hydrologique

La série chronologique des débits maximaux de la rivière Mont-Louis reconstituée à partir des données recueillies sur la rivière Madeleine (1955-1995) et la rivière York (1996-2016) permet de constater qu'un grand écart et une forte variabilité de ces débits existent entre les années. Entre 1955 et 2016, le plus petit des débits maximaux de la rivière Mont-Louis est estimé à 23 m³/s, alors que le plus grand est de plus de 157 m³/s, ce qui représente un débit 6,8 fois plus élevé. La moyenne des débits atteints au cours de la même période est de 73 m³/s et la valeur médiane est de 65 m³/s. De grandes crues sont survenues

en 1961, 1963 et 1966 alors que la période de 1955 à 1976 est plutôt caractérisée par une succession de crues moyenne et faibles (figure 49).

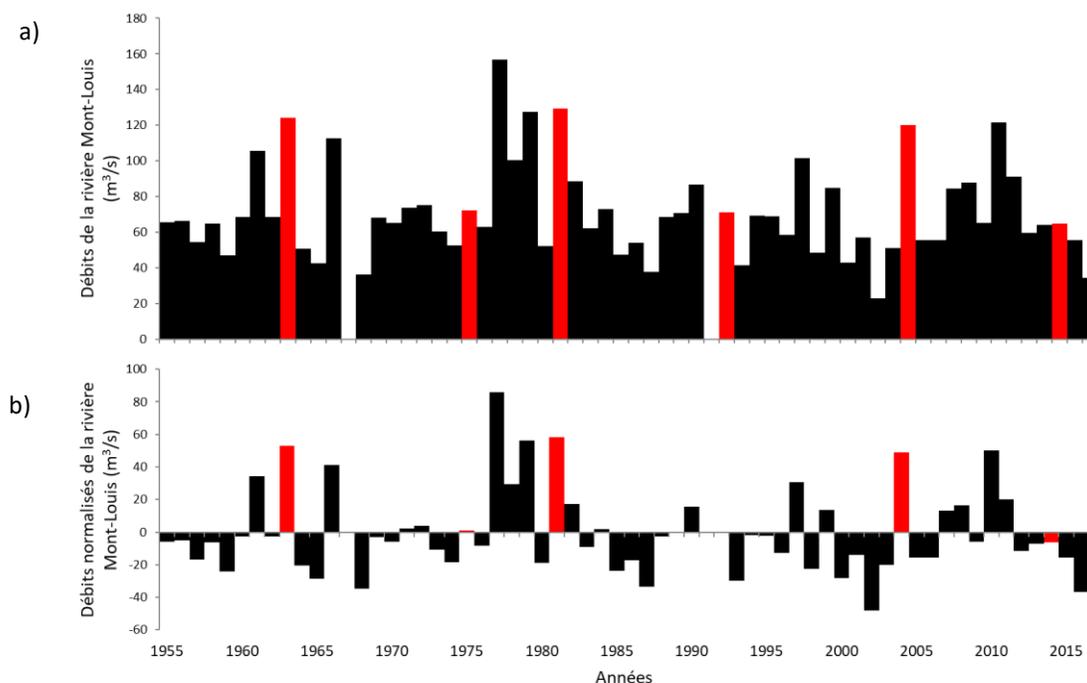


figure 49. a) série temporelle des débits maximaux de la rivière Mont-Louis estimée à partir des débits spécifiques de la rivière Madeleine et de la rivière York, b) écart à la moyenne des débits de la rivière Mont-Louis, en rouge : années des tracés fluviaux

Entre 1977 et 1981, quatre crues majeures sont survenues et des débits historiques ont été enregistrés. Pour chacune de celles-ci, les débits ont dépassé les $100 \text{ m}^3/\text{s}$ et la crue de 1977 excède $157 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 49a). De 1982 à 2003, quatre années seulement sont marquées par des débits supérieurs à la moyenne, soit en 1982, en 1990, en 1997 et en 1999. Parmi ceux-ci, le plus élevé a été atteint en 1997, avec un débit de $101 \text{ m}^3/\text{s}$. Au cours des autres années, les débits égaux ou inférieurs à la moyenne sont calculés, avec au minimum, $23 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2002. Durant la période la plus récente, de 2004 à 2016, des débits de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ et de $121 \text{ m}^3/\text{s}$ ont été observés en 2004 et en 2010, et 2016 marque le plus petit débit, n'atteignant pas $35 \text{ m}^3/\text{s}$.

En somme, au cours des 61 dernières années, la rivière Mont-Louis a connu des débits supérieurs à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ à 10 reprises, et supérieurs à $120 \text{ m}^3/\text{s}$ à 6 reprises soit en 1963, 1977, 1979, 1981, 2004 et 2010. Ces périodes de forts débits se manifestent selon une certaine cyclicité, environ aux 10 ans, et elles sont suivies d'une période de débits moyens et faible (figure 49b). Ainsi, aucune tendance dans l'augmentation ou la diminution des débits maximaux n'est observable. De plus, quatre des 6 photos analysées ont été prises durant des années marquées par de fortes crues (1963, 1981, 2004, 2014). Les crues de 2014 ne sont pas répertoriées sur l'histogramme de crues présentées. Au cours du mois de juillet, des précipitations intenses de l'ordre de 100 mm en 24 h se sont abattues au nord de la Gaspésie et ont engendré une réponse rapide des petits cours d'eau, mais le signal est moins perceptible sur les plus gros bassins versants comme celui de la rivière York, à partir de laquelle l'histogramme a été construit. Il est donc connu que la crue de 2014 était majeure à Mont-Louis, mais l'information n'est pas traduite dans l'histogramme.

Cet effet des grandes crues sur la morphologie du cours d'eau se traduit sur les variables morphométriques analysées. L'image partielle de 2014 peut induire une erreur dans l'évolution des variables entre 2004 et 2014, car une grande portion d'un tronçon mobile n'est pas couverte. Toutefois, de manière générale, les périodes de forts débits correspondent à celles où la mobilité du cours d'eau est la plus élevée, à une diminution du tressage ainsi qu'à une augmentation des largeurs.

La succession de crues de 1977 à 1981 a engendré de grands taux d'érosion, atteignant en moyenne 2,6 m de migration annuelle pour l'ensemble du cours d'eau, mais atteignant plus de 4,5 m dans le tronçon divagant. Dans les années 2000, une seule crue majeure est répertoriée, en 2004. Son effet est donc moins marqué que la précédente période, mais porte le taux de mobilité à 0,9 m par an, une valeur 43 % supérieure à celle des années 90. Par ailleurs, ces épisodes de crues correspondent à une diminution du tressage du cours d'eau et à l'augmentation de la largeur.

L'élargissement du cours d'eau ainsi que les périodes de forte mobilité, particulièrement au sein du tronçon divagant, sont survenues en 1963, 1977, 1979 et 1981.

En 1992, le cours d'eau affiche les plus faibles valeurs des 51 dernières années, avec une largeur moyenne de 37m, où 50 % des valeurs se situent entre 25 m et 42 m et où le taux de migration est estimé à 0,4 m par an. La sinuosité et le tressage commencent aussi à augmenter entre 1981 et 1992, particulièrement pour les tronçons divagant et à méandres dans le cas de la sinuosité et pour le tronçon divagant dans le cas du tressage. En 2004 et 2014, la largeur moyenne de la rivière était respectivement de 42 m et 44, m, une augmentation inférieure à la marge d'erreur de 3 m calculée. Toutefois, dans le premier cas les valeurs du 3^e quartile sont comprises entre 35 m et 51 m et dans le second, entre 38 et 60 m, soulignant que de nombreux tronçons de la rivière Mont-Louis ont connu un élargissement de plusieurs mètres au cours des dernières décennies. De plus, cette augmentation des largeurs est particulièrement due à l'élargissement du tronçon divagant, où 50 % des valeurs étaient comprises entre 29 m et 43 m en 1992 et qu'en 2014, 50 % des valeurs est comprise entre 36 m et 71 m, avec des maximums respectifs de 69 m et 84 m.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Le chapitre qui suit met en relation les résultats présentés au chapitre 4 et dresse le portrait de l'évolution des interrelations entre la dynamique du bois mort et la dynamique fluviale de la rivière Mont-Louis. Dans un premier temps, la distribution et l'évolution des volumes de bois du bois mort sont mises en relation avec la segmentation du cours d'eau en tronçons homogènes afin de mettre en évidence le fait que le style fluvial régit la capacité de transport et la quantité de sites d'accumulation préférentiels. Dans un second temps, les effets de l'ajout et de la perte de volumes de bois au sein des embâcles sur le transit sédimentaire et la morphologie du lit sont discutés. Enfin, la trajectoire écohydrogéomorphologique de la rivière Mont-Louis est présentée et révèle que l'influence du bois mort sur le style fluvial est en croissance depuis les années 1980.

5.1 DISTRIBUTION DU BOIS MORT

Dans la littérature scientifique, la dynamique du bois mort est généralement abordée selon le rapport entre la taille des cours d'eau et celle des arbres qui composent la ripisylve (Gurnell *et al.*, 2002 ; Piégay et Gurnell, 1997). À une échelle spatiale plus large, cette classification permet d'identifier certains processus généraux en relation avec la production, le transport et l'accumulation de bois. D'après la classification de Seo et Nakamura (2009) les rivières drainant des superficies entre 100 km² et 400 km² devraient être considérées comme des rivières larges. En accord avec ces propositions, la rivière Mont-Louis doit être considérée comme une grande rivière, car la largeur du cours d'eau excède généralement la hauteur des arbres et la superficie du bassin versant avoisine 300 km². Il importe toutefois d'insister sur l'idée que cette classification vise la simplification des processus qui dominent

la dynamique du bois mort. La rivière Mont-Louis est donc catégorisée comme une grande rivière en matière de dynamique du bois mort, mais elle demeure relativement petite en comparaison avec d'autres grandes rivières à l'échelle de la province ou du monde.

À l'intérieur du même corridor fluvial, la production et la distribution des volumes de bois se font de manière très contrastée. Dans le cadre de cette recherche, quatre styles fluviaux ont été identifiés et circonscrits. C'est en relation avec ces styles fluviaux que la dynamique du bois mort de la rivière Mont-Louis est analysée.

Pour les années 2015 et 2016, respectivement 211 et 254 embâcles de bois mort ont été répertoriés. La segmentation du cours d'eau en tronçon homogène a permis de mettre en évidence que les conditions morphosédimentaires de la rivière influencent grandement la distribution ainsi que la mobilité du bois à une échelle interannuelle. Des embâcles de bois mort ont été répertoriés dans chacun des tronçons, mais leur nombre et leur volume varient grandement. Certaines configurations géomorphologiques telles que les zones d'eau peu profonde, les bancs d'accumulation, les zones de rétrécissement du chenal, les bifurcations brusques de méandre et les chenaux de moins de 10 mètres de largeur sont connus pour être des lieux d'accumulation du bois mort (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010). Sur la rivière Mont-Louis, les tronçons les plus chargés en bois sont caractérisés par d'imposants bancs d'accumulations, plusieurs chenaux secondaires et des zones d'eau peu profonde et les quelques embâcles présents sur les tronçons moins propices à l'accumulation du bois mort se situent à l'apex d'ilots.

5.1.1 Tronçon linéaire

Le tronçon linéaire est situé à l'amont du site d'étude (figure 50). Bien qu'avec $0,1325 \text{ m}^3/\text{m}^2$, la densité de bois qui compose la ripisylve soit la plus élevée, c'est au sein de celui-ci que les plus petits volumes de bois mort sont répertoriés. En effet, en 2015 et 2016, ce tronçon comportait respectivement 10 et 18 embâcles, pour 61 m^3 et 64 m^3 de bois, ce qui représente 3 % et 4 % du volume de bois retrouvé dans la rivière. Il s'agit toutefois du plus court des tronçons fluviaux identifiés. Lorsque reporté sur un linéaire de 100 m, ce tronçon de cours d'eau comporte 5 m^3 de bois pour les deux années, ce qui confirme qu'il s'agit du tronçon avec le plus faible chargement en bois.



figure 50. Localisation du tronçon linéaire

La grande stabilité qui caractérise le tronçon linéaire se répercute directement sur le recrutement de bois provenant de la ripisylve. Les faibles taux de mobilité ne permettent pas de recruter le bois de la berge, et au contraire, permet l'établissement de vieux peuplements forestiers, expliquant la grande densité de bois qui compose la forêt riveraine. Le secteur le plus enclin à manifester des variations de largeurs ou de la mobilité est situé à l'extrême amont du site d'étude, tout juste en aval de la confluence unissant la Mont-Louis Est et la Mont-Louis Ouest (figure 51).

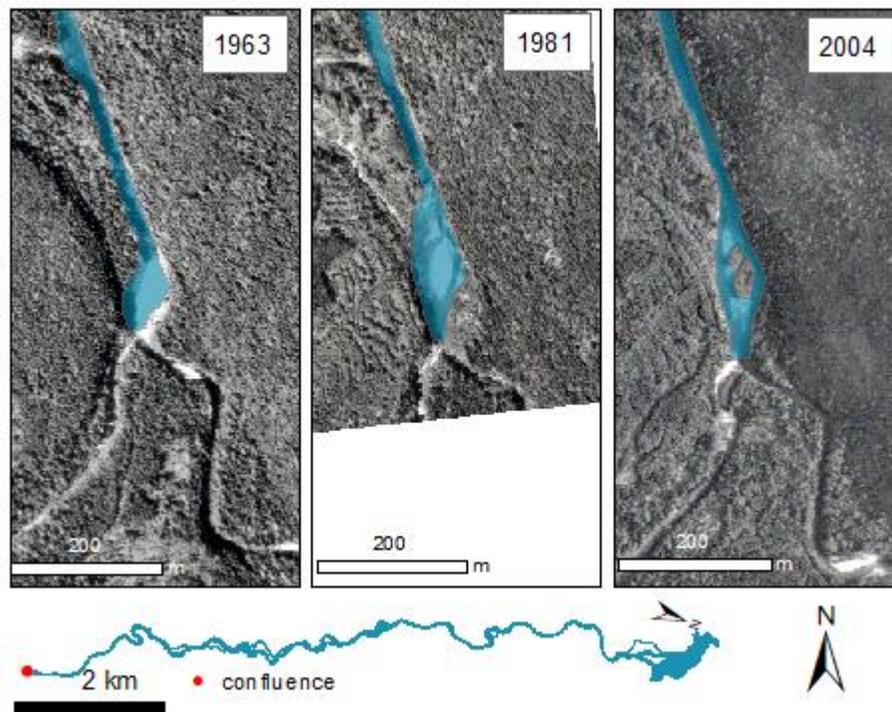


figure 51. Variations de largeur à la confluence

Ce type de confluence a pour effet de localement augmenter les vitesses d'écoulement et la puissance des cours d'eau, ce qui lui confère une force érosive accrue (Roy *et al.*, 1988). En faisant abstraction de ce secteur particulier, long d'environ 200 m, le taux d'érosion moyen du tronçon linéaire est de 0,25 m par an. Il s'agit donc d'un tronçon très stable, sur lequel la berge droite est confinée par un versant rocheux sur plus de 72 % de sa longueur et où le recrutement de bois mort par migration est limité. La présence de bois mort dans ce tronçon est ainsi largement dépendante des apports provenant de l'amont, de la mortalité naturelle des arbres ou d'évènements ponctuels tels que des chablis.

Entre 1963 et 1975, des coupes forestières sur le secteur ont réduit la superficie boisée de la plaine alluviale du tiers (figure 52). Certains secteurs de coupe se situent à proximité du chenal, ce qui se traduit par une diminution du linéaire de bande riveraine de 27 points de pourcentage dans le tronçon. Malgré la faible mobilité du cours d'eau, c'est plus du quart des arbres matures susceptibles d'être introduits dans le chenal qui disparaissent. De plus, les

arbres issus de la repousse sont aujourd'hui encore loin de leur fin de vie. Il est donc peu probable qu'ils soient introduits au cours d'eau par mortalité naturelle, ce qui contribue à maintenir les sources de bois à un niveau minimal au sein de ce tronçon.

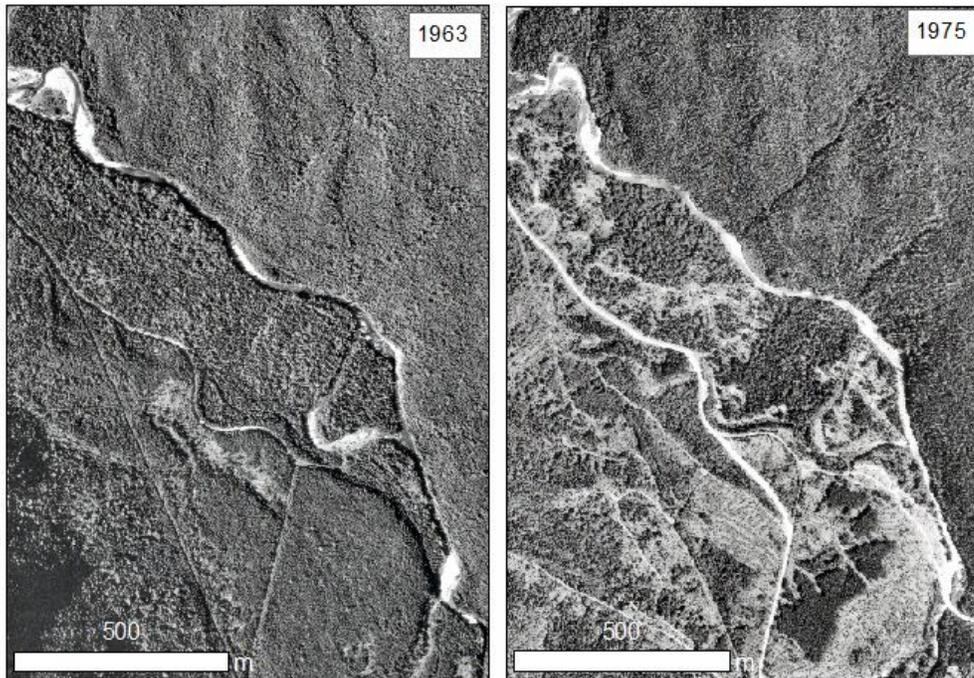


figure 52. Coupe forestière en amont du tronçon d'étude

Par ailleurs, les configurations géométriques et géomorphologiques du chenal contribuent à faciliter le transport du bois au sein du tronçon linéaire. En effet, les cours d'eau confinés, rectilignes avec de plus fortes pentes tendent à mobiliser le bois plus rapidement et à accumuler le bois moins longtemps (Kramer et Wohl, 2017 ; Nakamura et Swanson, 1994). Bien que la pente du tronçon linéaire soit faible (0,0095), elle demeure la plus grande retrouvée sur le corridor principal de la rivière Mont-Louis. En considérant que les largeurs de ce tronçon du cours d'eau sont relativement modestes et que les vitesses d'écoulement sont accélérées par la convergence des deux cours d'eau de la confluence, il est raisonnable de croire que la puissance spécifique du tronçon linéaire est la plus élevée sur la rivière Mont-Louis. Or, la puissance spécifique est l'une des variables qui influencent le plus le

transport et l'accumulation du bois mort (Iroumé *et al.*, 2015 ; Rigon *et al.*, 2012). Le confinement du tronçon sur près du trois quarts de sa longueur permet de limiter la dissipation de l'énergie fluviale et d'accentuer la mobilité du bois. De plus, les méandres, les bancs d'accumulations et les chenaux secondaires sont des lieux d'accumulation préférentiels, mais aucune de ces configurations ne se trouve dans le tronçon (Abbe et Montgomery, 2003 ; Gurnell *et al.*, 2002 ; Nakamura et Swanson, 1994). Toutefois, deux ilots végétalisés se sont développés entre 1981 et 1992. Les deux embâcles les plus volumineux de ce tronçon sont situés à l'apex de ces ilots (figure 53). Leur volume est estimé à 38,48 m³ pour 2015 et 28,21 m³ pour 2016 dans le cas de celui se trouvant sur l'ilot amont et à 9,23 m³ et 14,94 m³ pour celui en aval.



figure 53. Embâcle d'apex, a) ilot amont, 2015, b) ilot aval, 2015

Enfin, les relevés de végétation réalisés dans ce secteur ont permis de déterminer que la hauteur moyenne des arbres est de 14 m avec un écart-type de 6 m. Le rapport entre la hauteur moyenne des arbres et la largeur du chenal varie donc généralement entre 0,24 et 0,96. Suivant la recommandation de Gurnell *et al.* (2002) de considérer la taille des cours d'eau en relation avec la hauteur des arbres, ce tronçon de rivière serait de taille moyenne à large. D'après Kramer et Wohl (2017), les taux de transport de bois mort sont les plus grands dans les rivières de tailles moyennes, car ils combinent à la fois la largeur des grands cours d'eau et la puissance des petits.

Ainsi, la nature stable du tronçon linéaire limite la production de bois par migration latérale, les intrants sont donc dépendants des apports de l'amont, mais les configurations géométriques et géomorphologiques du cours d'eau lui confèrent la puissance nécessaire pour mobiliser le bois. De plus, de manière générale, la largeur du cours d'eau excède la taille des arbres de la ripisylve, excepté lorsque des îlots végétalisés divisent l'écoulement et réduisent la largeur des chenaux. Les taux de recrutements annuels moyens de ce tronçon ne peuvent pas être estimés pour la période de 2004 à 2014 en raison de l'image partielle. Il est donc impossible de dresser un bilan ligneux. De plus, l'augmentation des volumes de 3 m³ au cours de l'année 2016 est non significative, car elle peut être associée à des erreurs de mesure. C'est aussi le cas des 2 segments de 100 m sur 14 qui ont vu leur volume de bois augmenter, car les volumes demeurent faibles. Toutefois, 29 % des segments ont connu une diminution de leur volume de bois, ce qui représente 16 m³ de bois. Cette valeur est faible et est possiblement elle aussi associée à une erreur de mesure. Par contre, 50 % des segments ont connu une augmentation de leur volume, totalisant 16 m³. Il est donc aussi possible qu'une partie du bois ait été évacué et qu'une portion du bois provenant de l'amont se soit accumulé au sein du cours d'eau. Selon cette interprétation, ce tronçon de cours d'eau agit donc à titre de convoyeur en équilibre dynamique (Marcus *et al.*, 2002).

5.1.2 Tronçon divagant

Le tronçon divagant est long de 5255 m, ce qui représente 43 % de la longueur totale du cours d'eau et les densités de bois vivant mesurés sur la ripisylve au sein de ce tronçon affichent des valeurs très contrastées (figure 54). Sur les cinq quadrats effectués, deux contiennent 24 m³ et 26 m³ alors que deux autres ne contenaient que 2 m³ et 4 m³. Le cinquième quadra quant à lui affichait une densité ligneuse de 11 m³. Cette situation témoigne du fort dynamisme du cours d'eau et de sa connexion avec sa plaine alluviale, car les valeurs de densités ligneuses les plus élevées correspondent à des secteurs en érosion et les deux plus faibles à une plaine alluviale en construction. La localisation de ces deux quadrats était occupée en 2004 par le chenal dans le premier cas et par un banc d'accumulation dénudée dans le second. La migration du cours d'eau a permis de stabiliser suffisamment ces environnements pour qu'ils soient colonisés par la végétation.

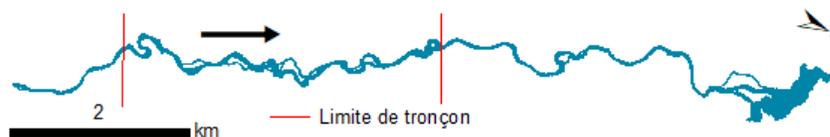


figure 54. Localisation du tronçon divagant

On retrouve d'ailleurs, au sein du tronçon divagant, une représentation typique de morphologie fluviale associée à la présence de bois mort, telle qu'elle est décrite par Collins *et al.* (2012). La présence de bois mort en marge du cours d'eau permet de protéger la berge de l'érosion et de dévier une partie de l'écoulement (figure 55a). La portion de plaine alluviale située à l'aval de l'embâcle se retrouve protégée de l'érosion et la végétation est libre de se développer jusqu'à maturité (figure 55b). L'écoulement dévié initie la migration du chenal, laissant d'un côté, un banc d'accumulation, de l'autre, une berge en érosion. La migration progressive du cours d'eau permet le développement d'une végétation affichant des stades de croissance variée et l'érosion d'une plaine alluviale qui soutient une forêt mature (figure 55c).

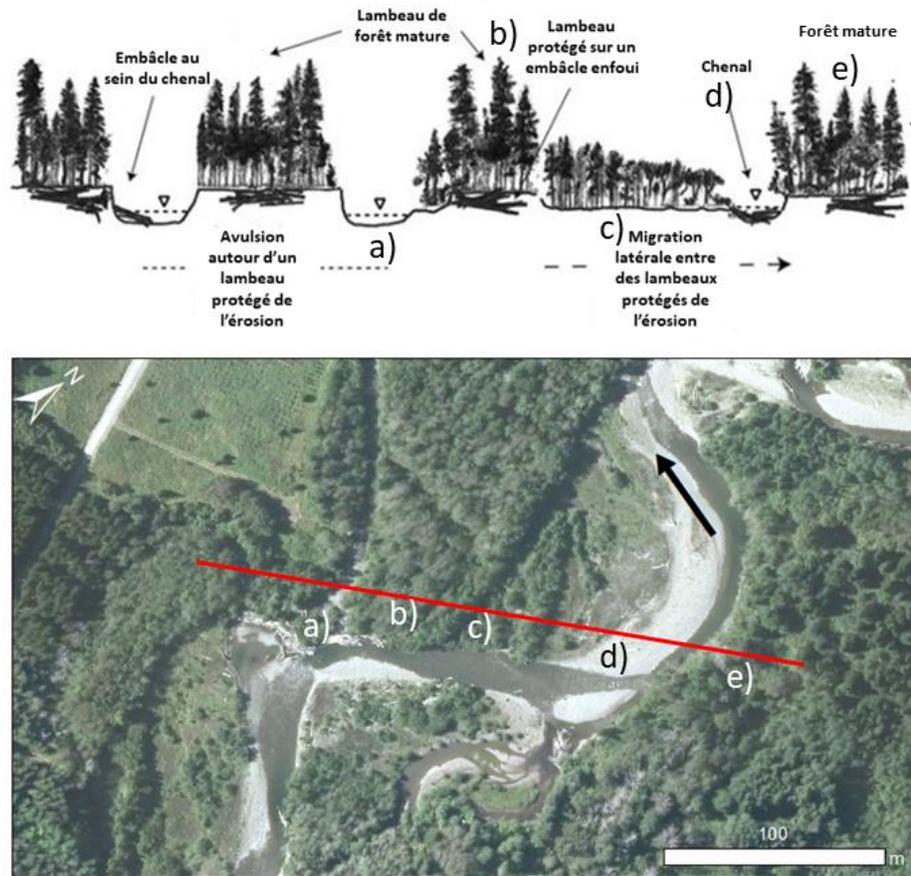


figure 55. Morphologie de plaine alluviale, a) embâcle, b) forêt mature protégée, c) migration du chenal et succession de végétation, d) chenal, e) forêt mature ; la flèche indique le sens de l'écoulement (adapté de Collins *et al.*, 2012)

La déviation ou la séparation de l'écoulement peut aussi créer des processus d'avulsion et laisser place à un style fluvial caractérisé par de multiples chenaux (Abbe et Montgomery, 2003). Cette dynamique permet donc la juxtaposition d'une forêt alluviale mature et d'une forêt jeune et en croissance, dans un environnement très restreint. Considérant ceci, il est peu surprenant de retrouver, au sein du tronçon divagant, un fort contraste entre les densités de bois vivant qui composent la ripisylve et une grande quantité de bois mort dans le chenal.

Par ailleurs, le tronçon divagant affiche les taux de mobilité les plus élevés sur le cours d'eau. En fonction de l'ampleur des crues, les taux de migration varient beaucoup, mais peuvent atteindre des valeurs excédant 4,5 m par année, comme c'est le cas pour la période 1975-1981. Cette mobilité se traduit par un apport massif en sédiments et en bois provenant des berges. Une fois formés dans le chenal, les bancs de gravier agissent comme un élément de rugosité limitant le transport du bois et forment des sites d'accumulation préférentiels. De plus, en présence d'un linéaire de berge végétalisé en quasi-totalité (89 %), la migration du chenal permet l'introduction de grands volumes de bois (Splinter et Dauwalter, 2016). Le tronçon divagant est d'ailleurs responsable de 75 % du recrutement de bois pour la période 1963-2014. Or, la réduction de la pente (0,0047) ainsi que l'élargissement du chenal ont pour effet de diminuer la puissance spécifique du cours d'eau, par rapport à celle du tronçon linéaire. La mobilisation du bois et des sédiments devient ainsi difficile et se traduit par la formation de nombreuses accumulations de bois mort et à d'imposants bancs de convexité.

D'ailleurs, les bancs occupent 62 % de la superficie totale du chenal (dans le secteur couvert par l'image de 2014) et occupent jusqu'à 92 % de la section transversale par endroits. Ces bancs ont pour effet d'augmenter la rugosité au sein du chenal et de réduire la profondeur d'eau, ce qui limite davantage la capacité du cours d'eau à mobiliser le bois (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010 ; Curran, 2010). En l'absence de variable explicative comme le rapport hauteur/largeur dans les petits cours d'eau, Haga *et al.* (2002) soutiennent que la mobilité du bois dépend d'abord du rapport entre la profondeur d'eau et le diamètre des arbres et que les secteurs où la profondeur d'eau est inférieure au diamètre des arbres tendent à accumuler plus de bois et à le stocker plus longtemps. La présence des bancs d'accumulation dans le tronçon divagant fait toutefois varier la profondeur d'eau le long de la section transversale. Les relevés topographiques effectués montrent qu'il peut y avoir une différence d'élévation excédant 3 m entre le sommet des bancs d'accumulation et le point le plus bas du chenal. La colonne d'eau au-dessus des bancs est donc réduite et le bois s'accumule plus facilement. De plus, à cause de la grande mobilité du tronçon, l'apport de bois provient principalement des berges. Le diamètre moyen des arbres situés sur les berges en érosion de ce tronçon est de

0,19 m (É-T 0,09 m), une dimension largement inférieure à la hauteur d'eau de la rivière Mont-Louis en période de crue, ce qui peut faciliter le transport (Iroumé *et al.*, 2015 ; Curran, 2010 ; Hassan *et al.*, 2005). Les arbres recrutés par la migration latérale du cours d'eau conservent toutefois une grande partie de leur réseau racinaire, ce qui, en plus de faciliter l'ancrage des arbres au lit ou aux berges, nécessite d'obtenir une profondeur d'eau nettement plus élevée que celle nécessaire au transport des troncs uniquement (Abbe et Montgomery, 2003 ; Bisson *et al.*, 1987).

Par ailleurs, l'I_t témoigne que le dynamisme de ce cours d'eau se manifeste aussi par l'occupation de multiples chenaux à travers l'espace et le temps. Les apports constants en sédiments provenant des berges permettent la formation de bancs centraux sur le chenal. La stabilisation de ces bancs, en partie causé par la présence de bois mort et leur élévation au-dessus du niveau plein-bord permet à une végétation arborescente de se développer, formant un îlot central. La figure 56a montre un embâcle typique, fréquemment observé sur le tronçon, formé à l'apex d'un de ces îlots. En plus de favoriser l'accumulation de bois, ces îlots ont pour effet de diviser l'écoulement et de forcer l'utilisation de multiples chenaux (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010 ; Abbe et Montgomery, 1996 ; Keller et Swanson, 1979). Aussi, bien que les avulsions survenues au sein du tronçon n'aient pas été quantifiées, une analyse qualitative des tracés fluviaux permet d'affirmer qu'au cours de son histoire, le cours d'eau a effectué un changement de chenal à de multiples reprises et que de nombreux chenaux secondaires ont été formés. La figure 56b montre un embâcle formé à l'amont d'un de ces chenaux.

En somme, la grande mobilité du chenal en combinaison avec une bande riveraine omniprésente permet au tronçon divagant de recruter de grands volumes de bois. La mobilité du bois produit est toutefois contrainte par la présence de bancs d'accumulations qui augmentent la rugosité. L'élargissement du cours d'eau et la diminution de la hauteur d'eau exacerbent l'effet de la rugosité et le bois devient difficile à mobiliser. De plus, la présence d'îlots végétalisés et de chenaux secondaires sur le tronçon facilite la formation des embâcles

au sein du tronçon divagant. Pour ces raisons, 60 % des embâcles de bois mort de la rivière sont accumulés au sein de ce tronçon.



figure 56. a) accumulation à l'amont d'un îlot végétalisé, b) accumulation sur un chenal secondaire

5.1.3 Tronçon à méandres stables

Dans son ensemble, le tronçon à méandres stables adopte un comportement et une morphologie similaires au tronçon linéaire, à l'amont du territoire d'étude. Il est caractérisé par un chenal unique, un taux de migration moyen pour la période de 1963 à 2014 de 0,46 m par an et par une largeur moyenne de 30 m (É-T : 12 m). Toutefois, ces valeurs sont influencées par la présence d'un sous-secteur adoptant une morphologie s'apparentant plutôt à celle du tronçon divagant. Ce secteur correspond au site d'étude numéro 3. La comparaison des tracés de 1963 et de 2014 permet de voir que les variations de largeur de mobilité et de tressage se manifestent de manière ponctuelle, entre les PK 4 000 et PK 3 100 (figure 57). En excluant ce sous-secteur, les taux de migration passent à 0,33 m par an. Il s'agit donc d'un tronçon assez stable au sein duquel on retrouve peu de bois mort.

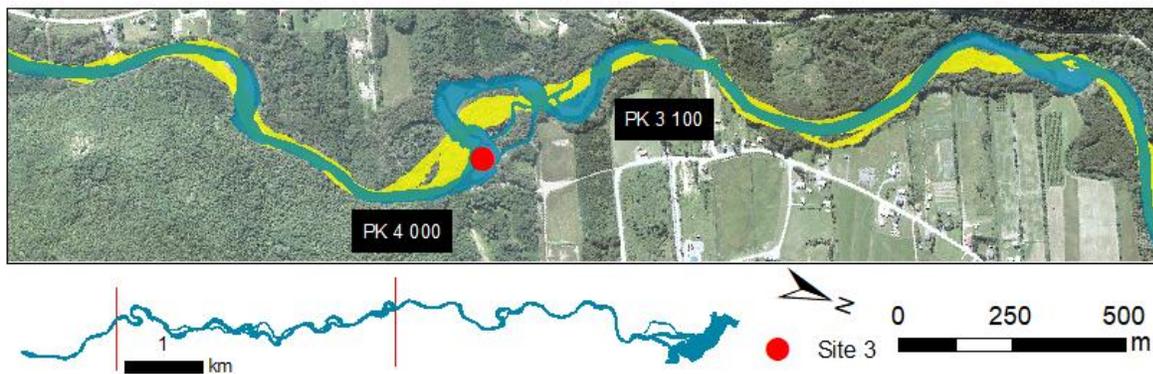


figure 57. Tronçon à méandres stables, en jaune, le tracé de 1960, en bleu, le tracé de 2014

En 2015 et 2016 respectivement, 69 % et 74 % du volume contenu dans le tronçon à méandres étaient accumulés au sein de l'embâcle du site 3. Sans cet embâcle, les volumes contenus dans le tronçon sont estimés à 169 m³ pour la première année et à 125 m³ pour la seconde. En reportant ces volumes sur un linéaire de 100 m, il est possible de constater que c'est au sein de ce tronçon que les volumes de bois sont les plus faibles (figure 58).

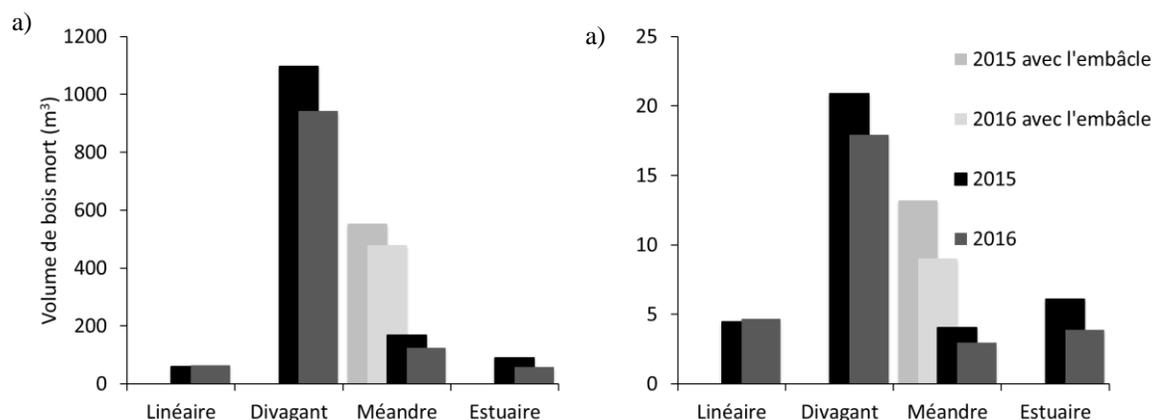


figure 58. Volume de bois par tronçon homogène a) Volume total, b) volume par 100 m linéaires

Dans un même tronçon fluvial, les variations locales des conditions hydrosédimentaires peuvent altérer la morphologie et le fonctionnement du chenal. Ici, deux types de configurations contrastées coexistent au sein du tronçon à méandres et leur influence sur le recrutement, le transport et l'accumulation du bois mort se manifeste également de manière opposée.

Sur le flanc ouest de la vallée de Mont-Louis, Héту et Gray (1980) ont identifié un complexe de cinq cônes alluviaux coalescents dont la formation a été initiée à la fin de l'Holocène et leur mise en place suit une séquence d'évènements bien précise. Dans un premier temps, le relèvement isostatique provoqué par la déglaciation provoque l'incision du cours d'eau principal et permet la mise en place des cônes supérieurs. L'incision du cours d'eau se poursuit dans les dépôts fluvioglaciaires sur lesquels reposent les cônes et la migration latérale du cours d'eau de l'époque vient tronquer leur extrémité, laissant un talus d'érosion fluviale. Dans une seconde phase, les tributaires torrentiels aujourd'hui connus sous le nom de ruisseau à Tremblay (au nord) et ruisseau à Mélina (au sud) incisent les cônes supérieurs et forment des cônes alluviaux inférieurs (figure 59).

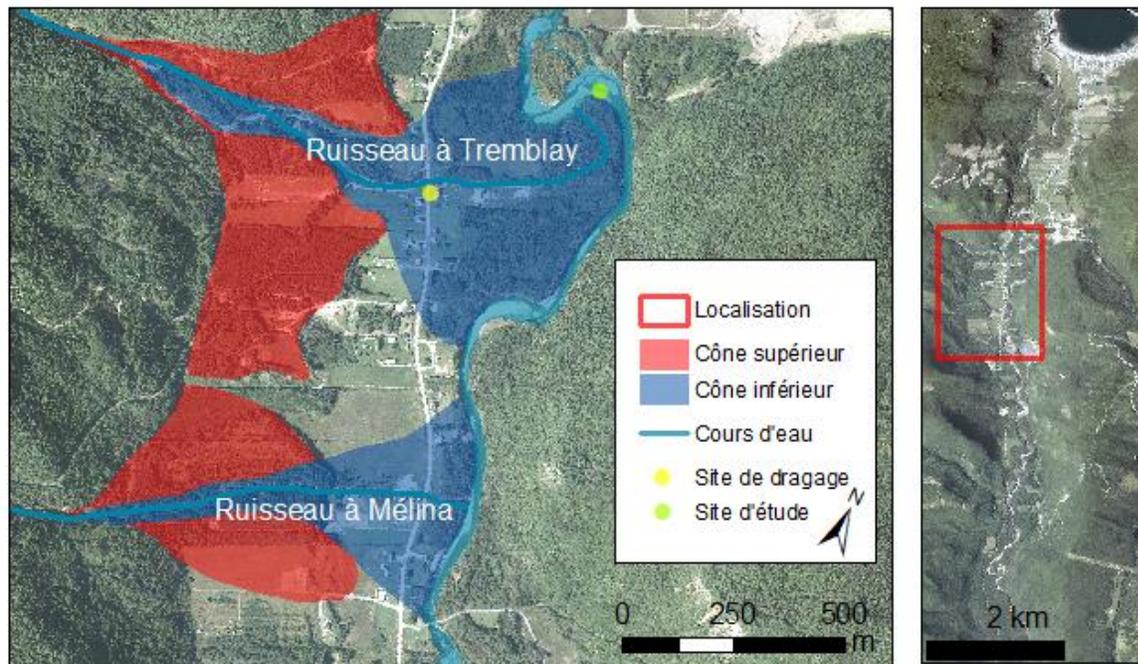


figure 59. Représentation du complexe de cônes coalescent de la vallée de Mont-Louis. La limite des cônes a été établie selon la description de Héту et Gray, (1980), *(positionnement et extension des cônes approximative)

Les cônes inférieurs sont contemporains, très actifs et amènent une grande quantité de sédiments au cours d'eau principal (figure 60). Dans le cas du ruisseau à Mélina, le lobe du cône est clairement perceptible dans le chenal de la rivière Mont-Louis et il est tronqué par les écoulements fluviaux, signe que les sédiments sont introduits au chenal. Dans le cas du ruisseau à Tremblay, des opérations de dragage lors des périodes de grandes crues contribuent au stockage du sédiment sur le cône, mais la formation d'un banc d'accumulation à la confluence entre le ruisseau et la rivière indique qu'il y a tout de même un apport sédimentaire. Ces interventions sont toutefois récentes à l'échelle de la mise en place des cônes. Ainsi, depuis le début de leur formation, les cônes alluviaux inférieurs apportent des sédiments qui ont pour effet d'acculer le cours d'eau au versant est, ne laissant place qu'à un corridor étroit ou aucune où très peu de migration n'est possible. Entre la limite amont du tronçon à méandres et le PK 4 000, respectivement 6 et 5 embâcles ont été répertoriés en 2015 et 2016 et chacun d'eux mesure moins de 5 m^3 . Le tronçon est étroit, mais suffisamment

large pour transporter le bois et l'effet du confinement se traduit par une profondeur d'eau supérieure. Cette section agit donc à titre de zone de transport de bois.

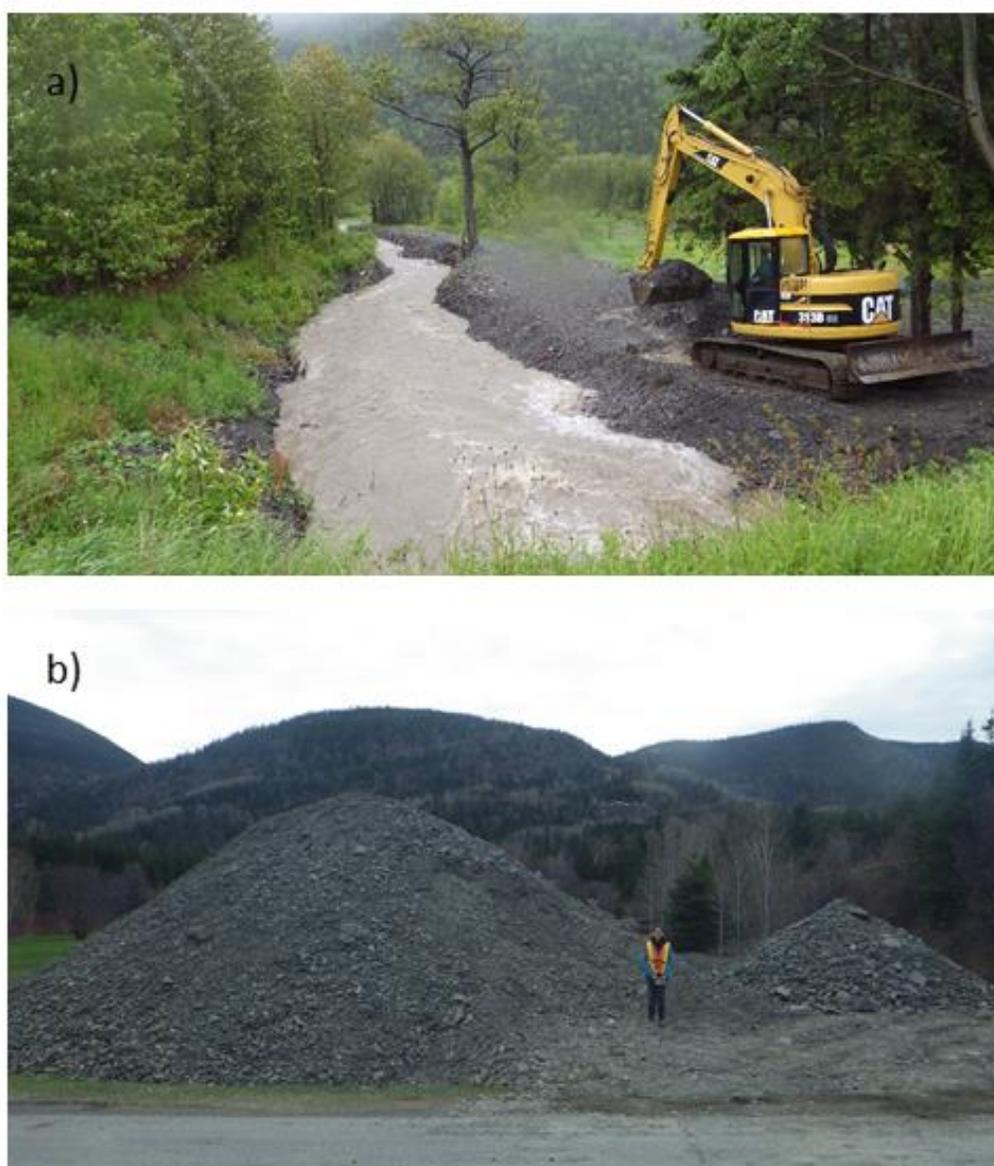


figure 60. Ruisseau à Tremblay, a) dragage de sédiments lors de la crue de juin 2016, b) sédiments dragées suite à la crue de mai 2017 ; Le site de dragage est identifié sur la figure 59

Entre le PK 4 000 et PK 3 100, au site 3, le versant laisse place à une plaine alluviale au sein de laquelle la rivière est libre de migrer. L'élargissement du chenal contribue à la diminution de sa capacité de transport. L'apport en sédiments des ruisseaux à Tremblay et à Mélina devient difficilement mobilisable et d'imposants bancs d'accumulations se forment sur ce secteur. C'est ici, logé contre un méandre abrupt que se loge le plus gros embâcle de bois mort de la rivière Mont-Louis. Le bois provenant de l'amont du cours d'eau est aisément transporté dans la portion confinée du tronçon, et il est accumulé dans la portion alluviale, où le cours d'eau perd en puissance et que des sites d'accumulation préférentiels sont présents. De plus, la présence de deux tributaires représente généralement une source de bois et de sédiments significative pour les cours d'eau (Martin et Benda, 2001). Toutefois, en raison de la présence de la route de la Rivière, orientée selon un axe nord-sud à l'ouest de la rivière Mont-Louis, des ponceaux ont dû être construits sur les ruisseaux à Tremblay et à Mélina. La dimension des ponceaux semble trop étroite pour laisser transiter des arbres matures, les apports en bois mort de ces tributaires est donc limité. Il est toutefois possible que certains arbres matures soient recrutés en aval de la route et acheminés au cours d'eau ou encore que des arbres fragmentés durant le transport transitent jusqu'au chenal, permettant de densifier les embâcles du site 3.

La portion aval du tronçon à méandres présente des caractéristiques similaires à la portion confinée par les cônes. De part et d'autre du chenal, des infrastructures de protections viennent restreindre la mobilité du chenal et concentrer l'écoulement. Aucune documentation officielle n'a été consultée, mais les témoignages de résidents du village soutiennent que ces infrastructures datent du temps de la drave et visaient à faciliter le transport du bois. De plus, peu de bancs d'accumulations se trouvent dans ce secteur et les bifurcations de méandres sont généralement peu prononcées, possiblement dues à la présence de ces infrastructures. Les murets de soutien seraient donc conçus de manière à préserver des dimensions de chenal favorables à la mobilité du bois mort, qu'il soit d'origine anthropique ou naturelle. Cette section agit ainsi à titre de zone de transport, et malgré qu'une plus grande quantité d'embâcles s'y trouvent (2015 : 15 ; 2016 : 16), ils sont composés d'un faible volume de bois (2015 : moyenne de 3 m³ ; 2016 moyenne de 2 m³).

5.1.4 Tronçon estuarien

Le dernier tronçon identifié se situe à l'interface entre le domaine littoral et le domaine fluvial (figure 61). L'estuaire de la rivière Mont-Louis est affecté à la fois par des processus fluviaux et des processus côtiers ainsi que par l'interaction de ces deux environnements. L'analyse des résultats doit être réalisée avec prudence, car la dynamique du bois mort dans les estuaires est largement moins documentée que celle concernant les milieux fluviaux (Hinwood et Mclean, 2017 ; Simenstad *et al.*, 2003 ; Gonor *et al.*, 1988). Toutefois, la littérature disponible semble confirmer certaines observations relatives à la dynamique du bois mort dans l'estuaire de la rivière Mont-Louis.



figure 61. Localisation du tronçon estuarien

Les taux de mobilité du tronçon estuarien varient entre 0,8 m par an et 1,3 par an entre 1975 et 2014, mais entre 1963 et 1975, de grandes superficies ont été érodées dans l'estuaire, portant le taux de mobilité à 3,7 m par an. Ceci se traduit par une production de bois massive au début des années 60, mais aussi par une très faible production au cours des autres périodes. Aucun relevé de végétation n'a été réalisé sur la portion estuarienne du cours d'eau. Les densités de bande riveraine du tronçon à méandres ont donc été utilisées afin d'estimer les volumes de bois produits dans la portion estuarienne. Ainsi, durant la période 1963-1975, pour laquelle 809 m^3 (67 m^3 par an) de bois auraient été produits dans l'estuaire, la production de bois mort de ce tronçon varie entre 15 m^3 par an et 28 m^3 par an entre pour les autres périodes, entre 1975 et 2014. Pourtant, l'analyse qualitative des superficies boisées de l'estuaire suggère que c'est en 1963 que l'étendue de la ripisylve est à son minimum. En 1963, une crue de $124 \text{ m}^3/\text{s}$ (moyenne $73 \text{ m}^3/\text{s}$) est venue élargir 2 chenaux à l'amont du site,

dont l'un est passé de 4 m de large à plus de 50 m. L'essentiel du volume produit provient de ce secteur. Autrement, les volumes de bois qui transitent ou qui s'accumulent dans le tronçon estuarien proviennent des apports de l'amont. Malgré que les superficies boisées soient plus grandes aujourd'hui qu'elles ne l'étaient au milieu du siècle, la mobilité latérale des chenaux a principalement lieu dans un milieu humide sans végétation arborescente (CENG, 2015).

Par ailleurs, le transport du bois est influencé par plusieurs processus. D'après Hinwood et Mclean (2017), l'effet des marées et du vent sont aussi importants que celle des crues quant au transport du bois dans les estuaires. Même en période d'étiage, le rehaussement du niveau de l'eau en période de marée haute peut être suffisant pour permettre au bois de flotter et d'être déplacé à la marée baissante ou simplement poussé par le vent. En contexte québécois, les périodes de grande mobilité du bois correspondent sommairement aux crues printanières ou aux événements de précipitations intenses. Comme l'estuaire de la rivière Mont-Louis est affecté par deux marées hautes par jour, il est difficile d'évaluer la mobilité interannuelle du bois.

5.1.5 Dynamique du bois mort, style fluvial et opportunité de gestion

Les résultats issus de la caractérisation des embâcles de la rivière Mont-Louis indiquent clairement que le recrutement, le transport ainsi que l'accumulation du bois sont conditionnés par le style fluvial et les configurations géomorphologiques qui leur sont associés. Les sources de bois sont suffisamment grandes pour permettre le recrutement de bois mort sur les tronçons linéaire, divagant et à méandre, car une bande riveraine est présente sur plus de 80 % du cours d'eau. Une partie des berges non boisée se trouve d'ailleurs dans le milieu humide de l'estuaire, où les sources de bois sont absentes en grande partie. La migration du cours d'eau est très faible dans les tronçons linéaires et à méandres, ce qui se traduit par un faible taux de recrutement de bois de ces trois tronçons. Au cours des 50 dernières années, le recrutement cumulé de ces trois tronçons est responsable de 25 % des apports en bois, alors que le tronçon divagant a contribué à la hauteur de 75 %. Sur la rivière

d'Ain, en France, Lassetre *et al.* (2008) ont identifié que la sinuosité (1,25) de la rivière était fortement corrélée avec les accumulations de bois sur leur tronçon d'étude. Sur la rivière Mont-Louis, la sinuosité du tronçon divagant atteint 1,46 en 2014 et celle du tronçon à méandre 1,43. Pourtant en 2015 et 2016, le premier compte 50 % de plus de bois que le second. La différence de 0,03 de l' I_s est non significative, la quantité de bois au sein de chacun de ces tronçons ne peut donc pas être expliquée par la sinuosité à elle seule. En retirant les volumes de bois associé à l'embâcle du site 3, le tronçon divagant compte respectivement 85% et 75% plus de bois que celui à méandres, pour 2015 et 2016. D'autres facteurs expliquent donc la rétention du bois dans le tronçon divagant. La présence de nombreux sites d'accumulation préférentiels dans le tronçon divagant a été mise en évidence. De plus, selon Moulin (2005) l'effet de captage de ces sites est amplifié dans les secteurs où les taux de recrutements sont les plus élevés, car les arbres recrutés tendent à s'accumuler à proximité de leur position initiale en présence d'obstacles. Ainsi, la grande production de bois et la présence de bancs d'accumulation, d'ilots végétalisés, de chenaux secondaires au sein du tronçon favorisent la rétention des volumes de bois produits *in situ*. Au contraire, l'absence de site d'accumulations et de production de bois dans le tronçon linéaire lui permet de transporter les bois morts. Sur un linéaire d'environ 100 km de la rivière d'Isère, en France, le même auteur a identifié deux tronçons homogènes. Le premier, d'une longueur de 45 km, est caractérisé par d'imposants bancs d'accumulations mobiles, des ilots végétalisés et de multiples chenaux, il concentre 65 % des volumes de bois mesurés sur le tronçon d'étude. Le second, est un chenal unique et encaissé, les superficies occupées par des bancs d'accumulations sont petites et il accumule moins que 40 % du bois. Ce tronçon d'étude est significativement plus long que celui de la rivière Mont-Louis, toutefois, à une échelle moindre, les mêmes patrons apparaissent. Le tronçon divagant correspond à 43 % de la longueur du cours d'eau, mais concentre 61 % des volumes de bois mesurés sur la rivière Mont-Louis pour chacune des années de mesure.

Par ailleurs, Boivin *et al.* (2017a) montrent que le long du corridor fluvial de la rivière Saint-Jean (60 km), les tronçons fluviaux caractérisés par un grand volume de bois et ceux où la variabilité interannuelle est la plus grande correspondent à des tronçons mobiles où se

forment de grands bancs d'accumulations. Inversement, le tronçon où les plus petits volumes sont répertoriés est un tronçon rectiligne et confiné qui agit à titre de zone de transport. Ces configurations sont cohérentes avec les observations faites sur la rivière Mont-Louis. Or, la rivière Saint-Jean est caractérisée par un delta où s'est accumulé un embâcle de plus de 3 km de long, ce qui contraste avec la quantité de bois retrouvé dans l'estuaire de la rivière Mont-Louis (Boivin *et al.*, 2017a ; Boivin *et al.*, 2017 b ; Boivin *et al.*, 2015). En raison des caractéristiques uniques de chaque estuaire et de celles du bassin versant qui y est rattaché, Hinwood et Mclean (2017) estiment qu'il est difficile de dresser un portrait généralisable de la dynamique du bois mort dans ces environnements. Le delta de la rivière Saint-Jean est situé à environ 100 km de l'embouchure de la rivière Mont-Louis. Il s'agit certes de rivières de tailles différentes, avec des bassins versants de 300 km² pour la rivière Mont-Louis et 1130 km² pour la rivière Saint-Jean, mais chacune est en mesure de transporter le bois mort qui y est introduit. La dynamique opposée observée dans ces deux environnements estuariens relève des configurations géomorphologiques propres à chacun des sites estuariens. En effet, le développement d'un style anastomosé végétalisé avec des forêts matures sur le delta de la rivière Saint-Jean donne lieu à une augmentation marquée de la sinuosité, au développement de multiples chenaux et à la diminution de leur largeur. Chacune de ces configurations représente individuellement un obstacle à la mobilité du bois et leur effet combiné provoque la formation d'un embâcle majeur. De plus, une végétation arborescente se développe sur la portion amont du delta, ce qui limite l'exportation du bois lors de marées hautes ou de crues importantes. Dans l'estuaire de la rivière Mont-Louis, le chenal s'élargit significativement et la diminution de la profondeur d'eau qui pourrait limiter le transport est compensée par l'effet des marées. De multiples chenaux sont actifs, mais le chenal principal est facilement identifiable et demeure relativement rectiligne. Enfin, l'estuaire est caractérisé par un milieu humide où la végétation herbacée domine, ce qui permet au bois de se déplacer plus facilement qu'en présence d'une ripisylve arborescente comme à la rivière Saint-Jean.

Wohl *et al.* (2016) soutiennent que la dynamique du bois mort peut être analysée selon trois échelles spatiales bien documentées par la littérature scientifique, celle du bassin versant (Boivin *et al.*, 2017a ; 2017 b ; 2015 ; Lawrence *et al.*, 2013 ; Fremier *et al.*, 2010 ;

Seo *et al.*, 2010 ; Seo et Nakamura, 2010 ; 2008, Martin et Benda, 2001), celle du tronçon (Martin *et al.*, 2016 ; Iroumé *et al.*, 2015 ; Davidson et Eaton, 2013 ; Nagayama *et al.*, 2012, Curran, 2010) et celle du site (Ravazzalo *et al.*, 2015 ; Montgomery *et al.*, 2003 ; Keller et Swanson, 1979). Toutefois, les études portées à l'échelle du tronçon sont généralement réalisées dans des segments homogènes ou omettent de présenter les variations dans la distribution du bois mort par des transitions entre les styles fluviaux. Les travaux menés sur la rivière Mont-Louis montrent qu'au sein même d'un tronçon fluvial, des nuances doivent être apportées selon le style fluvial afin d'identifier les processus qui régissent la dynamique du bois mort. La reconnaissance de patrons de production, de transport et d'accumulation de bois tels qu'ils sont présentés dans ce mémoire peut soutenir les gestionnaires dans des démarches visant l'analyse, la prévention et la gestion des risques naturels associé au bois en rivière.

En milieu fluvial, la notion de bois mort est souvent associée à celle du risque potentiel pour les infrastructures et la sécurité, notamment l'accumulation de bois à la base de ponts (Martínez-Martínez *et al.*, 2017 ; Wohl *et al.*, 2016 ; Pagliara et Carcina, 2011). Or, sur la rivière Mont-Louis, le tronçon divagant se situe en amont des trois ponts, le plus en amont est situé au PK 5 400, à la limite entre le tronçon divagant et à méandres, le second est celui de la rue de l'église au PK 3 200, et le plus en aval est celui de la route 132, situé au PK 0 (figure 62).

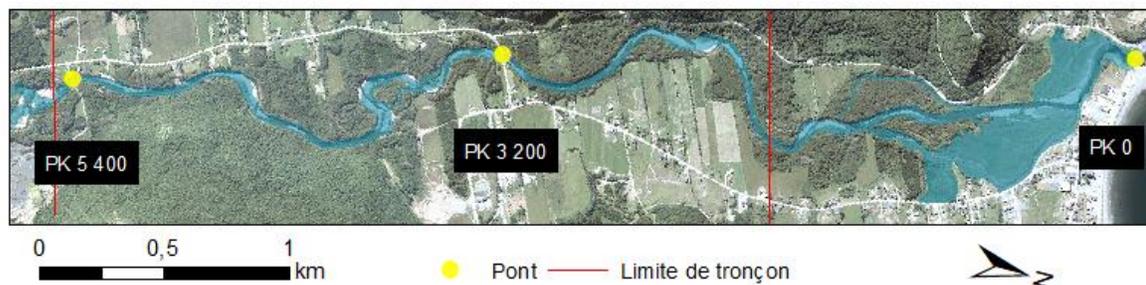


figure 62. Localisation des ponts

Les dimensions des ponts de la rivière Mont-Louis n'ont pas été mesurées, toutefois, aucun bois mort n'a été observé sur les infrastructures lors des campagnes de caractérisation. De plus, la présence sur le terrain durant la crue du printemps 2017, qui a généré des débits de $85 \text{ m}^3/\text{s}$, a permis d'observer des arbres matures transiter sans problème sous les ponts. Malgré la grande mobilité potentielle du bois dans le tronçon divagant, la présence d'infrastructures suffisamment larges pour laisser circuler le bois diminue considérablement les risques de bris ou d'inondation (Comiti *et al.*, 2016). Il n'est toutefois pas exclu que des arbres de grandes dimensions ou le transport concentré de grands volumes de bois engendrent l'obstruction du pont et l'ampleur du risque associé à la mobilité du bois près des infrastructures pourrait faire l'objet d'une étude spécifique.

En revanche, contrairement à l'idée généralement véhiculée, les grands secteurs d'accumulation de bois, plutôt que de représenter un danger pour la sécurité des infrastructures, permettent d'atténuer les risques d'obstruction en stockant une grande portion du bois produit sur les nombreux sites d'accumulations préférentiels (Kramer et Wohl, 2017). Le tronçon divagant permet donc d'accumuler un grand volume de bois que les crues moyennes mobilisent sur de courtes distances, jusqu'au site d'accumulation suivant. Le bois chemine ainsi lentement dans le tronçon divagant et n'atteint le pont à la limite du tronçon à méandres que par petits volumes. Une fois atteint, le bois s'accumule au sein de l'embâcle du site 3 où il est acheminé vers l'aval du tronçon, devenant facilement exportable. Il apparaît ainsi primordial d'identifier et d'exploiter les sites d'accumulation préférentiels, en laissant suffisamment d'espace pour que s'opèrent les processus fluviaux, pour maintenir le bois dans les cours d'eau, bénéficier des services écosystémiques associés et de limiter les risques associés à la mobilité du bois. Enfin, si des interventions visant le démantèlement d'embâcles devaient avoir lieu sur le tronçon divagant, leur efficacité serait modérée. En effet, la majorité du temps, le bois mort dans le chenal demeure relativement stable, car ce sont les grandes crues de faible récurrence qui permettent de mobiliser beaucoup de bois. Toutefois, la proportion de bois fraîchement recruté par l'érosion des berges est de loin supérieure aux volumes de bois stockés au sein du chenal lors du transport. La reconnaissance des processus qui contribuent au recrutement et à la mobilisation du bois permettrait donc de

mettre en place des stratégies de gestions adéquates et durables, tout en réduisant les coûts associés à des interventions moins efficaces. L'établissement d'un bilan ligneux, qu'il soit complet ou partiel, permet notamment d'adresser quantitativement la dynamique du bois en rivière, de cibler les tronçons susceptibles d'accumuler de grands volumes de bois et de cibler les processus qui contribuent à intégrer du bois au cours d'eau.

5.2 ÉVOLUTION INTERANNUELLE ET DECENNALE

L'analyse de la dynamique du bois mort à l'échelle interannuelle permet de distinguer des secteurs propices à la production, au transport et à l'accumulation du bois mort. Malgré une certaine mobilité, la formation d'embâcles de bois mort se produit dans les mêmes tronçons entre les deux années. Il est même possible de raffiner l'échelle d'analyse et d'identifier des sous-secteurs qui maintiennent une dynamique distincte de celle du tronçon homogène. Toutefois, cette information traduit un portrait statique dans le temps de la dynamique du bois mort. Pour évaluer la variabilité temporelle, il devient rapidement essentiel d'élargir l'échelle d'analyse et de s'intéresser à la distribution du bois mort et au bilan ligneux de manière pluriannuelle et décennale.

En 2004, un processus de caractérisation des embâcles de bois mort sur la rivière Mont-Louis a eu lieu (Hébert, 2006). Sur le même secteur d'études, 14 embâcles ont été inventoriés (annexe II). Les campagnes de terrain de 2015 et 2016 ont permis de caractériser plus de 200 embâcles chaque année. Cette grande différence est probablement liée à des choix méthodologiques ainsi qu'à la définition d'un embâcle, qui diffère très probablement de celle utilisée pour le projet actuel. Toutefois, l'année 2004 est marquée par une crue printanière excédant $120 \text{ m}^3/\text{s}$. En période de grande crue, le cours d'eau tend à concentrer les volumes de bois (Kraft *et al.*, 2011 ; Gurnell, *et al.*, 2002). Il est donc probable que de grands volumes de bois aient été produits et concentrés au sein de volumineux embâcles qui ont été identifiés lors de leur caractérisation. De plus, de ces 14 embâcles, 8 sont situés au sein du tronçon divagant, ce qui représente 57 % du nombre d'embâcles. En 2015 et 2016, 66 % du nombre

total d'embâcles recensés se situaient au sein du même tronçon. Malgré que la méthodologie et la notion d'embâcle différent, les proportions de bois mort dans le tronçon appartiennent au même ordre de grandeur. Ainsi, certaines tendances se dessinent et confirment que le secteur divagant est propice à l'accumulation de bois et que les autres agissent plutôt à titre de zone de transport.

Dans un contexte académique, en 2014, un groupe d'étudiantes et d'étudiants a eu à caractériser les embâcles de bois mort sur la rivière Mont-Louis. En utilisant une méthodologie similaire, leurs résultats indiquent que 84 embâcles de bois mort ont été identifiés et que 1 500 m³ de bois avaient été mesurés (Tremblay *et al.*, 2014). La forte majorité des embâcles recensés était située au sein du tronçon divagant ainsi que dans le sous-secteur du site 3 (annexe III). Les foyers d'accumulations identifiés sont ainsi cohérents avec les zones identifiées par Hébert (2006). La quantité d'embâcles identifiés en lien avec les volumes de bois mesurés contrastent toutefois largement les observations effectuées lors des campagnes de caractérisations des étés 2015 et 2016. Alors que les volumes estimés appartiennent au même ordre de grandeur, le nombre d'embâcles est largement inférieur. Deux hypothèses permettent d'adresser ce phénomène, la première est orientée vers les contraintes de temps et les choix méthodologiques et la seconde relève des processus associés à la mobilité du bois.

Comme cet atelier a été réalisé dans un contexte académique, les objectifs visaient principalement à initier les étudiants (es) à de nouvelles problématiques, de nouvelles méthodes de travail et de nouveaux cadres d'analyse plutôt qu'à recueillir de l'information scientifiquement exploitable. Dans ce contexte, les contraintes de temps étaient importantes et la caractérisation des embâcles a dû être effectuée de façon simultanée par deux équipes différentes. La méthode dicte que les embâcles de bois morts doivent être mesurés selon les axes d'un cube, or sur le terrain, les accumulations de bois sont généralement de forme imparfaite et implique un niveau d'interprétation lors de la prise de mesure. Il est donc possible que les deux équipes, face à des morphologies d'embâcles variées, aient interprétées de manière différente les dimensions à noter, impliquant une marge d'erreur supplémentaire.

Les contraintes de temps peuvent aussi mener à adopter des critères légèrement différents afin d'accélérer le processus. Ainsi, il est possible que les plus petits embâcles (nombreux en 2015 et 2016) aient été délaissés lors de la caractérisation de 2014. Ainsi, on retrouverait un nombre d'embâcles largement inférieur, mais un volume similaire, car le volume des petits embâcles influence peu les volumes totaux retrouvés sur l'ensemble du cours d'eau.

La seconde hypothèse s'explique plutôt par la dynamique du bois mort en elle-même. En juillet 2014, la tempête poste tropicale Arthur s'abat sur la Gaspésie, laissant plus de 100 mm de pluie en 24 h (Environnement Canada, 2014). De Sainte-Anne-des-Monts à Saint Maxime-du-Mont-Louis, ces précipitations ont eu des effets majeurs sur les cours d'eau, provoquant une onde de crue majeure qui a engendré des inondations dans certains secteurs et l'érosion de grandes superficies de plaine alluviale. La puissance dégagée par les grands débits permet de mobiliser de grands volumes de bois et l'augmentation des niveaux d'eau diminue les effets de la morphologie du cours d'eau sur le transport du bois.

Considérant la grande proportion du linéaire de bande riveraine et de ripisylve, particulièrement dans le tronçon divagant, de grands volumes de bois mort ont été introduits au chenal lors de cette crue. En raison de l'image partielle de 2014, les taux de migration et les apports en bois pour la période 2004 à 2014 sont largement sous-estimés, car plus du tiers du tronçon divagant est manquant. Le bois recruté a donc pu être accumulé dans un nombre restreint d'embâcles avant la caractérisation qui a eu lieu en octobre. Inversement, les crues plus faibles contribuent peu à l'érosion des berges et au recrutement de bois mort, mais mobilisent le bois accumulé au sein du chenal et les redistribuent sur d'autres sites d'accumulations préférentiels (Gurnell *et al.*, 2002). La crue du printemps 2015 est estimée à 55 m³/s secondes, environ 16 m³/s sous la moyenne historique. Elle a ainsi pu déloger du bois des embâcles accumulés suite au passage d'Arthur pour les disperser en de nombreux embâcles de plus faibles volumes.

Kramer et Wohl (2017) proposent d'ailleurs que les plus grands volumes de bois sont transportés épisodiquement, lors de grandes crues de faible récurrence, mais que des débits inférieurs au débit plein bord peuvent mobiliser et redistribuer jusqu'à 30 % du bois stocké

au sein du chenal. Sous des conditions de débit plein bord, Iroumé *et al.* (2015) ont observé une mobilité de 28 % des volumes de bois sur leur site d'étude. Suite à un évènement de pluie, la crue de juin 2016 a engendré des débits supérieurs à la crue printanière et ceux-ci sont estimés à 34 m³/s, mais des observations terrain ainsi qu'une mesure de débit réalisée 5 jours plus tard (25 m³/s) portent à croire que le débit était supérieur, sans toutefois atteindre le niveau plein bord. La caractérisation des embâcles de bois au cours de l'été 2016 a permis d'identifier que 22 des 115 parcelles de 100 m ont connu une diminution de leur volume de bois. Cette diminution est estimée à 460 m³ de bois, ce qui représente 26 % des 1 800 m³ mesurés en 2015. Les variations interannuelles de volumes de bois mort de la rivière Mont-Louis pour des débits plein bord ou inférieur sont ainsi cohérentes avec la littérature scientifique.

Les résultats issus de la caractérisation des embâcles au cours des années 2015 et 2016 montrent que les volumes de bois au sein du chenal principal de la rivière Mont-Louis varient à l'intérieure d'une même année. Au total, une diminution de 257 m³ de bois a été calculée. Le tronçon divagant est celui affichant la plus grande différence de bois, tant en termes de volume qu'en termes de proportion du volume initial. Le tronçon à méandres affiche la seconde perte de volume de bois la plus importante, mais la majorité du bois évacué provient du sous-secteur alluvial du site 3. Dans ces deux environnements, les parcelles de 100 m ayant connu une augmentation de leur volume de bois sont généralement précédés par des segments ayant connu une diminution de leurs volumes. Ceci suggère que la distance sur laquelle le bois mort est mobilisé au cours d'une année est relativement courte. Toutefois, il est impossible d'établir une relation directe entre le gain et la perte de volume de ces parcelles. En effet, la majeure partie du bois mobilisé se met en mouvement à l'amorce de l'augmentation des niveaux d'eau, jusqu'au pic de crue et tendent à s'accumuler lorsque les niveaux d'eau redescendent (Schenk *et al.*, 2014 ; Shields et Alonso, 2012). La mobilité du bois dépend donc de l'ampleur et de la durée des crues. Il est ainsi possible que le bois ait été initialement transporté sur une distance inconnue et que d'autres bois morts provenant de plus loin en amont se soient accumulés sur ces secteurs à cause de leurs prédispositions géomorphologiques. Néanmoins, cette observation est cohérente avec celles de

Bocchiola *et al.* (2006) et Curran (2010). Ces auteurs soutiennent que le bois mort mobilisé tend à s'accumuler sur le prochain obstacle rencontré. Or, les secteurs où les variations de volumes ont été observées révèlent une concentration d'ilots végétalisés, de chenaux secondaires, une augmentation de la largeur du cours d'eau ainsi que des bancs d'accumulation et d'autres embâcles de bois mort qui peuvent capter le bois en transit.

Enfin, l'établissement d'un bilan ligneux partiel, même sur une courte période d'un an, permet de confirmer les fonctions de chacun des tronçons homogènes. Les tronçons linéaire et à méandres agissent à titre de zone de transport et le tronçon divagant agit comme zone de production et d'accumulation de bois. Les volumes entrants peuvent être estimés à partir des taux de recrutement annuels moyens et les volumes sortant, à partir de la variation interannuelle du volume de bois mort du tronçon. Cependant, les apports provenant du bassin versant en amont du territoire d'étude ne peuvent être quantifiés. Toutefois, Curran (2010) estime que dans les chenaux où la mobilité du bois n'est pas déterminée par la taille des arbres, la distance sur laquelle le bois est mobilisé correspond à la distance entre les foyers d'accumulation. Le bois est donc transporté d'un site d'accumulation (méandre, bancs, ilots) à un autre site en aval, jusqu'à ce que la crue suivante le remobilise. De plus, en raison de la stabilité du tronçon linéaire, ses apports en bois sont considérés comme nuls. Ainsi, les apports de l'amont du bassin versant sont susceptibles de s'être accumulés sur les ilots végétalisés du tronçon linéaire ou en amont du tronçon divagant. La grande incertitude engendrée par les apports de l'amont et l'image partielle de 2014 porte à orienter l'interprétation du bilan ligneux partiel sur le tronçon divagant et le tronçon à méandres (figure 63). Entre 2004 et 2014, la production annuelle de bois mort du tronçon divagant est estimée à 330 m³. Entre les deux années de suivi (2015 et 2016), une diminution de 155 m³ a été observée, ce qui signifie que les volumes produits ont été évacués avec une portion du bois stocké, car les crues n'ont pas excédé le niveau plein bord entre les deux recensements. Ceci représente un apport d'au moins 485 m³ de bois au tronçon à méandres en plus de sa propre production, estimée à 77 m³ par an. Un potentiel d'au moins 562 m³ de bois a été introduit dans cette portion du cours d'eau en 1 an.

Or, les volumes de bois contenu dans ce tronçon du cours d'eau sont passés de 553 m³ en 2015 à 479 m³ en 2016, pour une diminution 74 m³ de bois. Au total, ce tronçon aurait donc évacué 636 m³ de bois en l'espace d'une année. Enfin, ces 636 m³ de bois sont acheminés à l'estuaire, qui produit 14 m³ de bois, portant le total à 650 m³, mais sa variation interannuelle est de -32 m³, portant le total de bois mort exporté du système à 681 m³ de bois.

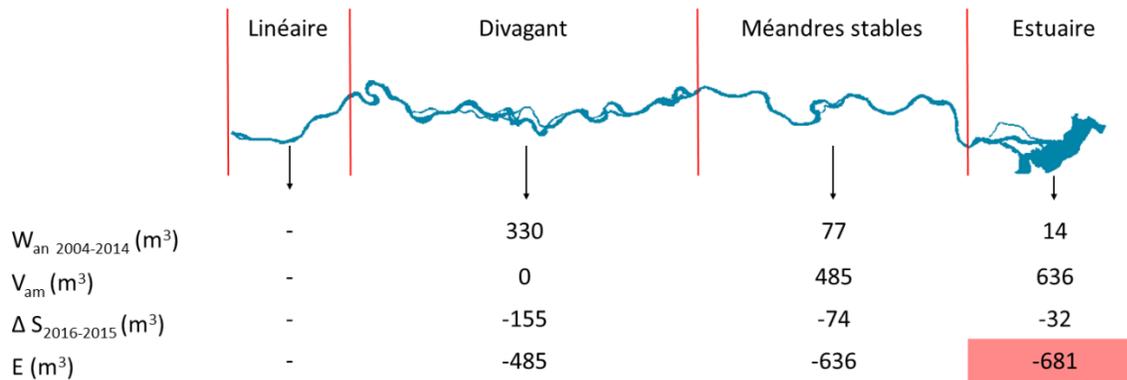


figure 63. Estimation du bilan ligneux partiel de la rivière Mont-Louis, entre 2004 et 2016 ; W_{an} : production annuelle moyenne ; V_{am} : volumes provenant de l'amont ; $\Delta S_{2015-2016}$ Variation interannuelle des volumes de bois stockés ; E : volumes exportés

Ce bilan partiel témoigne de la grande mobilité du bois au sein du tronçon à méandres stables, mais aussi de la grande capacité à recruter des arbres provenant de la ripisylve du tronçon divagant. Toutefois, l'utilisation du taux de recrutement annuel peut représenter une surestimation des volumes réellement produits. Les fortes crues tendent à recruter plus de bois que les crues moyennes (Golladay *et al.*, 2007). Les crues des années 2010 et 2014 (les effets d'Arthur ne sont pas répertoriés sur le diagramme de crue) ont donc engendré beaucoup d'érosion et ont contribué à recruter de grands volumes de bois provenant des berges alors que les volumes de bois recrutés au cours des autres années sont plus modestes. Néanmoins, les configurations hydrogéomorphologiques du tronçon tendent à corroborer qu'il s'agit bien d'une zone de transport sur la majorité de sa longueur, mais qu'il existe une grande zone d'accumulation de bois et de sédiments au secteur du site 3.

5.3 EFFETS MORPHOLOGIQUES DES EMBACLES DE BOIS MORT

Les relevés topographiques réalisés sur chacun des sites au cours des étés 2015 et 2016 ont montré que des variations de superficies de bancs d'accumulation, de profondeur de fosses et de thalweg se sont manifestées entre les deux années. Malgré une perte de 61 m³ de bois sur le site 1 et de 22 m³ au sein même de l'embâcle à l'étude, relativement peu de changements se sont produits entre les deux années de suivi (figure 64). En fait, la longueur ainsi que la largeur de l'embâcle sont demeurées très similaires. La perte de volume s'explique donc par une diminution importante de la hauteur de l'embâcle. Comme la majeure partie de l'embâcle est situé sur un banc d'accumulation et que des arbres massifs assurent la solidité de la structure, il est peu probable que la perte de hauteur soit liée au transport du bois qui constitue la portion basale de l'embâcle. L'augmentation des niveaux d'eau aurait plutôt permis la mobilisation d'un certain volume bois accumulé sur le dessus de l'embâcle, laissant les troncs clés bien ancrés sur le lit et le banc d'accumulation en aval. De plus, la fosse associée à l'embâcle à l'étude a conservé une superficie équivalente entre 2015 et 2016, signifiant que les troncs clés qui ont engendré sa formation sont toujours présents et que la distance entre le bois et le fond de la fosse est demeurée la même (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2016).



figure 64. Embâcle du site 1 ; la flèche indique l'embâcle ainsi que le sens de l'écoulement

Au site 2, une dynamique opposée se manifeste (figure 65). L'embâcle à l'étude, situé sur une berge concave en érosion, était quasi perpendiculaire à l'écoulement et faisait face à un imposant banc d'accumulation. Il a perdu 2 m³ de bois entre 2015 et 2016, soit 26 % de son volume, mais cette perte de bois se répercute sur la morphologie fluviale. En 2015, l'embâcle était composé essentiellement d'arbres structurants provenant de la berge gauche, sur lesquels se sont accumulés des bois morts provenant de l'amont au cours d'une crue (figure 66a). Ces plus petits morceaux de bois ont pour effet de diminuer les interstices entre les troncs clés et réduire la porosité de l'embâcle (Montgomery *et al.*, 2003). Selon Manners *et al.* (2007), le degré de porosité des embâcles est une variable souvent négligée par les méthodes classiques de caractérisation des embâcles de bois mort.

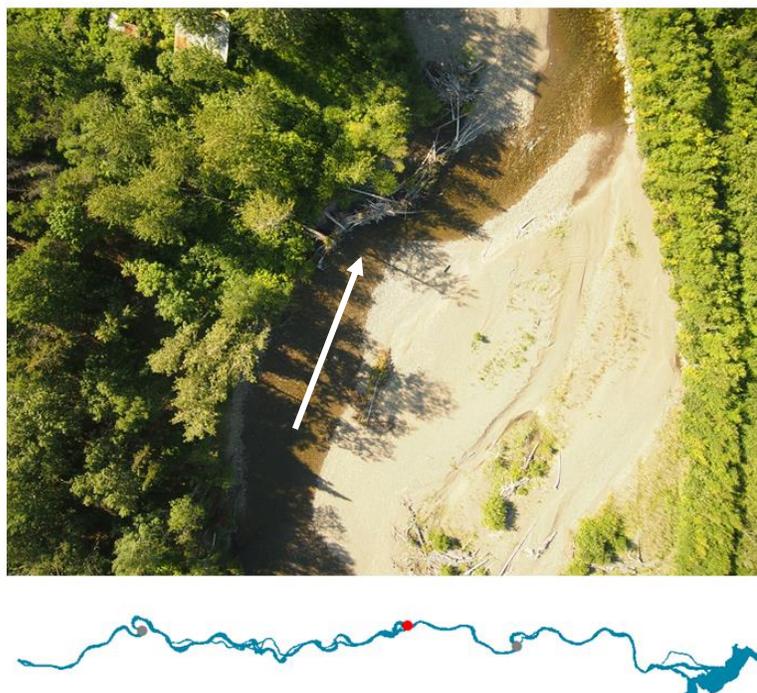


figure 65. Embâcle du site 2 ; la flèche indique l'embâcle ainsi que le sens de l'écoulement

Or, les embâcles les plus denses, ceux où l'espace entre les troncs clés est réduit par la présence de fragments de bois, de branchage et de matières organiques, obstruent plus efficacement le chenal et altèrent la distribution des vitesses de manière beaucoup plus efficace. Aucune donnée hydraulique n'a été recueillie au site 2, mais les configurations de l'embâcle, du chenal ainsi que des observations terrain soutiennent que l'obstruction causée par l'embâcle altérerait l'écoulement de façon majeure.

En général, dans les chenaux non obstrués, les vitesses maximales se situent en marge de la berge concave, à l'aval de l'apex d'un méandre. Le cisaillement atteint sa valeur maximale et l'érosion de la berge est le plus efficace (Daniels et Rhodes, 2003). Or, c'est à cet endroit qu'était situé l'embâcle de bois. La berge derrière est donc protégée des forces hydrauliques et l'écoulement est redirigé selon des axes préférentiels dictés par l'orientation du bois, ici, vers le centre du chenal. De plus, l'obstruction causée par le bois peut engendrer

le ralentissement de l'écoulement au sein du thalweg et le refoulement de l'eau (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2016 ; Thorne et Furbish, 1995). Le refoulement diminue la capacité du transport et accentue l'accumulation des sédiments en amont de l'embâcle (Wohl et Scott, 2016 ; Gippel *et al.*, 1996).



figure 66. Embâcle du site 2 a) 2015 ; b) 2016

La crue de juin 2016 était inférieure aux crues moyennes, mais elle a suffi pour procéder au démantèlement naturel de l'embâcle (figure 66b). Ainsi dépouillés de la fraction de bois morts la plus fine, les troncs clés constituaient en 2016 l'essentiel de l'embâcle. La diminution du volume de bois et l'augmentation de la porosité de l'embâcle se répercutent sur la distribution des forces hydrauliques et la morphologie du chenal. L'effet de

refoulement est minimisé, l'écoulement s'accélère en amont et les sédiments préalablement accumulés dans le chenal sont incisés (Beschta, 1979). De plus, la fosse engendrée par l'embâcle de 2015 a été partiellement comblée de sédiments. La présence de l'embâcle dense, au cours de la première année de terrain limite la progression de l'eau et concentre les forces hydrauliques entre le bois et le lit, ce qui résulte par une augmentation des vitesses et de la capacité de transport du cours d'eau. En 2016, la diminution du volume de bois et l'augmentation de la porosité de l'embâcle permettent à une plus grande portion de l'eau de s'écouler librement sur la colonne d'eau. Ceci se traduit par la diminution de la capacité de transport forçant la déposition des sédiments dans la fosse. Cette observation est cohérente avec celles de Warren *et al.* (2013), qui ont noté que le nombre de fosses sur leur secteur d'étude est passé de 6 à 2 suite au retrait d'embâcles. Enfin, l'accélération de l'eau semble initier la formation d'un chenal de dissection entre la berge et le banc en aval de l'embâcle. Cette interprétation doit toutefois être réalisée de manière prudente, car si en effet, le modèle numérique de terrain réalisé semble indiquer une profondeur supérieure en 2016, la différence entre les deux années demeure mince. Afin de pouvoir être plus affirmatif, la quantification des volumes de sédiments évacués et une analyse de l'évolution topographique à une échelle plus fine sont nécessaires.

Sur le site 3, l'imposant embâcle est logé contre la berge concave d'un méandre, ce qui limite l'érosion et obstrue deux chenaux secondaires qui sillonnent la plaine alluviale sur une centaine de mètres (figure 67). L'analyse des photographies aériennes historiques montre que ces chenaux se sont formés entre 1981 et 1992 (figure 68). La résolution des images est toutefois insuffisante pour déterminer avec certitude si du bois était présent en 1981, avant la formation des chenaux. Deux hypothèses contrastées sont proposées pour expliquer la formation de ces chenaux. La première est que les chenaux secondaires ont été formés avant l'embâcle et qu'ils aient contribué à initier sa formation en agissant comme foyers d'accumulation (Wohl, 2013). Cette hypothèse est intéressante, car aucun embâcle n'a été identifié sur le secteur lors de la caractérisation des embâcles de bois mort de la rivière Mont-Louis en 2004 (Hébert, 2006). Or, les embâcles sont des entités mobiles qui ont pu se former, se démanteler et se reformer entre les années 1980 et 2004. De ce fait, il est aussi

possible que l'embâcle ait été formé contre la berge d'abord, que le bois mort ait favorisé le rehaussement du niveau de l'eau et provoqué des débordements qui ont incisé la plaine alluviale en exploitant des voies d'écoulement préférentielles (Abbe et Montgomery, 2003 ; Webb et Eskiné, 2003 ; Gurnell *et al.*, 2002). La seconde hypothèse est particulièrement intéressante, car la période allant de 1981 et 1992 est caractérisée par des crues moyennes et faible. Il semble donc peu probable que des débordements se produisent de manière suffisamment importante pour entailler la plaine alluviale.



figure 67. Embâcle du site 3 ; la flèche indique l'embâcle ainsi que le sens de l'écoulement

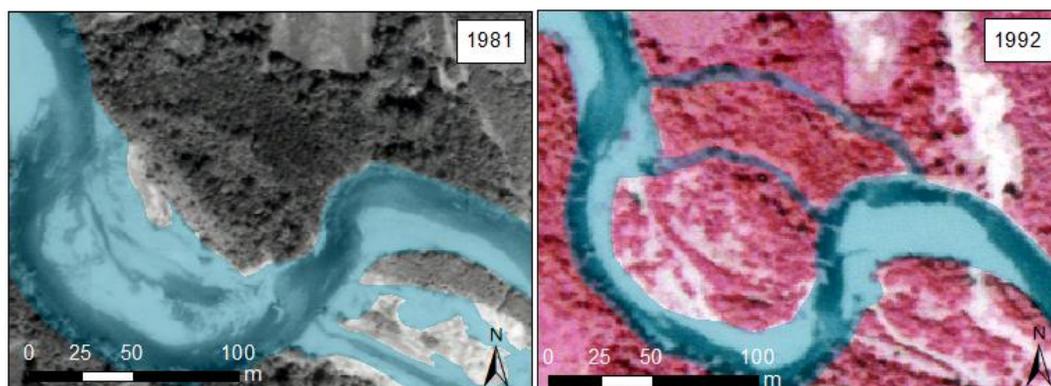


figure 68. Formation de chenaux secondaires sur le site 3

Par ailleurs, le témoignage d'une personne rencontrée près du site révèle qu'un gros tronç a été accumulé à l'amont de l'embâcle lors de l'été 2015, peu avant les relevés topographiques. Ses effets sur la topographie du lit sont donc limités au moment où les mesures ont été prises. En 2016, la présence de ce bois mort a permis d'engraisser le banc d'accumulation déjà volumineux qui se situe au centre du chenal. En effet, le bois représente un obstacle et une source de rugosité additionnelle qui favorisent l'accumulation des sédiments diminuant ainsi la profondeur d'eau (Wohl et Scott, 2016 ; Gippel *et al.*, 1996). L'écoulement a été dévié vers la berge gauche et la portion du chenal située le long de l'embâcle s'est partiellement comblé de sédiments. Entre les deux années de suivi, l'embâcle a connu une réduction de son volume de l'ordre de 30 m^3 (8 %). Or, l'accumulation de sédiments décrite est plutôt associée à l'ajout de bois. Il semble donc que le tronç clé introduit en 2015 pourrait être à l'origine de ces changements morphologiques. En se situant à l'amont de l'embâcle, il devient le premier obstacle rencontré par l'écoulement de l'eau. Il divise l'écoulement de l'eau dont une partie s'écoule au centre du chenal et l'autre longe toujours l'embâcle. L'effet combiné du tronç, qui freine l'écoulement en amont et de la rugosité de l'embâcle réduit les vitesses d'écoulement et permet l'accumulation de sédiments dans le thalweg. C'est pourquoi sa profondeur a diminué entre les 2015 et 2016.

De plus, une concentration de bois s'est formée au centre de l'embâcle en 2016 (figure 69). Elle obstrue la portion du chenal entre la berge droite et le banc central. De la même façon que le tronc clé de l'amont, cette accumulation de bois diminue la capacité de transport et contribue à l'accumulation de sédiments dans le chenal principal.

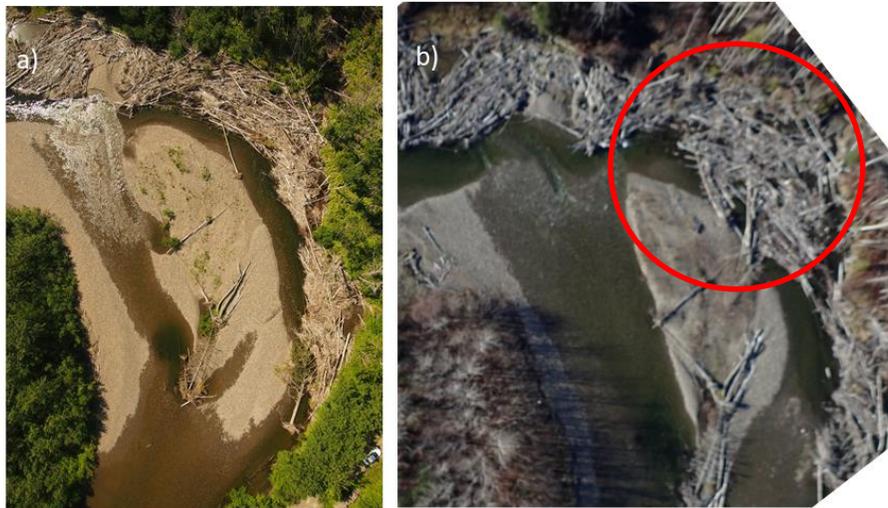


figure 69. Densification de l'embâcle, a) 2015, b) 2016 ; en rouge, le secteur où le bois s'est concentré

L'intérêt des sites 2 et 3 est grand, car les constats effectués suggèrent que la position du bois joue un rôle important sur le transit sédimentaire, même si les volumes de bois sont relativement faibles. En effet, en identifiant que l'effet du bois mort sur la morphologie fluviale est maximal pour les embâcles obstruant complètement l'écoulement, Massé (2014) proposait qu'il est peu probable que les embâcles de petite taille exercent un contrôle significatif sur la variabilité morphologique du chenal. Or, l'évolution interannuelle de la topographie du lit indique que des changements morphologiques sont survenus à l'intérieur même d'une année, malgré le faible volume contenu dans l'embâcle du site 2 et le faible volume de bois évacué. Ces changements sont certes modestes, mais sur la rivière Mont-Louis, la majorité des embâcles de bois mort sont composés d'un petit volume de bois et l'effet cumulatif de chacun d'eux le long du corridor fluvial mériterait d'être quantifié. La

littérature scientifique documente assez bien les effets des embâcles de bois, sur la morphologie du lit et la dynamique sédimentaire à l'échelle locale (Ravazzalo *et al.*, 2015 ; Moulin *et al.*, 2011 ; Webb et Eskrine, 2003 ; Montgomery *et al.*, 2003 ; Piégay et Gurnell, 1997 ; Keller et Swanson, 1979). Peu d'études ont toutefois tenté d'adresser la relation entre la dynamique du bois mort et les bilans sédimentaires à l'échelle du tronçon fluvial ou du bassin versant (Parker *et al.*, 2017 ; Wohl et Scott, 2016). Pourtant, en plus de retenir les sédiments au sein même du chenal, le bois mort peut augmenter la fréquence et la durée des inondations, ce qui permet le stockage d'une quantité substantielle de sédiments sur la plaine alluviale (Wohl, 2013). Selon Latterell et Naiman (2007), même les bois morts individuels sont susceptibles d'avoir un impact significatif sur la dynamique d'un cours d'eau. Ainsi, il est proposé que sur une période de temps d'une ou plusieurs décennies, la succession de nombreux petits embâcles pourrait altérer la dynamique sédimentaire de façon suffisamment importante pour engendrer des modifications de la morphologie fluviale.

Sur la rivière Mont-Louis, les sources de bois sont en augmentation depuis quelques décennies. L'arrêt des activités forestières de la *Mont-Louis Seigniorie*, et de l'agriculture de subsistance dans la vallée ont contribué à l'augmentation des superficies boisées de la ripisylve et à la présence d'une bande riveraine sur les berges (Pelletier, 2012). En raison de la grande mobilité de la rivière Mont-Louis, l'augmentation des superficies de ripisylve se traduit par une augmentation des taux de recrutement. Il est donc probable que l'apport d'une quantité croissante de bois dispersé sur les nombreux sites d'accumulation préférentiels entretienne une boucle de rétroaction positive qui lie la dynamique du bois mort et la dynamique fluviale (figure 70). D'abord, la présence de bois mort dans le cours d'eau permet de ralentir l'écoulement et d'augmenter la sinuosité du chenal. Cette augmentation se traduit par un linéaire de berge plus grand et une plus grande source de bois. La formation d'embâcles au sein de la rivière peut forcer l'accumulation de sédiments et initier la formation de bancs de gravier, augmenter leur superficie et à augmenter les probabilités d'avulsions (Abbe et Montgomery, 2003). Ces bancs forcent la migration du cours d'eau et représentent des sites d'accumulations préférentiels sur lesquels le bois mort est stocké. En redirigeant l'écoulement, le bois mort peut forcer l'élargissement du cours d'eau et créé des

Les effets décrits caractérisent déjà l'évolution de la dynamique de la rivière Mont-Louis. L'analyse de la trajectoire hydrogéomorphologique montre que l'augmentation de la sinuosité, de l'indice de tressage et des largeurs a été initiée au cours des années 1980. Il est toutefois difficile d'estimer si les ajustements morphologiques se maintiendront jusqu'à ce qu'une perturbation comme une série de crues majeures ou une modification de l'occupation du territoire se produise ou si un ralentissement de l'activité géomorphologique est à anticiper. Deux propositions visant à projeter l'évolution de la dynamique fluviale de la rivière Mont-Louis dans le temps sont ainsi formulées.

La première proposition suggère que l'évolution de la morphologie fluviale est principalement dépendante du régime hydrologique. Faustini et Jones (2003) ont montré que les chenaux comportant du bois mort manifestent moins de changements morphologiques sur leurs sections transversales que les chenaux qui en sont dépourvus lors de crues moyennes, mais qu'ils réagissent de manière similaire lors de crues de récurrence 10-25 ans. Il est donc possible que les prochaines crues majeures de la rivière Mont-Louis agissent comme une remise à zéro et que la morphologie du cours d'eau évolue de façon cyclique entre les périodes de grandes crues.

Ces ajustements sont toutefois dépendants de la dynamique propre à chacun des tronçons homogènes identifiés (figure 71). Le tronçon linéaire est très peu affecté par l'augmentation des volumes de bois dû à sa stabilité et à sa capacité à évacuer le bois. Le tronçon divagant est celui où les ajustements morphologiques du cours d'eau sont les plus grands. L'analyse de la trajectoire hydrogéomorphologique de ce tronçon au cours des 50 dernières années a permis de montrer qu'il est caractérisé par l'augmentation des largeurs, du nombre de chenaux et de sa sinuosité et que ces indicateurs sont généralement supérieurs à ceux des autres tronçons. En ce sens, la projection de l'évolution de la dynamique fluviale suggère que les ajustements morphologiques à anticiper sont grands, surtout qu'il s'agit du tronçon qui accumule le plus de bois. Le tronçon à méandres stables pourrait manifester des changements morphologiques, surtout au niveau des largeurs, et particulièrement dans le sous-secteur alluvial entre les PK 4 000 et PK 3 100. Enfin, l'influence du bois mort ne

semble pas affecter la dynamique de l'estuaire, en raison de la perte de puissance de l'écoulement fluvial dans un environnement très large où la pente est très faible ainsi qu'aux marées qui permettent d'évacuer du bois mort.

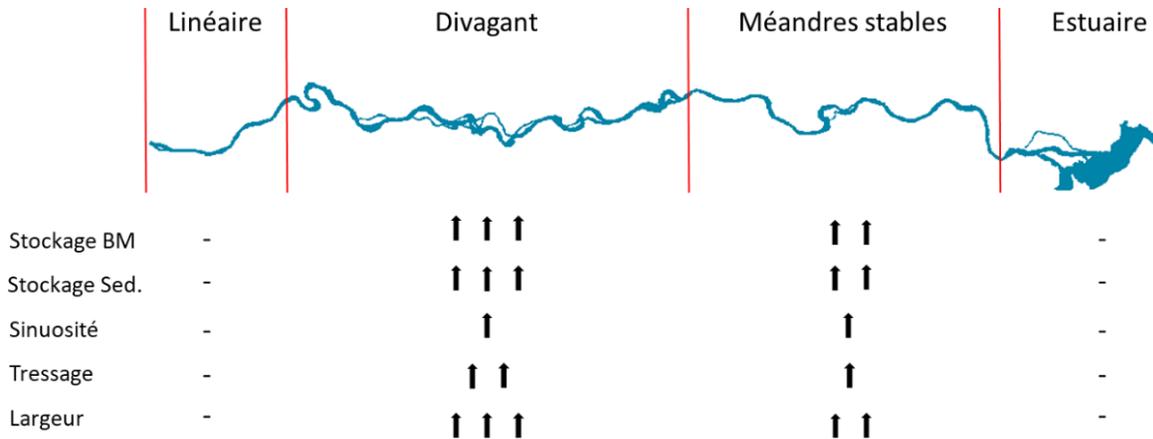


figure 71. Ajustements morphologiques potentiels du cours d'eau en présence de bois par tronçon homogène, le nombre de flèches indique l'ampleur des ajustements

La deuxième proposition suggère que les ajustements morphologiques en cours mènent le cours d'eau vers un état d'équilibre. Gurnell *et al.* (2002) soulignent que les cours d'eau caractérisés par la présence de bois mort sont généralement plus stables que ceux qui n'en ont pas. Il est donc aussi possible que la rivière Mont-Louis soit en ajustement, dû au retour du bois qui a suivi la période de « nettoyage » durant la drave, et qu'elle atteigne un état « d'équilibre conditionné¹ ». Cet état est décrit par Brooks et Brierley (2002) comme un équilibre conditionné par la présence de végétation et de bois mort au sein du système fluvial. Il est atteint lorsque la présence le bois mort et la végétation conditionne l'écoulement de

¹ Traduction libre de Brooks et Brierley (2002). Le terme utilisé par les auteurs est *mediated equilibrium*. Ils considèrent cet état d'équilibre atteint lorsque le bois mort agit comme médiateur dans les interactions entre l'écoulement de l'eau, la dynamique sédimentaire, la dynamique du bois mort de manière à conditionner le style fluvial.

l'eau et la dynamique sédimentaire à l'échelle du tronçon fluvial. « L'équilibre conditionné » est gouverné par trois principes généraux. Le premier concerne la résistance aux changements morphologique, car la présence de bois mort dans le chenal et de bois enfoui dans le chenal permet de limiter l'incision du cours d'eau et la végétation riveraine ralentit la migration du chenal en augmentant la cohésion des berges. Le second concerne la réduction de l'énergie dégagée pendant les crues. Au sein du chenal, le bois mort augmente la rugosité de manière très importante, ce qui ralentit l'écoulement et diminue l'énergie dégagée par le cours d'eau et sa capacité à initier des changements morphologiques significatifs. Le troisième concerne la capacité du cours d'eau à retrouver l'état d'équilibre s'il subit une perturbation. Une telle capacité peut par exemple se traduire par du bois mort qui permet la colonisation végétale de bancs d'accumulations dénudée lors d'une crue majeure. Cette repousse se transforme en végétation arborescente qui représente à la fois une source de bois et un élément de rugosité qui entretient l'état d'équilibre.

Enfin, il est aussi possible que ces deux propositions soient vraies et que la nuance entre les deux se trouve dans l'échelle de temps qui régit le cadre d'analyse. Il est en effet probable que les épisodes de fortes crues modifient la forme et la trajectoire du cours d'eau à une échelle pluridécennale, il serait ainsi nécessaire d'effectuer un suivi sur une plus grande période de temps afin de cibler avec plus de certitude les éléments qui influencent l'évolution du cours d'eau. La section suivante met en évidence que la trajectoire hydrogéomorphologique est le résultat de l'interaction entre le régime hydrologique et les sources de bois. Néanmoins, il est aussi probable que ces ajustements cycliques s'imbriquent dans une trajectoire plus large qui mènent le cours d'eau vers un état d'équilibre conditionné par la présence de bois mort et de végétation.

5.4 TRAJECTOIRE ECOHYDROGEOMORPHOLOGIQUE

5.4.1 L'influence du bois mort sur l'évolution du style fluvial

Le bois mort dans les systèmes fluviaux influence la structure de l'écoulement, le transit sédimentaire ainsi que le développement de formes fluviales (Gurnell *et al.*, 2002). Au cours des dernières décennies, une série de perturbations naturelles et anthropiques ont permis de modéliser la manière dont ces interactions se manifestent sur la rivière Mont-Louis. Elles ont conditionné la quantité de bois introduit au système fluvial, la manière dont ils ont été distribués au sein du chenal et ultimement influencé la manière dont l'évolution du cours d'eau s'est manifestée à travers le temps.

Dans les cours d'eau alluviaux, l'apport en bois dépend principalement de la mobilité du chenal et de la disponibilité du bois, c'est-à-dire la présence de berges végétalisées (Comiti *et al.*, 2016 ; Gurnell et Petts, 2002). La rivière Mont-Louis a connu plusieurs épisodes de fortes crues au cours des dernières décennies. Depuis les années 1960, les volumes de bois mort introduits dans son chenal ont connu de grandes fluctuations, mais semblent être en croissance constante depuis les années 1980. De plus, les volumes produits au cours de la période 2004-2014 sont sous-estimés, car le tiers du tronçon divagant est manquant sur l'image satellite. Les apports en bois n'ont ainsi pas pu être quantifiés en totalité, mais il est raisonnable de croire qu'ils sont supérieurs au 421 m³ de production annuelle. Cette variabilité est largement due à l'occurrence de crues majeures et à l'augmentation du linéaire de bande riveraine arborescente.

Depuis 1955, des épisodes de fortes crues ont été recensés sur la rivière Mont-Louis. Elles sont responsables de l'apport massif en bois au cours de certaines périodes, comme ce fut le cas à la fin des années 1970, mais celles-ci se produisent sur un intervalle d'environ 10 ans, sur l'ensemble de la période d'étude, elles ne suffisent donc pas à elles seules à justifier l'augmentation de la production de bois.

À Mont-Louis, l'occupation historique du territoire a modifié de façon majeure les superficies boisées de la ripisylve, et donc la disponibilité du bois. Depuis l'époque de la colonisation, une agriculture de subsistance visant à nourrir les pêcheurs est pratiquée dans la vallée de Mont-Louis (Pelletier, 2012). Afin de maximiser le rendement agricole, les terres de la vallée étaient entièrement défrichées, ne laissant aucune végétation arborescente en marge de la rivière (figure 72).



figure 72. Vallée de Mont-Louis, date estimée, 1894, source anonyme (tiré de Pelletier 2012)

La diversification de l'économie entre les années 1924 et 1970 a diminué l'importance de cette pratique, si bien qu'en 1963, 32 % de la plaine alluviale était végétalisée, mais surtout, 66 % du linéaire de cours d'eau était caractérisé par une bande riveraine. Cette proportion demeure relativement constante jusque dans les années 80, mais l'augmentation de la sinuosité du cours d'eau se traduit par un linéaire de berge plus long. La longueur absolue de la bande riveraine est donc grandissante, ce qui représente une source de bois plus importante. Depuis les années 1990, le linéaire de bande riveraine est en constante évolution et excède 80 % du linéaire de berge en 2004 et les superficies boisées couvrent 50 % de la plaine alluviale. Cette tendance se maintient sans doute jusqu'en 2014, mais il est impossible de quantifier dans quelle mesure. En somme, l'augmentation des volumes de bois produits par la rivière Mont-Louis est largement dépendante de la source et des processus qui contribuent à leur intégration au système fluvial (figure 73). Toutefois, des

crues extrêmes peuvent engendrer une érosion de la plaine alluviale suffisamment grande pour introduire de grands volumes de bois, malgré une source moindre, comme ce fut le cas à la fin des années 1970. De plus, il est possible que les 9 000 m³ de bois recruté par la migration du chenal soient une sous-estimation des volumes réellement produits. En période de crues moyennes ou faibles, le bois accumulé dans les tributaires en tête de bassin versant est difficilement mobilisable, car il s'étend généralement d'une berge à l'autre et son contact avec l'écoulement fluvial est limité (Abbe et Montgomery, 2003). Les fortes crues dégagent toutefois suffisamment d'énergie pour déloger ou fragmenter le bois, ce qui permet sa mise en circulation. Wohl et Goode (2008) ont montré que dans ces environnements, les grandes crues permettent non seulement de mobiliser le bois accumulé au sein du chenal, mais aussi d'en recruter du nouveau. Au cours de la même crue, les stocks de bois sont donc évacués et renouvelés à la fois. Les quatre crues majeures survenues entre 1977 et 1981 ont ainsi pu acheminer au cours d'eau principal une quantité de bois qui serait demeuré stocké en amont en période de crues moyennes.

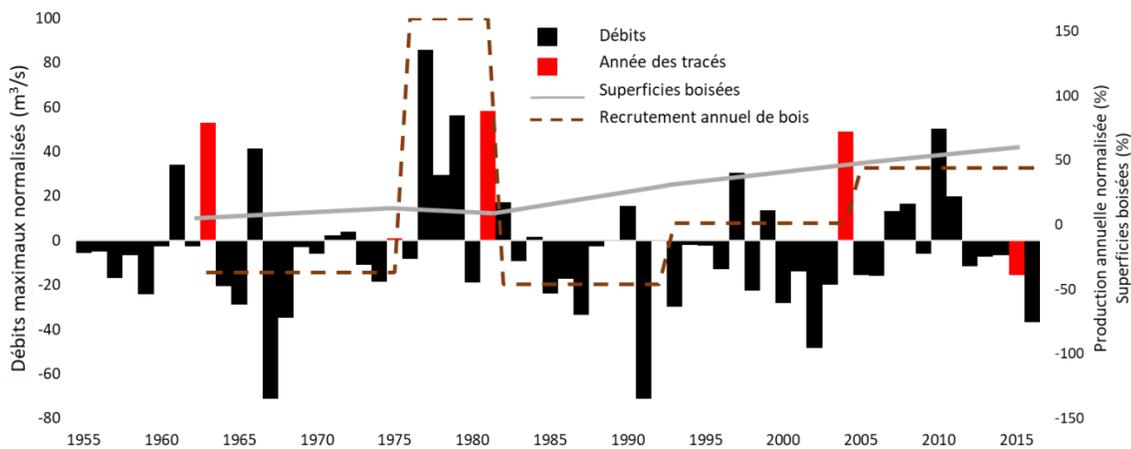


figure 73. Estimation de la production historique de bois en relation avec l'évolution des sources de bois et des débits maximaux annuels

Les taux de recrutement annuels estimés sont toutefois biaisés par la période de temps sur lesquels ils sont calculés ainsi que le nombre et la magnitude des crues qui se sont produites lors de la période. La production de bois est en effet largement corrélée avec les périodes de crues intenses de faibles récurrences (Kramer et Wohl, 2017). La puissance dégagée par le cours d'eau permet d'arracher la berge, d'introduire de grands volumes de bois au chenal et de transporter ceux-ci, car la largeur et la profondeur de l'écoulement sont généralement supérieures aux dimensions des arbres dans la Mont-Louis. Ces épisodes de crues favorisent aussi l'accumulation des volumes de bois mort au sein du chenal sur les sites d'accumulation préférentiels (Kraft *et al.*, 2011). Elles peuvent aussi avoir pour effet d'élargir le chenal de façon significative, altérant au passage le rapport entre le diamètre des arbres et la profondeur du chenal, ce qui limite le transport au cours des crues subséquentes (Comiti *et al.*, 2016). Inversement, les crues inférieures au niveau plein bord engendrent peu d'érosion et produisent peu de bois mort. L'essentiel du bois mobilisé provient du chenal (Kramer et Wohl, 2017). Ce type de crues permet de mobiliser le bois concentré dans les embâcles lors des crues intenses et de les redistribuer le long du corridor fluvial en de plus nombreux, mais moins volumineux embâcles (Gurnell *et al.*, 2002). Boivin *et al.* (2018) ont d'ailleurs développés une typologie des crues en lien avec la dynamique du bois mort, ils y identifient quatre types de crues dominantes. Les crues érosives permettent le recrutement du bois, les crues mobilisatrices redistribuent le bois accumulé au sein du chenal, les crues mixtes contribuent à la fois au recrutement et au transport et finalement, dans les zones tempérées froides, les crues glacielles recrutent peu de bois, mais mobilisent de grands volumes de bois, même lorsque les débits sont faibles. Les crues érosives sont généralement intenses, mais de plus courte durée, ce qui limite le transport du bois une fois qu'il est introduit au chenal. Inversement, les crues mobilisatrices peuvent être générées par des débits plus faibles, mais sont de plus longues durées, ainsi le taux de recrutement est plus faible, mais la distance de transport augmente.

Considérant que des épisodes de crues majeures ont été recensés sur la rivière Mont-Louis, généralement suivis de plusieurs années marquées par des crues moyennes ou faibles, les taux de production annuels sont vraisemblablement surévalués. Il est plutôt probable que des

pics de recrutement et de concentration de bois se soient produits au début des années 1960, à la fin des années 1970 et au milieu des années 2000, lors de crues érosives et que des crues mobilisatrices survenues durant les périodes intermédiaires aient dispersé la grande quantité de bois produit le long du corridor fluvial.

Cette hypothèse prend toute son importance lorsque l'intérêt est porté sur l'évolution de la morphologie fluviale au cours des 50 dernières années. Au cours de cette période, la rivière Mont-Louis a connu une augmentation de sa largeur (2014 sous-estimés) et une variation du nombre de chenaux et d'îlots végétalisés. D'abord, les crues de 1963, 1966, 1977 à 1981, 2010 et 2014 ont engendré un élargissement du chenal et le recrutement d'une grande quantité de bois. La puissance dégagée par les crues de cette ampleur limite la formation d'îlots végétalisés en érodant le substrat nécessaire à leur formation et ne permet pas le développement de végétation, pour laquelle un certain niveau de stabilité est nécessaire (Gurnell et Petts, 2006 ; Gurnell *et al.*, 2001). Ces crues agissent plutôt comme une remise à zéro du cours d'eau, formant un chenal large et généralement droit. De plus, l'influence morphologique du bois diminue durant les fortes crues (Faustini et Jones, 2003). Plutôt que de rediriger l'écoulement, le bois est mobilisé et le bois suffisamment stable pour demeurer en place obstrue une proportion plus faible de l'écoulement lorsque les niveaux d'eau augmentent et qu'une portion plus grande du chenal est occupée par l'écoulement. Durant les périodes de crues moyennes et faibles qui ont suivi, le bois est redistribué sur les bancs d'accumulations. Celui-ci crée des zones de faibles courants au-dessus des bancs, favorise la déposition de sédiments grossiers qui élèvent le niveau du banc et permet l'accumulation de sédiments fins favorable au développement de la végétation (Gurnell *et al.*, 2012 ; Francis *et al.*, 2008). Cette relation entre le bois mort et la dynamique fluviale conditionne ainsi l'interprétation de l'évolution qu'a connue la rivière Mont-Louis depuis 1960. Les crues du début des années 1960 ont eu un impact modéré sur le recrutement de bois, car les sources de bois étaient limitées. Il est aussi possible que la crue de 1961, dont les effets ne sont pas perceptibles sur les photographies aériennes, ait érodé les berges de manière à donner au cours d'eau des configurations géométriques lui permettant de subir des crues similaires en 1963 et 1966 sans éroder davantage. Les taux d'érosion et les apports en bois demeurent donc

relativement faibles durant cette période. De plus, l'abaissement du niveau de base de 1,5 m (voir section 5.4.1) peut avoir porté le cours d'eau à s'inciser plutôt qu'à se déplacer latéralement. La période d'accalmie hydrologique entre 1967 et 1976 et l'incision possible du cours d'eau a permis à certains chenaux secondaires de se végétaliser, diminuant le tressage du cours d'eau en 1975. Entre 1977 et 1981, une série de crues majeures, les plus grandes enregistrées, ont permis d'éroder de grandes superficies boisées. Une immense quantité de bois mort se retrouve ainsi accumulée au sein d'embâcles dans le cours d'eau. L'élargissement du chenal dû à ces événements a diminué la capacité de transport du cours d'eau et les faibles crues qui suivent dispersent les volumes de bois sur des foyers d'accumulations. Les 10 ans de faibles débits qui ont suivi ont permis au bois mort d'altérer la dynamique sédimentaire. La puissance du cours d'eau durant cette période est moindre et les obstacles que représente le bois mort limitent sa capacité de transport et force l'accumulation de sédiments au sein du chenal, ce qui permet aux berges et aux bancs de se végétaliser. Cette période marque le rétrécissement du chenal et l'augmentation du tressage. C'est d'ailleurs en 1992 que le plus grand nombre d'ilots végétalisés ont été recensés le long du corridor fluvial, avec 28 ilots. Les autres années en comptent moins de 15, à l'exception de 1963 qui en comptait 20. Les berges et les ilots sont colonisés par de la végétation arborescente, jusqu'en 2004 où une crue de plus de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ survient (moyenne $73 \text{ m}^3/\text{s}$). Cette crue a permis de recruter la majeure partie des volumes de bois produits entre 1992 et 2004 et représente un nouvel apport de grands volumes de bois au cours d'eau, la perte des ilots végétalisés les plus petits et l'élargissement du chenal. L'interprétation des événements survenus entre 2004 et 2014 représente un défi, car le tracé du cours d'eau ne couvre pas l'ensemble du territoire d'étude. Toutefois, la connaissance du terrain porte à croire que la largeur du cours d'eau ainsi que son taux de migration sont supérieurs aux valeurs présentées aux figures 43, 46 et 47, car une proportion importante du tronçon divagant s'y trouve. La valeur de tressage pourrait être légèrement inférieure, car le tronçon divagant ainsi que le tronçon linéaire sont principalement caractérisés par un chenal unique à cet endroit. En raison de l'ampleur des crues des années 2000, il apparaît peu probable que de nouveaux ilots végétalisés se soient formés. Or, face à une dynamique du bois mort bien ancré au sein d'un

cours d'eau dynamique, il est possible que ces crues aient engendré des avulsions qui contribuent à l'augmentation de l'indice de tressage.

La relation entre les types de crues et la spatialisation du bois mort décrite est cohérente avec les observations réalisées sur la rivière Mont-Louis au cours des deux années de suivi. La crue générée par le passage d'Arthur est susceptible d'avoir produit une grande quantité de bois, d'avoir élargi le chenal et d'avoir concentré les volumes de bois mort dans un nombre réduit d'embâcles, tel que recensé par Tremblay *et al.* (2014). Les faibles crues de 2015 et 2016 ont pour effet de mobiliser le bois stocké au sein du chenal et de le redistribuer en de nombreux embâcles de faibles volumes dont plusieurs ont déjà permis la colonisation des bancs par la végétation (figure 74). Entre 2015 et 2016, au moins 25,5 % du bois stocké a été mobilisé, une observation comparable à celles de 30 % faite par Kramer et Wohl (2017) et de 28 % par Iroumé *et al.* (2015).



figure 74. Embâcles et bancs végétalisés

L'évolution pluridécennale de la rivière Mont-Louis a donc été façonnée par des apports sporadiques de bois mort générés par de fortes crues qui concentrent les volumes de bois mort ainsi que par de longues périodes de crues moyennes et faibles durant lesquelles le bois a été dispersé sur des bancs de manière à ce qu'il permette le développement de la végétation (figure 75). Au début des années 1960, les sources de bois étaient limitées, car la ripisylve et la bande riveraine affichaient leurs valeurs minimales, depuis les années 1980, la croissance des sources de bois se fait de manière constante. Ceci se traduit par une augmentation de la production de bois au cours des années 2000, bien que les taux d'érosions soient plus faibles. Par ailleurs, les périodes de crues moyennes et faibles de 1966 à 1977 et de 1981 à 2004 permettent au bois d'être dispersé sur le corridor fluvial en de nombreuses accumulations de petite taille. La présence de bois devient un facteur de contrôle sur l'écoulement et sur la dynamique sédimentaire. Les sédiments s'accumulent sur le tronçon et la formation d'îlots végétalisés donne lieu à de multiples chenaux ainsi qu'à l'élargissement du cours d'eau. C'est donc au cours des périodes de débits moyens que le bois exerce la plus grande influence sur la morphologie fluviale, ces crues ne sont pas suffisamment grandes pour déloger les embâcles, mais sont en mesure de modifier la forme du lit.

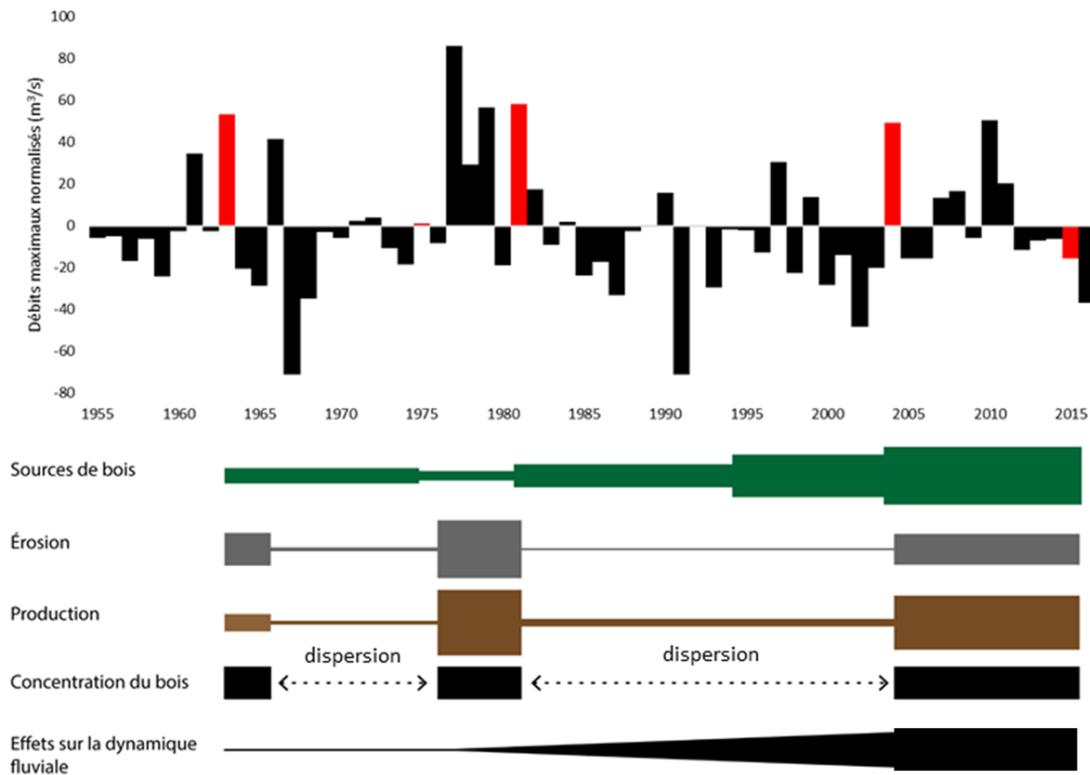


figure 75. Synthèse de la trajectoire éco-géomorphologique

L'introduction de grands volumes de bois dans les années 80 semble agir comme élément déclencheur d'une dynamique qui s'entretient aujourd'hui de manière autonome, car les superficies boisées en marge du cours d'eau sont suffisamment grandes et représentent un apport fréquent de bois. Enfin, l'interprétation proposée met l'accent sur le rôle que joue la dynamique du bois mort dans l'évolution de la dynamique fluviale. Il est certain que d'autres facteurs contribuent à modéliser le cours d'eau, mais les nombreux indices cumulés, allant de la morphologie de la plaine alluviale, à la distribution du bois et à ses effets sur le transit sédimentaire, témoignent que la trajectoire hydrogéomorphologique et la trajectoire éco-géomorphologique sont indissociables et doivent être considérées de pair.

5.4.2 Rôle des interventions en cours d'eau sur la dynamique du bois mort et la trajectoire écohydrogéomorphologique

La section suivante relève beaucoup plus de l'hypothèse que les précédentes, elle doit être interprétée avec beaucoup de prudence, mais témoigne tout de même de l'ampleur des répercussions associées à la dynamique du bois mort en rivière. Historiquement, la vie économique du village de Mont-Louis reposait sur l'industrie de la pêche (Pelletier, 2012). En 1924, une compagnie forestière américaine fait l'achat de la seigneurie de Mont-Louis afin d'y exploiter le bois de pulpe (Lemieux, 1984).

Aucune archive ne mentionne le retrait de bois mort pour en faciliter la pratique, mais ailleurs en Amérique, cette démarche était courante (Wohl, 2014) et il est raisonnable de croire que c'était aussi le cas ici. De plus, les rivières Marsoui et Matane, respectivement situé à 25 et 140 kilomètres de Mont-Louis, ont été grandement affectées par l'activité forestière au cours du XX^e siècle. Les observations réalisées par Demers *et al.*, (2014) lors de l'analyse de la trajectoire hydrogéomorphologique des rivières Marsoui et Matane sont d'ailleurs cohérentes avec celles faites sur la rivière Mont-Louis. Au cours des années 1920 à 1960 sur la rivière Matane et 1940 à 1970 sur la rivière Marsoui, la drave était une activité dominante. Afin de faciliter le transport des billes de bois, le chenal des rivières était élargi mécaniquement, dragué, et le bois mort était retiré. Selon les auteurs, ces interventions se manifestent comme une simplification de la géométrie du chenal.

La diminution de la sinuosité du chenal à Marsoui entre 1927 et 1975 est d'ailleurs une conséquence directe des travaux d'entretien du cours d'eau. Le même phénomène se produit à Mont-Louis, alors que l'indice de sinuosité chute entre les débuts de l'industrie forestière dans les années 1920 et la fin, dans les années 1960. La fin de ces interventions dans les années 60 justifie d'ailleurs certainement l'augmentation de la sinuosité de la rivière Mont-Louis depuis la deuxième moitié du XX^e siècle. De plus, la présence de machinerie lourde dans le chenal limite la construction d'un pavage sédimentaire sur le lit et pourrait expliquer la grande réponse géomorphologique du cours d'eau lors des périodes de crues intenses de la fin des années 1970, à Marsoui, comme à Mont-Louis. Enfin, toujours selon

Demers *et al.*, (2014) ces interventions mécanisées nécessitaient la destruction de la bande riveraine. La perte de cohésion des berges due à l'absence de végétation peut expliquer l'augmentation des largeurs du chenal au cours des années 1960 et a pu limiter les sources de bois potentielles pour le chenal.

Le parallèle dressé entre les rivières Marsoui, Matane et Mont-Louis vise à mettre en évidence que ces rivières ont connu un historique de perturbations anthropiques qui conditionne encore aujourd'hui la dynamique fluviale. Les manifestations évidentes d'un retour à un état plus naturel sont principalement l'augmentation de la sinuosité depuis la fin des travaux, l'augmentation des superficies boisées en marge du cours d'eau et le développement d'une mosaïque fluviale complexe, caractérisée par la formation d'îlots végétalisés et de chenaux secondaires.

À l'embouchure de la rivière Mont-Louis, un barrage érigé en 1925 au site de l'actuelle route 132 avait pour fonction de créer un bassin de rétention pour les troncs d'arbres provenant de la rivière en forçant l'élévation du niveau de l'eau de 1,5 m (figure 76) (Pelletier, 2012). Le rehaussement du niveau d'eau combiné aux fortes crues de 1961 a causé des inondations majeures dans le village, ce qui a conduit, au cours de la même année, au dynamitage de l'infrastructure et au déclin de l'industrie forestière (Lemieux, 1984).

En termes de dynamique fluviale, le retrait du barrage se traduit par un abaissement du niveau de base de la rivière ayant pu occasionner de l'érosion régressive. Or, le profil d'élévation longitudinal de la rivière Mont-Louis ne révèle pas la présence d'un tel phénomène. Face à un tel constat, trois hypothèses sont envisagées. La première veut que l'accumulation de sédiments fins au sein de l'estuaire ait colmaté le lit du cours d'eau, que l'effet des marées, l'élargissement des chenaux et la formation d'un milieu humide dans ce secteur limitent l'incision du lit et donc que l'abaissement du niveau de base soit minime. La seconde est que l'érosion régressive se soit dissipée longitudinalement sur le cours d'eau, que les grandes crues qu'a connues la rivière aient adouci l'encoche d'érosion ou complété son recul, de manière à retrouver une pente d'équilibre.

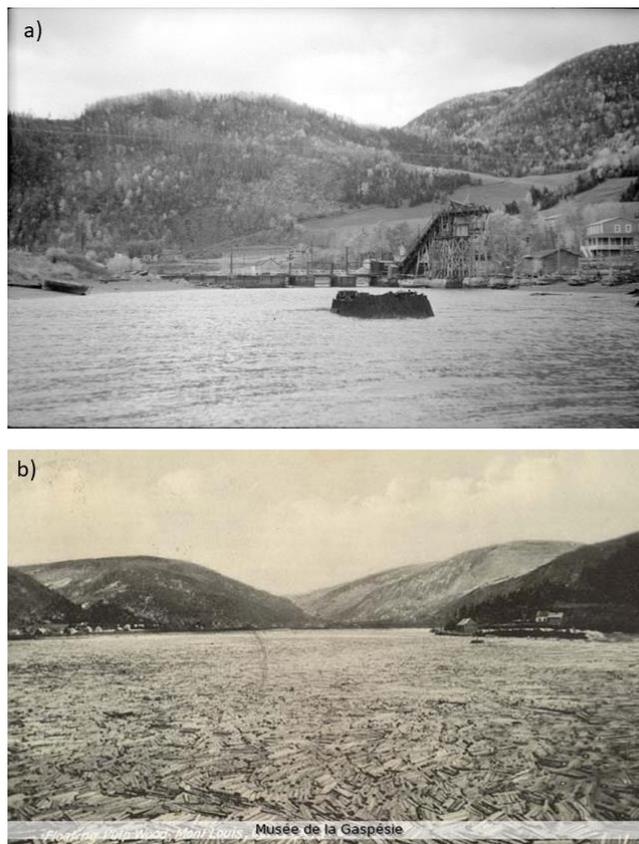


figure 76. Drave sur la rivière Mont-Louis a) barrages en aval de l'estuaire (Jean, 1942) et ; b) bassin de rétention dans l'estuaire, années 1930 (musée de la Gaspésie)

La troisième quant à elle propose que le retour du bois dans le chenal après 1961 a eu une influence significative sur la dynamique sédimentaire. La présence de bois mort en rivière peut en effet permettre de retenir une grande quantité de sédiments au sein du chenal (Gurnell *et al.*, 2002). Il est donc envisagé que le bois mort ait exacerbé le stockage de sédiments au sein du chenal de manière suffisante pour atténuer l'effet d'incision engendrée par la diminution du niveau de base.

Dans une démarche de restauration de cours d'eau, Shields *et al.* (2008) ont montré que l'addition de bois mort au sein des chenaux incisés permet de limiter l'érosion verticale du thalweg. L'apport massif de bois généré par les crues à la fin des années 1970 a apporté

de très grands volumes de bois au cours d'eau. Ce bois aurait permis de retenir une grande quantité de sédiments au sein du chenal, limitant l'incision. De plus, selon les mêmes auteurs, les effets du bois mort sur la rétention de sédiments sont plus durables lorsque les bancs d'accumulation sont colonisés par la végétation. Or, depuis la période de crues de 1977 à 1981, l'indice de tressage de la rivière Mont-Louis augmente. Cet indice traduit une augmentation du nombre de chenaux, et de ce fait, du nombre ou de la taille des ilots végétalisés. La formation de deux ilots centraux dans le tronçon linéaire, un indice de tressage qui est passé de 1,44 en 1981 à 1,74 en 2014 au sein du tronçon divagant, ainsi que par la formation de deux chenaux secondaires au site 3 au cours d'une période de crues moyennes et faibles sont des manifestations du phénomène. Il est ainsi possible que la quantité de sédiments retenue dans le chenal ait été en augmentation à la fin du siècle et peut-être encore à ce jour.

Ainsi, la troisième hypothèse est privilégiée et elle vient conforter celle émise dans la section 5.3, voulant que sur une période de plusieurs décennies, l'effet du bois mort sur la rétention de sédiments peut se manifester par une modification du style fluvial et de la morphologie du cours d'eau, même s'il s'agit de petits volumes. Depuis la fin des interventions et la chute de l'industrie forestière en 1961, auquel le retour du bois dans le cours d'eau est associé, le tronçon principal de la rivière Mont-Louis est passé d'un chenal relativement linéaire à un chenal dont la sinuosité est en augmentation constante, principalement dans les tronçons divagants et à méandres et où les chenaux se multiplient.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le rôle du bois mort dans les milieux fluviaux et les patrons de distribution du bois à l'échelle du bassin versant, du tronçon et du site a été largement documenté par la communauté scientifique. Toutefois, peu d'intérêt a été accordé aux nuances qu'impliquent la succession de styles fluviaux contrastés le long d'un corridor fluvial. Les résultats issus de cette recherche montrent clairement que des patrons de recrutement, de mobilité et de stockage des volumes de bois existent sur la rivière Mont-Louis. Le tronçon divagant est responsable de 75 % de la production de bois depuis les années 1960 et accumulait plus de 60 % des volumes de bois de la rivière Mont-Louis en 2015 et 2016. Les tronçons linéaires, à méandres stable et estuariens sont plutôt marqués par de faibles volumes de bois et une capacité de transport accrue. À une échelle pluridécennale, l'évolution du cours d'eau semble en partie déterminée par la distribution des volumes de bois, particulièrement au sein du tronçon divagant.

Quelques éléments méthodologiques soulèvent toutefois la nécessité de nuancer l'interprétation des résultats. Dans un premier temps, l'image partielle de 2014 induit une certaine erreur dans la trajectoire hydrogéomorphologique et l'évolution des superficies boisées. La portion amont du territoire d'étude n'est pas couverte alors qu'elle comprend le tiers du tronçon divagant et l'entièreté du tronçon linéaire. Les taux d'érosions, les largeurs, le tressage et la production de bois sont donc probablement sous-estimés. En cours de rédaction, les orthophotographies de 2016 ont été rendus disponibles. Les analyses pourraient être réalisées à nouveau à partir de cette image afin de valider les constats issus de ce mémoire. De plus, la série temporelle des débits maximaux a été reconstituée à partir des stations hydrométriques de deux rivières. Malgré la bonne relation qui existe entre les débits spécifiques de la rivière Madeleine et la rivière York, rien ne permet d'affirmer que les événements de crues se manifestent de la même façon sur la rivière Mont-Louis. En raison de l'influence des Chic-Choc, les conditions météorologiques varient beaucoup d'un endroit à l'autre et les précipitations localisées sont fréquentes. Une courbe de tarage est toutefois actuellement en construction. Une fois que suffisamment de données y seront intégrées, elle

permettra d'établir une relation entre les débits de la rivière Mont-Louis et ceux de la rivière York, pour la période actuelle. Enfin, pour estimer les volumes de bois introduits au chenal à travers le temps, les densités de bois en bande riveraine mesurées en 2017 ont été utilisées. L'analyse de l'évolution des superficies boisées et l'historique de la vallée de Mont-Louis montrent toutefois que des perturbations ont altéré le couvert forestier. La présence d'une mosaïque forestière complexe est aussi due au dynamisme du tronçon divagant. Il est donc possible que les volumes de bois mesurés en bande riveraine ne correspondent pas aux volumes réels pour chacune des périodes, particulièrement les plus anciennes. Cette situation pourrait être adressée en estimant la densité de bois en bande riveraine à différents stades de succession végétale, partant des espèces colonisatrices jusqu'aux peuplements matures et en estimant l'âge des peuplements à partir des photographies aériennes. L'analyse comparative des superficies boisées pour chacune des années peut montrer s'il s'agit d'un peuplement antérieur à 1963 ou si une repousse a été initiée au cours des 50 dernières années.

L'interprétation de l'évolution repose toutefois sur une revue de littérature extensive qui permet de conforter les hypothèses émises et de souligner l'originalité de ce mémoire. L'originalité réside dans l'intérêt accordé à l'évolution historique de la vallée de Mont-Louis et la manière dont l'occupation du territoire a conditionné la relation entre la dynamique fluviale et la dynamique du bois mort. La présence d'une industrie forestière forte au cours du XX^e siècle a certainement permis l'entretien d'un cours d'eau artificialisé. Le renouvellement de la ripisylve s'est traduit, à partir des années 1960-70, par la réintroduction de bois mort dans le chenal. Par ailleurs, cette recherche met en évidence que le recrutement de bois mort se fait de manière épisodique, lors des épisodes de grandes crues. Ces constats permettent ainsi de formuler sept propositions :

1. Les apports de bois à la rivière Mont-Louis sont conditionnés par la croissance de la ripisylve et la cyclicité des crues majeures.
2. Le bois introduit au système provient essentiellement de l'amont (contribution inconnue) et des berges du tronçon divagant lors de fortes crues
3. Les fortes crues concentrent les volumes de bois dans un nombre restreint d'embâcles et les crues moyennes à faibles redistribuent le bois sur des sites d'accumulation préférentiels Les sites d'accumulations préférentiels les plus importants sont les bancs d'accumulation, les îlots végétalisés, les chenaux secondaires ainsi que d'autres embâcles.
4. Le bois mort altère la dynamique sédimentaire en exacerbant ou en inhibant l'érosion et l'accumulation de sédiments. L'importance de ces rôles est largement fonction des caractéristiques du bois mort et du cours d'eau à l'échelle du site.
5. Un grand nombre d'embâcles de faible volume est susceptible d'impacter la dynamique sédimentaire de manière à modifier la dynamique et la morphologie fluviale de manière significative
6. Le contrôle du bois mort sur le développement du style fluvial est plus grand lors des périodes de crues moyennes et faibles.
7. Le bois en rivière apparaît comme un élément qui contribue à façonner la dynamique des cours d'eau à travers le temps. Dans l'optique d'une analyse prévisionnelle pluridécennale, il importe de considérer les variations de débits possibles, les superficies boisées et le linéaire de bande riveraine afin d'anticiper les volumes de bois potentiels ainsi que leurs effets sur l'évolution de la dynamique fluviale.

Enfin, les propositions 5, 6 et 7 pourraient être validées par l'établissement d'une relation entre les bilans sédimentaires et les bilans ligneux, particulièrement en présence d'un grand nombre d'embâcles de petit volume. Selon les hypothèses présentées, la présence de bois mort dans les rivières a permis de retenir suffisamment de sédiments dans le chenal pour provoquer la formation d'un style fluvial et d'une morphologie de plaine alluviale associée à la présence de bois mort. Les sédiments sont retenus dans le chenal de façon pérenne ce qui réduit leur évacuation hors du système. À Mont-Louis, un enrochement d'urgence a été construit en 2017 par le Ministère des Transports du Québec afin de contrer l'érosion du littoral, au fond de l'anse, suite à la tempête hivernale de décembre 2016. L'étude des interactions entre la dynamique sédimentaire et la dynamique du bois mort à l'échelle du tronçon ou du bassin versant permettrait d'évaluer si le stockage de sédiments provoqué par la présence de bois mort est suffisamment grand pour altérer significativement l'apport de sédiments fluviaux à l'hydrosystème côtier et ainsi exacerber le recul du trait de côte dans la baie de Mont-Louis.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbe, T.B. et Montgomery, D.R. 2003. Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washintgon, *Geomorphology*, vol. 51, 81-107.
- Abbe, T.B. et Montgomery, D.R. 1996. Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers, *Regulated Rivers: Research et Management*, vol. 12, 201-221.
- Arsenault, R. et Fugère, A. 2003. Plan directeur de l'eau du bassin versant de la rivière Mont-Louis, Activa Environnement Inc., New Richmond, 207 p.
- Arun, P.V. 2013. A comparative analysis of different DEM interpolation methods, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, vol. 16, 133-139.
- Ashmore, P. 1991. Channel Morphology and bed load pulses in braided, gravel-bed streams, *Physical Geography*, vol. 73(1), 37-52.
- Baillie, B.R., Garrett, L.G. et Evanson, A.W. 2008. Spatial distribution and influence of large woody debris in an old-growth forest river system, New-Zealand, *Forest Ecology and Management*, vol.256, 20-27.
- Ballais, J.-L., Garry, G. et Masson, M. 2005. Contribution de l'hydrogéomorphologie à l'évaluation du risque d'inondation : le cas du Midi méditerranéen français, *Geosciences*, vol. 337, 1120-1130.
- Beschta, R.L. 1979. Debris removal and its effects on sedimentation in an Oregon coast range, *Northwest Science*, vol. 53, 71-77.
- Benda, L.E., Miller, D., Sias, J., Martin, D., Bilby, R., Veldhuisen, C. et Dunne, T. 2003. Wood Recruitment Processes and Wood Budgeting, dans: *The Ecology and Management of Wood in World Rivers*, S. Gregory, K. Boyer et A. Gurnell (dir.), American Fisheries Society Symposium, 49-74.
- 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.

- Benda, L.E. 1990. The influence of debris flows on channels and valley floors in the Oregon coast range, U.S.A., *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 15, 457-466.
- Benyahya, L., Daigle, D. Caissie, D., Beveridge, D. et St-Hilaire, A. 2009. Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'Est du Canada, INRS-ÉTÉ, rapport R1057, 88 p.
- Bisson, P.A., Bilby, R.E., Bryant, M.D., Dolloff, C.A., Grette, G.B., House, R.A., Murphy, M.L., Koski, V.K. et Sedell, J.R. 1987. Large woody debris in forested streams in Pacific Northwest: past, present, and future, dans: *Streamside Management: Forestry and Fishery Interactions*. Univ. Washington Inst. Forest Resour. Contrib., Salo, E.P. and Cundy, T. W. (dir.), (57), 143-190.
- Boivin, M., Buffin-Bélanger, T. et Arsenault, D. 2018. Using tree-tings 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 Piégay, H. 2017a. Estimation of large wood budget in a watershed and river corridor at interdecadal to interannual scales in a cold-temperate fluvial system, *Earth Surface Processes and Landform*, vol. 42(13), 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-years flood event and fluvial ice dynamics, *Geomorphology*, vol. 279, 59-73.
- Boivin, M. 2016. Analyse par bilan ligneux de la dynamique des bois morts à multiples échelles spatiales et temporelle dans une rivière semi-alluviale de région froide. Thèse de doctorat en sciences de l'environnement et en géographie, Rimouski : Université du Québec à Rimouski, Université de Lyon, 185 p.
- Boivin, M., Buffin-Bélanger, T. et Piégay, H. 2015. The raft of the Saint-Jean River, Gaspé (Québec, Canada): A dynamic feature trapping most of the wood transported from the catchment, *Geomorphology*, vol. 231, 270-280.
- Boivin, M. et Buffin-Bélanger, T. 2010. Étude hydrogéomorphologique liée à la présence de bois morts dans le corridor fluvial de la rivière Saint-Jean, Gaspé, Rapport présenté à la Société de gestion des rivières de Gaspé inc. Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale. LGDF-001- UQAR. 99 p.
- Bocchiola, D. Rulli, M.C. et Rosso, R. 2006. Transport of large woody debris in the presence of obstacles, *Geomorphology*, vol. 76, 166-178.

- Braudrick, C.A. et Grant, E.G. 2000. When do logs move in rivers, *Water Resources Research*, vol. 36.(2). 571-583.
- Brooks, A.P. et Brierley, G.J. 2002. Mediated equilibrium: the influence of riparian vegetation and wood on the long term evolution and behaviour of a near-pristine river, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 27, 343-367.
- CENG (Conseil de l'Eau du Nord de la Gaspésie), 2015. Rapport de caractérisation, Milieu humide de la rivière Mont-Louis, Mont-Louis, 41 p.
- CENG (Conseil de l'Eau du Nord de la Gaspésie), 2014. Bassin versant de la rivière Madeleine, Mont-Louis, 10 p.
- Charlton, R. 2008. Fundamentals of fluvial geomorphology, London, Routledge, 234 p.
- Cherry, J. et Beschta, R.L. 1989. Coarse woody debris and channel morphology: a flume experiment, *Water Resources Bulletin*, vol. 25(5), 1031-1036.
- Chew, L.C. et Ashmore, P.E. 2001. Channel adjustment and a test of rational regime theory in a proglacial braided stream, *Geomorphology*, vol. 37, 43-63.
- Chin, A., Daniels, M.D., Urban, M.A., Piégay, H., Gregory, K.J., Bigler, W., Butt, A.Z., Grable, J.L., Gregory, S.V., Lafrenz, M., Laurencio, L.R. et Wohl, E. 2008. Perception of wood in rivers and challenges for stream restoration in the United States, *Environmental Management*, vol. 41(6), 893-903.
- Collins, B.D., Montgomery, D.R., Fetherston, K.L. et Abbe, T.P. 2012. The floodplain large-wood cycle hypothesis: A mechanism for the physical and biotic structuring of temperate forested alluvial valleys in the North Pacific coastal ecoregion, *Geomorphology*, vol. 139-140, 460-470.
- Comiti, F. Lucía, A. et Rickenmann, D. 2016. Large wood recruitment and transport during large floods: a review, *Geomorphology*, vol. 269, 23-39.
- Curran, J.C. 2010. Mobility of large woody debris (LWD) jams in a low gradient channel, *Geomorphology*, vol. 116, 320-329.
- Daniels, D.D. et Rhoads, B.L. 2003. Influence of a large woody debris obstruction on three-dimensional flow structure in a meander bend, *Geomorphology*, vol. 51, 159-173.

- Davidson, S.L. et Eaton, B.C. 2013. Modeling channel morphodynamic response to variations in large wood, Implications for stream rehabilitation in degraded watershed, *Geomorphology*, vol. 202, 59-73.
- Demers, S., Olsen, T. et Buffin-Bélanger, T. 2014. Développement d'une méthode hydrogéomorphologique pour mieux considérer les dynamiques hydrosédimentaires aux droits des traverses de cours d'eau du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie dans le contexte de changements climatiques et environnementaux. Laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale, Université du Québec à Rimouski. Remis au ministère des Transports du Québec, décembre 2014, 202 p.
- Demers, S. et Buffin-Bélanger, T. 2011. Une méthode illustrée pour la sectorisation morphodynamique de la rivière Neigette (Québec). *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, vol. 55(3), 318-333.
- Dufour, S. et Piégay, H. 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration : forget natural references and focus on human benefits, *River Research and Application*, vol. 25, 568-581.
- Environnement Canada 2019. Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981 à 2010, [En ligne] http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_f.html?searchType=stnProv&lstProvince=QC&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&stnID=5843&dispBack=0, Page consultée le 3 juin, 2019.
- Environnement Canada 2014. Bulletin trimestriel des impacts liés au climat et aperçu saisonier, septembre 2014, 3 p.
- Faustini, J.M. et Jones, J.A. 2003. Influence of large woody debris on channel morphology and dynamics in steep, boulder-rich mountain streams, western Cascades, Oregon, *Geomorphology*, vol. 51, 187-205.
- Francis, R.A., Tibaldeschi, P. et McDougall, L. 2008. Fluvially-deposited large wood and riparian plant diversity, *Wetland Ecology and Management*, vol. 16(5), 371-382.
- Fremier, A.K., Seo, J.I. et Nakamura, F. 2010. Watershed controls on the export of large wood from stream corridors, *Geomorphology*, vol. 117, 33-43.
- Gippel, C.J., O'Neill, I.C., Finlayson, B.L. et Schnatz, I. 1996. Hydraulic guidelines for the re-introduction and management of large woody debris in lowland rivers, *Regulated Rivers: Research et Management*, vol. 12, 223-236.

- Gippel, C.J. 1995. Environmental hydraulics of large woody debris in streams and rivers, *Journal of Environmental Engineering*, vol. 121(5), 388-395.
- Golladay, S.W., Battle, J.M. et Palik, B.J. 2007. Large woody debris recruitment on differing riparian landforms along a gulf coastal plain (USA) stream: a comparison of large floods and average flow, *River Research and Application*, vol. 23, 391-405.
- Gonor, J.J., Sedell, J.R., et Benner, P.A., 1988. What we know about large trees in estuaries, in the sea and on coastal beaches, dans: *From the forest to the sea: a story of fallen trees*, Maser, C. (dir.), Chapitre 4, 83-112
- Gonzalez, R., Dunham, J., Lightcap, S. et McEnroe, J. 2017. Large wood and instream habitat for juvenile Coho salmon and larval lampreys in Pacific Northwest streams, *North American Journal of Fisheries Management*, vol. 37(4), 683-699.
- Gurnell, A. M. 2013. Wood in fluvial systems, dans: *Treatise on fluvial geomorphology*, J.F. Shroder et E. Wohl (dir.), Academic Press, Elsevier, San Diego, CA, Volume 9, Fluvial Geomorphology, Chapitre 11, 163-188.
- Gurnell, A.M. et Petts, G. 2006. Tree as riparian engineers: The Tagliamento river, Italy, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 31, 1558-1574.
- Gurnell, A. M. 2003. Wood storage and mobility dans: *The Ecology and Management of Wood in World Rivers*, S. Gregory, K. Boyer et A. Gurnell (dir.) American Fisheries Society Symposium, 75-92.
- Gurnell, A.M., Piégay, H., Swanson, F.J. et George, S.V. 2002. Large wood and fluvial processes, *Freshwater Biology*, vol. 47(4), 601-619.
- Gurnell, A.M. et Petts, G.E. 2002. Island-dominated landscape of large floodplain rivers, a European perspective, *Freshwater Biology*, vol. 47, 581-600.
- Gurnell, A.M., Petts, G.E., Hannah, D.M., Smith, B.P.G., Edwards, P.J., Kollmann, J., Ward, J.V. et Tockner, K. 2001. Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed fiume Tagliamento, Italy, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 26, 31-62.
- Hafs, A.W., Harisson, L.R., Utz, R.M. et Dunne, T. 2014. Quantifying the role of woody debris in providing bioenergetically favorable habitat for juvenile salmon, *Ecological Modeling*, vol. 285, 30-38.

- Haga, H., Kumagai, T., Otsuki, K. et Ogawa, S. 2002. Transport and retention of coarse woody debris in mountain streams: An in situ field experiment of log transport and a field survey of coarse woody debris distribution, *Water Resources Research*, vol. 38(8), 1-16.
- Harmon, M.E., Franklin, J.F., Swanson, F.J., Sollins, P., Gregory, S.V., Lattin, J.D., Anderson, N.H., Cline, S.P., Aumen, N.G., Sedell, J.R., Lienkaemper, G.W., Cromack, K. Jr. et Cummins, K.W. 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems, *Advances in Ecological Research*, vol. 15, 133-302.
- Hassan, M.A., Hogan, D.L., Bird, S.A., May, L.M., Gomi, T. et Campbell, D. 2005. Spatial and temporal dynamics of wood in headwater streams of the pacific northwest, *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 2, 899-919.
- Hébert, J.-S. 2006. Bassin versant de la rivière Mont-Louis – Analyse des problématiques. Activa Environnement Inc. Pour le comité de bassin de la rivière Mont-Louis, Mont-Louis, Québec, 114 p. + annexes.
- Hébert, J.-S. 2004. Rapport concernant les activités réalisées dans le bassin versant de la rivière Mont-Louis pour la saison 2004, Activa Environnement Inc. Pour le comité de bassin de la rivière Mont-Louis, Mont-Louis, Québec, 44 p. + annexes.
- Héty, B. et Gray, J. 1980. Évolution postglaciaire des versants de la région de Mont-Louis, Gaspésie, Québec, *Géographie Physique et Quaternaire*, vol. 34(2), 187-208
- Hinwood, J.B. et McLean, E.J. 2017. Large wood in the Snowy River estuary, Australia, *Geomorphology*, vol.279. 209-225.
- Hong, L.B. et Davies, T.R.H. 1979. A study of stream braiding, *Geological Society of America Bulletin*, Part II, vol. 90, 1839-1859
- Hughes, M.L., McDowell, P.F. et Marcus, W.A. 2006. Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS, *Geomorphology*, vol.74, 1-16.
- Iroumé, A., Mao, L., Andrea, A., Ulloa, H. et Ardiles, M.P. 2015. Large wood mobility processes in low-order Chilean river channels, *Geomorphology*, vol. 228, 681-693.
- Jean, U. 1942. Rivière Mont-Louis à Gaspé, Mont-Louis, Bibliothèque des archives nationales du Québec, E6, S7, SS1, P6337.
- JFNew 2007. A Primer on Large Woody Debris Management, Pour Rochester Hills, Michigan, septembre 2007, 42 p.

- Kali, J. 2003. Influence of large woody debris on the morphology of six central European streams, *Geomorphology*, vol. 51, 207-223.
- Keller, E.A. et Swanson, F.J. 1979. Effects of large organic material on channel form and fluvial processes, *Earth Surface Processes*, vol. 4, 361-380.
- Kraft, C.E., Warren, D.R. et Keeton W.S. 2011. Identifying the spatial pattern of wood distribution in northeastern North American streams, *Geomorphology*, vol. 135, 1-7.
- Kramer, N. et Wohl, E. 2017. Rules of the road: A quantitative synthesis of large wood transport through drainage networks, *Geomorphology*, vol. 279, 74-97.
- Lassette, N.S., Piégay, H., Dufour, S. et Rollet, A.-J. 2008. Decadal changes in distribution and frequency of wood in a free meandering river, the Ain river, France, *Earth Surface Processes and Landform*, vol. 33, 1098-1112.
- Latterell, J.J. et Naiman, R.J. 2007. Sources and dynamics of large logs in a temperate floodplain river, *Ecological Applications*, vol. 17(4), 1127-1141.
- Lawrence, J.E., Resh, V.H. et Cover, M.R. 2013. Large-wood loading from natural and engineered processes at the watershed scale, *River Research and Application*, vol. 29, 1030-1041.
- Ledard, M., Gross, F., Haury, J., Lafontaine, L., Hubaud, M.-O., Vigneron, T., Dubos, C., Labat, J.-J., Aubry, M., Nioche-Seigneur, F., Vienne et L., Craipeau, F. 2001. Restauration et entretien des cours d'eau en Bretagne, Guide technique, Rennes, 107 p.
- Lemieux, M. 1984. Mont-Louis se raconte, Bibliothèques Nationales du Québec, Mont-Louis, Québec, 2^e édition, 358 p.
- Magilligan, F.J., Nislow, K.H., Fisher, G.B., Wright, J., Mackey, G. et Laser, M. 2008. The geomorphic function and characteristics of large woody debris in low gradient rivers, coastal Maine, USA, *Geomorphology*, vol. 97, 467-482.
- Manners, R.B., Doyle, M.W. et Small, M.J. 2007. Structure and hydraulics of natural woody debris jams, *Water Resources Research*, vol. 43, 1-17.
- Marcus, W.A., Marston, R.A., Colvard, C.R. et Gray, R.D. 2002. Mapping the spatial and temporal distributions of woody debris in streams of the Greater Yellowstone Ecosystem, USA, *Geomorphology*, vol. 44, 323-335.

- Martin, D.J. et Benda, L.E. 2001. Patterns of instream wood recruitment and transport at the watershed scale, *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 130, 940-958.
- Martínez-Martínez, L.H., Delgado-Hernández, D.J., de-León-Escobedo, D., Flores-Gomoara, J. et Arteaga-Arcos, J.C. 2017. Woody debris trapping phenomena evaluation in bridge piers: a Bayesian perspective, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 161. 38-52.
- Massé, S. 2014. Analyse hydrogéomorphologique de la dynamique des embâcles de bois mort de la rivière Neigette, Bas-Saint-Laurent, Québec. Mémoire de maîtrise en géographie, Rimouski : Université du Québec à Rimouski, 191 p.
- Merten, E.C., Vaz, P.G., Decker-Fritz, J.A., Finlay, J.C. et Stefan, H.G. 2013. Relative importance of breakage and decay as processes depleting large wood from streams, *Geomorphology*, vol. 190, 40-47.
- Merten, E.C., Finlay, J., Johnson, L., Newman, R., Stefan, H. et Vondracek, B. 2010. Factors influencing wood mobilization in streams, *Water Resources Research*, vol. 46(10), 1-13
- Montgomery, D., Collins, B.D., Buffington, J.M. et Abbe, T.B. 2003. Geomorphic effects of wood in rivers, *American Fisheries Society Symposium*, vol. 37, 21-47.
- Montgomery, D. et Piégay, H. 2003. Wood in rivers: interactions with channel morphology and processes, *Geomorphology*, vol. 51, 1-5.
- Montgomery, D.R., Buffington, J.M., Smith, R.D., Schmidt, K.M. et Pess, G., 1995. Pool spacing in forest channels. *Water Resources Research*, vol. 31, 1097–1105.
- Moseley, M.P. 1981. Semi-determinate hydraulic geometry of river channels, South Island, New-Zealand, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 6, 127-137.
- Moulin, B., Schenk, E.R., et Hupp, C.R. 2011. Distribution and characterization of in-channel large wood in relation to geomorphic patterns on a low-gradient river, *Earth Surfaces Processes and Landforms*, vol. 36, 1137-1151.
- Moulin, B. 2005. Variabilité spatiale et temporelle du bois mort dans le réseau hydrographique de l'Isère à l'amont de Grenoble, Thèse de doctorat en géographie et aménagement, Saint-Étienne, Université Jean Monet, 444 p.
- Musée de la Gaspésie. Fonds Robert Fortin. P54/1a/16/14.

- Nagayama, S., Nakamura, F., Kawaguchi, Y. et Nakano, D. 2012. Effects of configuration of instream wood on autumn and winter habitat use by fish in a large remeandering reach, *Hydrobiologia*, vol. 680, 159-170.
- Nakamura, F., Seo, J.I., Akasaka, T. et Swanson, F.J. 2017. Large wood, sediments, and flow regimes: Their interactions and temporal changes caused by human impacts in Japan, *Geomorphology*, vol. 279, 176-187.
- Nakamura, F. et Swanson, F.J. 2003. Dynamics of wood in rivers in the context of ecological disturbance, Dans: The ecology and management of wood in world rivers (American Fisheries Society Symposium 37), (dir.) Gregory SV, Boyer KL, Gurnell AM, American Fisheries Society, Bethesda, MD, pp 279–297
- Nakamura, F. et Swanson, F.J. 1994. Distribution of coarse woody debris in a mountain stream, western Cascade Range, Oregon, *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 24, 2395-2403.
- Nakamura, F. et Swanson, F.J. 1993. Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon, *Earth Surface Processes and Landform*, vol. 18, 43-61.
- Nanson G.C. et Crooke J.C. 1992. A genetic classification of floodplains, *Geomorphology*, vol. 4, 459-486.
- Oliver, M.A. et Webster, R. 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems, *Geographical Information Systems*, vol. 4(3), 313-332.
- OPSW (Oregon Plan for Salmon and Watersheds) 1999. Oregon Aquatic Habitat: Restoration and Enhancement Guide, 103 p.
- Pagliara, S. et Carnacina, I. 2011. Influence of woody debris on sediment scour at bridge piers, *International Journal of Sediment Research*, vol. 26, 121-136.
- Parker, C., Henshaw, A.J., Harvey, G.L. et Sayer, C.D. 2017. Reintroduced large wood modifies fine sediment transport and storage in lowland river, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 42, 1693-1703.
- Pasternack, G.B. 2013. Geomorphologist's guide to participating in river rehabilitation, dans: Treatise on Geomorphology volume 9, (dir.) John F. Shroder, London, Academic Press, Elsevier, San Diego, CA, Volume 9, Fluvial Geomorphology, Chapitre 41, 843-860.

- Pelletier, S.T. 2012. Le barachois de Mont-Louis, un témoin privilégié des pêcheries sédentaires dans le Canada de la Nouvelle-France, Mémoire de maîtrise en archéologie, Québec, Université Laval, 213 p.
- Piégay, H., Le Lay, Y.-F. et Moulin, B. 2005. Les risques liés aux embâcles de bois dans les cours d'eau : état des connaissances et principes de gestion, dans : Bois mort et à cavités. Une clé pour des forêts vivantes, Vallauri, D., Dodelin, A.J., Eynard-Machet, B. et Rambaud, D. (dir.), Paris, Lavoisier et Editions Tec et Doc, 193-202.
- Piégay, H. 2003. Dynamics of Wood in Streams and Rivers, dans: The Ecology and Management of Wood in World Rivers, S. Gregory, K. Boyer et A. Gurnell (dir.) American Fisheries Society Symposium, 109-134.
- Piégay, H. et Gurnell, A.M. 1997. Large woody debris and river geomorphological pattern: examples from S.E. France and S. England, *Geomorphology*, vol. 19, 99-116.
- Roy, A.G., Roy, R. et Bergeron, N. 1988. Hydraulic geometry and changes in flow velocity at a river confluence with coarse bed material, *Earth Surface and Processes*, vol. 13, 583-598.
- Rigon, E., Comiti, F. et Lenzi, M.A. 2012. Large wood storage in streams of the Eastern Italian Alps and the relevance of hillslope processes, *Water Resources Research*, vol. 48, 1-18.
- Ravazzolo, D., Mao, L., Picco, Sitzia, T. et Lenzi, M.A. 2015. Geomorphic effects of wood quantity and characteristics in three Italian gravel-bed rivers, *Geomorphology*, vol. 246, 79-89.
- Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F. et Bussettini, M. 2015. A methodological framework for hydrogeomorphological assessment, analysis and monitoring (IDRAIM) aimed at promoting integrated river management, *Geomorphology*, vol. 251, 122-136.
- Rosgen, D.L. 1994. A classification of natural rivers, *Catena*, vol. 22, 169-199.
- Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A. et Bladé, E. 2014. Large wood transport as significant influence on flood risk in a mountain village, *Natural Hazards*, vol. 74, 967-987.
- Schenk, E.R., Moulin, B., Hupp, C.R. et Richer, J. (2014). Large wood budget and transport dynamic on a large river using radiotelemetry, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 39, 487-498.

- Seo, J.I., Nakamura, F., Chun, K.W., Kim, S.W. et Grant, G.E. 2015. Precipitation patterns control the distribution and export of large wood at the catchment scale, *Hydrological Processes*, vol. 29(24), 5044-5057.
- Seo, J.I., Nakamura, F. et Chun, K.W. 2010. Dynamics of large wood at the watershed scale: a perspective on current research limits and future directions, *Landscape and Ecological Engineering*, vol. 6, 271-287.
- Seo, J.L. et Nakamura, F. 2009. Scale-dependent controls upon the fluvial export of large wood from river catchments, *Earth Surface Processes and Landform*, vol. 34, 786-800.
- Seo, J.L., Nakamura, F., Nakano, D., Ichiyanagi, H. et Chun, K.W. 2008. Factors controlling the fluvial export of large woody debris, and its contribution to organic carbon budgets at watershed scales, *Water Resources Research*, vol. 44, 1-13.
- Shields, D.F., Pezeshki, S.R., Wilson, G.V., Wu, W. et Dabney, S. 2008, Rehabilitation of an incised stream using plant material: the dominance of geomorphic processes, *Ecology and Society*, vol. 13(2).
- Shields, F.D. Jr. et Smith, R.H. 1992. Effects of a large woody debris removal on physical characteristics of a sand-bed river, *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystem*, vol. 2, 145-163.
- Simenstad, C.A., Wick, A., Van de Wetering, S. et Bottom, D.L. 2003. Dynamics and ecological functions of wood in estuarine and coastal marine ecosystems, *The Ecology and Management of Wood in World Rivers*, S. Gregory, K. Boyer et A. Gurnell (dir.) American Fisheries Society Symposium, 265-277
- Sivapragasam, C. et Muttill, N. 2005. Discharge rating curve extension – a new approach, *Water Resources Management*, vol. 19, 505-520.
- Skalak, K. et Pizzuto, J. 2010. The distribution and residence time of suspended sediment stored within the channel margins of a gravel-bed bedrock river, *Earth Surface Processes and Landform*, vol. 35, 435-446.
- Splinter, D.K. et Dauwalter, D.C. 2016. Frequency of large wood in-channel wood in eastern Oklahoma ecoregions and its association with channel morphology, *Geomorphology*, vol. 269, 175-185.
- Therrien, J. 1997. Guide technique sur le démantèlement d'embâcles, Fondation de la Faune du Québec, Sainte-Foy, 55p.

- Thevenet, A., Citterio, A. et Piégay, H. 1998. A new methodology for the assessment of large woody debris accumulations on highly modified rivers (example of two French piedmont rivers), *Regulated Rivers: Research et Management*, vol. 14, 467-483.
- Thompson, D.M. 2013. Pool-riffle dans: *Treatise on fluvial geomorphology*, J.F. Shroder et E. Wohl (dir.), Academic Press, Elsevier, San Diego, CA, Volume 9, Fluvial Geomorphology, Chapitre 21, 364-378.
- Thorne, S.D. et Furbish, D.J. 1995. Influence of coarse bank roughness on flow within a curves river bend, *Geomorphology*, vol. 12, 241-257.
- Tremblay, F., Young-Vigneault et Banville-Côté, F. 2014. Analyse de la dynamique fluviale de la rivière Mont-Louis : caractérisation des embâcles, de leur évolution temporelle et de leur influence sur l'utilisation du territoire. Dans le cadre du cours GEO6213 – Atelier pratiques sur le terrain sur l'analyse et la prévention des risques naturels I, Rimouski, 19 p.
- Warren, D.R., Judd, K.E., Bade, D.L., Likens, G.E. et Kraft, C.E. 2013. Effects of wood removal on stream habitat and nitrate uptake in two northeastern US headwater streams, *Hydrobiologia*, vol. 717, 119-131.
- Webb, A. et Erskine, W. 2003. Distribution, recruitment, and geomorphic significance of large woody debris in an alluvial forest stream: Tonghi Creek, southeastern Australia, *Geomorphology*, vol. 51, 109-126.
- Wohl, E. et Scott, D.N. 2016. Wood and sediment storage and dynamics in river corridors, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 42(1), 5-23.
- Wohl, E., Bledsoe, B.P., Fausch, K.D., Kramer, N., Bestgen, K.R. et Gooseff, M.N. 2016. Management of large wood in streams: an overview and proposed framework for hazard evaluation, *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 52(2), 315-335.
- Wohl, E. 2014. A Legacy of absence: Wood removal in US rivers, *Progress in Physical Geography*, vol. 38, (5), 637-663.
- Wohl, E. 2013. Floodplain and wood, *Earth-Sciences Reviews*, vol. 123, 194-212.
- Wohl, E. et Goode, J.R. 2008. Wood dynamic in headwater streams of the Colorado Rocky Mountains, *Water Resources Research*, vol. 44, 1-14.

Wyrick, J.R. et Pasternack, G.B. 2014. Geospatial organization of gravel-cobble river: Beyond the riffle-pool couplet, *Geomorphology*, vol. 21, 48-65.

ANNEXES

ANNEXE I

FICHE DE CARACTERISATION DES EMBACLES DE BOIS MORT

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

CARACTÉRISTIQUES DE L'EMBÂCLE

Type:

Position: C B P

Obstruction du chenal (%):

Provenance du BM:

Longueur (m):

Largeur (m):

Hauteur (m):

Densité:

Nb de BM:

Réseaux racinaires:

Composition (%): Troncs Branches Racines

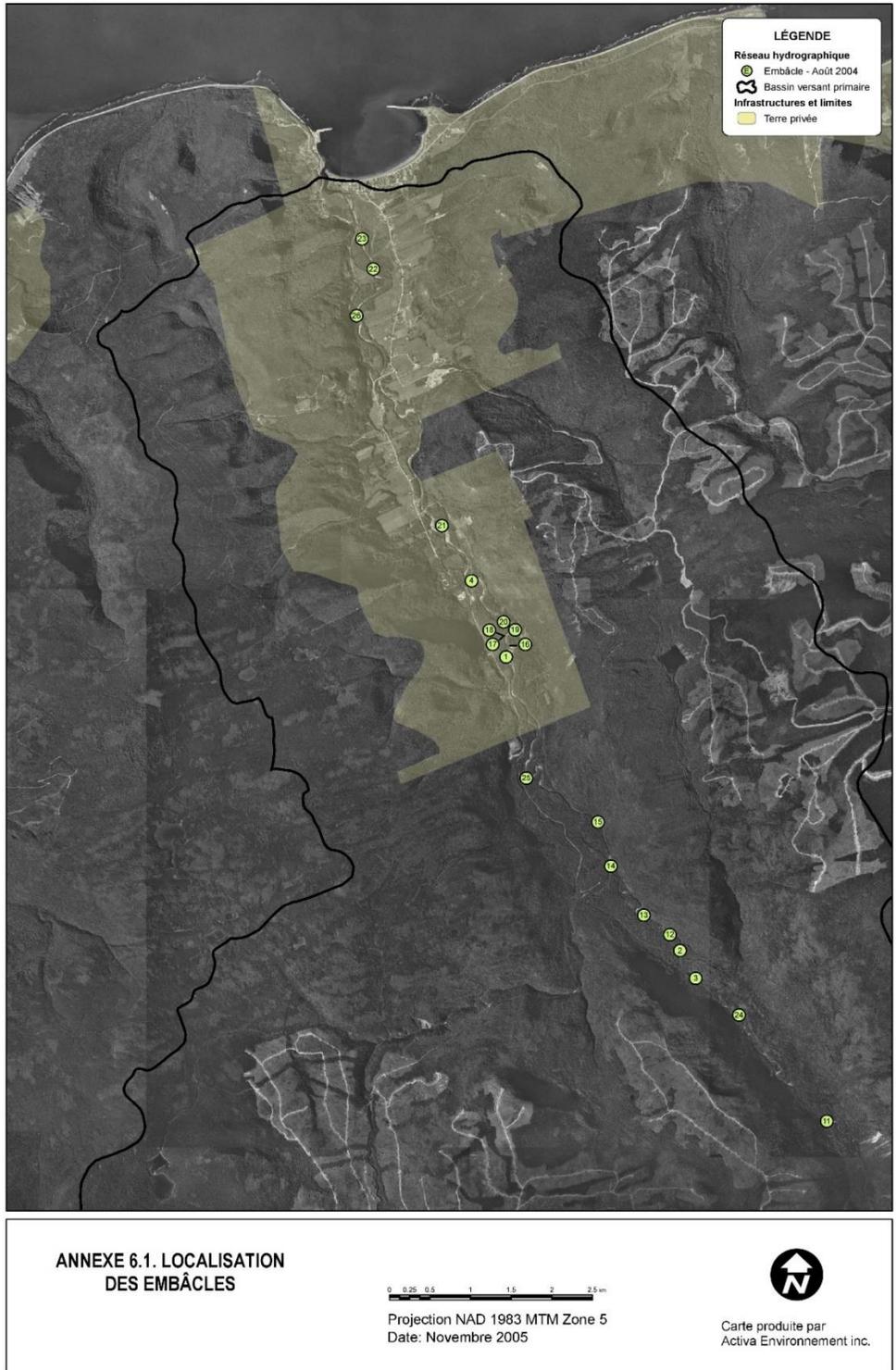
Berge:

Fosse:

Commentaires:

ANNEXE II

LOCALISATION DES EMBACLES DE BOIS MORT EN 2004



(Hébert, 2006)

ANNEXE III

LOCALISATION DES EMBACLES DE BOIS MORT EN 2014

