

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

**ANALYSE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE DE LA
DYNAMIQUE DES EMBÂCLES DE BOIS MORT DE LA
RIVIÈRE NEIGETTE, BAS-SAINT-LAURENT, QUÉBEC**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en géographie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© **SIMON MASSÉ**

Juillet 2014

Composition du jury :

Simon Bélanger, président du jury, Université du Québec à Rimouski

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

Guillaume Marie, examinateur interne, Université du Québec à Rimouski

Pascale Biron, examinatrice externe, Université Concordia

Dépôt initial le 7 mai 2014

Dépôt final le 27 juillet 2014

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

Je tiens d'abord à remercier chaleureusement mon directeur Thomas Buffin-Bélangier. Tom : merci beaucoup pour la confiance que tu m'as accordée, ton professionnalisme, ta disponibilité et ton écoute. Tout au long du projet, tes conseils ont toujours été judicieux et pertinents. Ta passion pour la recherche scientifique et la géomorphologie fluviale est contagieuse et tu es un excellent professeur !

Merci à tous les collègues et amis pour leur assistance sur le terrain : Simon Claveau, Johan Bérubé, Véronic Parent, Maxime Boivin, Sylvio Demers, Jean-Philippe Marchand, Nancy Martel, Sophie Delorme, Marie-Andrée Roy, Ludovic Landry-Johnson, Jimmy Larivière et Étienne Couture. Merci notamment aux plus expérimentés pour les judicieux conseils sur le mode d'emploi des divers instruments utilisés pour la prise de données. Merci aussi à la très charmante Anne-Josée Hébert pour son accompagnement lors des sorties de terrain improvisées et pour son soutien lors de mes périodes de stress !

Je tiens aussi à remercier sincèrement Sylvio Demers, Taylor Olsen et Claude-André Cloutier pour avoir répondu à mes nombreuses interrogations à propos d'*ArcGIS* et des analyses statistiques. D'ailleurs, c'est vraiment un avantage considérable de travailler avec des collègues aussi passionnés et généreux de leurs connaissances et de leur temps. La cohésion et l'esprit de solidarité qui règnent au sein du Laboratoire de recherche en géomorphologie et dynamique fluviale sont certainement exemplaires et je suis honoré de faire partie de l'équipe. Merci également à Marie-Andrée Roy pour ses trucs de pro en géomatique et sa disponibilité.

Un merci bien spécial à Gérard Michaud, qui est sans aucun doute le radio-modéliste le plus passionné du Bas-St-Laurent, pour son habileté légendaire à manœuvrer le drone et à capter ces prises de vue si impressionnantes.

Je remercie également Catherine Denis, Simon Tweddell, Maxime Gendron et toute l'équipe de l'OBVNESBL. Je suis fier d'avoir participé avec vous à la rédaction du rapport sur la gestion des embâcles de bois mort et sur le potentiel récréatif de la rivière Neigette.

Je tiens également à remercier les élus municipaux de St-Donat et de St-Anaclet de Lessard ainsi que Cédric Charest de la MRC de la Mitis pour leur soutien au cours du projet. Merci également aux propriétaires riverains pour les autorisations de passage et le partage de leurs connaissances.

Je remercie le Centre d'études nordiques pour le prêt du GPS lors des 2 étés de terrain et pour la prise en charge des frais du cours d'abattage manuel (oui, en plus d'être maître ès sciences, je suis un bûcheron certifié). Enfin, je tiens à remercier le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT), le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), la Fondation Desjardins et Enviro-Nord pour le soutien financier obtenu dans le cadre de mes travaux de maîtrise.

RÉSUMÉ

Dans la rivière Neigette, les embâcles de bois sont très nombreux et causent des inquiétudes pour la sécurité des infrastructures dans les municipalités de St-Donat et de St-Anaclet-de-Lessard dans le Bas-Saint-Laurent. En effet, les embâcles entraînent des problèmes majeurs d'érosion et exacerbent les débordements en période de crue. Les autorités ont la responsabilité d'extraire les obstacles à l'écoulement, mais la grande quantité de bois implique à la fois des coûts très significatifs et à la fois une incertitude quant à la réponse de la rivière à une intervention si drastique.

L'objectif général du projet de maîtrise est de comprendre le rôle du bois mort sur la dynamique fluviale de la rivière Neigette afin de soutenir les municipalités de St-Donat et de St-Anaclet dans la gestion durable des risques d'inondation et d'érosion liés à la présence des embâcles de bois mort.

Sur les 32,1 km du tronçon à l'étude, une recension de tous les embâcles a été réalisée en 2012 et en 2013 pour décrire la distribution spatiale du bois mort et analyser sa mobilité interannuelle. La dynamique hydrogéomorphologique du cours d'eau (sectorisation morphodynamique, largeur active du chenal, profil en long avec imagerie LiDAR et relevés au DGPS, analyse de la migration latérale par la superposition des tracés fluviaux dans un système d'information géographique) a été analysée pour interpréter le rôle des embâcles de bois mort dans l'évolution du corridor fluvial. Enfin, 3 embâcles de bois mort ont été démantelés afin d'étudier la réponse du chenal à ce type d'intervention. La comparaison des profils topographiques effectués avant et après les démantèlements permet de visualiser les impacts sur la morphologie du lit et des berges.

L'étude souligne le rôle des paramètres hydrogéomorphologiques du chenal (style fluvial, pente, largeur, érodabilité) sur la distribution longitudinale des embâcles de bois mort. Le contexte morphosédimentaire de la rivière Neigette semble expliquer la diminution de l'amont vers l'aval du nombre d'embâcles. L'analyse comparative des données extraites des inventaires des embâcles met en évidence leur variabilité spatio-temporelle. En l'espace d'une année, on constate que 35 nouveaux embâcles ont été formés et que 20 ont été évacués du système fluvial. L'ensemble des résultats suggère une forte variabilité spatiale et temporelle des embâcles de bois mort de la rivière Neigette. De plus, le démantèlement d'embâcles de bois mort provoque des changements morphologiques significatifs à l'échelle du tronçon fluvial. À la lumière de ces connaissances, il est nécessaire d'opter pour une approche de gestion qui considère le dynamisme des embâcles de bois mort et leur rôle hydrogéomorphologique afin d'atténuer les risques d'inondation et d'érosion dans le corridor de la rivière Neigette.

Mots clés : Embâcles de bois mort, hydrogéomorphologie, démantèlement, dynamique du bois mort, gestion des cours d'eau, inondation, érosion, rivière Neigette

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	vii
RÉSUMÉ.....	ix
TABLE DES MATIÈRES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
LISTE DES FIGURES.....	xvii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxiii
CHAPITRE 1. INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 PROBLEMATIQUE.....	1
1.2 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE.....	5
CHAPITRE 2. CADRE THÉORIQUE.....	7
2.1 LA DYNAMIQUE DU BOIS MORT EN RIVIERE.....	7
2.1.1 Le recrutement du bois mort.....	7
2.1.2 La mobilité du bois mort.....	12
2.1.3 L'accumulation du bois mort et la formation d'embâcles.....	15
2.1.4 Le concept de bilan ligneux.....	18
2.2 LES IMPACTS HYDROGEOMORPHOLOGIQUES DU BOIS MORT EN RIVIERE.....	21
2.2.1 Les effets sur l'écoulement fluvial.....	21
2.2.2 Les effets sur le transport des sédiments.....	23
2.2.3 Les effets sur la morphologie du chenal.....	25
2.2.4 Les impacts des embâcles de bois mort sur les écosystèmes aquatiques.....	29

2.3	LES IMPACTS HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES DU DÉMANTELEMENT D'EMBACLES DE BOIS MORT	31
2.3.1	Les effets sur la structure de l'écoulement	31
2.3.2	Les effets sur le transport des sédiments	33
2.3.3	Les effets sur la morphologie du lit et des berges	35
2.3.4	Les conséquences sur la dynamique du bois mort.....	37
2.4	LES MESURES DE GESTION DU BOIS MORT EN RIVIERE.....	37
2.5	CONCLUSION	40
CHAPITRE 3. SITE D'ÉTUDE.....		43
3.1	PRESENTATION GÉNÉRALE.....	43
3.2	CARACTÉRISTIQUES CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES DU BASSIN VERSANT	45
3.3	CONTEXTE GÉOLOGIQUE	47
3.4	DYNAMIQUE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE DE LA RIVIÈRE NEIGETTE.....	49
3.5	ÉVOLUTION ET PERTURBATIONS RÉCENTES DE LA BANDE RIVERAINE.....	55
CHAPITRE 4. MÉTHODOLOGIE		57
4.1	CARACTÉRISATION HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE.....	57
4.1.1	Analyse de l'érodabilité et de la migration latérale	58
4.1.2	Évolution spatiale et temporelle de la largeur du chenal	59
4.1.3	Profil topographique longitudinal.....	60
4.2	CARACTÉRISTIQUES ET DYNAMIQUES DES EMBACLES DE BOIS MORT	61
4.2.1	Inventaire des embâcles de bois mort.....	61
4.2.2	Variabilité interannuelle de la position et de la configuration des embâcles	70
4.2.3	Suivi en continu de la dynamique du bois mort	71
4.3	ÉVALUATION HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE DES EFFETS DU DÉMANTELEMENT SUR LA DYNAMIQUE FLUVIALE	77
4.3.1	Démantèlement expérimental de 3 embâcles	77
4.3.2	Évaluation des impacts morphologiques des démantèlements.....	81

CHAPITRE 5. RÉSULTATS	85
5.1 CARACTERISATION HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE	85
5.1.1 Analyse de l'érodabilité et de la migration latérale.....	85
5.1.2 Évolution spatiale et temporelle de la largeur du chenal	90
5.1.3 Profil topographique longitudinal	92
5.2 CARACTERISTIQUES ET DYNAMIQUES DES EMBACLES DE BOIS MORT	94
5.2.1 Inventaires des embâcles de bois mort.....	94
5.2.2 Variabilité interannuelle de la position et de la configuration des embâcles	107
5.2.3 Analyse de l'effet du bois mort sur la rétention de l'écoulement	118
5.3 ÉVALUATION DES EFFETS DU DEMANTELEMENT SUR LA DYNAMIQUE FLUVIALE.....	129
5.3.1 Suivi de la dynamique du bois mort.....	129
5.3.2 Suivi de la morphologie du lit et des berges	131
 CHAPITRE 6. DISCUSSION	 137
6.1 INTERRELATIONS ENTRE LE BOIS MORT ET L'HYDROGÉOMORPHOLOGIE	138
6.1.1 Unité divagante à chenaux multiples (A).....	138
6.1.2 Unité à méandres dynamiques (B)	143
6.1.3 Unité à méandres stables (C).....	153
6.2 DYNAMIQUE DES EMBACLES DE BOIS MORT	156
6.2.1 Dynamique spatiale du bois mort de l'amont vers aval	156
6.2.2 Dynamique interannuelle du bois mort	164
6.3 EFFETS DU DEMANTELEMENT D'EMBACLES SUR LA DYNAMIQUE FLUVIALE.....	173
 CONCLUSION GÉNÉRALE.....	 179
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	181

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.2.1. Critères pour la classification des embâcles de bois mort	67
Tableau 4.2.2. Description des variables mesurées ou évaluées pour la caractérisation des embâcles	69
Tableau 4.3.1. Valeurs médianes et d'écart-type de l'erreur de krigeage des matrices d'interpolation.....	83
Tableau 5.1.1. Taux de migration latérale et superficies érodées entre 1963 et 2004 pour l'unité A	86
Tableau 5.1.2. Taux de migration latérale et superficies érodées entre 1963 et 2004 pour l'unité B.....	88
Tableau 5.1.3. Comparaison des valeurs de largeur moyenne et d'écart-type par unité morphodynamique pour les séries de 2004, 2001, 1980 et 1963.....	92
Tableau 5.2.1. Répartition des embâcles de bois mort caractérisés en 2012 selon la segmentation hydrogéomorphologique.....	95
Tableau 5.2.2. Répartition des embâcles de bois mort caractérisés en 2013 selon la segmentation hydrogéomorphologique.....	99
Tableau 5.2.3. Composition des embâcles de bois mort de 2013. La valeur entre parenthèses correspond à l'écart-type.....	102
Tableau 5.2.4. Nombre d'embâcles par unité fluviale selon la provenance du bois mort.....	103
Tableau 5.2.5. Nombre d'embâcles par niveau et selon la provenance du bois mort.....	104
Tableau 5.2.6. Nombre d'embâcles où une mouille a été constatée en amont, au droit ou en aval	105

Tableau 5.2.7. Nombre d'embâcles selon le nombre de mouilles par site	106
Tableau 5.2.8. Nombre de sites par niveaux d'intensité présentant une mouille en amont, au droit et en aval de l'embâcle dans les unités morphodynamiques A et B	106
Tableau 5.2.9. Nombre de sites par niveaux d'intensité selon leur nombre de mouilles répertoriées dans les unités morphodynamiques A et B	107
Tableau 5.2.10. Évolution interannuelle (2012-2013) du nombre d'embâcles de bois mort	109
Tableau 5.2.11. Composition des embâcles de bois mort nouvellement formés. La valeur entre parenthèses correspond à l'écart-type de la distribution.	110
Tableau 5.2.12. Provenance des bois morts composant les embâcles nouvellement formés.....	111
Tableau 5.2.13. Caractéristiques des embâcles dont la taille a le plus augmenté entre 2012 et 2013	113
Tableau 5.2.14. Caractéristiques des embâcles dont la taille a le plus diminué entre 2012 et 2013	113
Tableau 5.2.15. Comparaison du nombre d'embâcles recensés à St-Donat en 2011 et en 2012	115
Tableau 5.2.16. Amplitude et pic de refoulement calculés pour les événements hydrologiques A à F	120
Tableau 5.2.17. Valeurs de décalage calculées par corrélations croisées pour chaque événement.....	123
Tableau 5.2.18. Amplitude et pic de refoulement calculés pour les événements hydrologiques A à F	125
Tableau 5.2.19. Valeurs de décalage calculées par corrélations croisées pour chaque événement.....	127
Tableau 5.3.1. Caractéristiques des amas de bois mort des sites n ^{os} 8205 et 10930 entre 2012 et 2013	131

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1.1. Recrutement de bois morts par l'érosion progressive des berges à l'échelle d'une section transversale (modifié de Abbe, 2000).....	8
Figure 2.1.2. Importance des processus de production du bois mort en rivière relativement au gradient longitudinal de la taille du cours d'eau (adapté de Keller et Swanson, 1979).....	9
Figure 2.1.3. Relation entre la concentration de bois mort en rivière et l'âge des peuplements riverains pour 314 tronçons fluviaux (modifié de Gurnell, 2013).....	11
Figure 2.1.4. Importance relative des processus d'évacuation du bois mort en rivière selon un gradient longitudinal (adapté de Keller et Swanson, 1979)	15
Figure 2.1.5. Évolution longitudinale de l'organisation et de la configuration des embâcles de bois mort à l'échelle d'un bassin versant	18
Figure 2.1.6. Bilan ligneux annuel de la rivière Roanoke. Les pourcentages ont été calculés en fonction de la population de bois mort totale et le nombre de bois mort correspond à la valeur entre parenthèses. Le carré blanc représente le système de la rivière Roanoke, les ovales bleus correspondent au bois mort stocké dans des embâcles et les ovales verts représentent les bois morts individuels. La flèche orange correspond au déplacement du bois mort dans le système et les flèches grises indiquent les bois morts entrants et sortants (traduit de Schenk <i>et al.</i> , 2014)	19
Figure 2.2.1. Accumulation de sédiments en amont d'un embâcle de bois mort (Therrien, 1997).....	24
Figure 2.2.2. Engraissement et stabilisation d'un banc d'accumulation à la suite de la formation d'un embâcle de bois mort (MacVicar <i>et al.</i> , 2009)	25
Figure 2.2.3. Surcreusement du lit en aval d'un amas de bois mort.....	26

Figure 2.2.4. Distribution de fréquence de la profondeur des mouilles associées et non associées à un embâcle de bois mort, rivière Queets, État de Washington (É-U) (Abbe et Montgomery, 1996).....	27
Figure 2.2.5. Avulsion provoquée par la présence d'un embâcle total (Therrien, 1997)	28
Figure 2.2.6. Embâcle latéral atténuant l'érosion de la berge concave d'un méandre (modifié de Therrien, 1997)	29
Figure 2.4.1. Estacade aménagée sur le lac Shasta pour récupérer les débris ligneux à la suite d'un feu de forêt, Californie (É-U) (USDA Forest Service, 2014)	40
Figure 3.1.1. Localisation de la zone d'étude	44
Figure 3.2.1. Régime annuel des débits mensuels moyens de la rivière Neigette entre 1975 et 1997	46
Figure 3.2.2. Valeurs de débit journalier maximales de la rivière Neigette entre 1975 et 1997. Le trait en pointillé correspond à la médiane de 90,67 m ³ /s.	46
Figure 3.3.1. L'imposant escarpement de la faille Neigette vu du 2 ^e rang de Neigette	47
Figure 3.3.2. Carte des dépôts de surface de la vallée de la Neigette (Données écoforestières du MRN (2013)).....	48
Figure 3.4.1. Sectorisation morphodynamique de la rivière Neigette entre la chute et la confluence avec la rivière Mitis réalisée par Demers et Buffin-Bélanger (2011) (modifié de Denis <i>et al.</i> , 2013).....	49
Figure 3.4.2. Segment de l'unité divagante à chenaux multiples	51
Figure 3.4.3. Tronçon de l'unité à méandres dynamiques	52
Figure 3.4.4. Un <i>oxbow lake</i> (méandre délaissé) témoignant de la dynamique hydrogéomorphologique de l'unité B	53
Figure 3.4.5. Tronçon de l'unité à méandres stables.....	54
Figure 4.2.1. Calcul du volume géométrique d'un embâcle (Thevenet <i>et al.</i> , 1998).....	63
Figure 4.2.2. Comparaison d'embâcles de même volume selon la méthode de Thevenet (1998)	64

Figure 4.2.3. Représentation des 4 types d'embâcles de bois mort selon Therrien (1997).....	65
Figure 4.2.4. Exemples des niveaux d'embâcles de bois mort.....	68
Figure 4.2.5. Drone télécommandé <i>Draganfly X4-P</i> équipé de la caméra <i>Olympus E-PM1</i>	71
Figure 4.2.6. Caméras Spypoint HD-10 et Live-3G (Source : http://www.spypoint.com/FR/cameras).....	72
Figure 4.2.7. Localisation des capteurs de pression. La zone A correspond au tronçon de 540 m comprenant 9 embâcles dont 2 extrêmes et la zone B correspond à l'embâcle extrême n° 8075.	73
Figure 4.2.8. Schématisation du système de mise à l'eau des capteurs de pression.....	74
Figure 4.2.9. Interprétation de la valeur de niveau d'eau corrigé (Z_{corr}) selon 3 scénarios d'écoulement : A) étiage ou bas niveau de l'eau, B) crue en dessous du niveau plein-bord et C) crue au-delà du niveau plein-bord.	76
Figure 4.3.1. Localisation des 3 embâcles démantelés en septembre 2012.....	78
Figure 4.3.2. Sectionnement des bois morts avec une scie mécanique	79
Figure 4.3.3. Extraction des bois morts du chenal.....	79
Figure 4.3.4. Vue aérienne des sites avant et après les opérations de démantèlement	80
Figure 4.3.5. Disposition des bornes pour les relevés topographiques. La densité des transects est plus élevée au droit des embâcles.....	81
Figure 4.3.6. Étapes de réalisation de la matrice des variations morphologiques du lit entre 2012 et 2013.....	83
Figure 5.1.1. Superposition des tracés historiques de l'unité A	86
Figure 5.1.2. Érosion sévère d'une berge concave de l'unité A, octobre 2013	87
Figure 5.1.3. Superposition des tracés historiques dans les 3,2 premiers km de l'unité B.....	89

Figure 5.1.4. Évolution de la largeur active au niveau plein-bord de l'amont vers l'aval	90
Figure 5.1.5. Diagramme à barres d'écart-type de la largeur du chenal	92
Figure 5.1.6. Profil topographique longitudinal à la surface de l'eau	93
Figure 5.2.1. Carte de localisation des embâcles de bois mort répertoriés en septembre 2012	95
Figure 5.2.2. Représentation et localisation des embâcles extrêmes	97
Figure 5.2.3. Carte de localisation des embâcles de bois mort répertoriés en juillet 2013	99
Figure 5.2.4. Comparaison du nombre d'EBM par niveau d'intensité de 2012 et de 2013	108
Figure 5.2.5. Carte de localisation des embâcles de bois mort formés et évacués entre 2012 et 2013	110
Figure 5.2.6. Diagrammes de dispersion des valeurs de volume corrigé (A) et du nombre de bois mort (B) pour les embâcles présents en 2012 et 2013. (Les embâcles dont le volume ou le nombre de bois mort a augmenté sont à gauche de la droite 1:1 et ceux dont ces variables ont diminué sont à droite de cette dernière.)	112
Figure 5.2.7. Embâcle n° 4525 vu de l'amont en 2012 et en 2013	113
Figure 5.2.8. Embâcle n° 16075 vu de l'amont en 2012 et en 2013	114
Figure 5.2.9. Carte de localisation des embâcles de bois mort relevés en 2011. Les flèches indiquent le début et la fin de la zone caractérisée.....	116
Figure 5.2.10. Évolution temporelle des niveaux d'eau enregistrés en amont et en aval du tronçon fortement encombré de bois mort. Le trait pointillé de la section supérieure représente le point de congélation. Dans la section inférieure, les zones blanches correspondent aux périodes sans refoulement ($Z_{\text{corr}} \approx 0$), les zones mauves représentent les phases de refoulement ($Z_{\text{corr}} > 0$) et les zones orangées correspondent aux épisodes où le niveau d'eau en aval surpasse celui de l'amont indépendamment de la pente ($Z_{\text{corr}} < 0$).....	119

Figure 5.2.11. Évolution temporelle des niveaux d'eau enregistrés en amont et en aval lors des événements hydrologiques B (partie A) et F (partie B)	121
Figure 5.2.12. Évolution temporelle des niveaux d'eau enregistrés en amont et en aval de l'embâcle n° 8075. (Le trait pointillé de la section supérieure représente le point de congélation. Dans la section inférieure, les zones blanches correspondent aux périodes sans refoulement ($Z_{\text{corr}} \approx 0$), les zones mauves représentent les phases de refoulement ($Z_{\text{corr}} > 0$) et les zones orangées correspondent aux épisodes où le niveau d'eau en aval surpasse celui de l'amont indépendamment de la pente ($Z_{\text{corr}} < 0$).).....	124
Figure 5.2.13. Évolution des niveaux d'eau enregistrés par les capteurs en amont et en aval de l'embâcle n° 8075 au cours de la crue printanière.....	126
Figure 5.2.14. Diagramme de dispersion des valeurs d'amplitude calculées par les capteurs en amont et en aval pour 24 épisodes d'augmentation du niveau d'eau	128
Figure 5.3.1. Configuration de l'embâcle n° 10930 et du barrage de castor à l'été 2013	130
Figure 5.3.2. Configuration de l'embâcle n° 8205 à l'été 2013	130
Figure 5.3.3. Évolution de la morphologie du lit du site n° 12010 entre septembre 2012 et juillet 2013	132
Figure 5.3.4. Évolution de la morphologie du lit du site n° 8205 entre septembre 2012 et juillet 2013	133
Figure 5.3.5. Évolution de la morphologie du lit du site n° 10930 entre septembre 2012 et juillet 2013	135
Figure 6.1.1. Embâcle majeur n° 745 formé par l'accumulation de bois mort en amont d'un filot central végétalisé.....	139
Figure 6.1.2. Embâcle majeur n° 1505 disposé sur un banc d'accumulation latéral	140
Figure 6.1.3. Embâcle mineur n° 505 formé au pied d'une berge concave en érosion	141
Figure 6.1.4. Embâcles flottants n° ^{os} 11175 et 11285 dans la portion aval de l'unité B	144

Figure 6.1.5. Comparaison des distributions statistiques de la largeur moyenne de l'unité B des parcelles sans embâcle, des parcelles avec embâcles latéraux et des parcelles avec embâcles obstruant la majorité de la section transversale	145
Figure 6.1.6. Embâcle extrême n° 8075 perceptible par photos aériennes à partir de 2001	148
Figure 6.1.7. Imagerie aérienne des embâcles n ^{os} 4925 et 4960 obtenue avec le drone télécommandé en octobre 2013	150
Figure 6.1.8. Recoupement d'un méandre et formation de l'embâcle extrême n° 4960 entre 1980 et 2004	151
Figure 6.1.9. Comparaison des distributions statistiques de la largeur moyenne des parcelles de l'unité C sans embâcle et des parcelles avec embâcles	154
Figure 6.2.1. Distribution des embâcles de bois mort de 2013 sur le profil en long (traits noirs sur courbe grise) et la variation du nombre d'embâcles par km (courbe noire)	157
Figure 6.2.2. Barrage de castor relevé en 2012 à 8 520 m en aval de la chute Neigette....	161
Figure 6.2.3. Modèle des dynamiques de recrutement et de l'accumulation du bois mort dans la rivière Neigette. (La magnitude des processus et des phénomènes sont représentés sur un axe relatif et ne sont pas à l'échelle.)	162
Figure 6.2.4. Images transmises à 30 minutes d'intervalle par la caméra de surveillance en amont de l'embâcle extrême n° 8075 soulignant le transport du bois mort en période de crue	166
Figure 6.2.5. Histogramme du débit moyen journalier maximal enregistré sur la Petite rivière Neigette entre 2001 et 2013. (Le trait en pointillé correspond à la valeur moyenne de 19,88 m ³ /s.)	168
Figure 6.2.6. Histogramme du nombre de jours par année où un débit moyen supérieur à 10 m ³ /s a été enregistré sur la Petite rivière Neigette entre 2001 et 2013. (Le trait en pointillé correspond à la valeur moyenne de 14,7 jours par année.)	169
Figure 6.3.1. Schéma de la morphologie du lit avant (A) et après (B) le démantèlement de l'embâcle n° 8205.....	175

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
D-GPS	Système mondial de localisation différentiel (<i>Differential Global Positioning System</i>)
EBM	Embâcle de bois mort
GPS	Système de localisation mondial (<i>Global Positioning System</i>)
LGDF	Laboratoire de recherche en géomorphologie et dynamique fluviale
LiDAR	Détection et télémétrie par ondes lumineuses (<i>Light Detection and Ranging</i>)
MDDEFP	Ministère du développement durable, de l'environnement, de la faune et des parcs du Québec
MRC	Municipalité régionale de comté
MRN	Ministère des ressources naturelles du Québec
OBVNEBSL	Organisme des bassins versants du nord-est du Bas-St-Laurent
UQAR	Université du Québec à Rimouski

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La problématique de recherche est d'abord présentée pour souligner l'origine du projet de maîtrise et le partenariat avec les acteurs locaux de la gestion de l'eau et les collectivités concernées. Les objectifs de la recherche sont ensuite étayés.

1.1 PROBLEMATIQUE

En milieu forestier, le matériel ligneux mort ou vivant se trouvant en bordure et dans le chenal influence la dynamique hydrogéomorphologique des cours d'eau (Keller et Macdonald, 1995; Gurnell *et al.*, 2002; Piégay *et al.*, 2005a; Gurnell, 2013). Généralement, les amas de débris ligneux ont pour effet de stabiliser le chenal en atténuant l'énergie hydraulique du cours d'eau et en limitant l'évacuation des sédiments de fond qui sont essentiels aux écosystèmes fluviaux (Montgomery, 2003; Gurnell, 2013). Cependant, les cours d'eau caractérisés par un volume anormalement élevé de bois mort ou par une succession d'embâcles obstruant complètement le chenal subissent des modifications de leurs caractéristiques hydrogéomorphologiques initiales (Montgomery *et al.*, 2003). À l'échelle événementielle ou annuelle, le bois mort peut accentuer l'érosion des berges, initier la formation de fosses de surcreusement et de bancs d'accumulation, mener à l'aggradation du lit et à la diminution de la granulométrie des sédiments de fond (Keller et Swanson, 1979; Piégay et Gurnell, 1997; Gurnell *et al.*, 2002). Sur de plus grandes périodes de temps, les embâcles de bois mort peuvent entraîner des ajustements morphologiques majeurs dans le style fluvial du cours d'eau et modifier les interactions entre le chenal et sa plaine alluviale (Montgomery *et al.*, 2003). Pour atténuer les effets négatifs des embâcles

de bois mort, l'extraction des débris ligneux du cours d'eau est souvent la méthode préconisée par les collectivités riveraines (Shields et Smith, 1992; Therrien, 1997; Chin *et al.*, 2012).

Située à une vingtaine de km au sud de Rimouski dans le Bas-St-Laurent, la rivière Neigette est une rivière à méandres caractérisée par la présence de nombreux embâcles de bois mort. En 2011, un inventaire réalisé sur un tronçon d'environ 11,5 km dans les limites de la municipalité de St-Donat par Pierre-Luc Rioux et Cédric Charest, respectivement technicien en géomatique et technicien en aménagement et en urbanisme à la MRC de La Mitis, a répertorié 27 embâcles de bois mort, dont une douzaine obstruaient le chenal dans toute sa largeur (Denis *et al.*, 2013).

Ces embâcles causent des désagréments à plusieurs niveaux dans la vallée de la Neigette. D'abord, combinés au morphodynamisme de la rivière, les embâcles de bois mort entraînent des problèmes majeurs d'érosion et exacerbent les débordements en période de crue dans les municipalités de St-Donat et de St-Anaclet-de-Lessard dans le Bas-St-Laurent. Selon les instances municipales et les propriétaires riverains, l'érosion des berges génère la perte annuelle d'une superficie considérable de terres arables. Les débordements récurrents dans les champs situés en amont du village de St-Donat semblent affecter la productivité des surfaces cultivées. Au cours d'une séance d'information publique avec les propriétaires riverains, un agriculteur a affirmé perdre de 30 à 50 % de rendement céréalier en raison de drains bouchés par l'accumulation de sédiments en amont des embâcles.

Ensuite, les embâcles de bois de la rivière Neigette complexifient les descentes en canot, principalement dans la portion en amont de St-Donat, ce qui limite le développement récréotouristique de la vallée (Denis *et al.*, 2013). Le contournement d'un embâcle peut être risqué compte tenu de l'instabilité des amas de débris ligneux et des fosses de surcreusement associées aux embâcles. Une odeur nauséabonde en raison de la décomposition de la matière organique et la présence de déchets entremêlés aux débris ligneux peuvent compromettre le caractère bucolique d'une expédition de canot.

De plus, bien que ceci ne fut pas mentionné spécifiquement lors des rencontres publiques, une rivière chargée d'embâcles de bois est généralement moins appréciée d'un point de vue purement esthétique par les utilisateurs qu'une rivière libre de débris ligneux (Piégay *et al.*, 2005a). La présence des embâcles peut ainsi limiter la jouissance de la rivière par les résidents riverains.

Finalement, la dislocation naturelle d'un embâcle de bois mort lors d'une crue exceptionnelle peut engendrer un puissant coup d'eau et le déferlement des débris ligneux vers l'aval (Montgomery *et al.*, 2003). De tels événements pourraient provoquer des inondations majeures et compromettre la sécurité des riverains de St-Anaclet de-Lessard et de St-Donat.

Au Québec, l'article 105 de la Loi sur les compétences municipales (*L.R.Q.*, c. C-47.1) indique 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 qui menace la sécurité des personnes ou des biens ». Cependant, l'article 104 précise qu'une MRC « peut adopter des règlements pour régir toute matière relative à l'écoulement des eaux d'un cours d'eau, y compris les traverses, les obstructions et les nuisances ». Les MRC de la Mitis et de Rimouski-Neigette se sont dotées d'un tel règlement en regard du problème des nombreux embâcles de bois mort de la rivière Neigette en transférant la responsabilité du libre écoulement de l'eau aux propriétaires riverains, ce qui complique considérablement la gestion intégrée de la problématique (Denis *et al.*, 2013). Or, les municipalités et les MRC concernées sont d'avis qu'une telle disposition n'encourage pas la concertation quant à ces opérations ponctuelles et ne constitue pas la meilleure solution pour limiter les risques encourus par les embâcles.

Afin de mieux comprendre le rôle du bois mort sur la dynamique de la rivière et d'éviter les répercussions négatives liées au démantèlement non concerté d'embâcles de bois mort, l'Organisme des bassins versants du nord-est du Bas-St-Laurent (OBVNEBSL) a initié à l'été 2012 une démarche visant à produire un plan de gestion intégrée de la problématique des embâcles de bois mort sur la rivière Neigette. Réalisé en partenariat

étroit avec le Laboratoire de recherche en géomorphologie et dynamique fluviale (LGDF) de l'UQAR, avec les municipalités de St-Anaclet-de-Lessard et de St-Donat et avec les MRC de Rimouski-Neigette et de la Mitis, le projet de gestion intégrée comprenait trois volets : 1) la caractérisation de la dynamique fluviale en lien avec la présence d'embâcles de bois mort, 2) le développement d'une méthodologie optimale de démantèlement d'embâcles et l'analyse coûts/bénéfices des opérations et 3) l'évaluation du potentiel récréatif du corridor fluvial de la rivière Neigette. La recherche a mené à la publication du rapport « Gestion des embâcles de bois mort et analyse du potentiel récréatif de la rivière Neigette » en mars 2013 (Denis *et al.*, 2013).

La contribution du LGDF a été de développer ce projet de maîtrise en géographie pour répondre au premier volet du plan de gestion intégrée concernant l'analyse des dynamiques hydrogéomorphologiques de la rivière et des embâcles de bois mort et pour documenter scientifiquement les impacts hydrogéomorphologiques des démantèlements.

1.2 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

L'objectif général du projet de maîtrise est de comprendre la dynamique du bois mort de la rivière Neigette. Pour atteindre l'objectif général, quatre objectifs spécifiques ont été formulés :

1. Décrire la distribution spatiale des embâcles de bois mort dans le tronçon de 32,1 km de la rivière Neigette;
2. Examiner les interrelations existant entre la dynamique fluviale (morphologie et écoulement) et la distribution spatiale et la mobilité du bois mort.
3. Analyser la mobilité interannuelle du bois mort et des embâcles de bois mort sur une période de deux ans;
4. Évaluer les effets du démantèlement d'embâcles de bois mort sur la dynamique fluviale.

Les résultats issus du projet de maîtrise permettront de mieux connaître les dynamiques spatio-temporelles des embâcles de bois en milieu fluvial, mais surtout de cibler les processus hydromorphologiques dominants de ces systèmes et les aléas qui s'y rattachent. La compréhension des effets du bois mort sur la dynamique de la rivière Neigette et des impacts du démantèlement d'embâcles constitue un pilier majeur du programme de gestion intégrée orchestré par l'OBVNESBL. En outre, la démarche permettra d'initier le processus décisionnel auprès des acteurs locaux permettant d'évaluer la pertinence du démantèlement des embâcles, mais également d'évaluer la possibilité de recourir à des solutions alternatives pour la gestion du bois mort en rivière dans un souci de conservation des services écologiques.

CHAPITRE 2

CADRE THÉORIQUE

Les composantes de la dynamique du bois mort en rivière et les effets hydrogéomorphologiques liés à la présence d’embâcles de bois mort sont d’abord présentés. Par la suite, les impacts hydrogéomorphologiques du démantèlement d’embâcles de bois mort sont exposés. Puisque le projet de maîtrise est né d’un partenariat avec les acteurs locaux de la gestion de l’eau pour gérer efficacement la problématique de la rivière Neigette, les principales mesures de gestion du bois mort en rivière sont sommairement présentées.

2.1 LA DYNAMIQUE DU BOIS MORT EN RIVIERE

2.1.1 Le recrutement du bois mort

L’érosion des berges, la mortalité naturelle d’arbres à proximité du chenal, les mouvements de masse, la rupture de branches en raison d’une surcharge de glace ou de neige, le déracinement d’arbres lors d’épisodes de vents forts et la mise en transport du bois stocké sur la plaine inondable lors des crues sont les principaux phénomènes contribuant de manière directe à l’acheminement des débris ligneux dans les cours d’eau (Keller et Swanson, 1979; Downs et Simon, 2001; Gurnell *et al.*, 2002; Piégay *et al.*, 2005a; Seo *et al.*, 2010; Gurnell, 2013). La figure 2.1.1 illustre le transfert de matière ligneuse du milieu terrestre au milieu fluvial par l’érosion des berges. En milieu froid, la dérive des

plaques de glace suivant la débâcle peut entraîner le déracinement et la mise en transport de la végétation riveraine (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010). Dans les cours d'eau torrentiels en milieu montagnard, les avalanches et les coulées de débris peuvent causer la formation d'embâcles de bois mort (Keller et Swanson, 1979).

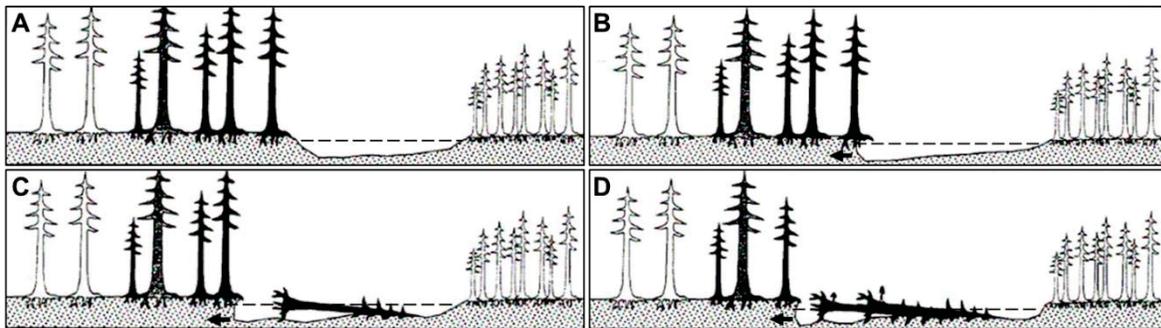


Figure 2.1.1. Recrutement de bois morts par l'érosion progressive des berges à l'échelle d'une section transversale (modifié de Abbe, 2000)

Les perturbations d'origine naturelle ou anthropique de la ripisylve comme les feux, les épidémies d'insectes ravageurs (tordeuse des bourgeons de l'épinette, agrile du frêne, graphiose de l'orme, etc.), les chablis, les coupes forestières partielles ou extensives et la construction d'infrastructures riveraines peuvent accroître les transferts de matière ligneuse du domaine terrestre au système fluvial (Keller et Swanson, 1979; Smith *et al.*, 1993; Seo *et al.*, 2010). À l'échelle du bassin versant, les activités anthropiques qui augmentent le ruissellement, l'érosion des sols et/ou le débit fluvial accentuent l'érosion des berges et le déracinement des arbres en bordure du cours d'eau. En plus de représenter des sites propices à l'accumulation de débris, les ponts et les ponceaux sous-dimensionnés amplifient l'érosion des rives et subséquentement la chute d'arbres dans le chenal. Indirectement, l'activité du castor d'Amérique (*Castor canadensis*) contribue à augmenter le volume de matière ligneuse disponible pour la formation d'embâcles (Smith *et al.*, 1993).

La figure 2.1.2 souligne l'évolution de l'amont vers l'aval de la nature et de l'importance des processus de recrutement du bois mort (Keller et Swanson, 1979). Dans les cours d'eau de premier ordre, les processus de versant constituent les processus dominants. À titre d'exemple, Benda *et al.*, 2003 ont évalué à 80 % la contribution des processus de versant au volume de bois mort dans un cours d'eau de premier ordre en Oregon (É-U). Dans les rivières plus grandes, l'érosion progressive de la plaine alluviale est le principal facteur de production de bois mort (Keller et Swanson, 1979; Benda *et al.*, 2003; Montgomery *et al.*, 2003; Piégay, 2003; Latterell et Naiman, 2007). La chute de troncs et de branches et le transport de bois mort en provenance de l'amont sont des processus de recrutement généralisés à l'ensemble des systèmes fluviaux. L'impact du castor sur la production de bois mort en rivière est limité aux sections alluviales.

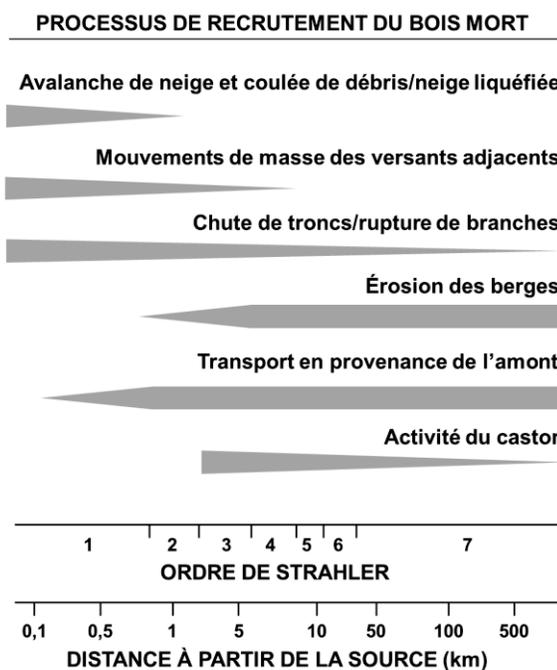


Figure 2.1.2. Importance des processus de production du bois mort en rivière relativement au gradient longitudinal de la taille du cours d'eau (adapté de Keller et Swanson, 1979)

Latterell et Naiman (2007) ont quantifié les processus dans le tronçon d'ordre 5 de la rivière Queets dans l'État de Washington (É-U) et ont révélé que sur une base annuelle, 72 % des bois morts sont recrutés par l'érosion des berges et 21 % par la mise en transport de débris stockés sur la plaine alluviale lors des débordements. De plus, un volume considérable de bois morts enfouis dans la plaine alluviale peut être remis en transport dans le cours d'eau par l'érosion latérale. Le recrutement de bois morts enfouis serait d'ailleurs responsable de 7 % du volume annuel de débris ligneux acheminé dans la rivière Queets (Latterel et Naiman, 2007).

Les taux de recrutement de bois mort peuvent être amplifiés dans les systèmes à méandres caractérisés par un morphodynamisme impliquant l'érosion des berges concaves et la migration du tracé fluvial (Downs et Simon, 2001; Gurnell *et al.*, 2002; Seo *et al.*, 2010). Par exemple, un tronçon dynamique correspondant à seulement 10 % de la longueur totale de la rivière Queets serait responsable de 38 % des bois morts recrutés annuellement (Latterell et Naiman, 2007). Les arbres délogés, brisés ou déracinés à la suite d'un réajustement brusque du tracé fluvial, comme le recoupement d'un méandre et une avulsion, contribuent au volume de bois disponible pour la formation d'embâcles (Lauzon, 2007; Phillips, 2012).

La dynamique de recrutement du bois mort dépend aussi des caractéristiques biologiques associées à la végétation riveraine comme la maturité, les essences composant le peuplement et la résistance des végétaux à l'énergie mécanique de l'écoulement (Piégay et Gurnell, 1997; Collins *et al.*, 2002; Gurnell *et al.*, 2002; Montgomery *et al.*, 2003). Les zones riveraines caractérisées par de vieux peuplements ou par une proportion importante de chicots sont susceptibles de transférer des volumes considérables de bois au cours d'eau (Therrien, 1997 ; Collins *et al.*, 2002). Gurnell (2013) a compilé les données sur la densité de bois mort en rivière et l'âge des peuplements riverains pour 314 tronçons fluviaux répartis à travers le monde. Les résultats montrent une augmentation significative de volume de bois mort (m^3) par hectare en fonction de la maturité de la ripisylve (figure 2.1.3).

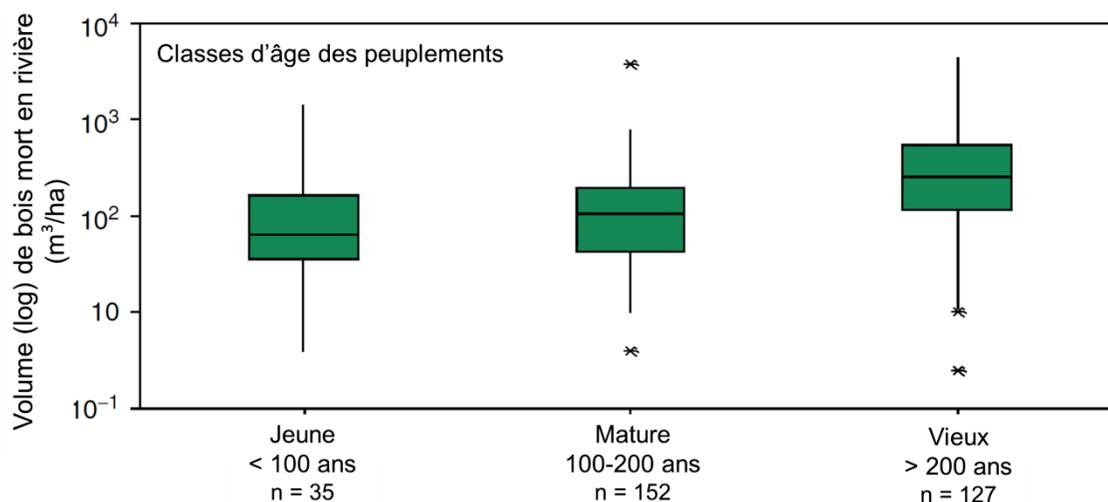


Figure 2.1.3. Relation entre la concentration de bois mort en rivière et l'âge des peuplements riverains pour 314 tronçons fluviaux (modifié de Gurnell, 2013)

De plus, les essences intolérantes à l'ombre, comme les peupliers faux-tremble (*Populus tremuloides*) qui sont souvent observés aux abords des cours d'eau du Québec, ont une courte durée de vie, ce qui entraîne des apports plus fréquents (Lauzon, 2007). La connectivité entre la rivière et la ripisylve, qui varie selon le style géomorphologique du tronçon, influence la mise en transport et la rétention du bois (Piégay et Gurnell, 1997). De manière générale, les transferts de bois mort au cours d'eau sont optimaux dans les tronçons alluviaux peu encaissés (Gurnell *et al.*, 2002).

La production de débris ligneux varie temporellement selon les conditions hydroclimatiques du bassin versant. Par exemple, une augmentation graduelle des précipitations et du ruissellement sur un territoire peut mener à l'accroissement du volume de bois mort acheminé dans le chenal (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010; Gurnell, 2013). De manière plus ponctuelle, les tempêtes, les inondations majeures et les épisodes d'érosion accélérée peuvent se traduire par un pic de recrutement de bois mort (Downs et Simon, 2001; Gurnell *et al.*, 2002). Sur le Rhône en France, un suivi sur 10 ans des volumes de bois mort extraits en amont du barrage de Génissiat révèle que la plus grosse accumulation

de débris ($7\,350\text{ m}^3$) a été extraite à la suite de la plus grande crue enregistrée durant cette période ($Q = 1\,490\text{ m}^3/\text{s}$) (Moulin et Piégay, 2004).

2.1.2 La mobilité du bois mort

Une fois en rivière, le bois mort peut rester stable à l'endroit où il a chuté ou être transporté vers l'aval pour finalement se déposer contre une berge, sur la plaine alluviale, sur un banc d'accumulation ou dans un embâcle de débris. S'il ne rencontre aucun obstacle, le bois mort sera évacué du système (Montgomery *et al.*, 2003). Avant tout, le bois sec flotte parce que sa densité est inférieure à celle de l'eau (Montgomery *et al.*, 2003). La densité du bois contrôle la flottaison des débris de même que l'énergie requise pour sa mise en transport et elle varie en fonction des essences. Les débris ligneux les plus denses vont s'ancrer contre une structure rugueuse et n'être mobilisés qu'en période de crue, comme les sédiments en charge de fond. Les feuillus sont généralement plus denses que les résineux, à l'exception des peupliers dont la masse volumique est inférieure à la plupart des conifères, ce qui leur confère une grande flottabilité (Lauzon, 2007).

L'aspect morphologique du bois mort influence également son comportement hydraulique (Braudrick et Grant, 2000). Les pièces de bois de forme irrégulière sont plus susceptibles de s'accrocher aux berges, de s'entremêler aux autres débris ligneux ou d'initier des embâcles (Gurnell *et al.*, 2002). Les souches et leur réseau racinaire sont particulièrement propices à la formation d'un embâcle (Moulin *et al.*, 2011). Puisqu'elles s'accrochent facilement au lit, aux berges, à la végétation riveraine et aux amas de bois mort, la mise en transport des souches nécessite un écoulement très compétent (Braudrick et Grant, 2000). Le taux de transport des bois morts avec un réseau racinaire est généralement très faible (Moulin *et al.*, 2011). Par ailleurs, les essences feuillues sont plus susceptibles de s'enchevêtrer et de former des embâcles puisque leurs branches sont solides et ont une grande étendue latérale. Au contraire, les essences résineuses sont plus droites et

cylindriques, ce qui favorise leur transit et leur évacuation du système (Montgomery, 2003).

Le rapport entre la taille d'un débris et la taille du chenal où il tombe constitue le facteur principal contrôlant la stabilité du bois mort en rivière (Keller et Swanson, 1979; Piégay et Gurnell, 1997; Gurnell *et al.*, 2002; Gurnell, 2003; Montgomery *et al.*, 2003). Il est reconnu que les taux de transport sont plus élevés dans les rivières dont la largeur est supérieure à la longueur des plus grands bois morts (Braudrick et Grant, 2000; Gurnell *et al.*, 2002; Gurnell, 2013). Selon le modèle de Braudrick et Grant (2000), la profondeur d'eau (m) doit être environ 2 fois plus grande que le diamètre du bois mort (m) pour permettre la flottaison de la plupart des essences. Les petits débris ligneux sont ainsi plus mobiles que les gros billots et ont de plus courts temps de résidence (Wohl et Goode, 2008). La géomorphologie et la configuration des cours d'eau jouent aussi un rôle déterminant dans le transport du bois mort en influençant la densité de structures rugueuses limitant le transit des bois morts (p.ex. affleurements rocheux, bancs d'accumulation, seuils, etc.) (Piégay et Gurnell, 1997; Van der Nat *et al.*, 2003).

Le régime hydrologique d'un cours d'eau contrôle le degré et la fréquence des phases de mobilité du bois mort (Moulin et Piégay, 2004). En période de crue, la montée du niveau d'eau favorise la flottaison des débris ligneux et leur redistribution vers l'aval ou à l'extérieur du lit mineur vers la plaine alluviale (Keller et Swanson, 1979; Gurnell *et al.*, 2002). Berg *et al.* (1998) ont suivi le déplacement de 1 700 bois morts dans 6 cours d'eau de la Californie sur une période de 6 ans. Au cours d'une année marquée par des débits moyens inférieurs à la moyenne, seulement 0,8 % des débris a été mobilisé, alors 31 % ont été déplacés après une année où des débits largement supérieurs à la moyenne ont été enregistrés dans les 6 rivières. Les inondations majeures jouent un rôle déterminant dans la distribution spatiale et la dynamique des débris (Piégay et Gurnell, 1997; Downs et Simon, 2001). Par exemple, Van der Nat *et al.* (2003) ont étudié la dynamique du bois mort dans un tronçon à tresses de la rivière Tagliamento en Italie et ont observé un renouvellement de 95 % des bois morts contenus dans 165 parcelles fixes de 100 m² à la suite d'une crue

majeure. Par ailleurs, l'analyse d'une séquence vidéo de la rivière Ain en France révèle des taux de transport plus importants durant la phase ascendante d'un événement de crue que lors de la phase de décrue pour des débits similaires (MacVicar *et al.*, 2009).

La mobilité et le temps de résidence du bois mort sont très variables selon les systèmes fluviaux. Une étude de Wohl et Goode (2008) réalisée sur une période de 11 ans a relevé une mobilité moyenne annuelle des bois morts variant de 16 à 23 % dans 5 différents cours d'eau montagnards du Colorado (É-U) pour un taux moyen de résidence de 3,4 ans. Les auteurs ont aussi constaté des taux de mobilité accrus dans les tronçons fluviaux ayant une forte puissance spécifique. Benke et Wallace (1990) ont étudié la dynamique du bois mort dans le segment d'ordre 6 de la rivière Ogeechee dans le sud-est des États-Unis et ont observé un taux de mobilité annuel de 18 %. Une étude réalisée par Gregory *et al.*, (1985) dans un ruisseau de l'Angleterre souligne que 36 % des embâcles de bois mort ont été évacués et que 36 % ont changé de configuration en l'espace d'une année. Par ailleurs, des mesures de datation au carbone 14 réalisées sur des bois morts de la rivière Queets (État de Washington, É-U), dans un tronçon de 20 m de largeur, soit de taille comparable à la rivière Neigette, ont révélé que 80 % des échantillons dataient de moins de 50 ans, mais que certains billots étaient en résidence dans la rivière depuis près de 1 400 ans (Hyatt et Naiman, 2001). Leur étude souligne que la majorité du bois mort dans la rivière Queets est renouvelée dans un horizon de quelques décennies, mais que des débris peuvent persister durant plusieurs siècles.

Enfin, la figure 2.1.4 illustre longitudinalement les principaux processus menant à l'évacuation des bois morts d'un système fluvial. La décomposition et le lessivage progressif de la matière ligneuse sont des processus d'évacuation dominants sur tous les types de cours d'eau. La flottaison de bois mort et le transport par la glace de dérive sont les principaux processus d'évacuation dans les segments fluviaux d'ordre supérieur à 2. Dans les cours d'eau torrentiels, les bois morts stockés sont susceptibles d'être éjectés de manière brutale lors de coulées de débris. May et Gresswell (2004) ont évalué que la

réurrence de tels événements variait entre 98 et 357 ans pour 125 cours d'eau montagnards de l'Oregon.

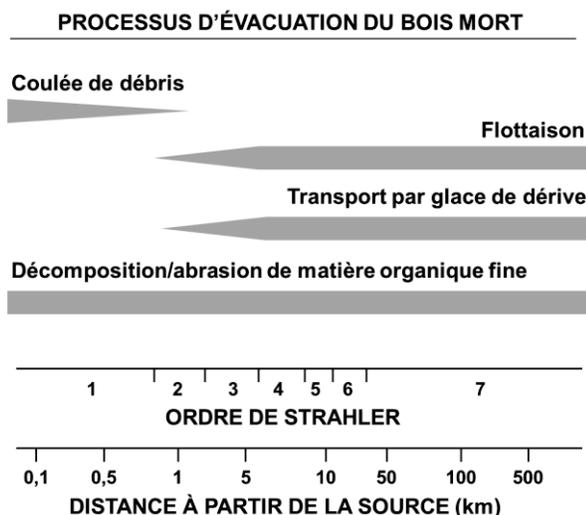


Figure 2.1.4. Importance relative des processus d'évacuation du bois mort en rivière selon un gradient longitudinal (adapté de Keller et Swanson, 1979)

2.1.3 L'accumulation du bois mort et la formation d'embâcles

L'affaissement d'un arbre riverain ou l'ancrage d'une pièce de bois mort massive dans le chenal peut initier la formation d'un embâcle en provoquant la rétention des débris ligneux à la dérive (Montgomery *et al.*, 2003; Baillie *et al.*, 2008). Un embâcle croît généralement de l'aval vers l'amont à une vitesse qui dépend principalement des taux de production de bois mort, de la quantité de débris ligneux en transit dans le système et des conditions hydrologiques permettant d'initier leur transport (Gurnell, 2013).

De manière générale, cinq configurations géomorphologiques sont propices à l'accumulation du bois mort dans un système fluvial: 1) les tronçons de moins de 10 m de

largeur, 2) les zones de rétrécissement de la largeur, 3) les bancs d'accumulation, 4) les zones de rupture de pente et 5) les bifurcations brusques du tracé fluvial (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010). La configuration géométrique du chenal en relation avec la taille des débris est le facteur le plus déterminant pour la formation d'un embâcle (Keller et Swanson, 1979; Piégay *et al.*, 2005a; Gurnell, 2013). Le risque de formation d'embâcles est proportionnel à la largeur et à la profondeur du chenal. Plus ces valeurs sont importantes, moins les chances d'obstruction par des débris ligneux sont grandes.

Dans les petits cours d'eau d'ordres 1 et 2, la longueur médiane des morceaux de bois est supérieure à la largeur du chenal au niveau plein-bord (Piégay et Gurnell, 1997). Les amas de débris ligneux peuvent facilement s'étendre au-delà du périmètre mouillé. À moins d'un épisode hydrométéorologique générant une onde de crue torrentielle, la compétence de l'écoulement est insuffisante pour permettre la redistribution des débris vers l'aval (Gurnell *et al.*, 2002). Ainsi, les débris ligneux d'un diamètre supérieur à 10 cm sont souvent localisés à proximité de leur lieu de chute (Gurnell, 2013). Au fur et à mesure que le chenal s'élargit vers l'aval, de plus en plus d'interactions ont lieu entre le bois et les processus hydrodynamiques (Keller et Swanson, 1979; Wohl et Jaeger, 2009).

Dans les rivières moyennes d'ordres 3 et 4, la largeur du chenal est généralement inférieure au plus grand percentile des valeurs de longueur des débris ligneux (Gurnell *et al.*, 2002). La taille d'une proportion considérable des débris est similaire à la largeur du chenal, ce qui fait que la configuration morphologique et les dimensions d'un bois mort sont critiques pour sa stabilité dans le système (Gurnell *et al.*, 2002). L'écoulement des rivières de plus de 10 m de largeur est généralement assez puissant pour permettre la redistribution des débris organiques et leur accumulation sous la forme d'embâcles aux endroits morphologiquement préférentiels (Piégay et Gurnell, 1997; Wohl et Jaeger, 2009).

Pour les rivières d'ordre égal ou supérieur à 5, la largeur du chenal est plus importante que la longueur de tous les débris ligneux. Leur ancrage est tout de même possible sur les éléments de rugosité comme les berges, les bancs d'accumulation, les îlots végétalisés, les embâcles de bois mort et les infrastructures comme les enrochements, les

ponceaux et les ponts (Gurnell *et al.*, 2002, Kail, 2003). Les grandes rivières sont aussi caractérisées par la présence irrégulière de gros débris au-delà de la limite du lit mineur (Keller et Swanson, 1979).

De manière générale, la concentration de débris organiques est maximale dans les tronçons fluviaux de premier ordre et diminue progressivement vers l'aval du bassin versant compte tenu de l'élargissement du chenal et de l'augmentation du débit, ce qui favorise l'évacuation longitudinale ou latérale du bois mort. Par exemple, pour la rivière McKenzie en Oregon (É-U), la concentration en débris ligneux d'un diamètre supérieur à 10 cm dans un tributaire de premier ordre est de 48 fois supérieure à celle du chenal principal de sixième ordre (Keller et Swanson, 1979).

Enfin, la configuration et l'organisation des embâcles de bois mort varient longitudinalement dans un bassin versant avec l'élargissement graduel du chenal (figure 2.1.5). Généralement, les amas de bois mort en amont des bassins sont de faible taille et peu organisés. Progressivement vers l'aval, les amas sont plus volumineux et davantage structurés (Montgomery *et al.*, 2003). La proportion des embâcles partiels augmente et celle des embâcles complets diminue quand la taille du chenal augmente vers l'aval (Piégay et Gurnell, 1997).

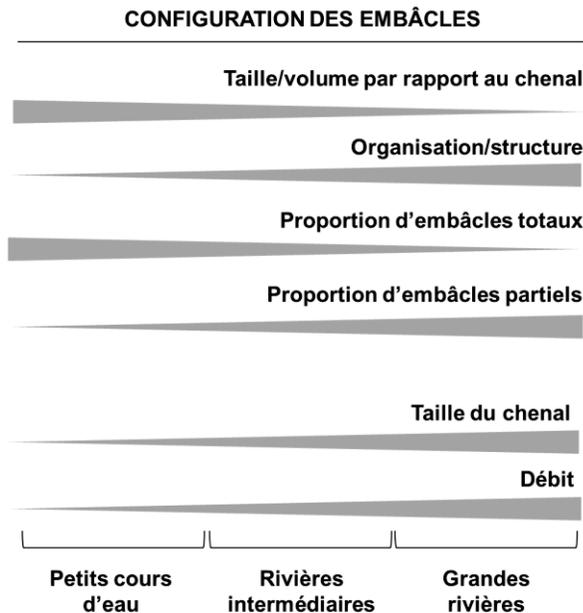


Figure 2.1.5. Évolution longitudinale de l'organisation et de la configuration des embâcles de bois mort à l'échelle d'un bassin versant

2.1.4 Le concept de bilan ligneux

La quantité et la nature du bois entrant, résidant et sortant d'un système fluvial sont conditionnées par la configuration physiographique, la dynamique géomorphologique, les paramètres climatiques et les caractéristiques de la végétation du corridor fluvial (Keller et Swanson, 1979; Abbe et Montgomery, 1996; Downs et Simon, 2001). La quantité et la configuration des embâcles de bois mort dans un tronçon fluvial sont contrôlées par l'équilibre entre le volume de bois entrant et le volume sortant du système (Keller et Swanson, 1979). À la manière d'un bilan sédimentaire, le bilan ligneux fait référence à la quantification de la production de bois mort en rapport au volume de bois stocké par les embâcles, au volume accumulé sur la plaine alluviale ou en transit dans le corridor fluvial et au volume expulsé du bassin (Downs et Simon, 2001; Benda *et al.*, 2003; Montgomery *et*

al., 2003; Gurnell, 2013). La figure 2.1.6 présente un exemple de bilan ligneux annuel réalisé par Schenk *et al.* (2014) pour les derniers 210 km de la rivière Roanoke en Caroline du Nord (É-U). Leur étude révèle un bilan équilibré entre les volumes entrants (4 % par mouvements de masse + 1 % par érosion latérale) et sortants (3 % enfouis ou décomposés + 2 % évacués). Le recrutement de bois mort en provenance de l'amont est limité par la présence d'un barrage. Ils ont également constaté que 16 % des bois morts se sont déplacés dans le système en l'espace d'un an (flèche orange).

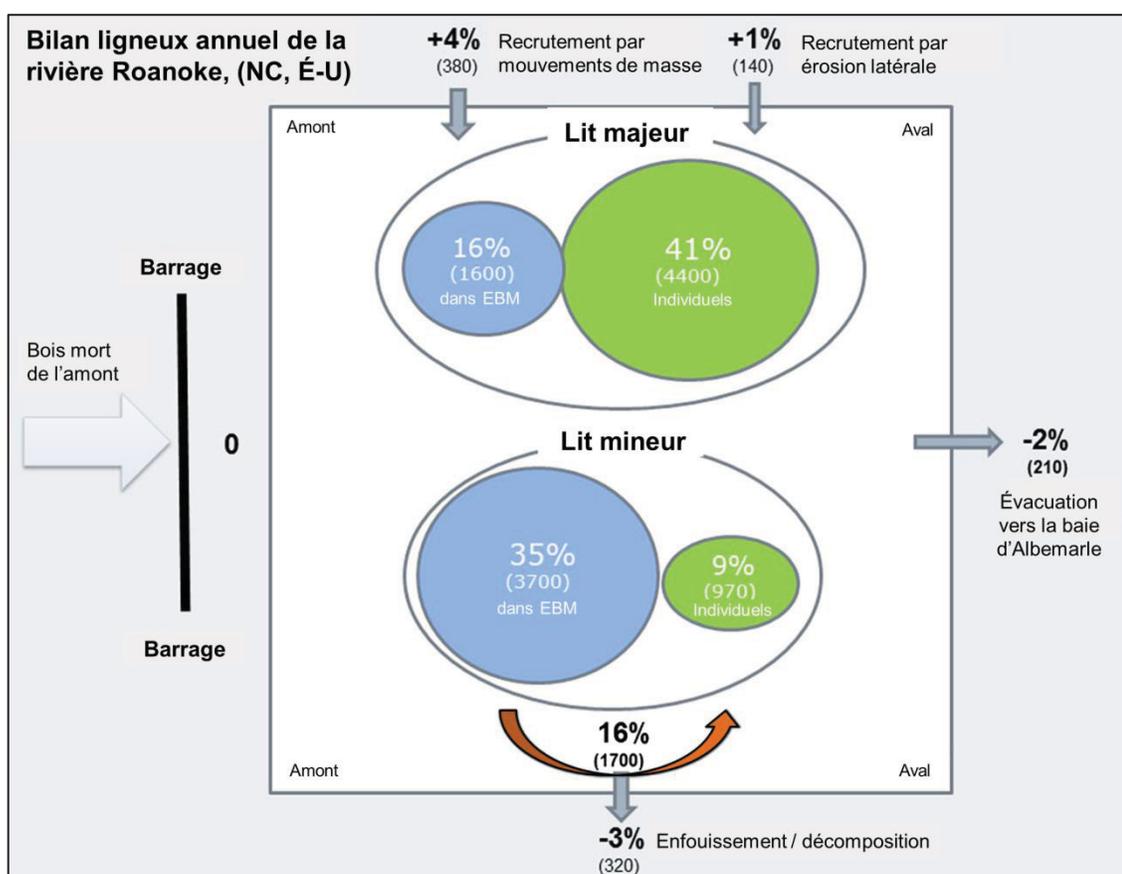


Figure 2.1.6. Bilan ligneux annuel de la rivière Roanoke. Les pourcentages ont été calculés en fonction de la population de bois mort totale et le nombre de bois mort correspond à la valeur entre parenthèses. Le carré blanc représente le système de la rivière Roanoke, les ovales bleus correspondent au bois mort stocké dans des embâcles et les ovales verts représentent les bois morts individuels. La flèche orange correspond au déplacement du bois mort dans le système et les flèches grises indiquent les bois morts entrants et sortants (traduit de Schenk *et al.*, 2014).

Si le volume de bois résidant et en transit dans le système fluvial est similaire à celui produit annuellement, le taux d'embâcles de bois est généralement faible puisque le bois mort est facilement évacué du système (Montgomery *et al.*, 2003). En outre, la présence de nombreux embâcles de bois dans un cours d'eau est généralement le reflet d'un déséquilibre dans les composantes du bilan ligneux. Les volumes de bois produits sont alors plus importants que la capacité du système à les évacuer.

Les variations temporelles de la dynamique des composantes du bilan ligneux peuvent occasionner un déséquilibre hydrogéomorphologique comparable aux modifications du bilan sédimentaire ou du débit fluvial (Montgomery *et al.*, 2003). Les systèmes fluviaux en déséquilibre en raison de variations du régime hydrologique, de changements dans la dynamique sédimentaire, de perturbations anthropiques majeures (linéarisation, anthropisation des berges de certains tronçons, déforestation des rives, construction d'ouvrages inadaptés au comportement hydrogéomorphologique) peuvent être marqués par une augmentation significative des apports en bois mort advenant l'élargissement du chenal, son incision ou des réajustements morphologiques majeurs (Downs et Simon, 2001). Si le cours d'eau n'est pas en mesure d'opérer efficacement le transit et l'évacuation des nouveaux débris ligneux, le cours d'eau devra s'adapter à une augmentation du nombre d'embâcles de bois mort (Downs et Simon, 2001).

Enfin, un bilan quantitatif des volumes de bois mort entrants, sortants et résidants d'un système fluvial s'avère un outil efficace pour la gestion des effets bénéfiques du bois mort (services écologiques, diversifications des habitats) et des risques qui y sont rattachés (érosion, inondation, accumulation dans les réservoirs, obstacles à la navigation) (Schenk *et al.*, 2014). Un tel cadre de référence permet aux gestionnaires de mieux appréhender les dynamiques spatiales et temporelles du bois mort, ce qui résulte en des actions ciblées et plus efficaces.

2.2 LES IMPACTS HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES DU BOIS MORT EN RIVIÈRE

Le contrôle morphologique exercé par les accumulations de bois mort sur un tronçon fluvial dépend principalement de la fréquence des embâcles et du pourcentage d'obstruction du chenal (Gurnell, 2013). Les impacts hydrogéomorphologiques du bois mort sont plus marqués dans les cours d'eau de petite taille, puisque l'emprise des débris ligneux sur la superficie transversale du chenal est plus importante (Keller et Swanson, 1979; Eaton et Hassan, 2013; Church, 2013). De plus, les différences régionales concernant les effets hydrogéomorphologiques du bois mort reflètent les variations dans la dimension des débris, leur densité et leur forme qui sont des paramètres essentiellement contrôlés par la disponibilité du bois, la composition de la forêt riveraine, la taille de la rivière, ses caractéristiques et ses processus (Collins *et al.*, 2002; Piégay *et al.*, 2005a).

Les embâcles de bois mort entraînent des répercussions sur les trois composantes de la trinité de Leeder (1983) : la structure de l'écoulement turbulent, le transport des sédiments et la morphologie du lit et des berges (Montgomery *et al.*, 2003), en plus d'affecter la dynamique des écosystèmes aquatiques (Gurnell *et al.* 2002). Les principaux impacts de la présence de bois mort en rivière seront discutés dans la section qui suit.

2.2.1 Les effets sur l'écoulement fluvial

Les embâcles de bois mort en rivière complexifient la résistance à l'écoulement, les contraintes hydrauliques et le profil longitudinal à la surface de l'eau (Smith *et al.*, 1993). De manière générale, le bois mort en rivière augmente la rugosité à l'échelle de la section transversale, ce qui a pour effet de réduire la vitesse de l'écoulement (Keller et Swanson, 1979; Bilby et Ward, 1991; Abbe et Montgomery, 1996; Hygelund et Manga, 2003; Manners *et al.*, 2007; Ferguson, 2013; Wohl et Beckman, 2014a). Une étude réalisée sur un chenal fortement encombré de débris ligneux en Alaska attribue à 60 % la contribution du bois mort à la rugosité totale (Montgomery *et al.*, 2003). Le nettoyage complet des

embâcles d'un cours d'eau aurait pour effet de réduire jusqu'à 90 % du coefficient de rugosité de Manning (Shields et Gippel, 1995). Théoriquement, les impacts du bois mort sur la structure de l'écoulement sont plus importants en période de faible niveau d'eau, puisque l'espace occupé par les débris par rapport au périmètre mouillé est maximal (Piégay *et al.*, 2005a). En période de fort débit, la proportion de l'eau augmente tandis que celle du bois reste la même.

Pour les cours d'eau torrentiels, la diminution de la vitesse du courant par la présence de bois mort se traduit par l'atténuation de la réponse hydrologique lors d'une crue et par l'augmentation du temps de déplacement de l'onde de crue (Gurnell *et al.*, 2002, Zimmermann, 2013). Dans certains cas, les embâcles de bois peuvent ainsi être bénéfiques pour la protection des infrastructures situées dans les basses vallées. Or, les embâcles majeurs dans les grandes rivières accentuent localement l'intensité des crues en restreignant l'évacuation de l'eau et en amplifiant les débordements sur la plaine alluviale (Downs et Simon, 2001; Piégay *et al.*, 2005a; Seo *et al.*, 2010). La vidange des réservoirs en amont des embâcles lors d'une crue exceptionnelle peut engendrer une onde de crue aux conséquences catastrophiques en aval (Piégay *et al.*, 2005a). De plus, la dislocation naturelle d'un embâcle de bois mort peut engendrer un coup d'eau puissant ainsi que le déferlement des débris ligneux vers l'aval (Montgomery *et al.*, 2003).

Par ailleurs, les débris ligneux dans les cours d'eau montagnards contribuent à l'irrégularisation du profil longitudinal par la création d'une succession de cascades et de fosses (*step-pools*) ayant pour effet de dissiper l'énergie hydraulique (Zimmermann, 2013). À titre d'exemple, Abbe et Montgomery (2003) ont révélé que 77 % des ruptures de pente caractérisant le profil en long à la surface de l'eau était directement attribuable à la présence d'embâcles de bois mort dans la portion d'ordre 1 à 3 de la rivière Queets (WA, É-U).

2.2.2 Les effets sur le transport des sédiments

Les modifications de la structure de l'écoulement attribuables aux embâcles de bois mort affectent le stockage et le transport de sédiments dans les systèmes fluviaux. La réduction de la vitesse du courant diminue la capacité de l'écoulement à redistribuer les sédiments. Ainsi, les rivières fortement encombrées de débris sont caractérisées par des taux de transport de sédiments plus faibles (Wallerstein, 1999; Montgomery *et al.*, 2003; Seo *et al.*, 2010).

Dans les cours d'eau de premier ordre, la dissipation de l'énergie induite par les débris ligneux a pour effet de retenir une certaine quantité de sédiments qui serait normalement transférée vers l'aval (Eaton *et al.*, 2012; Church, 2013). Dans certains cas, la proportion de sédiments stockés par les amas de débris peut représenter 30 à 50 % de tous les sédiments contenus dans le chenal (Gurnell *et al.*, 2002). Sans amas de débris, le tracé des cours d'eau torrentiels serait naturellement linéarisé pour permettre le transfert plus rapide de l'écoulement et des sédiments vers l'aval. En raison de l'absence d'une plaine alluviale, les amas de débris organiques constituent l'un des principaux modes de rétention des sédiments dans les cours d'eau torrentiels (Keller et Swanson, 1979).

Pour les moyennes et les grandes rivières, les amas de bois mort qui occupent entièrement le chenal peuvent littéralement agir comme des barrages en bloquant le transit sédimentaire. Cela favorise ainsi l'accumulation et le stockage de sédiments en amont des embâcles (figure 2.2.1). La position et l'orientation des embâcles de bois influencent la capacité de stockage des sédiments (Abbe et Montgomery, 1996). Les amas de débris orientés parallèlement aux berges retiennent moins de sédiments que ceux qui sont disposés perpendiculairement à l'écoulement (Smith *et al.*, 1993). Le rehaussement du niveau de l'eau provoqué par un embâcle peut également favoriser la croissance des dépôts de débordement sur la plaine inondable (Collins *et al.*, 2002; Daniels, 2006; Gurnell, 2013; Wohl et Beckman, 2014b).

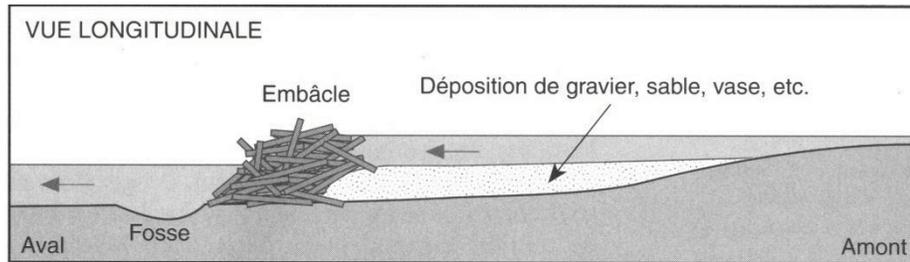


Figure 2.2.1. Accumulation de sédiments en amont d'un embâcle de bois mort (Therrien, 1997)

De manière générale, la réduction de la capacité de transport provoque le dépôt de sédiments fins, particulièrement en amont des embâcles de bois mort et dans les fosses. La sédimentation fine peut provoquer le colmatage du substrat graveleux essentiel à certaines communautés d'invertébrés et aux salmonidés (Montgomery *et al.*, 2003; Wohl et Beckman, 2014a). La diminution de la puissance spécifique entraîne aussi une diminution générale de la taille granulométrique des sédiments composant le substrat de la rivière (Abbe et Montgomery, 1996; Kail, 2003).

Pour les rivières alluviales de milieu forestier, les embâcles de bois mort jouent un rôle majeur dans la formation et l'entretien des bancs d'accumulation (Abbe et Montgomery, 1996; Gurnell *et al.*, 2002 ; Merritt, 2013). Les embâcles peuvent générer la construction de bancs d'accumulation en bloquant physiquement le transfert des sédiments ou en forçant la diversion de l'écoulement et conséquemment le dépôt de sédiments (Daniels, 2006; Kail, 2003). La figure 2.2.2 illustre la croissance et la stabilisation d'un banc d'accumulation sur la rivière Drome en France à la suite de la formation d'un embâcle de bois mort (MacVicar *et al.*, 2009).



Figure 2.2.2. Engraissement et stabilisation d'un banc d'accumulation à la suite de la formation d'un embâcle de bois mort (MacVicar *et al.*, 2009)

Les bancs d'accumulation sont généralement plus nombreux et plus étendus spatialement dans les rivières avec embâcles de bois mort que dans les rivières sans bois mort (Gurnell et Sweet, 1998). Il est d'ailleurs fréquent d'observer le développement de bancs d'accumulation associés aux fosses de surcreusement générées par les embâcles de bois mort (Keller et Swanson, 1979).

2.2.3 Les effets sur la morphologie du chenal

Tout d'abord, le bois mort affecte la morphologie du lit en modifiant considérablement la taille et la configuration des fosses et des seuils dans les rivières graveleuses (Kail, 2003; Montgomery *et al.*, 2003). À l'échelle d'un bois mort, les tourbillons de turbulence induite par l'obstruction provoquent le surcreusement du lit (figure 2.2.3) (Keller et Swanson, 1979; Smith *et al.*, 1993; Kail, 2003). En plus de l'orientation et de la taille de l'embâcle, la profondeur du surcreusement est aussi influencée par la géométrie du chenal, la granulométrie du lit, la rugosité, la disponibilité sédimentaire en charge de fond et la pente du cours d'eau (Montgomery *et al.*, 2003).

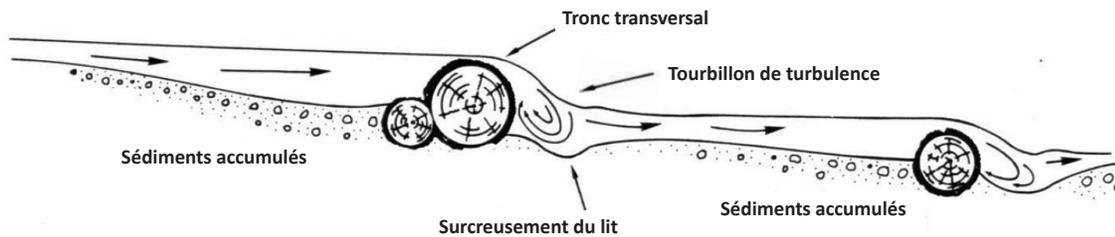


Figure 2.2.3. Surcreusement du lit en aval d'un amas de bois mort
(modifié de Keller et Swanson, 1979)

Les courants de recirculation au niveau du lit induits par la présence d'un embâcle de bois mort peuvent être suffisants pour initier la formation d'une mouille (Abbe et Montgomery, 1996 ; Abbe et Montgomery, 2003; Gurnell, 2013). Ainsi, la fréquence longitudinale des mouilles dans un segment fluvial augmente avec le nombre d'amas de débris ligneux (Abbe et Montgomery, 1996; Gurnell *et al.*, 2002). De plus, l'espacement entre les mouilles dans les systèmes fluviaux forestiers est réduit proportionnellement à l'augmentation de la présence de bois dans le chenal. Selon Montgomery *et al.* (2003), les différences régionales de l'espacement des mouilles reflètent aussi des différences dans la lithologie, le climat, la composition végétale, la taille des débris et la gestion des terres avoisinantes. Les mouilles des rivières avec embâcles de bois mort ont généralement une plus grande superficie que les mouilles des rivières sans bois mort (Gurnell et Sweet, 1998). L'étude d'Abbe et Montgomery (1996) souligne aussi que la profondeur des mouilles associées à un embâcle de bois mort est plus importante que la profondeur des mouilles sans embâcle (figure 2.2.4).

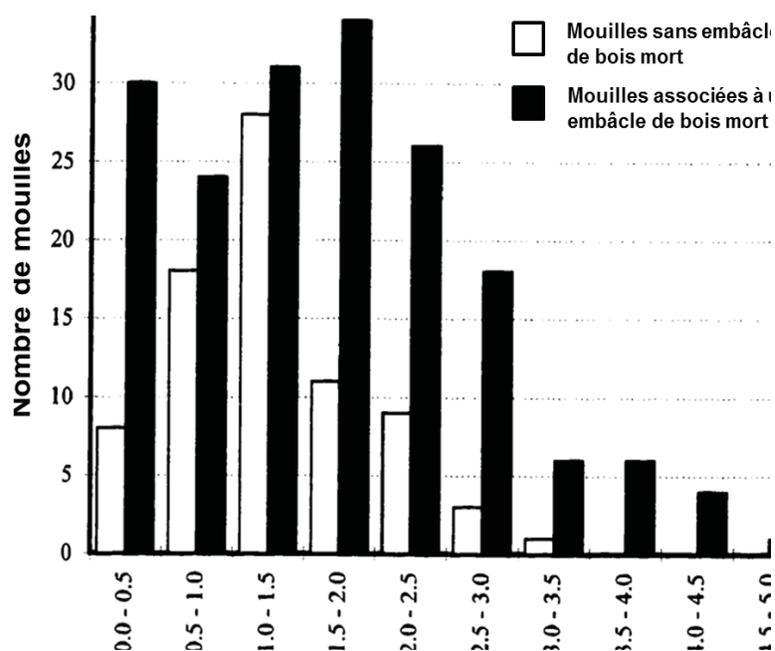


Figure 2.2.4. Distribution de fréquence de la profondeur des mouilles associées et non associées à un embâcle de bois mort, rivière Queets, État de Washington (É-U) (Abbe et Montgomery, 1996)

Par ailleurs, la déviation de l'écoulement et la formation de courants de recirculation en amont d'un embâcle de bois ont pour effet de concentrer l'énergie hydraulique vers les berges, ce qui génère de l'érosion (Abbe et Montgomery, 2003; Gurnell, 2013). Selon l'intensité du phénomène, l'érosion des berges peut mener à l'élargissement considérable du chenal. À titre d'exemple, Keller et Swanson (1979) ont relevé une augmentation de 230 % de la largeur de la rivière Mallard en Caroline du Nord (É-U) en amont d'un embâcle occupant la totalité de la largeur du chenal. Contrairement aux rivières dépourvues de débris ligneux, les cours d'eau caractérisés par la présence de nombreux embâcles présentent une plus grande variabilité dans les valeurs de largeur du chenal (Montgomery *et al.*, 2003). En période de crue, les gros troncs en transport peuvent percuter durement les berges et la végétation riveraine, ce qui accentue l'érosion et réduit pour plusieurs années la protection induite par la végétation (Keller et Swanson, 1979).

Les embâcles de bois qui obstruent complètement l'écoulement peuvent engendrer des ajustements morphologiques majeurs comme la dérivation du chenal principal par avulsion, le recouplement de méandre et l'initiation de chenaux secondaires (figure 2.2.5) (Gurnell *et al.*, 2002; John et Klein, 2004; Phillips, 2012; Eaton et Hassan, 2013; Gurnell, 2013; Wohl et Bechman, 2014b).

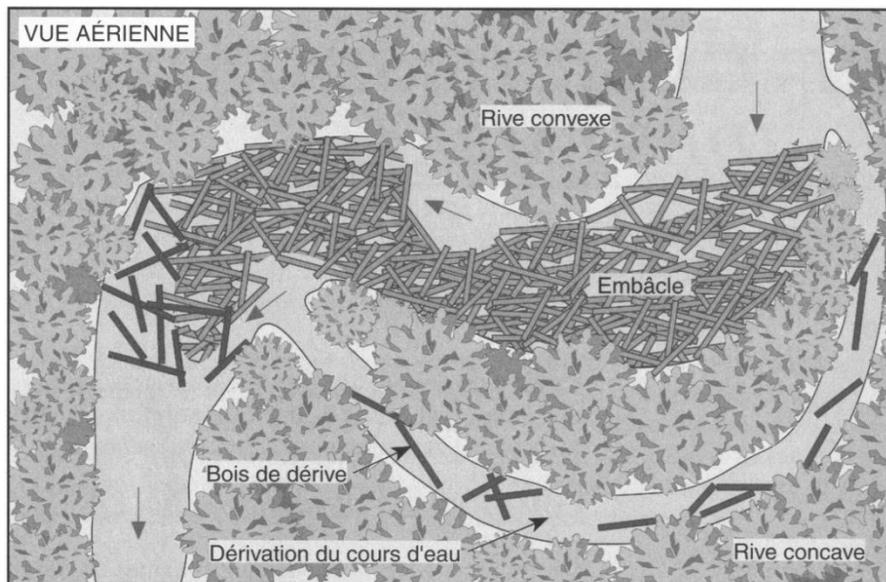


Figure 2.2.5. Avulsion provoquée par la présence d'un embâcle total (Therrien, 1997)

Dans la rivière Mallard (Caroline du Nord, É-U), 15 années se sont écoulées entre la formation de l'embâcle et le détournement du chenal principal (Keller et Swanson, 1979). Le moment d'occurrence et la trajectoire d'une avulsion sont pratiquement impossibles à prévoir (Hooke, 2004). Mais, une avulsion survient lorsque le niveau d'eau est très élevé. En période de crue, le refoulement de l'écoulement provoqué en amont d'un embâcle majeur peut déclencher une avulsion (Phillips, 2012). Les systèmes fluviaux peu profonds, de faible pente et caractérisés par la présence de chenaux secondaires sont davantage propices aux avulsions (Hooke, 2004; John et Klein, 2004; Phillips, 2012). La création d'un nouveau segment fluvial ou la réoccupation d'un ancien chenal génère de l'érosion et le

déracinement d'arbres, ce qui peut mener à la création de nouveaux embâcles (Phillips, 2012).

Par ailleurs, les embâcles latéraux, formés sur la rive concave d'un méandre, atténuent l'énergie mécanique de l'écoulement et ralentissent les taux d'érosion (figure 2.2.6) (Gurnell *et al.*, 2002 ; Abbe et Montgomery, 2003). Ainsi, les embâcles de bois peuvent aussi contribuer à la stabilité géomorphologique latérale dans cours d'eau.

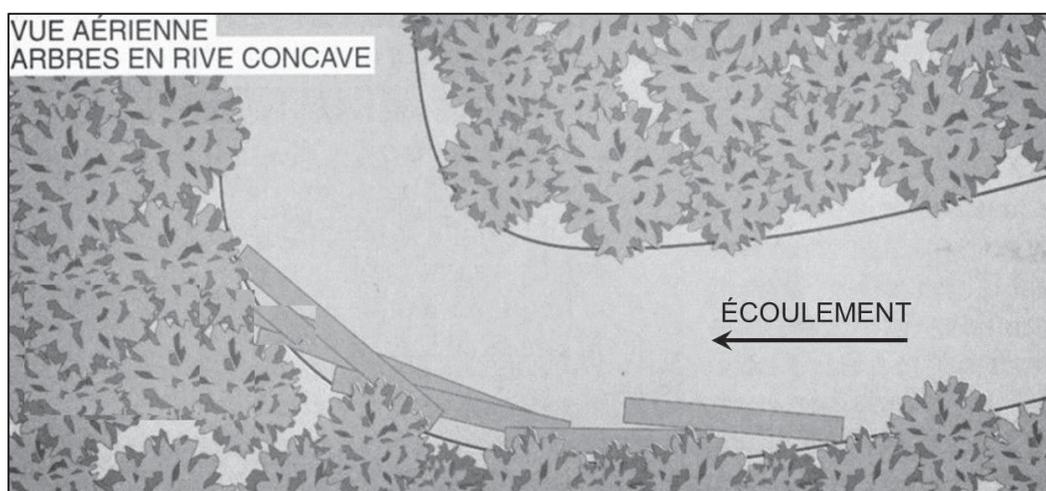


Figure 2.2.6. Embâcle latéral atténuant l'érosion de la berge concave d'un méandre (modifié de Therrien, 1997)

2.2.4 Les impacts des embâcles de bois mort sur les écosystèmes aquatiques

Les amas de débris ligneux sont reconnus comme des abris fauniques qui contribuent à la diversification des habitats aquatiques (Keller et Swanson, 1979; Therrien, 1997; Montgomery *et al.*, 2003; Boyer *et al.*, 2003; Seo *et al.*, 2010; Gurnell, 2013). Le bois mort en rivière complexifie la structure de l'écoulement et procure des habitats aux conditions hydrauliques variées qui sont essentiels à une grande variété d'organismes aux différentes

étapes de leur cycle de vie (Warren et Clifford, 2003 ; Buffin-Bélanger *et al.*, 2013). Dans les cours d'eau torrentiels, le ralentissement du courant induit par la présence de bois mort permet la conservation d'un substrat granulométrique au niveau du lit rocheux, ce qui favorise l'implantation des communautés d'invertébrés. Cela est bénéfique pour l'ensemble de l'écosystème aquatique (Keller et Swanson, 1979).

Les systèmes caractérisés par une grande quantité de bois mort possèdent généralement une diversité plus importante de poissons et de macro-invertébrés (Piégay et Gurnell, 1997). Dans la rivière Drôme en France, les tronçons encombrés de bois mort abritent de 1,3 à 2 fois plus d'espèces de poissons et de 1,6 à 7 fois plus d'individus que les tronçons sans bois mort (Thevenet, 1998). De plus, une étude dans le fleuve Mississippi (É-U) a mise en évidence une abondance de poissons de 2 à 50 fois plus importante dans les tronçons contenant du bois mort comparativement aux tronçons sans bois mort (Lehtinen *et al.*, 1997).

Cependant, dans les chenaux où l'accumulation des débris ligneux est anormalement élevée, les bouleversements hydrogéomorphologiques au niveau de la structure de l'écoulement, du transport sédimentaire et de la morphologie du chenal peuvent altérer considérablement l'écosystème fluvial. La diminution de la qualité de l'eau induite par la dégradation de la matière ligneuse flottante ou submergée peut être nuisible pour l'intégrité de l'habitat aquatique (Therrien, 1997). Le ralentissement de l'écoulement en amont des embâcles provoque le réchauffement de l'eau et la réduction de la concentration en oxygène dissous. Dans un tronçon fluvial fortement encombré de bois mort, l'habitat des poissons peut être morcelé par les embâcles qui agissent littéralement comme des barrages étanches bloquant l'accès à des segments de rivières ou à des tributaires (Gurnell *et al.*, 2002). En outre, la montaison à travers une succession d'embâcles de bois mort peut s'avérer une source de stress majeure pour les poissons. Par exemple, le stress induit par le passage de l'immense complexe d'embâcles de bois mort obstruant l'embouchure de la rivière St-Jean en Gaspésie aurait causé la mort de plus de 150 saumons de l'Atlantique (*Salmo salar*) en 2009, ce qui correspond à environ 20 % de la population qui remonte

annuellement la rivière pour la fraie (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010). L'analyse pathologique des individus décédés a révélé la présence d'importantes lésions cutanées résultant de l'immunosuppression provoquée par le traumatisme lors de la montaison (Dallaire *et al.*, 2010).

2.3 LES IMPACTS HYDROGEOMORPHOLOGIQUES DU DEMANTELEMENT D'EMBACLES DE BOIS MORT

De manière générale, le retrait d'un embâcle de bois mort permet au chenal de retrouver progressivement sa configuration initiale (Therrien, 1997). Toutefois, la nature et la vitesse des réajustements morphologiques diffèrent considérablement d'un embâcle à l'autre, selon ses caractéristiques et celles du tronçon fluvial (Smith *et al.*, 1993a). Les effets du démantèlement d'embâcles de bois sur la dynamique hydrogéomorphologique des cours d'eau seront présentés selon les composantes de la trinité de Leeder (1983) : la structure de l'écoulement, le transport de sédiments et la morphologie du chenal.

2.3.1 Les effets sur la structure de l'écoulement

Le démantèlement d'un embâcle de bois a pour effet direct de désengorger le chenal et de permettre le libre écoulement de la rivière. Dans le cas des embâcles disposés de manière oblique qui contournent et concentrent l'écoulement vers l'une ou l'autre des berges, leur démantèlement permet la redistribution de l'énergie hydraulique sur l'ensemble du profil transversal. Le retrait de plusieurs amas de bois mort d'un segment fluvial a pour effet d'homogénéiser la structure de l'écoulement, particulièrement en période de faible débit, de diminuer localement la hauteur d'eau, d'accentuer le profil longitudinal à la surface de l'eau et d'éliminer les lieux de faible énergie et de refoulement de l'écoulement (Shields et Smith, 1992; Smith *et al.*, 1993b; Daniels et Rhoads, 2007).

Le retrait d'une structure rugueuse comme un amas de bois mort provoque nécessairement une diminution du coefficient de rugosité à l'échelle du tronçon fluvial (Bilby, 1984; Lisle, 1995; Chin *et al.*, 2012). Les travaux de Shields et Smith (1992) réalisés sur deux tronçons fluviaux géomorphologiquement similaires montrent que la rugosité était 400 % plus importante dans le tronçon encombré de bois mort que dans le tronçon « nettoyé » en période d'étiage. Toutefois, la différence n'était que de 35 % lors des débits les plus élevés (Shields et Smith, 1992). La contribution du bois mort à la rugosité totale est plus importante en période de faible niveau d'eau, puisque l'espace occupé par les débris par rapport au périmètre est maximal.

La réduction du coefficient de rugosité se traduit par une augmentation de la vitesse locale de l'écoulement (Smith *et al.*, 1993 b; Keller et Macdonald, 1995; Daniels et Rhoads, 2007). L'amplitude de l'augmentation des vitesses dépend principalement des dimensions du cours d'eau et de la taille de l'embâcle de bois mort retiré. Par exemple, le retrait de tous les débris ligneux d'un cours d'eau de premier ordre a mené à une augmentation de plus de 250 % de la vitesse en période de faible débit (Macdonald et Keller, 1987). Des expérimentations similaires réalisées dans un cours d'eau d'ordre 4 se sont traduites par une augmentation de 20 à 30 % des valeurs de vélocité (Shields et Smith, 1992). À la manière du coefficient de rugosité, la différence de vitesse entre les tronçons encombrés et les tronçons libres de bois mort tend à diminuer parallèlement à l'augmentation du débit (Macdonald et Keller, 1987; Keller et Macdonald, 1995).

Par ailleurs, si le niveau d'eau est particulièrement élevé au moment du démantèlement d'un embâcle majeur, il est possible que l'évacuation du volume d'eau qui était retenu à l'amont de l'embâcle génère un coup d'eau vers l'aval. Cette onde pourrait causer un important événement d'érosion, la mise en transport et la redistribution des débris ligneux composant d'autres embâcles de même que des dommages pour les infrastructures riveraines. De plus, le retrait d'une proportion importante des débris ligneux d'un cours d'eau aurait comme effet d'accentuer la réponse hydrologique du cours d'eau en période de crue (Smith *et al.*, 1993a). Selon Shields et Smith (1992), bien que le retrait des débris

ligneux puisse engendrer une augmentation du débit de niveau plein-bord, les bénéfices du retrait d'embâcles de bois mort sur le contrôle des inondations sont modestes.

2.3.2 Les effets sur le transport des sédiments

Le démantèlement d'un embâcle de bois entraîne une augmentation immédiate de la turbidité par le relâchement et la mise en suspension de sédiments fins et de matière organique (Smith *et al.*, 1993b). La matière fine sera évacuée vers l'aval à une vitesse qui dépend du régime hydrologique du cours d'eau. Dans les rivières caractérisées par un faible débit, l'évacuation des sédiments fins pourra s'étendre sur plusieurs mois, voire quelques années (Smith *et al.*, 1993a). Si le courant n'est pas suffisant pour redistribuer les sédiments en suspension vers l'aval, ils s'accumuleront sur le lit par décantation. Les coups d'eau subséquents auront pour effet de remettre une certaine quantité de matière en suspension (Smith *et al.*, 1993a).

L'extraction d'un embâcle de bois mort bloquant entièrement le chenal entraîne la disparition d'un lieu de faible énergie hydraulique propice à la sédimentation fine. L'augmentation de la vitesse de l'écoulement provoque la mise en transport des sédiments qui étaient retenus par les débris ligneux (Bilby, 1984). Macdonald et Keller (1987) ont procédé au retrait de 70 m³ de débris ligneux sur un segment de 300 m d'un cours d'eau de troisième ordre et ont observé un lessivage de 100 m³ de sédiments fins dans la première année suivant les opérations.

L'accroissement de la vitesse de l'écoulement à la suite du démantèlement d'un embâcle de bois mort se traduit par une augmentation de la capacité du cours d'eau à transporter des sédiments. À titre d'exemple, l'augmentation des vitesses occasionnée par le retrait d'un embâcle majeur sur la rivière Red en Oklahoma (É-U) aurait provoqué la multiplication par six de la capacité de transport sédimentaire (Montgomery *et al.*, 2003).

Le démantèlement de plusieurs embâcles sur un même tronçon fluvial peut engendrer une diminution considérable des taux de sédiments stockés dans le système et une augmentation du transit sédimentaire (Shields et Smith, 1992). L'élimination de plusieurs sites de faible énergie et de refoulement propices à la sédimentation provoque la réduction générale du volume de sédiments stocké dans le système fluvial. Le retrait des débris ligneux d'un cours d'eau d'ordre 2 aurait mené à l'évacuation de 72 % du sable et du limon contenu dans le cours d'eau (Díez *et al.*, 2000). Après le démantèlement de 4 embâcles de bois majeurs, Klein *et al.* (1997) ont enregistré une réduction de 48 000 m³ de sédiments sur 1,2 km de rivière, soit une diminution de 70 % de tous les sédiments qui étaient initialement stockés dans le tronçon.

Les sédiments évacués à la suite du démantèlement d'embâcles de bois mort sont généralement redistribués sous la forme d'une nouvelle série de bancs alternes à l'aval (Smith *et al.*, 1993 b; Keller et Macdonald, 1995). Ainsi, la diminution de la rugosité du chenal provoquée par le retrait du bois mort peut être compensée par le développement de bancs d'accumulation en aval qui agissent comme des structures de résistance à l'écoulement (Montgomery *et al.*, 2003).

La contrainte de cisaillement induite par les forces exercées par l'écoulement contrôle le transport des sédiments de fond. La diminution de la rugosité induite par l'extraction des débris ligneux d'un cours d'eau provoque une augmentation de la contrainte de cisaillement stimulant le transport des sédiments en charge de fond (Smith *et al.*, 1993 b; Lisle, 1995). Les effets sur le transport en charge de fond dépendent principalement de l'intensité du renforcement des paramètres hydrauliques, mais aussi des taux de transport sédimentaires initiaux (Smith *et al.*, 1993b). À la suite du retrait des débris ligneux d'un petit cours d'eau graveleux, Smith *et al.* (1993b) ont documenté une augmentation par un facteur de 4 du taux de transport en charge de fond lors des débits plein-bord attribuable à : 1) l'augmentation de la transportabilité des sédiments anciennement stockés en amont des débris, dans les fosses et dans les lieux de faible énergie associés aux embâcles, 2) aux berges déstabilisées qui fournissent davantage de sédiments au système et 3) à

l'augmentation de la contrainte de cisaillement. L'augmentation du flux sédimentaire en charge de fond a persisté durant les 12 crues qui ont suivi le retrait du bois mort avant de se stabiliser. Un volume estimé de 5 000 m³ de sédiments sur une longueur de 100 m de rivière a été évacué seulement un an après le « nettoyage » du cours d'eau (Smith *et al.*, 1993b).

La magnitude des facteurs qui augmentent le transport sédimentaire en charge de fond diminue après que la majorité des sédiments facilement mobilisables aient été évacués du tronçon (Smith *et al.*, 1993b). Le débit sédimentaire peut persister plusieurs mois après le démantèlement d'embâcles jusqu'à un retour à l'équilibre relatif du système fluvial, soit par l'accumulation de nouveaux débris ligneux, par un adoucissement de la pente, par un renouvellement des tailles granulométriques ou par le rétablissement d'une séquence seuil-mouille régulière (Smith *et al.*, 1993b).

En outre, la taille granulométrique moyenne des sédiments composant le lit de la rivière devient plus grossière en raison de l'accroissement de la compétence hydraulique liée au libre écoulement de l'eau (Lisle, 1995; Díez *et al.*, 2000; Montgomery *et al.*, 2003). Les superficies du lit recouvertes de sédiments fins sont réduites au profit des surfaces graveleuses après le retrait du bois mort en rivière (Keller et Macdonald, 1995; Lisle, 1995)

2.3.3 Les effets sur la morphologie du lit et des berges

Selon la configuration et la taille de l'embâcle démantelé et les caractéristiques hydrogéomorphologiques du cours d'eau, les impacts sur la forme du lit et des berges peuvent varier considérablement. De manière générale, l'augmentation locale de la vitesse d'écoulement induite par la réduction du coefficient de rugosité provoque l'instabilité du chenal et accentue l'érosion des berges, notamment sur les rives concaves des méandres (Bilby, 1984; Shields et Smith, 1992; Keller et Macdonald, 1995; Daniels et Rhoads, 2007). Au contraire, le retrait d'un embâcle oblique qui avait pour effets de diriger et de

concentrer l'écoulement vers une berge permettra de ralentir l'érosion puisque l'énergie de l'écoulement sera maintenant répartie de manière plus uniforme sur l'ensemble de la largeur du chenal. Advenant le démantèlement de plusieurs embâcles de bois sur un même tronçon fluvial, l'accroissement de l'énergie du cours d'eau pourrait causer d'importants changements morphologiques comme le recouplement de méandres ou des avulsions (Gurnell, 2013).

Après le démantèlement d'un embâcle de bois mort, des changements morphologiques au niveau du lit s'effectuent selon le rythme et l'intensité de l'évacuation et de la redistribution des sédiments de fond (Smith *et al.*, 1993a). Par exemple, l'accroissement de la capacité hydraulique causée par le démantèlement d'un embâcle majeur dans un cours d'eau d'ordre 4 en Californie (É-U) a provoqué l'incision du lit sur 370 m vers l'amont de l'embâcle, ce qui a généré une perte nette de 930 m³ de sédiments (Klein *et al.*, 1997). Ces ajustements s'effectuent de manière progressive, mais sont caractérisés par des phases plus marquées lors des débits de crue (Smith *et al.*, 1993a ; Klein *et al.*, 1997). Dans certains cas, le surcreusement du lit peut s'effectuer jusqu'à l'exposition complète du substrat rocheux (Díez *et al.*, 2000).

Des changements dans la taille, la disposition et la configuration des fosses peuvent être enregistrés après le démantèlement d'embâcles de bois (Collins *et al.*, 2002). Généralement, le retrait du bois mort d'un tronçon fluvial provoque la diminution de la fréquence des fosses et la réduction de leur profondeur (Lisle, 1995 ; Collins *et al.*, 2002). Toutefois, ces modifications sont très variables selon la nature des opérations et la dynamique morphosédimentaire du système fluvial (Macdonald et Keller, 1987; Smith *et al.*, 1993; Klein *et al.*, 1997; Díez *et al.*, 2000). Un an après le retrait de tous les débris ligneux d'un segment d'ordre 2 de 90 m de longueur, Díez *et al.* (2000) ont constaté la disparition de 5 des 9 fosses préalablement cartographiées. Dans l'étude de Smith *et al.* (1993a) qui consistait à retirer tous les débris ligneux d'un segment de rivière de 100 m de longueur, les auteurs ont constaté une réduction de la profondeur moyenne du chenal et une légère diminution du coefficient de pente en lien avec le rehaussement des fosses. Par

ailleurs, l'augmentation de la vitesse de l'écoulement peut occasionner une réduction de la sinuosité du thalweg (Macdonald et Keller, 1987; Smith *et al.*, 1993a).

En outre, le retrait des embâcles de bois mort d'une rivière à lit graveleux d'ordre supérieur à 3 entraînerait le retour progressif d'une succession seuil-mouille similaire à ce qu'on retrouve habituellement dans les rivières dépourvues d'embâcles de bois mort majeurs (Smith *et al.*, 1993b; Keller et Macdonald, 1995).

2.3.4 Les conséquences sur la dynamique du bois mort

À l'instar du transit sédimentaire, le transit des bois morts nouvellement recrutés est accru lorsque le chenal est libre d'obstruction (Smith *et al.*, 1993a). De plus, l'instabilité du chenal engendré par le démantèlement d'embâcles de bois mort peut entraîner une augmentation significative du volume de bois acheminé au cours d'eau par l'érosion des berges. Des démantèlements effectués en France et en Angleterre par les hydrogéomorphologues Piégay et Gurnell (1997) ont permis de réaliser des constats intéressants. Presque immédiatement après le retrait de gros embâcles de bois mort, plusieurs petits et moyens embâcles se sont reformés notamment à la suite d'un événement de crue causé par une tempête. Lorsque les gros embâcles sont retirés, ils ne peuvent plus retenir le bois mort en transport et celui-ci est davantage mobile dans le système fluvial. Les forts débits ont redistribué les débris des petits et moyens amoncellements vers de plus gros embâcles. Cela souligne l'importance des gros embâcles actifs, mais stables, dans le contrôle de la mobilité du bois à l'échelle d'un bassin (Piégay et Gurnell, 1997).

2.4 LES MESURES DE GESTION DU BOIS MORT EN RIVIERE

Les impacts hydrogéomorphologiques du bois mort en rivière peuvent représenter tout un casse-tête pour les communautés riveraines, spécialement dans les environnements

touchés par une modification du régime d'inondation, des taux accélérés d'érosion et des ajustements morphologiques majeurs (Piégay, 2003; Seo *et al.*, 2010). Ainsi, diverses mesures directes et indirectes sont adoptées pour limiter le développement d'embâcles de bois mort et leurs impacts négatifs. Tout d'abord, le « nettoyage » des cours d'eau ou et le démantèlement d'embâcles sont les principales mesures de gestion du bois mort en rivière et possiblement l'intervention humaine la plus répandue dans les rivières à l'échelle mondiale (Brierley *et al.*, 2005 ; Le Lay, 2007). Dans certaines grandes rivières européennes, le bois mort est retiré pour maintenir le libre écoulement, surtout en temps de crue, pour éviter les dommages et le blocage des structures comme les piliers, les ponts, les barrages et les réservoirs, en plus de favoriser la navigation et le passage des poissons (Piégay et Gurnell, 1997; Moulin *et al.*, 2001; Le Lay, 2007).

Dans la législation québécoise, l'article 105 de la *Loi sur les compétences municipales (L.R.Q., c. C-47.1)* affirme 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 qui menace la sécurité des personnes ou des biens ». Ainsi, les MRC touchées par un problème d'embâcles de bois dans un cours d'eau sont dans l'obligation d'adopter des dispositions pour désengorger le chenal.

Avant d'entreprendre le démantèlement de multiples embâcles de bois mort, il est préférable d'évaluer en profondeur l'impact des interventions afin de limiter au maximum les répercussions négatives sur l'intégrité du cours d'eau, sur les écosystèmes et sur les infrastructures riveraines (Piégay *et al.*, 2005a). Généralement, lorsqu'on compare les bénéfices écologiques avec le coût des opérations, un minimum de démantèlements est souvent la meilleure solution (Piégay et Gurnell, 1997).

Néanmoins, le retrait d'embâcles où les inondations sont fréquentes s'avère une stratégie avantageuse en regard du ratio coûts/bénéfices (Piégay et Gurnell, 1997). Les embâcles qui ne présentent pas d'inconvénients devraient être conservés en raison de leurs avantages écologiques, d'autant plus que les coûts engendrés ne valent pas les faibles

changements espérés sur l'écoulement (Piégay et Gurnell, 1997). De plus, la présence de nombreux embâcles a pour effet de ralentir le transit du bois mort et de limiter la formation de nouveaux embâcles majeurs ou extrêmes. Selon Piégay et Gurnell (1997), la maintenance devrait être focalisée sur les petits cours d'eau d'ordre 1 et 2, puisque l'impact des débris ligneux sur la structure de l'écoulement est à son maximum et que la portion en amont des bassins versants constitue souvent une source majeure de production de bois mort.

Afin de limiter les apports en bois mort dans un cours d'eau, la gestion de la bande forestière riveraine et la stabilisation des berges peuvent être efficaces (Therrien, 1997). La coupe sélective des arbres inclinés ou susceptibles de tomber à court terme dans le chenal peut être réalisée dans les zones propices à la formation d'embâcles de bois mort. Des travaux de reboisement peuvent être entrepris en privilégiant des essences ayant un système racinaire profond qui favorisent la stabilisation des berges. De plus, la gestion des opérations forestières à l'échelle du bassin versant permet de limiter le ruissellement et l'érosion des berges.

Par ailleurs, des ouvrages de rétention tels que des trappes à bois peuvent être aménagés dans les tronçons fluviaux caractérisés par un taux de transport de bois mort important (Piégay *et al.*, 2005a) (figure 2.4.1). Ces installations sont similaires aux estacades aménagées dans certaines rivières pour recueillir la glace de dérive au printemps et limiter la formation d'embâcles de glace.



Figure 2.4.1. Estacade aménagée sur le lac Shasta pour récupérer les débris ligneux à la suite d'un feu de forêt, Californie (É-U) (USDA Forest Service, 2014)

Les gestionnaires de cours d'eau reconnaissent de plus en plus les effets bénéfiques du bois mort en rivière (Eaton *et al.*, 2012; Gurnell, 2013). En Australie, en Allemagne et aux États-Unis, des organismes ont commandé la réintroduction des débris ligneux en rivière afin de recréer des embâcles pour restaurer des habitats piscicoles (Piégay *et al.*, 2005a). Dans la rivière Au Sable au Michigan (É-U), 2 250 billots de bois ont été disposés parallèlement à des berges actives pour atténuer l'érosion (Klungle, 2006).

2.5 CONCLUSION

Dans le cadre de ce chapitre, les principales composantes de la dynamique du bois mort en rivière ont d'abord été présentées. Le recrutement du bois mort dans les rivières semi-alluviales comme la Neigette est principalement conditionné par l'érosion latérale des berges et par le taux de mortalité ou de chute d'arbres riverains. La capacité de

l'écoulement des rivières intermédiaires est suffisante pour permettre la redistribution et l'accumulation des débris sous forme d'embâcles à des endroits préférentiels : contre un arbre riverain affaissé, sur un banc d'accumulation, dans une zone de faible profondeur, dans un tronçon étroit ou sinueux. La mobilité des débris ligneux dépend essentiellement du rapport entre la taille du bois mort et la taille du chenal. Leur mise en transport s'effectue principalement en période de crue, lorsque le débit est suffisant pour engendrer la flottaison des débris individuels et la dislocation des embâcles de bois mort. Bien que les études scientifiques sur la dynamique interannuelle des embâcles dans les rivières intermédiaires soient limitées, le déplacement des bois morts et les changements de la configuration des embâcles sont reconnus. Les taux de mobilité interannuelle dépendent principalement de la magnitude des événements hydrologiques et de la configuration géomorphologique du chenal. Le temps de résidence des bois morts dans les rivières larges et profondes est généralement moindre notamment en raison de la diminution de la fréquence des éléments morphologiques propices à l'accumulation.

En outre, la complexification de la structure de l'écoulement, la réduction de la vitesse du courant, le stockage de sédiments, l'augmentation de la fréquence des mouilles et de leur profondeur et l'augmentation de la variabilité des valeurs de largeur du chenal sont les principaux effets hydrogéomorphologiques du bois mort en rivière. De plus, la plupart des études soulignent les bienfaits du bois mort sur les écosystèmes, bien que dans certains cas l'abondance de débris ligneux entraîne des perturbations écologiques significatives comme ce fut le cas en 2009 avec la mortalité de 150 saumons sur la rivière St-Jean en Gaspésie. Enfin, les embâcles de bois mort peuvent causer des désagréments pour les populations riveraines lorsqu'ils se forment contre des infrastructures (barrages, ponts, etc.) ou qu'ils ont pour effets d'amplifier les inondations en rehaussement localement le niveau de l'eau et d'accentuer l'érosion des berges. Pour éliminer ces effets indésirables, les gestionnaires ont souvent recours au démantèlement des embâcles de bois mort et les opérations peuvent avoir des conséquences importantes sur l'intégrité hydrogéomorphologique d'un cours d'eau : augmentation de la vitesse de l'écoulement, augmentation de la turbidité, augmentation de la capacité de transport sédimentaire,

incision du lit ou remblaiement des fosses et réduction de la diversité des habitats aquatiques.

Bref, la documentation scientifique a permis de bien cerner les composantes du bilan ligneux et de la dynamique du bois mort et constitue un cadre de référence pour répondre aux objectifs de ce mémoire, notamment quant à l'analyse de la distribution spatiale des embâcles de bois mort de la rivière Neigette. Les études sur la mobilité temporelle du bois mort dans les rivières intermédiaires pourront être comparées avec les résultats du suivi interannuel de la répartition des embâcles de la rivière Neigette. Les interrelations entre la dynamique fluviale et la distribution des embâcles de bois mort seront aussi étudiées à partir des constats décrits dans ce chapitre. Comme un nombre limité d'études scientifiques se sont intéressées aux effets morphologiques de l'extraction du bois mort dans les rivières intermédiaires, les travaux sur la rivière Neigette permettront de mieux comprendre la réponse morphosédimentaire des cours d'eau à la suite du démantèlement d'embâcles.

CHAPITRE 3

SITE D'ÉTUDE

Le présent chapitre résume d'abord les principales caractéristiques démographiques, climatiques et hydrologiques du bassin de la rivière Neigette. Ensuite, le contexte géologique est présenté de même que les connaissances sur la dynamique hydrogéomorphologique du corridor fluvial. Finalement, l'historique des perturbations de la bande riveraine est brièvement exposé.

3.1 PRESENTATION GENERALE

La rivière Neigette s'écoule sur 117,1 km et fait partie du bassin versant de la rivière Mitis dans le nord-est du Bas-St-Laurent (figure 3.1.1). La superficie de drainage du sous-bassin de la Neigette couvre 494 km². Précisément, le tronçon à l'étude s'étend de la chute Neigette à la confluence de la rivière Mitis sur une longueur de 32,1 km et correspond à un segment fluvial d'ordre 5.

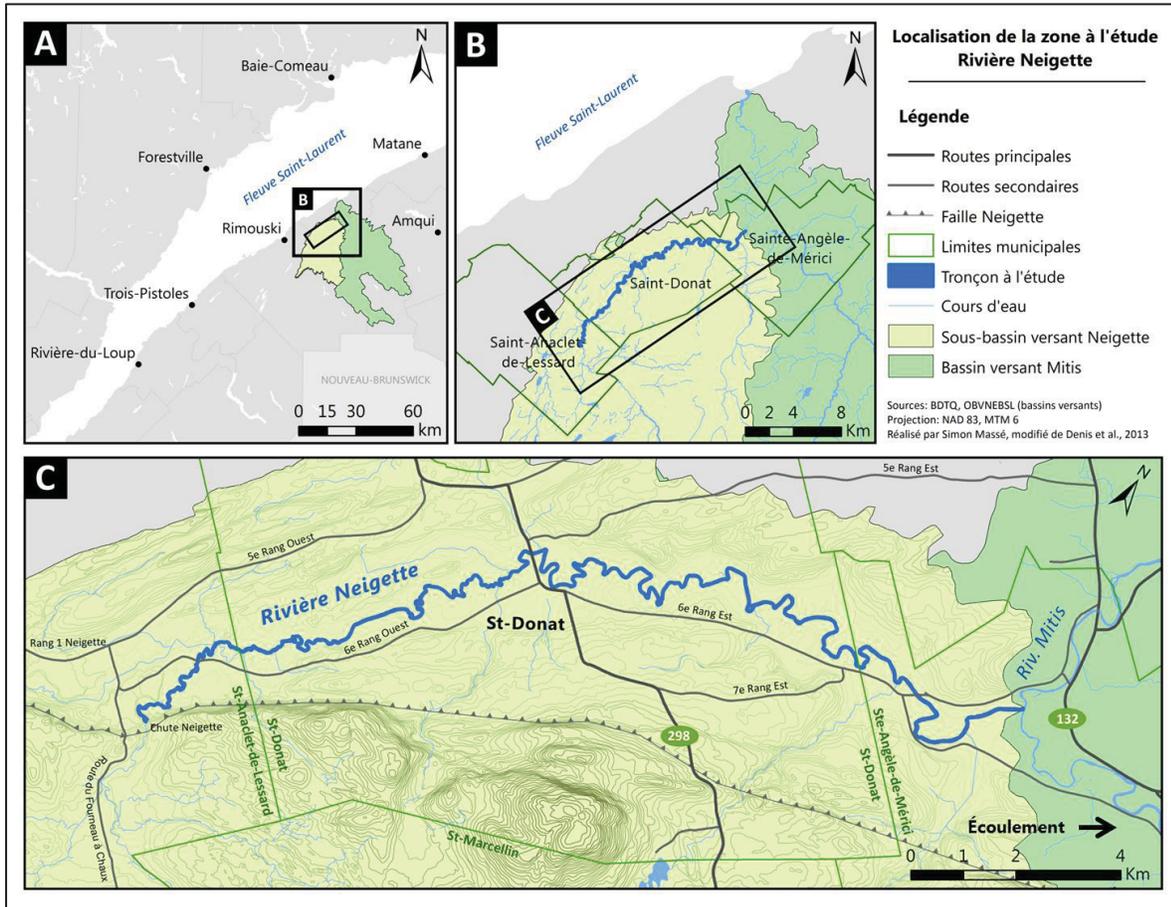


Figure 3.1.1. Localisation de la zone d'étude

Le bassin versant de la Neigette est forestier dans une proportion de 70 %. Toutefois, la partie nord du bassin correspondant au site d'étude est caractérisée par de grandes superficies agricoles. Le territoire est inclus dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune (MRN, 2013). La municipalité de St-Donat et le hameau Neigette, inclus dans les limites de la municipalité de St-Anaclet-de-Lessard, constituent les principaux secteurs habités. En 2011, ces municipalités comptaient respectivement 890 habitants et 3 035 habitants (Statistique Canada, 2013a; Statistique Canada, 2013b).

3.2 CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES DU BASSIN VERSANT

Les données de la station météorologique de Mont-Joli (48°36'32"N; 68°12'27"O), située à environ 14 km du point médian du tronçon à l'étude, ont été préconisées à celles de la station de Pointe-au-Père bien qu'elle soit légèrement plus proche du site d'étude. Le climat de la vallée de la Neigette est davantage similaire à celui de Mont-Joli qu'à celui de Pointe-au-Père qui subit l'influence directe des conditions hydroclimatiques de la côte de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Le bassin versant de la rivière Neigette est caractérisé par un climat de type tempéré froid. Entre 1981 et 2010, la température moyenne quotidienne calculée est de 3,5 °C. La température moyenne du mois le plus chaud (juillet) est de 17,5 °C, tandis que celle du mois le plus froid (janvier) est de -12,2 °C. En ce qui concerne les précipitations, la région reçoit en moyenne 632,1 mm de pluie et 324,6 cm de neige par année.

Les données hydrologiques de la station n° 021915 du Centre d'expertise hydrique du Québec, localisée à 3,7 km en amont de la confluence avec la rivière Mitis, ont permis de caractériser le régime hydrologique de la rivière Neigette. Pour la période comprise entre 1975 et 1997, le débit annuel moyen était de 9,30 m³/s. De type nivo-pluvial, le régime hydrologique de la Neigette est marqué par un pic de débit pour les mois d'avril (29,36 m³/s) et mai (36,60 m³/s) en raison de la fonte du couvert nival. La saison automnale est généralement marquée par une légère augmentation des débits principalement en raison de la pluviosité. Les mois d'août et de septembre sont marqués par des débits d'étiage généralement inférieurs à 3 m³/s. La figure 3.2.1 présente le régime annuel des débits mensuels moyens pour la période 1975-1997. De plus, pour la période couverte par la banque de données, le débit journalier le plus élevé a été évalué à 200 m³/s le 29 avril 1979 alors que le débit maximal médian est de 90,67 m³/s. La figure 3.2.2 représente les valeurs de débit journalier maximales entre 1975 et 1997.

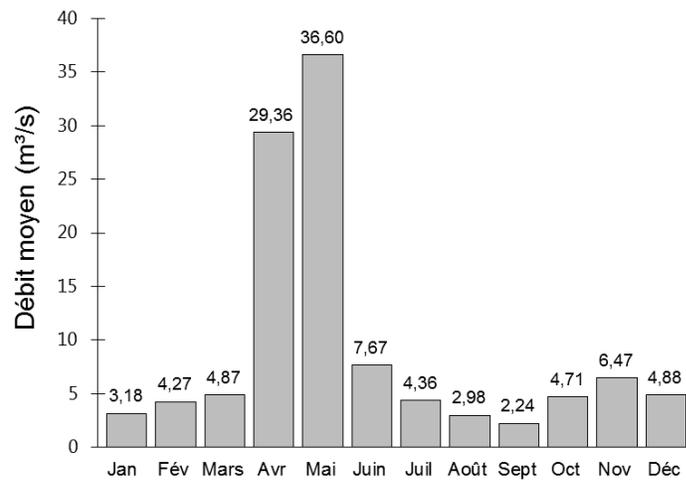


Figure 3.2.1. Régime annuel des débits mensuels moyens de la rivière Neigette entre 1975 et 1997

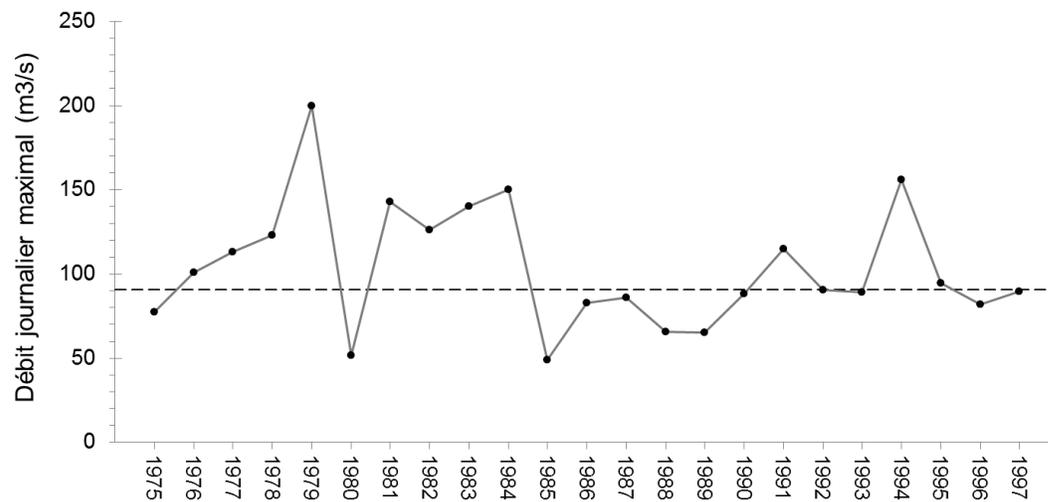


Figure 3.2.2. Valeurs de débit journalier maximales de la rivière Neigette entre 1975 et 1997. Le trait en pointillé correspond à la médiane de $90,67 \text{ m}^3/\text{s}$.

La Petite rivière Neigette est le principal tributaire du tronçon à l'étude et s'y déverse à 3,2 km en aval de la chute Neigette. Son débit annuel moyen est de $2,03 \text{ m}^3/\text{s}$. Comme

pour la rivière Neigette, les débits moyens des mois d'avril et mai sont les plus élevés avec des valeurs respectives de 6,20 et 6,13 m³/s.

3.3 CONTEXTE GEOLOGIQUE

La rivière Neigette évolue dans deux principaux environnements physiographiques typiques du cadre géologique bas-laurentien hérité de la formation orogénique des Appalaches : les formations taconiennes et acadiennes respectivement au nord et au sud de la ligne de faille Neigette (Hétu, 1998). Cette délimitation géologique est exprimée dans le paysage par la ligne de faille Neigette, escarpement abrupt au sud des villages de St-Anaclet-de-Lessard et de St-Donat d'où s'écoule la chute (figure 3.3.1).

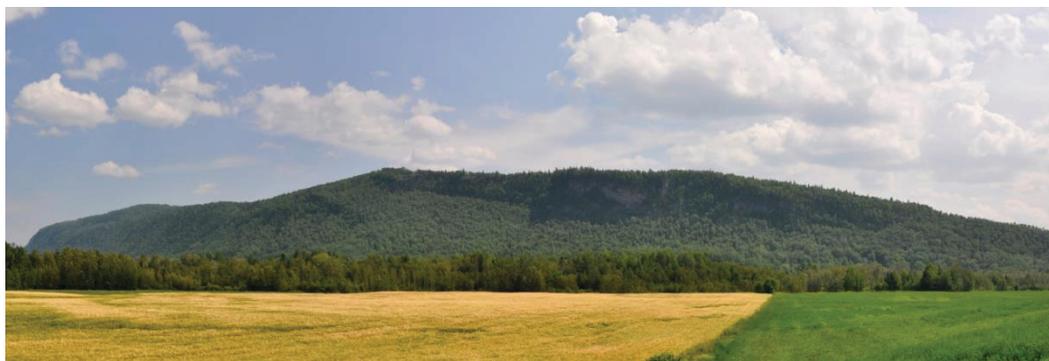


Figure 3.3.1. L'imposant escarpement de la faille Neigette vu du 2^e rang de Neigette

Le tronçon à l'étude correspond au segment fluvial compris dans la formation géologique taconienne caractérisée par une succession de crêtes de grès, de calcaire, de quartzite et de conglomérat et par des sillons de schiste particulièrement friable dans les altitudes les plus basses. En aval de la ligne de faille, la plaine alluviale de la rivière Neigette est composée d'une série irrégulière de dépôts sédimentaires d'origine glaciaire et

fluvio-glaciaire succédée d'une couche discontinue d'argile marine associée à la mer de Goldthwait (Héту, 1998). La figure 3.3.2 représente l'étendue spatiale des différents types de dépôts de surface répertoriés dans la vallée de la Neigette. La dynamique géomorphologique de la rivière Neigette est principalement conditionnée par le contexte morphosédimentaire hérité de la dernière glaciation (Demers et Buffin-Bélangier, 2011).

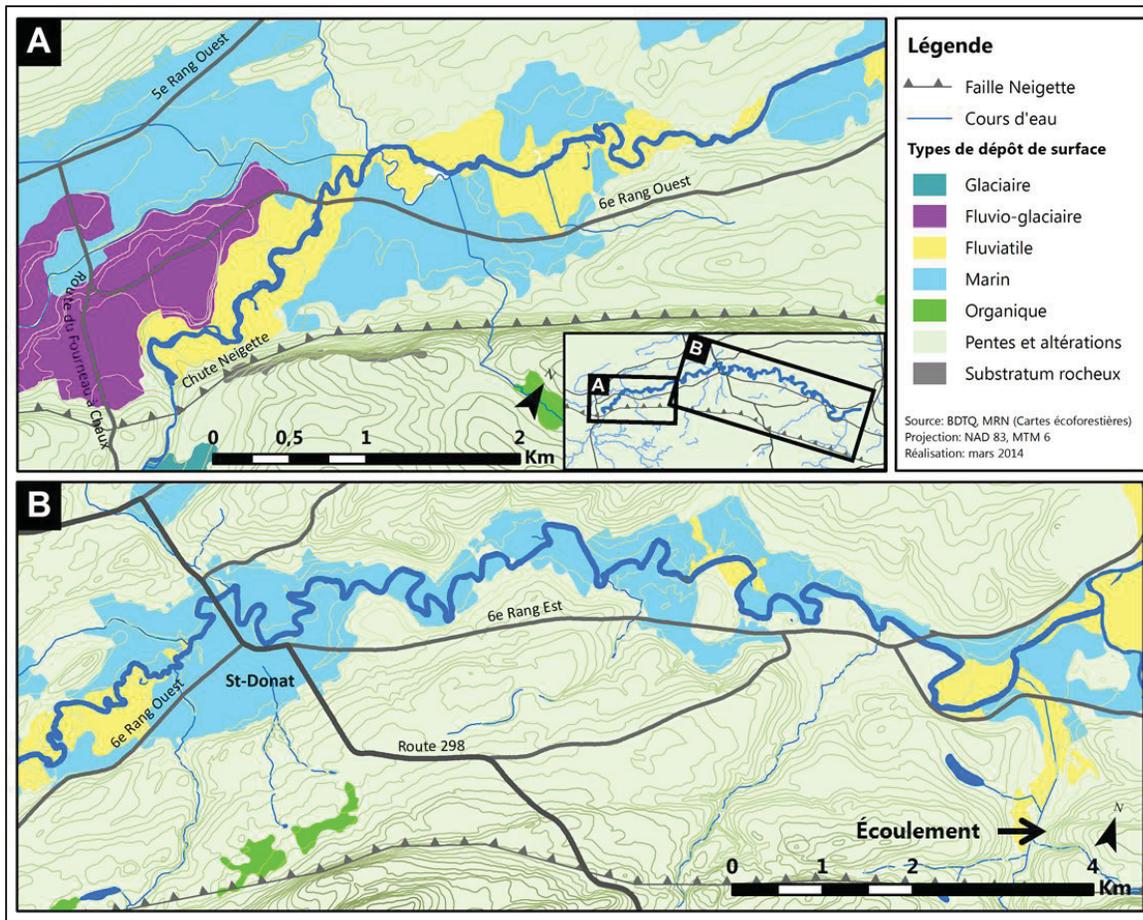
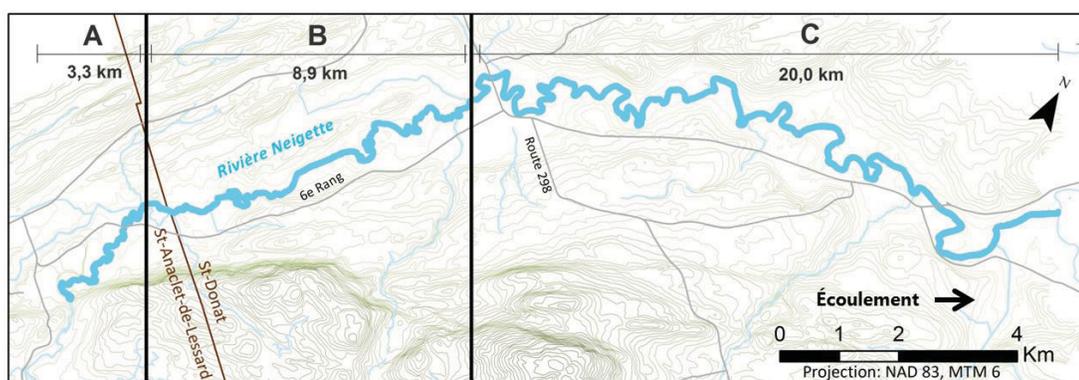


Figure 3.3.2. Carte des dépôts de surface de la vallée de la Neigette (Données écoforestières du MRN (2013))

3.4 DYNAMIQUE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE DE LA RIVIÈRE NEIGETTE

La dynamique hydrogéomorphologique du tronçon à l'étude de la rivière Neigette a été l'objet d'une étude de segmentation par Demers et Buffin-Bélanger (2011). Les résultats de cette étude seront résumés ici pour bien cerner le dynamisme de la rivière, mais surtout pour bien appuyer les choix méthodologiques.

Les travaux de Demers et Buffin-Bélanger (2011) ont mené à une segmentation de la rivière selon les discontinuités longitudinales de la puissance spécifique, paramètre hydraulique qui intègre la largeur du chenal au niveau plein-bord, la pente et le débit plein-bord et qui exprime le potentiel énergétique par unité de surface d'un cours d'eau. La segmentation de la rivière Neigette a permis de mettre en évidence trois unités morphodynamiques¹ : divagante à chenaux multiples, à méandres dynamiques et à méandres stables (figure 3.4.1). Les trois unités fluviales présentent des caractéristiques très distinctes qui leur confèrent une dynamique géomorphologique tout aussi singulière. La diversité des variables hydrogéomorphologiques s'explique par la succession des dépôts sédimentaires issus de la période quaternaire.



Sources : Unités morphodynamiques: Demers et Buffin-Bélanger, 2011. Réseaux hydrographique et routier: BDTQ. Limites administratives: MRN. Modifié de Denis et al., 2013.

Figure 3.4.1. Sectorisation morphodynamique de la rivière Neigette entre la chute et la confluence avec la rivière Mitis réalisée par Demers et Buffin-Bélanger (2011) (modifié de Denis *et al.*, 2013)

¹ Une unité morphodynamique correspond à un « assemblage de formes fluviales et alluviales défini par les mécanismes qui contrôlent leur formation et leur développement » (Demers et Buffin-Bélanger, 2011)

Unité A : divagante à chenaux multiples

D'une longueur de 3,3 km, la première unité correspond à la portion la plus en amont du tronçon à l'étude. La rivière Neigette y incise un delta pro-glaciaire mis en place au cours de la dernière période de déglaciation. Ce complexe sédimentaire est composé majoritairement de sable et de gravier. Toutefois, à proximité de la chute, les berges et le lit de la rivière sont parsemés de blocs rocheux. La taille granulométrique moyenne des sédiments composant le lit et les berges de la rivière diminuent graduellement vers l'aval. La cohésion sédimentaire de ce type de dépôt glaciaire est faible en raison de l'hétérogénéité des tailles granulométriques, ce qui contribue à augmenter le potentiel d'érodabilité des berges.

L'importante quantité de sédiments disponible et leur mobilité en période de crue expliquent le comportement divagant de ce segment fluvial. L'unité A est caractérisée par un chenal principal entrecoupé de multiples chenaux secondaires activés lors des crues et de grands îlots végétalisés. Ce tronçon est particulièrement propice aux ajustements morphodynamiques en période de crue. La migration latérale résultant de l'érosion progressive des berges et l'avulsion (détournement soudain du chenal principal) sont des processus fluviaux typiques des systèmes divagants à chenaux multiples (Hooke, 2004). Dans ce type d'environnement, l'intensité des crues s'avère le principal facteur qui contrôle la réponse morphologique des chenaux (Phillips, 2012). L'unité A constitue la principale source de sédiments pour le tronçon à l'étude. La figure 3.4.2 illustre un segment divagant de l'unité A situé à quelques centaines de mètres en aval de la chute Neigette.



Figure 3.4.2. Segment de l'unité divagante à chenaux multiples

Unité B : à méandres dynamiques

La deuxième unité succède graduellement à l'unité A à environ 8,9 km en aval de la chute. Bien que les valeurs de pente s'adoucissent graduellement vers l'aval, elles sont toujours suffisantes pour générer le transport de sable et de gravier. La dynamique sédimentaire est d'ailleurs mise en évidence par la présence de nombreux bancs d'accumulation latéraux et centraux. Le tronçon fluvial évolue progressivement vers des dépôts riches en sédiments limoneux dont la cohésion est supérieure aux dépôts grossiers caractéristiques de la portion précédente. La figure 3.4.3 représente un tronçon de l'unité à méandres dynamiques.



Figure 3.4.3. Tronçon de l'unité à méandres dynamiques

Bien que la plaine alluviale de l'unité B soit souvent large, l'espace de migration latérale du chenal est contraint par la présence de terrasses fluviales. La plaine alluviale est parsemée d'anciens méandres, ce qui témoigne du dynamisme du tronçon (Denis *et al.*, 2013). Les marques de recouplements de méandres sont aussi bien perceptibles par photo-interprétation (figure 3.4.4). Ces indices morphologiques montrent que le chenal principal peut changer soudainement de tracé lors des crues.



Figure 3.4.4. Un *oxbow lake* (méandre délaissé) témoignant de la dynamique hydrogéomorphologique de l'unité B

Unité C : à méandres stables

Ce long segment s'étire sur 20 km jusqu'à la confluence avec la rivière Mitis et comprend la plaine occupée par la municipalité de St-Donat. La zone se caractérise par des dépôts argileux d'origine marine accumulés lors de la dernière période de déglaciation où le niveau marin relatif était de 140 m supérieur à aujourd'hui (Hétu, 1998). La rivière Neigette incise profondément les dépôts de sédiments très fins et les berges peuvent atteindre plusieurs mètres de hauteur à certains endroits. La rivière est souvent confinée par le cadre structural ou par la présence de terrasses fluviales. La séquence seuil-mouille caractéristique des sections en amont laisse place à des profondeurs plus importantes.

Aucun dépôt alluvial n'est présent dans ce tronçon, à l'exception des dépôts de graviers accumulés en forme deltaïque à la confluence de petits cours d'eau agricoles. L'état des berges est beaucoup plus stable qu'en amont et l'érosion est moins prononcée (Denis *et al.*, 2013). La forte cohésion des sédiments argileux atténue l'érodabilité. La sinuosité et l'amplitude des méandres sont plus importantes qu'en amont en raison de la réduction des valeurs de pente et de la cohésion du complexe argileux. L'analyse des photographies aériennes révèle une diminution des marques d'anciens méandres pour ce tronçon, ce qui témoigne d'une plus grande stabilité hydrogéomorphologique (Denis *et al.*, 2013). La figure 3.4.5 présente un tronçon à méandres stables situé à proximité du pont de la route 298 à l'entrée du village de St-Donat.



Figure 3.4.5. Tronçon de l'unité à méandres stables

3.5 ÉVOLUTION ET PERTURBATIONS RECENTES DE LA BANDE RIVERAINE

Au début des années 1970, les rives de la rivière Neigette ont subi une coupe forestière totale sur environ 12 mètres de large de chaque côté du chenal pratiquement sur la totalité des 32,1 km du tronçon à l'étude (Lauzon, 2007). Ces interventions ont été réalisées par des chômeurs dans le cadre de travaux hivernaux imposés. À l'époque de la drave, les rivières étaient ainsi « débarrassées » pour faciliter le passage des travailleurs et éviter les obstacles pouvant entraver le transfert des billes de bois au cours d'eau. L'observation des photographies aériennes de 1963 et de 1980 permet aussi de constater le faible taux de végétalisation des berges, par rapport aux photos de 2001 et de 2004, de même que le prolongement de nombreuses parcelles agricoles jusqu'à la limite du cours d'eau.

Le phénomène d'enfeuillage fait référence à l'augmentation significative de la proportion de feuillus de lumière, comme le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*), à la suite d'une coupe forestière totale (Laquerre et al., 2009). Ainsi, la dominance du peuplier faux-tremble constatée dans la strate arbustive lors des campagnes de terrain serait imputable aux travaux sylvicoles de l'époque de la drave. Les peuplements équiens de peupliers qui bordent la rivière seraient ainsi âgés d'une quarantaine d'années. Ces spécimens sont donc vieillissants et approchent la fin de leur cycle vital (Lauzon, 2007).

Selon Lauzon (2007), qui a participé aux campagnes de caractérisation des bandes riveraines de nombreux cours d'eau sur le territoire de la MRC de La Mitis, les arbres penchés, renversés ou en surplomb sont particulièrement abondants en bordure de la rivière Neigette. Il affirme que cette tendance se poursuivra encore pendant 10 à 15 ans, jusqu'à ce que les peupliers faux-tremble aient complété leur cycle de vie et soient tous tombés. Le réseau racinaire des peupliers faux-tremble étant relativement faible, il est facilement altéré par l'énergie cinétique de l'écoulement, ce qui entraîne progressivement l'affaiblissement et la chute des spécimens évoluant en bordure des berges actives (Lauzon, 2007). Lors d'un épisode éventuel de vents forts, de verglas ou de neige lourde, ces arbres déjà fragilisés par

l'âge peuvent céder, tomber dans le chenal et ainsi contribuer à la formation de nouveaux embâcles ou à l'accroissement du volume d'embâcles existants.

Par ailleurs, une étude sur la qualité des berges et de la bande riveraine de la rivière Neigette réalisée par le Comité d'étude sur les ressources forestières (CERF) de Saint-Charles-Garnier en 2007 a permis de constater la déperdition générale de l'orme d'Amérique (*Ulmus americana*) tout au long du corridor fluvial de la Neigette (Lauzon, 2007). La présence de nombreux chicots sur la plaine alluviale est due à la graphiose, communément nommée « la maladie hollandaise de l'orme », qui se propage dans l'est du Canada depuis plus de 10 ans. La graphiose aurait engendré la mort de la totalité des ormes qui évoluaient dans les strates arbustive et arborescente (Lauzon, 2007). Ainsi, il est possible qu'un volume considérable de chicots d'ormes d'Amérique ait été transféré au cours d'eau à la suite de cette épidémie.

Finalement, la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables entérinée par le gouvernement du Québec au milieu des années 1990, couplée à des programmes de sensibilisation des agriculteurs et de protection de la qualité l'eau, a permis de limiter les interventions anthropiques à proximité du cours d'eau et d'ainsi augmenter la largeur de la zone riveraine tampon (Gauthier, 2009). De ce fait, il est logique de présager que ces mesures ont contribué à accroître le volume de matière ligneuse susceptible d'être transféré à un moment ou à un autre dans la rivière Neigette.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre expose les trois volets méthodologiques préconisés pour la réalisation des objectifs du mémoire. Le premier volet est consacré à la caractérisation hydrogéomorphologique. Les procédures d'analyse des tracés fluviaux historiques, des variations longitudinales des valeurs de largeur et du profil en long sont exposées. Le deuxième volet concerne l'acquisition et le traitement des données sur les inventaires des embâcles de bois mort réalisés en 2012 et en 2013, l'analyse de la variabilité interannuelle des embâcles et le suivi en continu de la dynamique du bois mort. Finalement, le dernier volet décrit les étapes préconisées pour le démantèlement des embâcles de bois mort de même que pour le suivi des paramètres hydrogéomorphologiques suivant les opérations.

4.1 CARACTERISATION HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE

La segmentation morphodynamique de la rivière Neigette réalisée par Demers et Buffin-Bélanger (2011), qui considère les styles fluviaux, les sources sédimentaires, les formes du lit ainsi que la nature, la composition sédimentaire et la stabilité des berges, constitue le cadre d'analyse pour la dynamique hydrogéomorphologique. Les travaux ont permis de diviser le corridor fluvial en 3 unités morphodynamiques homogènes : A) divagante à chenaux multiples, B) à méandres stables et C) à méandres dynamiques. La dynamique du bois mort sera analysée selon cette segmentation en fonction des paramètres hydrogéomorphologiques qui prévalent dans chaque unité.

Les caractéristiques géomorphologiques comme l'érodabilité, la largeur du chenal actif et la pente du cours d'eau ont été décrites pour chaque unité morphodynamique dans le but de valider et de renforcer la segmentation de Demers et Buffin-Bélanger (2011). Ces 3 variables physiques sont intimement liées au recrutement, au transport et à l'accumulation du bois mort en rivière (Montgomery *et al.*, 2003 ; Gurnell, 2013). Leur analyse permettra ainsi de faire des liens avec la caractérisation morphodynamique et la distribution spatiale des embâcles de bois mort dans le tronçon à l'étude.

4.1.1 Analyse de l'érodabilité et de la migration latérale

L'érosion latérale des berges constitue le principal mode de recrutement du bois mort dans les systèmes alluviaux et semi-alluviaux (Keller et Swanson, 1979; Gurnell *et al.*, 2002; Piégay *et al.*, 2005a; Gurnell, 2013). Ainsi, l'analyse de la migration latérale de la rivière Neigette a été réalisée selon la méthode de superposition des tracés fluviaux historiques développée par Downward *et al.* (1994) et Marston *et al.* (1995) et maintenant couramment utilisée en géomorphologie fluviale, notamment dans les travaux de Piégay *et al.* (2005b), Boivin et Buffin-Bélanger (2010), Demers et Buffin-Bélanger (2011) et Biron *et al.* (2013a). Tout d'abord, les photographies aériennes de 1963, 1980 et 2004 et les orthophotographies de 2001 ont pu être obtenues pour la région à l'étude. Les photographies aériennes ont été géoréférencées à partir des orthophotographies. Un minimum de 10 points de contrôle a été positionné pour chaque séquence et une moyenne quadratique (RMS) maximale de 5 m a été préconisée afin d'optimiser la précision du positionnement géographique. La superposition dans un système d'information géographique des images aériennes de 1963, 1976, 2001 et 2004 permet de visualiser l'évolution du tracé fluvial. Pour chaque année disponible, la superficie couverte par le chenal actif au niveau plein-bord a été numérisée. Ensuite, les surfaces ont été chevauchées pour visualiser les zones en érosion et les zones en accumulation. Les taux annuels de migration latérale ont été obtenus à partir du calcul des superficies érodées par unité de

longueur. Puis, des valeurs d'érosion moyenne ont été calculées entre chaque période couverte par les photographies aériennes. Finalement, la division de ces coefficients par le nombre d'années séparant les séries de photos a permis de quantifier l'érosion annuelle moyenne pour chaque période.

4.1.2 Évolution spatiale et temporelle de la largeur du chenal

Comme la largeur du chenal constitue le paramètre le plus déterminant du risque de formation d'embâcles de bois mort (Keller et Swanson, 1979; Montgomery *et al.*, 2003; Piégay *et al.*, 2005a; Gurnell, 2013) et que sa variabilité rend compte du dynamisme hydrogéomorphologique (Piégay *et al.*, 2005a), une analyse longitudinale des variations des valeurs de la largeur active au niveau plein bord a été réalisée. Tout d'abord, l'aire du chenal a été tracée dans *ArcGIS* à l'aide des photographies aériennes les plus récentes qui datent de 2004. À l'aide de l'outil *Transect* de l'extension *XTools Pro*, la superficie couverte par le chenal a pu être systématiquement subdivisée en tronçons équidistants de 100 m de longueur. La largeur moyenne de chaque segment a été obtenue en divisant l'aire de la section par la longueur de 100 m. La démarche a été répétée pour les tracés fluviaux de 1963, 1980 et 2001 pour évaluer l'évolution temporelle de la géométrie hydraulique de la rivière Neigette. Une marge d'erreur est nécessairement liée au géoréférencement des images, mais aussi au traçage manuel des limites du chenal par photographies aériennes. Sur les cours d'eau relativement étroits, comme la rivière Neigette, il est très difficile de relever avec exactitude les limites du cours d'eau, principalement en raison de la végétation riveraine. En plan, la canopée s'étend vers l'intérieur du cours d'eau, ce qui influence la précision du tracé des berges. L'estimation de l'erreur liée au tracé manuel du cours d'eau n'a pas été quantifiée, mais aurait nécessité des mesures systématiques de largeur *in situ*.

4.1.3 Profil topographique longitudinal

La pente d'un cours d'eau influence considérablement la puissance spécifique et la compétence du système fluvial à transporter et à redistribuer le bois mort vers l'aval (Gurnell *et al.*, 2002). De plus, les ruptures de pente sont généralement des zones propices à la formation d'embâcles de bois mort en rivière (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010; Gurnell, 2013). Le profil en long à la surface de l'eau de la rivière Neigette a ainsi été généré pour étudier les relations entre la pente du cours d'eau et la distribution spatiale du bois mort. Pour les 8 premiers kilomètres du segment à l'étude, les cotes d'altitude ont été relevées à l'aide d'un D-GPS *Trimble R-10*, d'une précision horizontale de 0,08 cm et verticale de 0,15 cm. Puis, l'extraction des valeurs d'altitude de l'imagerie LiDAR, dont la résolution des pixels est de 1 m², disponible pour la portion restante de la vallée de la rivière Neigette a été utilisée pour compléter le profil selon la méthode de Biron *et al.* (2013b). Les données LiDAR ont été obtenues à partir de relevés effectués du 9 au 19 novembre 2009 par le ministère de la Sécurité publique du Québec en collaboration avec le LGDF et le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) pour d'éventuels projets de gestion des risques fluviaux et côtiers du Bas-St-Laurent et de la Gaspésie.

Pour réduire le bruit des valeurs d'altitude du LiDAR causé par la surface de l'eau et la végétation riveraine, les pixels ont d'abord été regroupés pour créer des unités de 10 m par 10 m avec l'outil *Neighborhood* de l'extension *Spatial Analyst* du logiciel *ArcGIS*. Pour chaque nouveau pixel, la valeur d'altitude la plus faible a été attribuée. Normalement, comme le rayonnement du LiDAR ne pénètre pas l'eau, la valeur d'élévation la plus faible au centre du chenal correspond à l'altitude de la surface de l'eau au moment du relevé aéroporté. Puis, le tracé central de la rivière, généré à partir des photographies aériennes de 2004, a été transformé en un composé de points alignés à tous les 5 m avec l'outil *Convert feature to points* de l'extension *XTools Pro*. Les points ont par la suite été superposés à l'imagerie LiDAR. Pour chacun des points, la valeur d'élévation du pixel de la matrice a été extraite automatiquement avec l'outil *Extract values to points* de l'extension *Spatial*

Analyst (Van-Wiersts, 2012). Finalement, le recouplement de coordonnées topographiques relevées au D-GPS avec les valeurs d'altitude du LiDAR ont permis d'ajuster les données d'altitude du D-GPS. En moyenne, les niveaux d'eau relevés au D-GPS étaient de 0,026 m supérieur aux valeurs LiDAR correspondantes. Cette valeur a donc été soustraite à l'ensemble des cotes d'altitude relevées au D-GPS.

4.2 CARACTERISTIQUES ET DYNAMIQUES DES EMBÂCLES DE BOIS MORT

4.2.1 Inventaire des embâcles de bois mort

Une campagne de terrain a été réalisée en septembre 2012 pour inventorier et caractériser sommairement les embâcles de bois mort répartis sur 26,1 km entre le pont couvert de St-Anaclet-de-Lessard et le pont du 6^e rang Est dans la municipalité de Ste-Angèle-de-Mérici dans le cadre du projet en partenariat avec l'OBVNEBSL qui s'est concrétisé au début de septembre 2012. Les travaux ont été conduits rapidement puisqu'il était nécessaire d'identifier les 3 embâcles à démanteler et de caractériser les sites avant la date limite du 30 septembre fixée par le MDDEFP pour les opérations dans les cours d'eau.

En juillet 2013, un second inventaire, plus exhaustif cette fois-ci, a été réalisé pour mieux comprendre la dynamique spatiale des embâcles et évaluer la variabilité interannuelle du bois mort. Conséquemment, l'exploration de la littérature scientifique et l'analyse des données issues de l'inventaire de 2012 ont permis de cerner l'ensemble des paramètres à considérer dans les études sur les embâcles de bois mort et de constater les lacunes de la caractérisation de 2012. Cela a permis de raffiner la grille de caractérisation pour l'inventaire de 2013. De plus, la zone couverte par l'inventaire des embâcles de 2013 a été élargie de la chute Neigette à la confluence avec la rivière Mitis, soit une distance de 32,1 km.

Dans le cadre du projet, la définition de Platts *et al.* (1987), qui identifie un embâcle comme une accumulation d'au moins 3 bois morts dont la longueur et le diamètre sont respectivement supérieurs à 1,0 et à 0,1 cm, a été retenue. Cette définition est largement adoptée dans les publications scientifiques concernant le bois mort en rivière (Seo *et al.*, 2010; Gurnell, 2013) et est également préconisée dans les travaux réalisés au LGDF (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010; Denis *et al.*, 2013) dans le but d'uniformiser la prise de données et de favoriser la comparaison des résultats.

Lors des deux inventaires, 4 catégories de variables ont été relevées pour chaque embâcle : 1) la morphométrie et la composition de l'embâcle, 2) la configuration et le positionnement dans le tronçon, 3) le contexte géomorphologique et 4) le niveau d'intensité. Le choix des variables a été fortement inspiré des fiches de terrain utilisées au LGDF, notamment pour les travaux de Maxime Boivin sur la dynamique du bois mort dans le corridor de la rivière St-Jean en Gaspésie (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010). Les résultats obtenus pour la rivière Neigette pourront éventuellement être comparés avec d'autres études, puisque les variables choisies sont régulièrement préconisées dans les recherches sur le bois mort en rivière. Les données récoltées lors des inventaires ont été compilées dans des tableurs *Excel* en vue de produire les analyses statistiques, mais aussi les représentations cartographiques.

4.1.1.1 *Morphométrie et composition des embâcles*

Tout d'abord, la hauteur H (m), la longueur L (m) et la largeur I (m) de chaque embâcle ont été précisément relevées avec un ruban à mesurer selon les protocoles de Piégay (1993), Citterio (1996) et Therrien (1997) pour calculer le volume géométrique V (m^3) d'après la formule suivante : $V = H \times L \times I$ (figure 4.2.1). Au retour du terrain, les valeurs de volume géométrique ont été corrigées selon la méthode de Thevenet (1998) qui considère que la matière ligneuse représente en moyenne 10 % du volume géométrique d'un embâcle ($V_{\text{corrigé}} = V \times 0,10$). Le ratio air/bois a aussi fait aussi l'objet de recherches

par Boivin et Buffin-Bélanger (2010) qui ont mesuré précisément le volume de chaque bois mort compris dans 2 embâcles majeurs. Les résultats ont également montré que la matière ligneuse équivaut à environ 10 % du volume géométrique d'un embâcle.

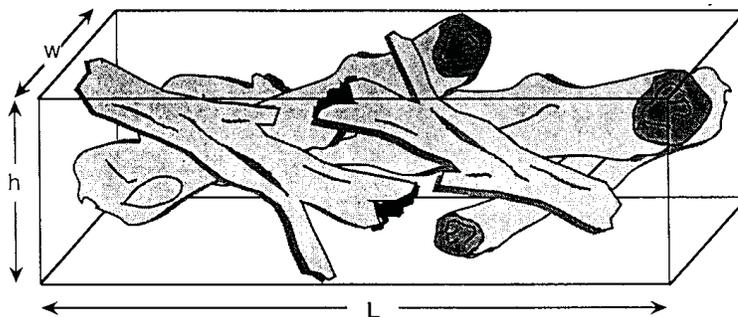


Figure 4.2.1. Calcul du volume géométrique d'un embâcle (Thevenet *et al.*, 1998)

Bien que la densité de bois mort influence grandement le volume réel de matière ligneuse contenu dans un embâcle, comme le montre la figure 4.2.2, elle n'est pas prise en compte dans la méthode de Thevenet (1998) pour le calcul du volume corrigé. Le calcul du volume géométrique, puis l'application du coefficient de correction ont tout de même été privilégiés pour l'estimation du volume de bois mort en raison de la facilité et de la rapidité de la prise de mesure. Pour pallier au problème illustré à la figure 4.2.2, la densité de chaque embâcle a été évaluée visuellement selon 4 catégories : faible, moyenne, élevée et très élevée.

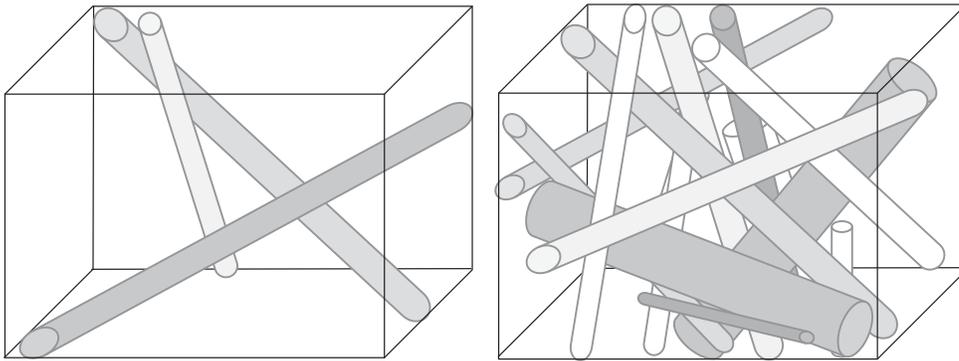


Figure 4.2.2. Comparaison d'embâcles de même volume selon la méthode de Thevenet (1998)

La composition de chaque embâcle a aussi été évaluée selon les critères utilisés par Therrien (1997) et Boivin et Buffin-Bélanger (2010). Le nombre de bois mort a d'abord été relevé pour l'appréciation de leur densité. Pour les embâcles comprenant moins de 10 bois morts, le nombre exact de débris a été précisément noté. Pour les plus gros embâcles, le nombre de bois morts a plutôt été estimé.

Comme la composition d'un embâcle influence sa dynamique temporelle et son comportement hydraulique (Braudrick et Grant, 2000; Gurnell *et al.*, 2002), le pourcentage de troncs, de branches et de racines contenu dans chaque embâcle a été relevé. Finalement, la source du bois mort compris dans les embâcles a été évaluée visuellement et catégorisée soit en provenance de l'amont ou à proximité de l'embâcle. Par exemple, la présence d'arbres tombés dans le chenal et encore rattachés à la rive par des racines de même que la présence d'écorce et de branches de faible diamètre toujours unies au tronc permettent de croire que la source du bois mort est proximale à l'embâcle. Au contraire, les troncs dépourvus d'écorces et de branches laissent présager un transport plus important en raison du niveau d'altération du bois mort (Gurnell *et al.*, 2002).

4.1.1.2 Configuration et positionnement de l'embâcle dans le tronçon

La configuration de chaque embâcle par rapport à la section transversale du chenal a été décrite. Les embâcles ont été classés en 4 types selon la catégorisation de Therrien (1997) : troncs transversaux, embâcle latéral, embâcle partiel et embâcle total (figure 4.2.3).

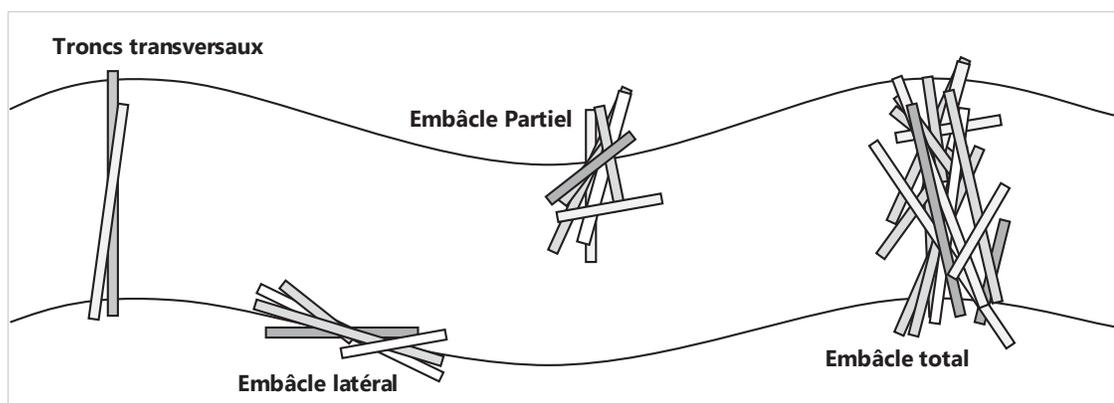


Figure 4.2.3. Représentation des 4 types d'embâcles de bois mort selon Therrien (1997)

Le pourcentage d'obstruction du chenal est le principal paramètre qui influence le contrôle hydrogéomorphologique d'un embâcle de bois mort (Gurnell, 2013). Ainsi, cette valeur a été estimée visuellement lors des inventaires. Les embâcles latéraux occupaient moins de 25 %, les embâcles partiels entre 25 et 90 % et les embâcles totaux obstruaient plus de 90 % de l'aire transversale. Le pourcentage d'obstruction a été relevé par classes de 5 %.

Les coordonnées géographiques de chaque embâcle ont été enregistrées au GPS pour analyser la distribution spatiale du bois mort et pour produire les documents cartographiques. Afin de faciliter la représentation spatiale et le positionnement des embâcles lorsque comparés les uns avec les autres, les embâcles de bois mort sont numérotés selon leur position longitudinale à partir de la chute Neigette constituant le point

métrique 0 et la limite amont du site d'étude. Par exemple, l'embâcle n° 11855 se situe à 11 855 m en aval de la base de la chute Neigette ; donc plus le n° d'embâcle augmente, plus il se situe loin en aval de la chute. Il est à noter que la position longitudinale a été obtenue en superposant dans un système d'information géographique les points GPS associés aux embâcles sur le tracé central de la rivière Neigette. Le tracé central a été déterminé à partir des photographies aériennes de 2004, soit les plus récentes disponibles pour le tronçon à l'étude.

4.1.1.3 Contexte géomorphologique du site

Pour chaque embâcle, le contexte géomorphologique général du site a été relevé. Dans la fiche terrain, la berge gauche et la berge droite étaient définies comme étant en accumulation, stable ou en érosion. La morphologie du lit a été décrite par la présence ou l'absence d'une mouille en amont, sous l'embâcle et en aval. L'identification des mouilles a pu être réalisée pour les unités morphodynamiques A et B. L'exercice n'a pas pu être réalisé pour l'unité C, compte tenu des valeurs de profondeur plus importantes et de la turbidité de l'eau qui complexifient le repérage des mouilles. L'évaluation qualitative du contexte géomorphologique avait pour but de déterminer si les embâcles étaient associés à de l'érosion des berges, à de l'accumulation sédimentaire ou à des fosses. Les critères qualitatifs ont été préconisés aux mesures quantitatives (par exemple les mesures de la longueur des zones d'érosion et d'accumulation, de la largeur et de la profondeur des mouilles) en raison du temps et de l'énergie qu'aurait nécessité l'analyse approfondie de la morphologie du lit et des berges.

4.1.1.4 Classification des embâcles par niveaux d'intensité

Une classification des embâcles reposant sur leur nombre de bois mort, sur leur densité et sur leur potentiel d'obstruction de l'écoulement a été réalisée. Les objectifs de la

classification étaient de faciliter la représentation cartographique et de différencier les embâcles selon leur niveau d'importance. Les catégories ont été fortement inspirées de celles utilisées par les aménagistes de la MRC de la Mitis pour l'inventaire de 2011 qui distinguaient 4 niveaux d'intensité : mineur, moyen, majeur et extrême. Ces classes ont été précisées à l'aide des critères présentés dans le tableau 4.2.1 et la figure 4.2.4 illustre des exemples des niveaux d'intensité d'embâcles de bois mort.

Tableau 4.2.1. Critères pour la classification des embâcles de bois mort

Niveau	Nombre de bois morts	Densité	Obstruction de l'écoulement
Mineur	< 20	Faible à moyenne	Minime
Moyen	< 40	Faible à moyenne	Partielle
Majeur	< 100	Moyenne à élevée	Partielle à totale
Extrême	> 100	Très élevée	Totale

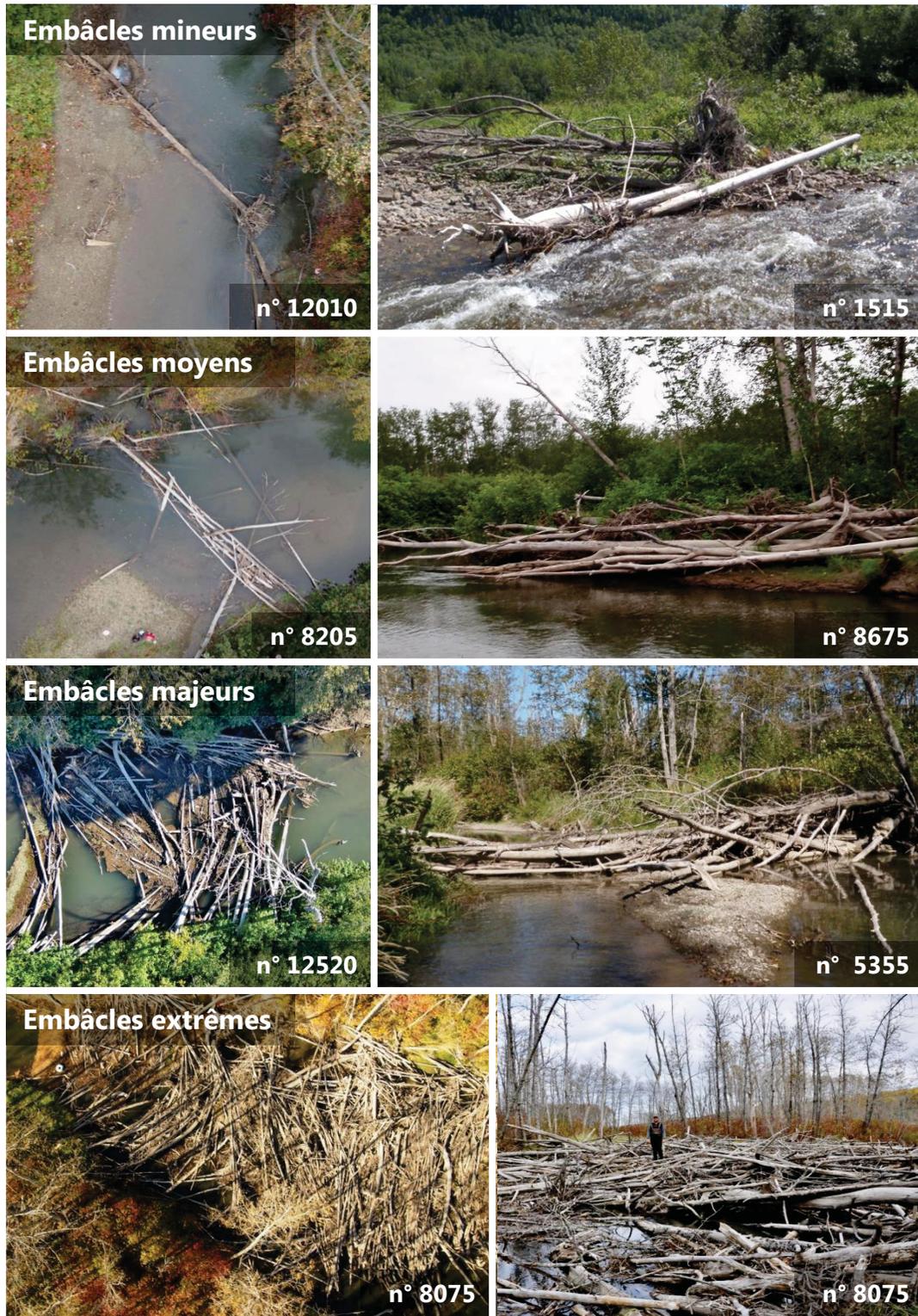


Figure 4.2.4. Exemples des niveaux d'embâcles de bois mort

Finalement, le tableau 4.2.2 résume l'ensemble des variables retenues pour la prise de données lors des inventaires des embâcles de bois mort.

Tableau 4.2.2. Description des variables mesurées ou évaluées pour la caractérisation des embâcles

Variable	Méthode de mesure	Type de variable	Unité ou catégories
1. Morphométrie et composition			
Hauteur (<i>H</i>)	Ruban à mesurer	Quantitative	0,1 m
Longueur (<i>L</i>)	Ruban à mesurer	Quantitative	0,1 m
Largeur (<i>l</i>)	Ruban à mesurer	Quantitative	0,1 m
Volume géométrique	$H \times L \times l$	Quantitative	0,01 m ³
Volume corrigé	$(H \times L \times l) \times 10 \%$	Quantitative	0,01 m ³
Nombre de bois mort	Décompte (<15) et estimation (>15)	Quantitative (<15) et qualitative (>15)	Sans unité/catégorie
Densité	Évaluation visuelle	Qualitative	Faible, moyenne, élevée et très élevée
Composition	Estimation	Semi-quantitative	% de troncs, de branches et de racines
Provenance	Évaluation visuelle des bois morts	Qualitative	Amont et/ou proximale
2. Configuration et positionnement			
Type	Évaluation visuelle	Qualitative	Troncs transversaux, latéral, partiel, total
Obstruction du chenal	Estimation	Semi-quantitative	Par classes de 5 %
Coordonnées géographiques	GPS	Géographique	Latitude et longitude (°), altitude (m)
Position longitudinale	GPS et tracé central	Géographique	Point métrique (m)
3. Contexte géomorphologique			
État des berges	Observation visuelle	Qualitative	En accumulation, stable ou en érosion
Formes du lit	Observation visuelle	Qualitative	Présence ou absence d'une mouille
4. Classification			
Niveau d'intensité	Évaluation selon obstruction, densité nombre de bois mort	Qualitative	Mineur, moyen, majeur et extrême

4.2.2 Variabilité interannuelle de la position et de la configuration des embâcles

La comparaison des résultats issus des inventaires de 2012 et de 2013 permet d'examiner les changements dans la position spatiale des embâcles et d'identifier les embâcles ayant été redistribués ou évacués du système de même que ceux ayant été formés entre septembre 2012 et juillet 2013. Pour les embâcles de bois mort présents lors des deux inventaires, les variables morphométriques (volume corrigé, nombre de bois mort, densité) et le pourcentage d'obstruction du chenal ont été comparés pour évaluer s'il y'a eu des changements dans leurs dimensions et leur configuration. Pour chaque embâcle, l'analyse des photographies prises en 2012 et en 2013 a permis de confirmer visuellement la nature des variations de leur taille (augmentation, stabilité ou diminution). Les photographies prises par les aménagistes de la MRC de la Mitis lors de l'inventaire de 2011 ont été utilisées pour évaluer visuellement l'évolution de la configuration des embâcles répartis dans les limites de St-Donat par rapport à 2012.

Par ailleurs, l'utilisation d'un drone télécommandé *Draganfly X4-P* (figure 4.2.5) a permis d'obtenir des photographies aéroportées à haute résolution pour certains embâcles de bois, dont les embâcles extrêmes n^{os} 4925, 4960 et 8075 et les embâcles démantelés n^{os} 12010, 8205 et 10930. La caméra fixée à l'appareil est le modèle *E-PM1* d'*Olympus* d'une résolution de 12,3 mégapixels effectifs. Des campagnes de vol ont été conduites à l'automne 2012, soit avant et après le démantèlement des embâcles, et à l'automne 2013. L'appareil a été programmé pour prendre une photo à chaque intervalle de 3 secondes lorsque le déclencheur de la manette de contrôle est appuyé et maintenu enfoncé. Un post-traitement est nécessaire pour éliminer les images floues ou obliques. Généralement, les vols étaient effectués à environ 75 m d'altitude. À cette altitude, la résolution au sol est d'environ 16 cm² (0,0016 m²), comparativement à 1 m² pour les photos aériennes du gouvernement du Québec. Pour obtenir une vue d'ensemble des sites, des séries de photo ont aussi été prises jusqu'à 200 m d'altitude. Des mosaïques de photographies ont été générées automatiquement avec le logiciel *Adobe Photoshop CS6* avec la commande *Photomerge* pour obtenir des images plus étendues des sites survolés. Les images aériennes

ont permis de décrire qualitativement la configuration des embâcles. L'évolution des embâcles survolés a pu être observée en comparant les séries de photos de 2012 et de 2013. Certaines mosaïques ont été géoréférencées dans *ArcGIS* à l'aide de repères visuels au sol, comme des particularités dans le tracé de la rivière et des bois morts présents sur 2 séries de photos. Cependant, le manque de repères géolocalisés au sol n'a pas permis d'obtenir un positionnement suffisamment précis pour pouvoir procéder à des analyses quantitatives entre les séries d'images. Le drone a cependant permis d'obtenir des images spectaculaires et évocatrices de la taille et de la configuration des embâcles de bois.



Figure 4.2.5. Drone télécommandé *Draganfly X4-P* équipé de la caméra *Olympus E-PM1*

4.2.3 Suivi en continu de la dynamique du bois mort

Des caméras de surveillance *Spypoint HD-10* d'une résolution de 10 mégapixels ont été installées sur des arbres riverains près de la limite amont de l'embâcle majeur n° 12520, en amont de l'embâcle de niveau extrême n° 4925 et en aval du site de l'embâcle démantelé n° 10930. Pour les sites n° 8075 et 12520, des caméras de type *Spypoint Live-3G* de 8

mégapixels ont été déployées. Ce modèle a comme particularité d'être connectée à un réseau internet sans fil 3 G, ce qui permet le téléchargement automatique des photos et le contrôle à distance des paramètres de la caméra à partir du site internet <http://www.myspypoint.com>. La figure 4.2.6 présente les 2 modèles de caméra de surveillance utilisés dans le cadre du projet. Tous les appareils ont été réglés pour prendre des photographies à chaque intervalle de 30 minutes de 8h à 17h de novembre à avril et de 7h à 19h de mai à octobre. Les caméras à proximité des embâcles ont été installées pour surveiller leur progression, le transport du bois mort et leur comportement en période de crue.



Figure 4.2.6. Caméras Spypoint HD-10 et Live-3G (Source : <http://www.spypoint.com/FR/cameras>)

Afin de déterminer le potentiel de rétention de l'écoulement et l'effet des embâcles de bois mort sur la transmission de l'onde de crue, des capteurs de pression *Onset HOBO Water Level Data Logger* de type *U-20-001-01* ont été installés en amont et en aval d'un tronçon comprenant 9 embâcles dont 2 extrêmes, de même qu'en amont et en aval de l'embâcle n° 8075, soit le plus volumineux du tronçon à l'étude. Une distance de 540 m sépare les 2 premiers capteurs et 115 m séparent les capteurs de l'embâcle n° 8075. La

figure 4.2.7 montre la position des capteurs de pression. Les zones A et B correspondent respectivement au tronçon fortement encombré de bois mort et au site de l'embâcle extrême n° 8075.

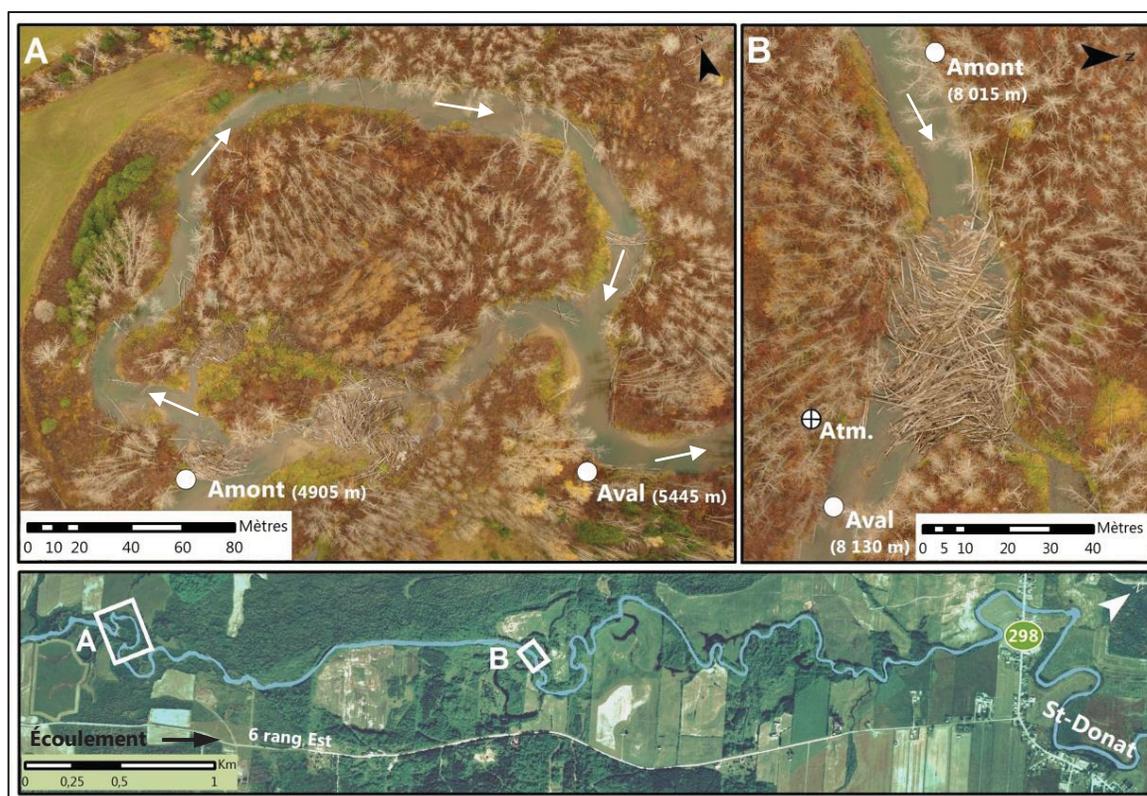


Figure 4.2.7. Localisation des capteurs de pression. La zone A correspond au tronçon de 540 m comprenant 9 embâcles dont 2 extrêmes et la zone B correspond à l'embâcle extrême n° 8075.

Chaque capteur a été programmé pour enregistrer une mesure chaque 15 minutes, puis inséré dans un tuyau de PVC de 7,62 cm (3") de diamètre. Les tuyaux ont été installés sur la rive, à un endroit où la berge était subverticale et où le lit était relativement profond. Les capteurs sont reliés au bouchon supérieur du tuyau par un fil d'acier suffisamment long pour que l'appareil soit submergé d'eau, même en période d'étiage. Une brèche a été creusée dans la berge pour y insérer le tuyau et maximiser sa stabilité. Les tuyaux ont aussi

été fixés contre des arbres avec des languettes d'acier solidement vissées pour assurer leur résistance aux crues et aux processus glaciels. La figure 4.2.8 montre le système de mise à l'eau des capteurs de pression. Selon le guide du fabricant, la résolution des capteurs est de 0,21 cm et la marge d'erreur maximale équivaut à 0,05 % de la profondeur d'eau. La période couverte par les données s'étend du 19 novembre 2012 au 7 mai 2013. Des problèmes techniques avec les capteurs n'ont pas permis d'étendre l'enregistrement des données au-delà de cette période.

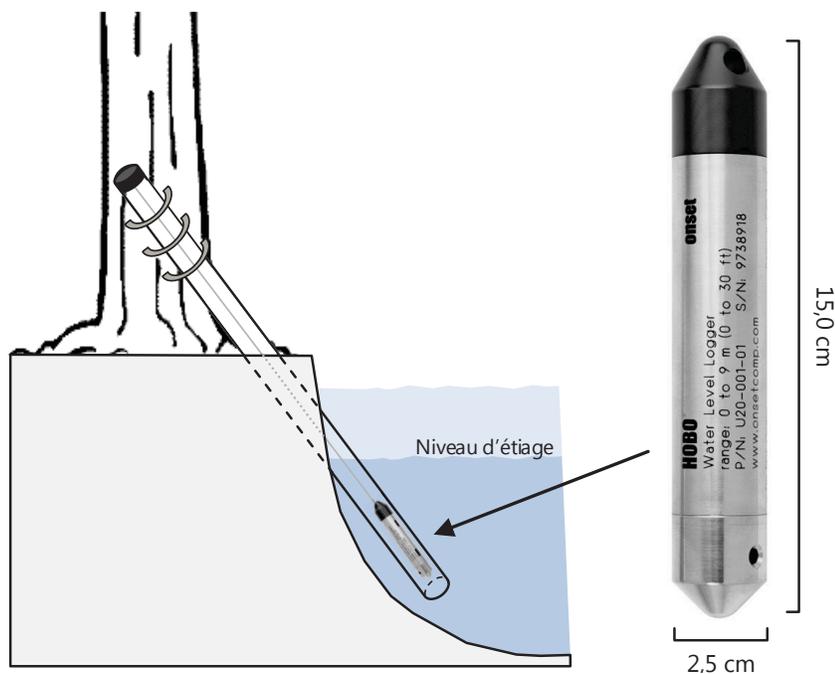


Figure 4.2.8. Schématisation du système de mise à l'eau des capteurs de pression

Un capteur a aussi été installé à l'air libre près du site n° 8075 pour enregistrer la pression atmosphérique. Il a aussi été placé dans un tuyau de PVC vissé sur un arbre. En soustrayant les valeurs de pression atmosphérique aux valeurs de pression enregistrées par les capteurs submergés, les valeurs nettes de pression exercée par la colonne d'eau sont extraites. Avec le logiciel *HOBOWare Pro*, les données de pression sont converties en

valeur de hauteur d'eau. Afin de convertir les données de hauteur d'eau en niveaux d'eau absolus, les coordonnées topographiques des capteurs ont été relevées avec un D-GPS *Trimble R- 10* d'une résolution à l'horizontale de 0,15 cm et à la verticale de 0,08 cm. Les valeurs de hauteur d'eau ont été additionnées aux valeurs d'altitude déterminées au D-GPS, ce qui a permis d'obtenir des valeurs de niveau d'eau (Z) pour les quatre capteurs de pression submergés. Pour obtenir la différence de niveau d'eau entre les sites, les valeurs enregistrées en aval ont été soustraites de celles en amont. Le coefficient de pente (ΔS) entre l'amont et l'aval de chaque site, obtenu avec le calcul du profil en long (voir section 4.2.3.), a été retranché aux valeurs de différence pour conserver seulement les variations nettes de niveau d'eau (niveau d'eau (Z) corrigé). Pour le segment compris entre les capteurs n^{os} 4905 et 5445, la différence d'altitude était de 0,7199 m, tandis qu'elle était de 0,3181 m entre les capteurs n^{os} 8015 et 8130. Bref, la formule suivante résume les étapes du calcul des valeurs de niveau d'eau corrigées :

$$Z_{\text{corr}} = (Z_{\text{amont}} - Z_{\text{aval}}) - \Delta S$$

La figure 4.2.9 illustre 3 scénarios de variations du niveau d'eau entre les capteurs amont et aval — A) étiage ou bas niveau de l'eau, B) crue en dessous du niveau plein-bord et C) crue au-delà du niveau plein-bord — et la valeur de niveau d'eau corrigé (Z_{corr}) qui leur est associée. Quand la valeur de Z_{corr} est près de 0, le niveau d'eau n'est pas influencé par le bois mort et varie de l'amont vers l'aval seulement en fonction de la pente naturelle du cours d'eau. Quand la valeur de Z_{corr} est supérieure à 0, le niveau d'eau enregistré en amont est supérieur au niveau en aval, ce qui révèle que le bois mort induit un effet de rétention de l'écoulement. Finalement, lorsque la valeur de Z_{corr} est inférieure à 0, on présume que les deux capteurs de pression enregistrent des niveaux d'eau équivalents indépendamment du coefficient de pente. En période de crue, la pente à la surface de l'eau diminue, puisque le niveau d'eau est rehaussé de manière étendue dans l'espace. La valeur négative obtenue est le résultat de la soustraction du coefficient de pente à la surface de l'eau.

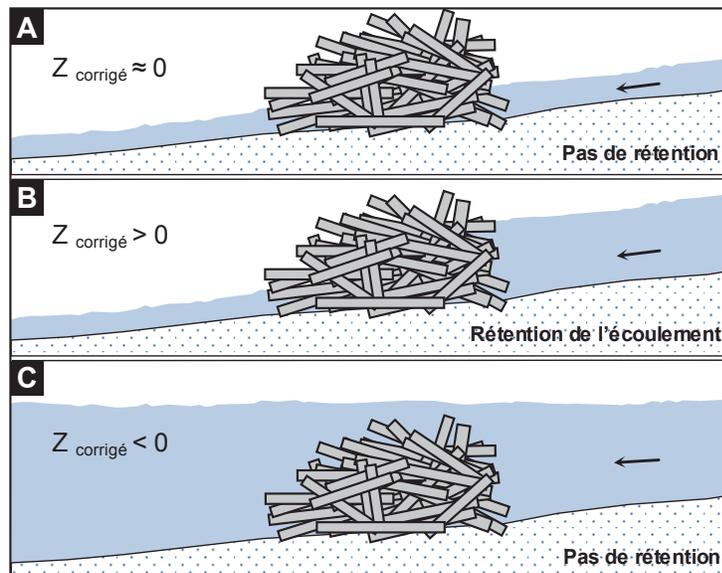


Figure 4.2.9. Interprétation de la valeur de niveau d'eau corrigé (Z_{corr}) selon 3 scénarios d'écoulement : A) étiage ou bas niveau de l'eau, B) crue en dessous du niveau plein-bord et C) crue au-delà du niveau plein-bord.

La méthode préconisée pour évaluer l'effet des embâcles de bois mort sur la rétention de l'écoulement comporte toutefois certaines limites. La géométrie hydraulique, soit la relation entre le niveau d'eau et la morphologie de la section transversale, peut nécessairement influencer la réponse hydrologique enregistrée par les capteurs et il est normal que la relation hauteur d'eau – débit ne possède pas les mêmes caractéristiques en amont et en aval. De plus, comme la période d'enregistrement s'échelonne de l'automne 2012 au printemps 2013, la glace a pu influencer localement les niveaux d'eau. Néanmoins, les données sont ici interprétées principalement selon deux variables moins sensibles à la géométrie du chenal et aux conditions glacielles : 1) le moment où survient la valeur maximale d'un événement de crue et 2) les différences relatives d'amplitude entre les fluctuations amont et aval. Ces deux variables permettent d'examiner et de discuter des 3 types d'événements hydrologiques présentés dans la figure 4.2.9.

Enfin, les données de la station météorologique de Mont-Joli (station n° 7055121), située à une quinzaine de km du site d'étude, ont été utilisées pour concorder les pics de niveaux d'eau avec les événements de précipitations liquides et les phases de réchauffement de la température durant l'hiver et le printemps.

4.3 ÉVALUATION HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE DES EFFETS DU DEMANTELEMENT SUR LA DYNAMIQUE FLUVIALE

4.3.1 Démantèlement expérimental de 3 embâcles

À la suite de l'inventaire et de la caractérisation des embâcles de l'automne 2012, les embâcles de bois mort n^{os} 12010, 8205 et 10930, respectivement de niveaux mineur, moyen et majeur, ont été sélectionnés pour le démantèlement dans le but d'étudier les impacts hydrogéomorphologiques de ce type d'intervention. Il est à noter que les 3 embâcles avaient aussi été relevés lors de l'inventaire sommaire de 2011. Les embâcles à démanteler ont été sélectionnés principalement selon leur accessibilité, leur représentativité en regard des autres embâcles du même niveau et selon le coût des opérations, c'est-à-dire la possibilité de réaliser les travaux sans dépasser le budget alloué. Une campagne de terrain avec les acteurs locaux impliqués dans le projet a permis de confirmer le choix des embâcles à retirer. Les 3 embâcles choisis avaient comme effet de concentrer l'écoulement vers les berges et d'accélérer l'érosion (Denis *et al.*, 2013). Les sites présentaient aussi des évidences d'accumulation sédimentaire principalement en amont des embâcles. Les sites n^{os} 8205 et 12010 étaient caractérisés par des fosses de surcreusement immédiatement en aval des embâcles, tandis que le site n° 10930 présentait des profondeurs importantes au niveau de l'embâcle et en amont de celui-ci. La figure 4.3.1 présente la position géographique des 3 embâcles démantelés. Il est à noter que tous les sites sont localisés dans les limites de la municipalité de St-Donat et inclus dans l'unité morphodynamique à méandres stables (B).

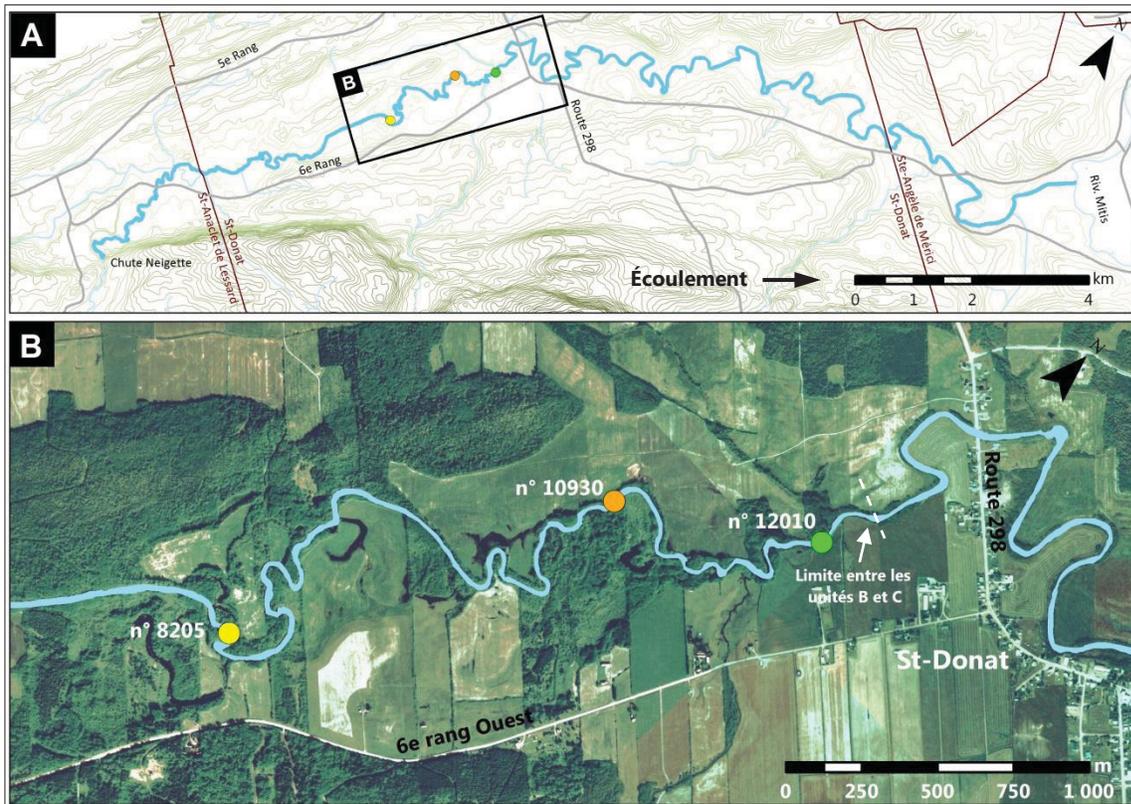


Figure 4.3.1. Localisation des 3 embâcles démantelés en septembre 2012

La procédure des travaux de démantèlement a été fortement inspirée du *Guide technique sur le démantèlement d'embâcles* de Therrien (1997). La première étape des opérations a consisté à ouvrir un chemin d'accès dans la bande riveraine à l'aide de scies mécaniques. La deuxième opération était de sectionner les billots composant l'embâcle afin de favoriser leur retrait (figure 4.3.2). Ensuite, un véhicule tout-terrain (VTT) équipé d'un treuil a été utilisé pour retirer le bois du chenal (figure 4.3.3). Un râteau a été utilisé pour ramasser les petits débris organiques afin d'empêcher leur redistribution vers l'aval. Le bois mort retiré du chenal a été disposé hors de la rive comme l'exige le MDDEFP (Therrien, 1997).



Figure 4.3.2. Sectionnement des bois morts avec une scie mécanique



Figure 4.3.3. Extraction des bois morts du chenal

L'embâcle mineur n° 12010 a été complètement retiré. Toutefois, le bois mort composant les embâcles moyen et majeur n° 8205 et 10930 n'a pas pu être entièrement extirpé du chenal. Certains bois morts étaient fortement ancrés au lit et leur retrait aurait nécessité de l'équipement supplémentaire et aurait nécessairement engendré des perturbations plus importantes. On estime que 90 % des bois morts de l'embâcle n° 8205 et que 70 % des bois morts de l'embâcle n° 10930 ont été retirés de la rivière. Les embâcles restants étaient tout de même significativement moins encombrants qu'avant les opérations et le retrait du bois mort a permis la redistribution de l'écoulement sur l'ensemble du profil transversal du chenal. D'un point de vue méthodologique, cela laisse croire qu'un volume suffisant de bois mort a été retiré pour qu'il soit possible d'évaluer des changements sur la morphologie du chenal. La figure 4.3.4 présente les 3 sites avant et après les opérations.



Figure 4.3.4. Vue aérienne des sites avant et après les opérations de démantèlement

4.3.2 Évaluation des impacts morphologiques des démantèlements

Avant les opérations de démantèlement à l'automne 2012, des relevés topographiques ont été réalisés pour les 3 sites sélectionnés (n^{os} 12010, 8205 et 10930) afin de documenter la réponse morphosédimentaire des tronçons. Tout d'abord, 4 couples de bornes ont été disposés de part et d'autre des embâcles sur chacune des berges pour orienter les profils topographiques. Les bornes au niveau des embâcles sont équidistantes et leur espacement a été déterminé à partir de la longueur de l'embâcle. Des bornes ont aussi été installées à tous les 5 m sur une distance de 25 m en amont et en aval des embâcles (figure 4.3.5). Les distances ont été calculées précisément avec un ruban à mesurer. Les relevés topographiques ont été réalisés avec une station totale de type *Leica TC-705* entre chaque transect. Des coordonnées ont été enregistrées à chaque changement dans la topographie du lit pour maximiser la résolution des relevés. À l'automne 2013, une seconde campagne de cueillette de données topographiques a été menée. Les mêmes bornes ont été réutilisées pour assurer la superposition des valeurs topographiques.

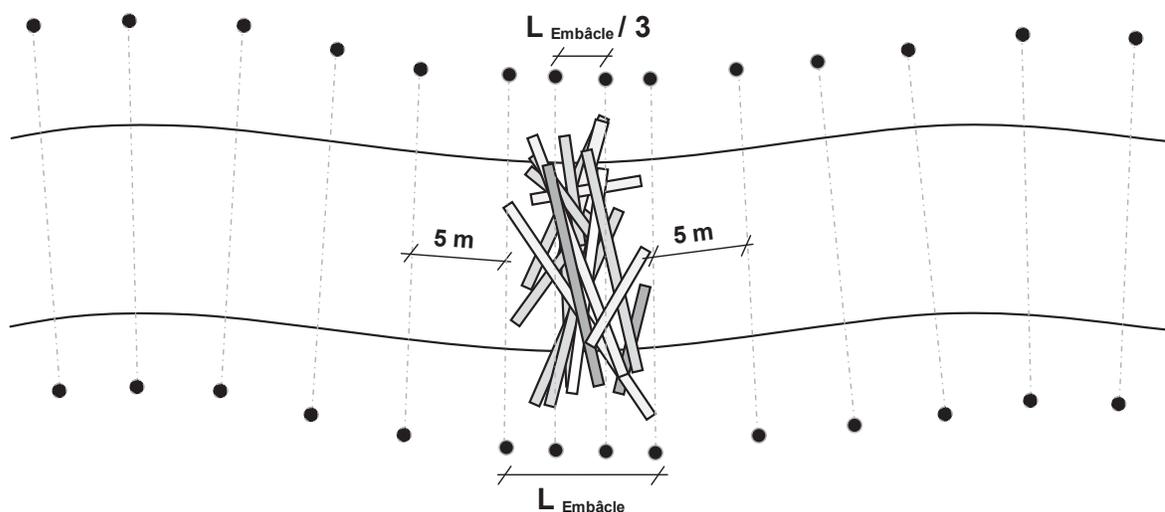


Figure 4.3.5. Disposition des bornes pour les relevés topographiques. La densité des transects est plus élevée au droit des embâcles.

Pour décrire et quantifier les changements dans la morphologie du lit, les données topographiques ont été traitées dans *ArcGIS*. Tout d'abord, les patrons de coordonnées topographiques de 2013 ont été superposés sur ceux de 2012 à l'aide des bornes positionnées sur chaque berge. Pour chaque site, une moyenne quadratique (RMS) maximale de 5 cm a été préconisée pour limiter l'erreur liée à la superposition des patrons topographiques. La différence d'altitude moyenne entre les coordonnées superposées de 2012 et de 2013 a été calculée pour réajuster les valeurs d'altitude du patron de 2013 sur celui de 2012. Des matrices de bathymétrie ont ensuite été extraites par krigeage, méthode stochastique d'interpolation spatiale, grâce à l'outil *Geostatistical Analyst* d'*ArcGIS*. Des essais ont été conduits avec d'autres méthodes, comme l>IDW et l'interpolation à partir d'un modèle numérique d'élévation, mais le krigeage ordinaire à modèle stable unidirectionnel a été préconisé, puisqu'il minimisait l'erreur d'interpolation, soit la différence entre les valeurs interpolées et les valeurs *in situ*. En géostatistique, l'écart-type de l'erreur de krigeage est un indicateur de la précision de l'interpolation permettant de quantifier la dispersion possible de la valeur réelle, mais inconnue, autour des coordonnées géographiques connues (Stein, 1999 ; De Smith *et al.*, 2007). Le tableau 4.3.1 présente les valeurs d'écart-type (en m) et médianes obtenues pour l'erreur de krigeage des matrices de 2012 et de 2013 pour chacun des sites. On constate que les valeurs d'écart-type sont plus importantes pour les matrices d'interpolation des sites n^{os} 8025 et 10930 de 2013. Cela peut possiblement s'expliquer par la confusion lors de l'identification des bornes des transects en 2013. En effet, certains transects ont été réalisés entre deux bornes n'appartenant pas à la même section transversale, par exemple entre la borne 1 sur la rive gauche et la borne 2 sur la rive droite. Ces erreurs dans la prise des données ont pu engendrer une plus grande dispersion spatiale entre les points topographies enregistrés et ainsi accroître l'écart-type de l'erreur de krigeage.

Tableau 4.3.1. Valeurs médianes et d'écart-type de l'erreur de krigeage des matrices d'interpolation

	2012		2013	
	Écart-type (m)	Médiane (m)	Écart-type (m)	Médiane (m)
Site n° 8205 (moyen)	0,0626	-0,0058	0,1127	-0,0058
Site n° 10930 (majeur)	0,0187	0,0001	0,1241	-0,0167
Site n° 12010 (mineur)	0,0221	-0,0090	0,0274	-0,0015

Enfin, la matrice bathymétrique de 2013 a été soustraite à celle de 2012 pour créer une matrice de différence des valeurs d'altitude. Ainsi, les valeurs négatives représentent des superficies érodées tandis que les valeurs positives représentent de l'accumulation sédimentaire. La figure 4.3.6 illustre les principales étapes de réalisation de la matrice des variations du niveau du lit entre 2012 et 2013.

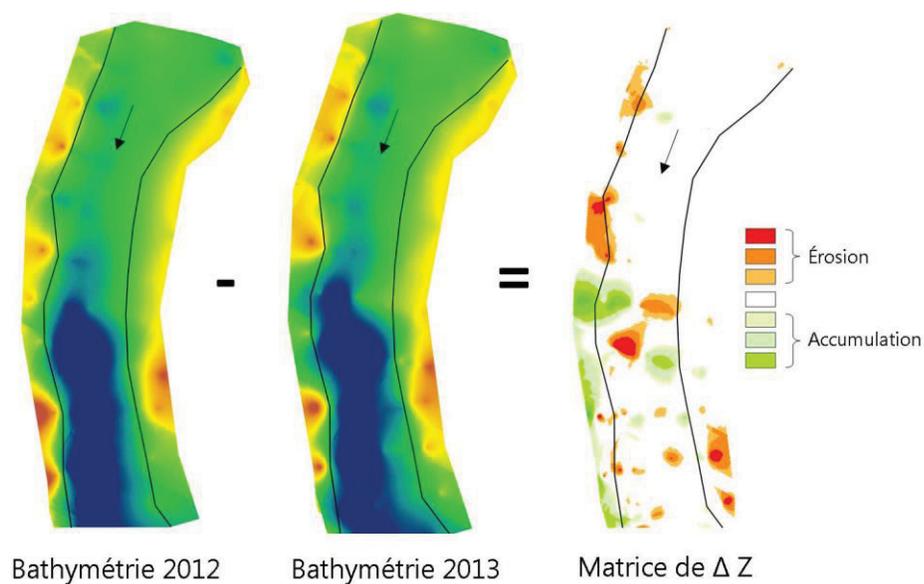


Figure 4.3.6. Étapes de réalisation de la matrice des variations morphologiques du lit au site de l'embâcle n° 12010 entre 2012 et 2013

Finalemment, le volume de sédiments accumulés ou érodés dans certaines zones critiques a pu être quantifié avec *ArcGIS*. Tout d'abord, la fonction *Extract by mask* de l'extension *Spatial Analyst* a été utilisée pour circonscrire la matrice des variations du niveau du lit de la zone désirée. Puis, le volume de la zone a été calculé grâce à l'outil *Surface volume* de l'extension *3D Analyst*.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS

Tout d'abord, la caractérisation hydrogéomorphologique de la rivière Neigette, basée sur l'analyse de la migration latérale (érodabilité), sur l'évolution longitudinale et temporelle de la largeur du chenal et sur le profil en long, est présentée. Ensuite, les résultats concernant les inventaires des embâcles de bois mort réalisés en 2012 et en 2013 sont présentés, puis comparés. Enfin, les résultats concernant le suivi morphologique des tronçons où le bois mort a été extrait du chenal sont décrits.

5.1 CARACTERISATION HYDROGEOMORPHOLOGIQUE

5.1.1 Analyse de l'érodabilité et de la migration latérale

L'analyse des tracés fluviaux historiques entre 1963 et 2004 révèle des taux importants de migration latérale pour les deux unités morphodynamiques en amont du tronçon à l'étude. Tout d'abord, l'unité divagante à chenaux multiples (A) présente un taux moyen de migration latérale de 0,49 m par année entre 1963 et 2004. Pour cette même période, le recul des berges a engendré l'érosion d'une superficie de 65 750 m². Le tableau 5.1.1 présente les taux de migration latérale calculés pour l'unité A. Entre 1980 et 2001, on constate que le taux de migration latérale est largement inférieur à celui des intervalles 1963-1980 et 2001-2004. Par ailleurs, le tracé fluvial a subi deux avulsions majeures, soit une entre 1980 et 2001 et l'autre entre 1963 et 1980. Ces avulsions ont entraîné l'érosion d'une superficie de 7 425 m². La figure 5.1.1 illustre l'évolution du tracé du chenal principal dans le segment divagant à chenaux multiples.

Tableau 5.1.1. Taux de migration latérale et superficies érodées entre 1963 et 2004 pour l'unité A

Période	Taux de recul moyen annuel (m/a)	Superficies érodées par migration latérale (m ²)	Superficies érodées par avulsion (m ²)
1963-1980	0,73	40 435	2 650
1980-2001	0,26	17 547	4 775
2001-2004	0,80	7 768	0
1693-2004	0,49	65 750	7 425

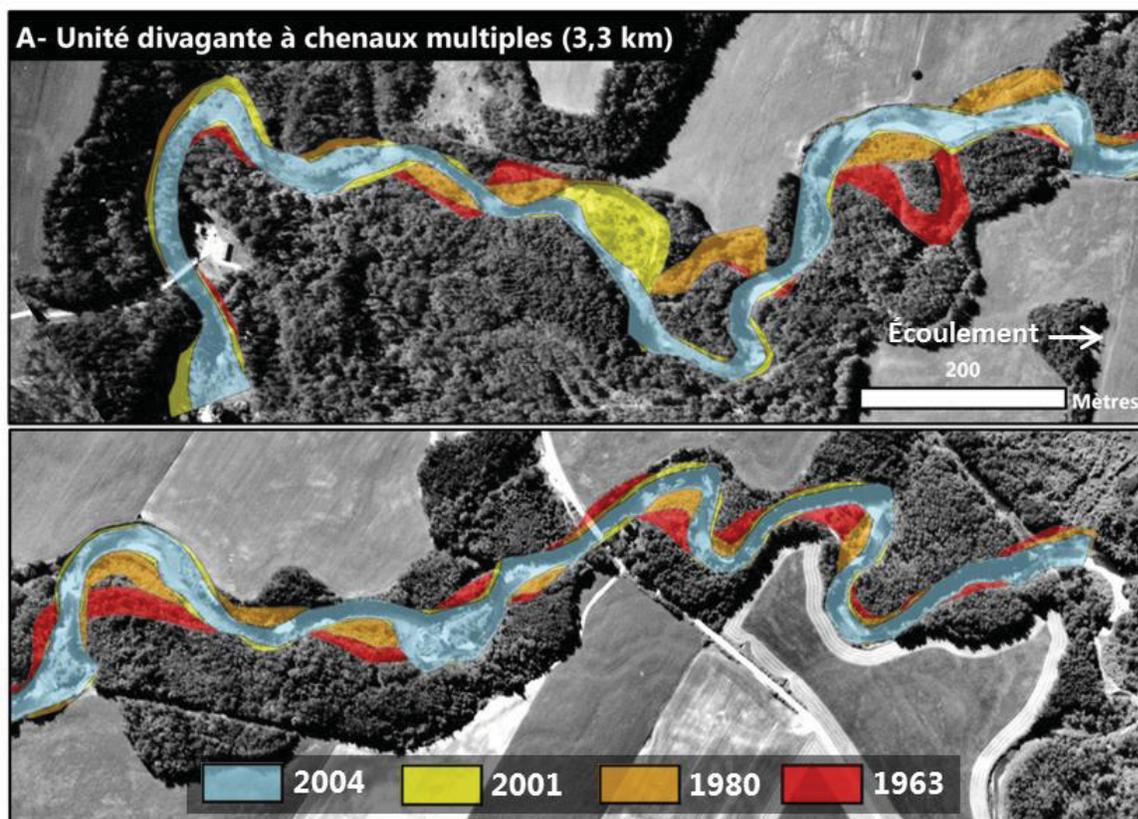


Figure 5.1.1. Superposition des tracés historiques de l'unité A

Au cours des campagnes de terrains de 2012 et de 2013, l'érosion active des berges de l'unité A, principalement les zones concaves des méandres, a été constatée (figure 5.1.2). De plus, les témoignages de propriétaires des terrains en bordure du segment divagant à chenaux multiples recueillis dans le cadre du projet de gestion intégrée de la rivière Neigette mettent aussi en évidence la dynamique morphosédimentaire de ce tronçon (Denis *et al.*, 2013). En effet, M. Roger Ruest et M. Normand Rodrigue ont affirmé observer presque annuellement des modifications de la trajectoire du cours d'eau. Cela laisse croire qu'une meilleure couverture temporelle (intervalles plus rapprochés) et des photographies aériennes plus récentes auraient probablement permis de noter un plus grand nombre d'ajustements morphologiques.



Figure 5.1.2. Érosion sévère d'une berge concave de l'unité A, octobre 2013

Concernant l'unité à méandres dynamiques (B), un taux de migration latérale moyen de 0,26 m a été calculé entre 1963 et 2004. Au total, le recul des berges a provoqué l'érosion d'une superficie de 95 552 m². Le tableau 5.1.2 présente les taux de migration latérale générés pour l'unité B. Entre 2001 et 2004, un taux d'érosion largement supérieur à

celui des périodes précédentes, 0,85 m par année, a été calculé. Tout comme l'unité A, les taux calculés pour ce tronçon entre 2001 et 2004 sont davantage soumis à une incertitude liée à la marge d'erreur du géoréférencement et du tracé manuel des limites du chenal actif. En effet, cette marge d'erreur est absorbée sur une période plus longue pour les intervalles 1963-1980, 1980-2001 et 1963-2004. En outre, le tracé du chenal principal a été détourné à 5 reprises : 4 avulsions entre 1963 et 1980 et une entre 1980 et 2001. À l'extrémité amont du tronçon B, on constate un détournement majeur du chenal principal entre 1980 et 2001. L'avulsion a provoqué le détournement du tracé principal de la rivière Neigette dans un chenal secondaire. À quelques centaines de mètres en aval, le recoupement d'un méandre a eu lieu entre 1963 et 1980. L'ensemble des avulsions a entraîné l'érosion d'une superficie de 16 359 m² dans l'unité B. Les ajustements morphologiques et les taux de recul les plus importants sont principalement concentrés dans les 3 premiers km de l'unité B, ce qui correspond à la transition hydrogéomorphologique avec l'unité A. La figure 5.1.2 représente les 3 200 premiers mètres de l'unité à méandres dynamiques et illustre la migration latérale du tracé du chenal principal et les principales avulsions.

Tableau 5.1.2. Taux de migration latérale et superficies érodées entre 1963 et 2004 pour l'unité B

Période	Taux de recul moyen annuel (m/a)	Superficies érodées par migration latérale (m²)	Superficies érodées par avulsion (m²)
1963-1980	0,21	32 288	6 677
1980-2001	0,22	40 687	9 682
2001-2004	0,85	22 547	0
1963-2004	0,26	95 522	16 359

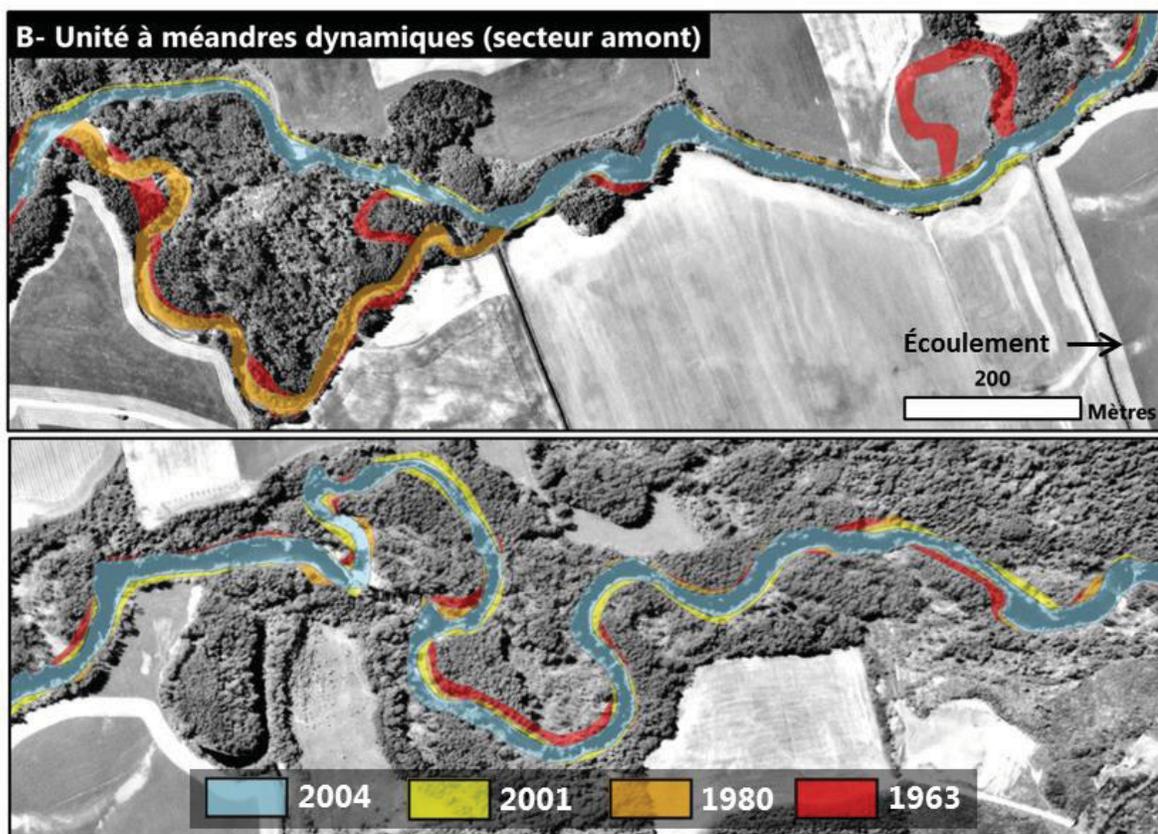


Figure 5.1.3. Superposition des tracés historiques dans les 3,2 premiers km de l'unité B

Pour l'unité à méandres stables (C), s'étendant sur 20 km jusqu'à la confluence, la superposition des tracés fluviaux historiques met en évidence le caractère statique du tronçon. Aucun ajustement morphologique majeur n'a été observé entre 1963 et 2004. Les taux d'érosion calculés sont trop faibles pour être considérés et sont probablement inférieurs à la marge d'erreur induite par le géoréférencement des photographies aériennes et la numérisation des tracés fluviaux.

5.1.2 Évolution spatiale et temporelle de la largeur du chenal

L'analyse dans un système d'information géographique de l'évolution de la largeur du chenal active réalisée à partir de l'imagerie aérienne de 2004, soit la plus récente disponible, révèle des tendances bien particulières pour chacune des 3 unités morphodynamiques qui caractérise l'hydrogéomorphologie de la rivière Neigette, comme le montre la figure 5.1.4. Tout d'abord, l'unité divagante à chenaux multiples (A) est celle qui présente la largeur la plus variable avec des valeurs oscillant entre 14,4 m et 43,3 m. L'écart-type de la série de données est de 6,8 tandis que l'écart interquartile est de 9,0. La largeur moyenne de l'unité A est de 23,2 m et s'avère la plus élevée des 3 unités. Bien que la régression linéaire de l'unité A montre une réduction de la largeur vers l'aval, le faible coefficient de détermination de 0,01 invalide cette tendance. L'absence d'une relation longitudinale significative des largeurs illustre toutefois la grande variabilité morphologique caractérisant l'unité divagante à chenaux multiples.

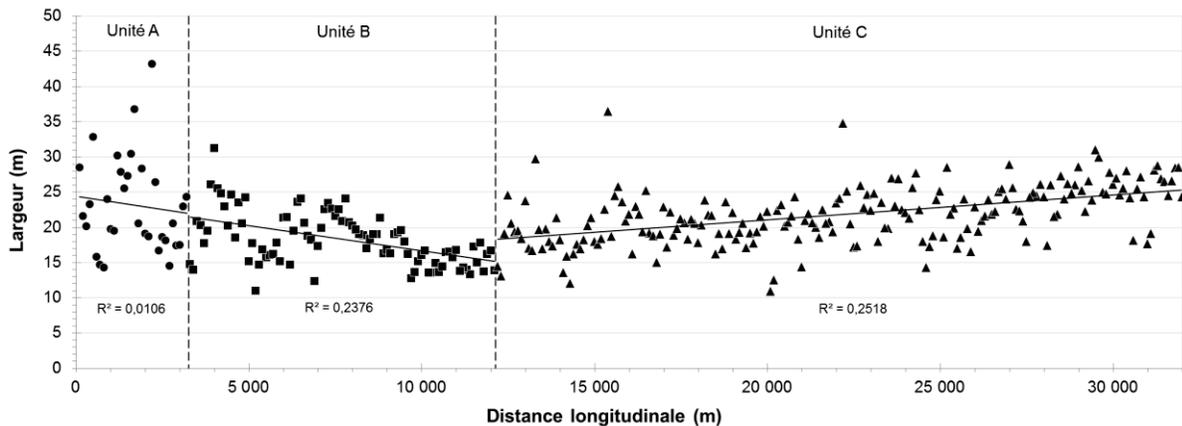


Figure 5.1.4. Évolution de la largeur active au niveau plein-bord de l'amont vers l'aval

Pour l'unité à méandres dynamiques (B), on constate que les valeurs de largeur et leur variabilité diminuent graduellement vers l'aval. Les largeurs fluctuent entre 11,0 m et 31,3 m et la moyenne est de 18,3 m. L'unité B présente la valeur de largeur moyenne la plus basse de l'ensemble des unités morphodynamiques. Avec un écart-type de 3,8 et un écart interquartile de 5,5, on constate que les données de l'unité B sont davantage centrées sur la moyenne que celles de l'unité A. La régression linéaire montre une diminution progressive des valeurs de largeur de l'amont vers l'aval avec un coefficient de détermination de 0,24.

L'unité à méandres stables (C) montre une augmentation progressive de la largeur active de l'amont vers l'aval avec un coefficient de détermination de 0,25. Les valeurs de largeur varient entre 11,0 m et 36,5 m et la moyenne est de 21,8 m. L'écart-type est de 4,1 et l'écart interquartile est de 5,7.

Par ailleurs, l'exercice ayant mené à l'acquisition des valeurs de largeur de 2004 a été répété avec les photographies aériennes de 1963, 1980 et 2001. Les résultats sont similaires à ceux obtenus pour l'année 2004 et ne permettent pas de visualiser des changements morphologiques majeurs dans le temps (tableau 5.1.3). Toutefois, ils confirment les tendances générales observées pour le tracé de 2004 (figure 5.1.5). On constate notamment que pour les 4 séquences temporelles, l'écart-type des valeurs de largeur de l'unité A est supérieur à celui des 2 autres unités. Cela souligne la grande variabilité de la largeur active du chenal de cette unité. De plus, la largeur moyenne de l'unité A est la plus élevée des 3 unités pour les 4 intervalles de temps et l'unité B est celle dont la largeur moyenne est la plus faible. L'unité B est aussi celle dont la largeur moyenne fluctue le moins dans le temps. L'étendue des valeurs de largeur moyenne de cette unité est de 2,2 m, tandis qu'elle est respectivement de 5,25 m et de 3,78 m pour les unités A et C.

Tableau 5.1.3. Comparaison des valeurs de largeur moyenne et d'écart-type par unité morphodynamique pour les séries de 2004, 2001, 1980 et 1963

Unité	2004		2001		1980		1963	
	Largeur moyenne (m)	Écart-type (m)						
A	22,99	6,76	25,61	8,56	28,24	9,04	24,76	5,06
B	18,33	3,75	19,93	3,03	17,71	3,94	18,33	3,75
C	21,80	4,06	24,95	3,76	21,17	4,37	22,94	3,72
Total	20,95	4,76	23,61	4,90	20,89	5,76	21,82	4,50

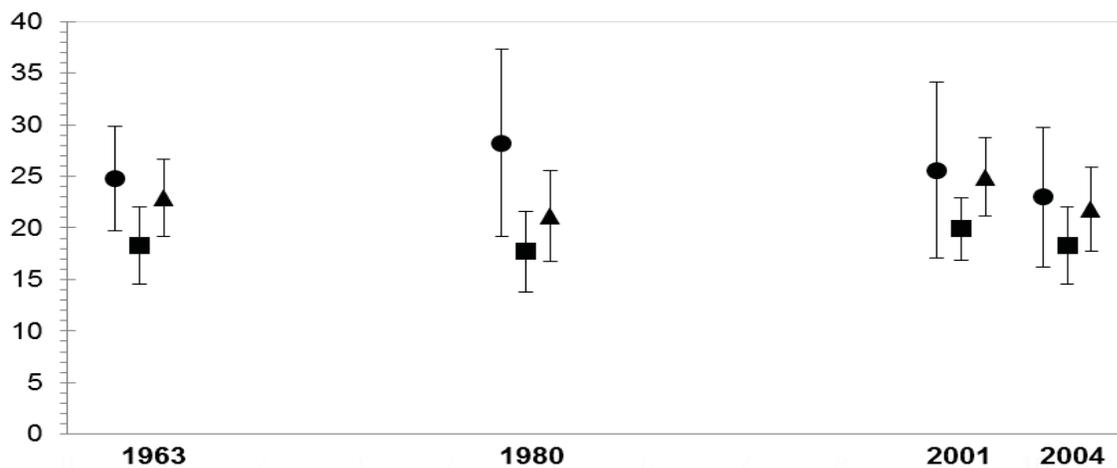


Figure 5.1.5. Diagramme à barres d'écart-type de la largeur du chenal

5.1.3 Profil topographique longitudinal

Le profil en long à la surface de l'eau généré à l'aide de relevés D-GPS et de l'extraction des valeurs d'altitude de l'imagerie LiDAR permet d'observer les variations des valeurs de pente pour les 3 unités morphodynamiques (figure 5.1.6). Tout d'abord,

l'unité divagante à chenaux multiples (A) présente la valeur moyenne de pente la plus marquée, soit 0,0043 m/m. Ensuite, le coefficient de pente diminue significativement vers l'aval avec une valeur de pente moyenne de 0,0006 m/m pour l'unité à méandres dynamiques (B). Finalement, l'unité à méandres stables (C) présente la plus faible valeur de pente, soit 0,0002. Sur la figure 5.1.6, il est intéressant de constater 3 ruptures de pente localisées à la confluence de petits affluents agricoles.

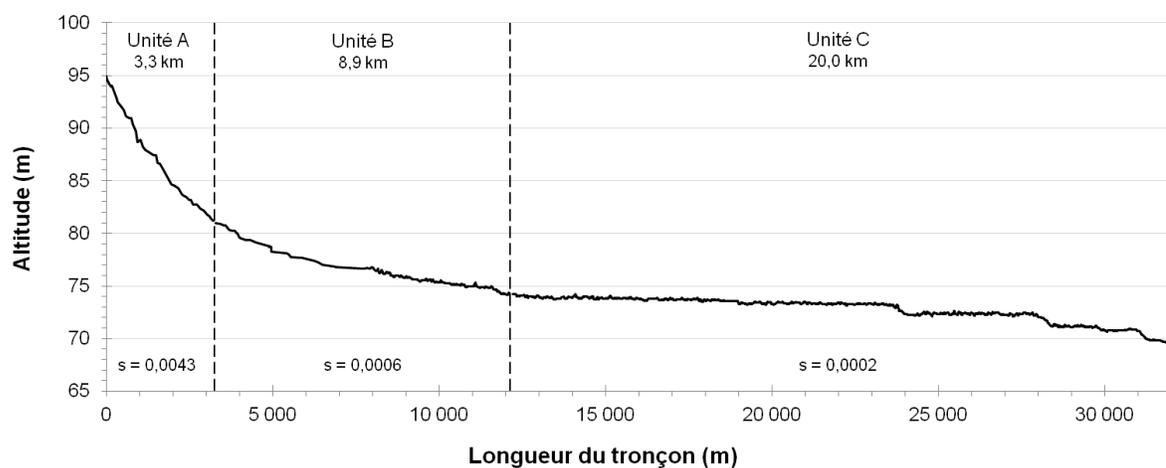


Figure 5.1.6. Profil topographique longitudinal à la surface de l'eau.

5.2 CARACTERISTIQUES ET DYNAMIQUES DES EMBACLES DE BOIS MORT

Les résultats des inventaires des embâcles de bois mort de 2012 et de 2013 sont présentés l'un à la suite de l'autre et ensuite comparés pour 3 principales raisons. Premièrement, les deux campagnes de terrain ne couvrent pas les mêmes distances. En effet, l'inventaire de 2012 a été réalisé sur une distance de 26,1 km à partir du pont couvert de St-Anaclet-de-Lessard jusqu'au pont du 6e rang Est dans la municipalité de Ste-Angèle-de-Mérici, tandis que l'inventaire de 2013 a couvert la totalité des 32,1 km du tronçon à l'étude, soit de la chute Neigette jusqu'à la confluence avec la rivière Mitis. Deuxièmement, l'inventaire de 2012 a été réalisé principalement pour relever la position des embâcles, les catégoriser selon leur niveau d'intensité et identifier 3 sites potentiels pour le démantèlement expérimental. Ainsi, l'inventaire de 2013 est beaucoup plus exhaustif que celui de 2012. En 2013, la morphométrie, la composition, la configuration et le contexte géomorphologique de chaque embâcle ont été rigoureusement relevés. Dans le chapitre suivant, la distribution spatiale du bois mort et les interrelations existant entre la dynamique fluviale et les embâcles de bois mort seront analysées à partir des données de l'inventaire de 2013. Troisièmement, les deux inventaires sont décrits séparément pour bien détailler la distribution spatiale des embâcles de chacune des années.

5.2.1 Inventaires des embâcles de bois mort

5.1.1.1 Inventaire de septembre 2012

Sur les 26,1 km de rivière inventoriés en 2012, 72 embâcles ont été compilés dont 43 mineurs, 17 moyens, 9 majeurs et 3 de niveau extrême. De ce nombre, 15 embâcles de bois mort sont localisés sur le territoire de St-Anaclet-de-Lessard et 57 du côté de St-Donat. La figure 5.2.1 et le tableau 5.2.1 illustrent la distribution spatiale des embâcles de bois mort de 2012 selon la segmentation morphodynamique de Demers et Buffin-Bélanger (2011).

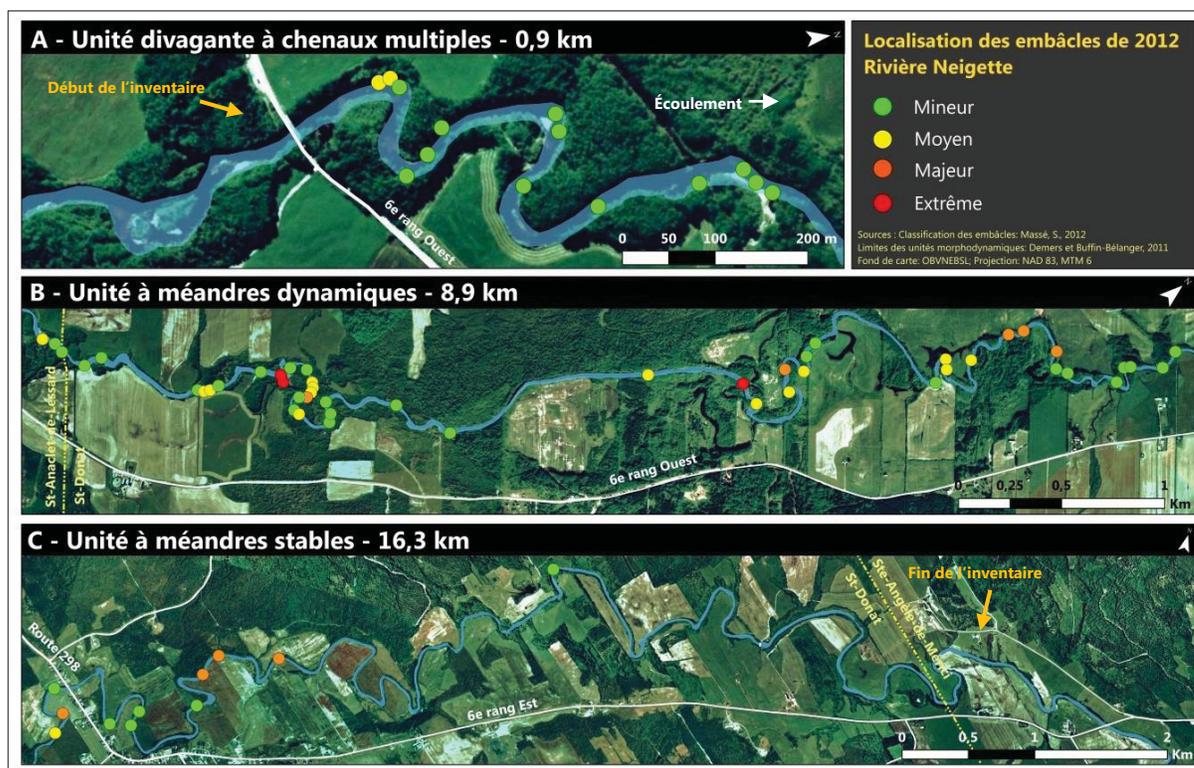


Figure 5.2.1. Carte de localisation des embâcles de bois morts répertoriés en septembre 2012

Tableau 5.2.1. Répartition des embâcles de bois morts caractérisés en 2012 selon la segmentation hydrogéomorphologique

Unité morphosédimentaire	EBM par niveaux				EBM par unité	EBM par km
	Mineur	Moyen	Majeur	Extrême		
A- Divagante à chenaux multiples (0,9 km)	12 (86 %)	2 (14 %)	0	0	14	15,6
B- Méandres dynamiques (8,9 km)	26 (54 %)	14 (29 %)	5 (11 %)	3 (6 %)	48	5,4
C- Méandres stables (16,3 km)	5 (50 %)	1 (10 %)	4 (40 %)	0	10	0,6
Total d'EBM (26,1 km)	43	17	9	3	72	4,4

En 2012, la portion de 0,9 km de l'unité divagante à chenaux multiples (A) située en aval du pont couvert comprenait 14 embâcles, ce qui correspondait à une concentration de 15,6 par km, soit la plus importante des 3 unités. Bien que le segment ne corresponde qu'à 3,4 % de l'ensemble du corridor caractérisé, il comprenait 19 % des embâcles caractérisés en 2012. Dans l'ensemble, 86 % des embâcles de l'unité A ont été caractérisés comme étant de niveau mineur, 14 % de niveau moyen alors qu'aucun embâcle majeur ou extrême n'a été caractérisé dans ce tronçon. Tous les embâcles de l'unité A étaient disposés latéralement contre l'une des berges et ils occupaient tous moins de 25 % de la largeur du lit mineur.

Pour l'unité B à méandres dynamiques, 48 embâcles ont été caractérisés sur 8,9 km. La concentration d'embâcles est de 5,4 par kilomètre. Ainsi, ce segment comprenait en 2012 67 % de tous les embâcles alors que sa longueur représente 34 % du tronçon inventorié en 2012. La grande majorité des embâcles caractérisés sont de niveaux mineur et moyen. C'est dans l'unité B qu'on retrouve tout de même le plus grand nombre d'embâcles majeurs (5) du tronçon à l'étude. Les 3 embâcles extrêmes caractérisés en 2012 (n^{os} 4925, 4960 et 8095) et représentés par la figure 5.2.2 sont aussi inclus dans cette unité morphodynamique. Sur les 48 embâcles, 3 étaient composés de quelques troncs disposés de manière perpendiculaire à l'écoulement, 22 étaient disposés contre une berge (taux d'obstruction inférieur à 25 %), 9 occupaient partiellement le chenal (taux d'obstruction entre 30 et 90 %) et 14 embâcles totaux obstruaient 100 % de la largeur du chenal.

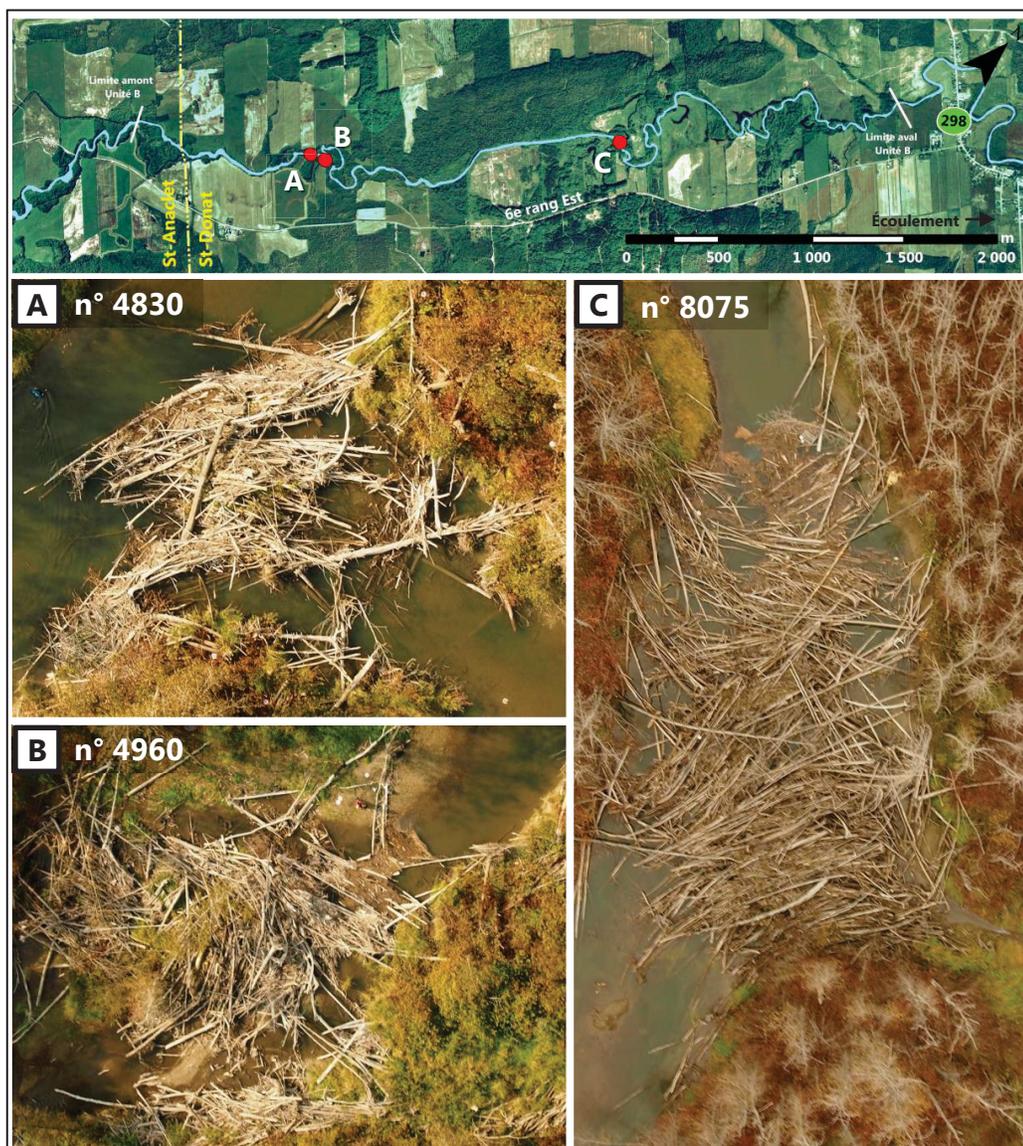


Figure 5.2.2. Représentation et localisation des embâcles extrêmes

En aval, l'unité C à méandres stables est caractérisée par la présence de 10 embâcles de bois mort sur 16,3 km, ce qui équivaut à 0,6 embâcle par km. L'unité C, dont la longueur parcourue en 2012 équivalait à 62 % de la longueur totale du corridor à l'étude, comprenait seulement 14 % du nombre total d'embâcles. Il est intéressant de constater que la proportion d'embâcles majeurs (40 %) est significativement supérieure à celle des unités

A et B en amont. Les résultats du test khi-deux soulignent que les proportions des niveaux d'embâcles varient de manière significative d'une unité morphodynamique à l'autre (khi-deux = 11,39 ; p-value = 0,02). Pour la proportion d'embâcles majeurs dans l'unité C, la valeur individuellement du khi-deux (5,57) équivaut à 49 % du khi-deux total observé. Le test a été réalisé en considérant seulement les niveaux mineur, moyen et majeur et malgré le fait que l'échantillon ne respectait pas la condition d'utilisation voulant que 85 % des données soient égales ou supérieures à 5 (dans ce cas-ci, 67 % des données étaient égales ou supérieures à 5). Toujours dans l'unité C, on dénote un seul embâcle latéral occupant 25 % du périmètre mouillé, 5 embâcles partiels (taux d'obstruction entre 30 et 90 %) et 4 embâcles totaux dont 3 n'étaient pas ancrés au lit et flottaient à la surface de l'eau. Il est intéressant de constater que tous les embâcles de l'unité C occupaient au moins 25 % du lit mineur.

Pour l'ensemble du tronçon à l'étude, les embâcles mineurs et moyens représentent 84 % de tous les embâcles caractérisés en 2012. Par ailleurs, plus de la moitié (51 %) des embâcles caractérisés en 2012 étaient disposés parallèlement à l'une des berges, tandis que 4 % étaient constitués de troncs tombés de manière transversale à l'écoulement, que 21 % obstruaient partiellement le chenal et que 24 % occupaient toute la largeur.

5.1.1.2 Inventaire de juillet 2013

Sur les 32,1 km du tronçon, 105 embâcles ont été répertoriés en juillet 2013 dont 73 mineurs, 17 moyens, 12 majeurs et 3 de niveau extrême. De ce nombre, 33 embâcles sont situés dans les limites municipales de St-Anaclet-de-Lessard et 70 à St-Donat et 2 à St-Angèle-de-Mérici. Le tableau 5.2.2 regroupe les résultats de l'inventaire des embâcles de 2013 selon leur niveau d'intensité et les unités morphodynamiques de Demers et Buffin-Bélanger (2011). Les deux premières unités fluviales qui s'étendent sur 12,1 km regroupent 83 % de tous les embâcles présents sur les 32,1 km du tronçon à l'étude. La figure 5.2.3 montre la localisation de l'ensemble des embâcles de bois mort caractérisés en 2013.

Tableau 5.2.2. Répartition des embâcles de bois mort caractérisés en 2013 selon la segmentation hydrogéomorphologique

Unité morphosédimentaire	EBM par niveaux				EBM par unité	EBM par km
	Mineur	Moyen	Majeur	Extrême		
A- Divagante à chenaux multiples (3,3 km)	25 (81 %)	4 (13 %)	2 (6 %)	0	31	9,4
B- Méandres dynamiques (8,9 km)	39 (71 %)	7 (13 %)	6 (11 %)	3 (5 %)	55	6,2
C- Méandres stables (20,0)	9 (47 %)	6 (32 %)	4 (21 %)	0	19	1,0
Total d'EBM (32,1 km)	73	17	12	3	105	4,4

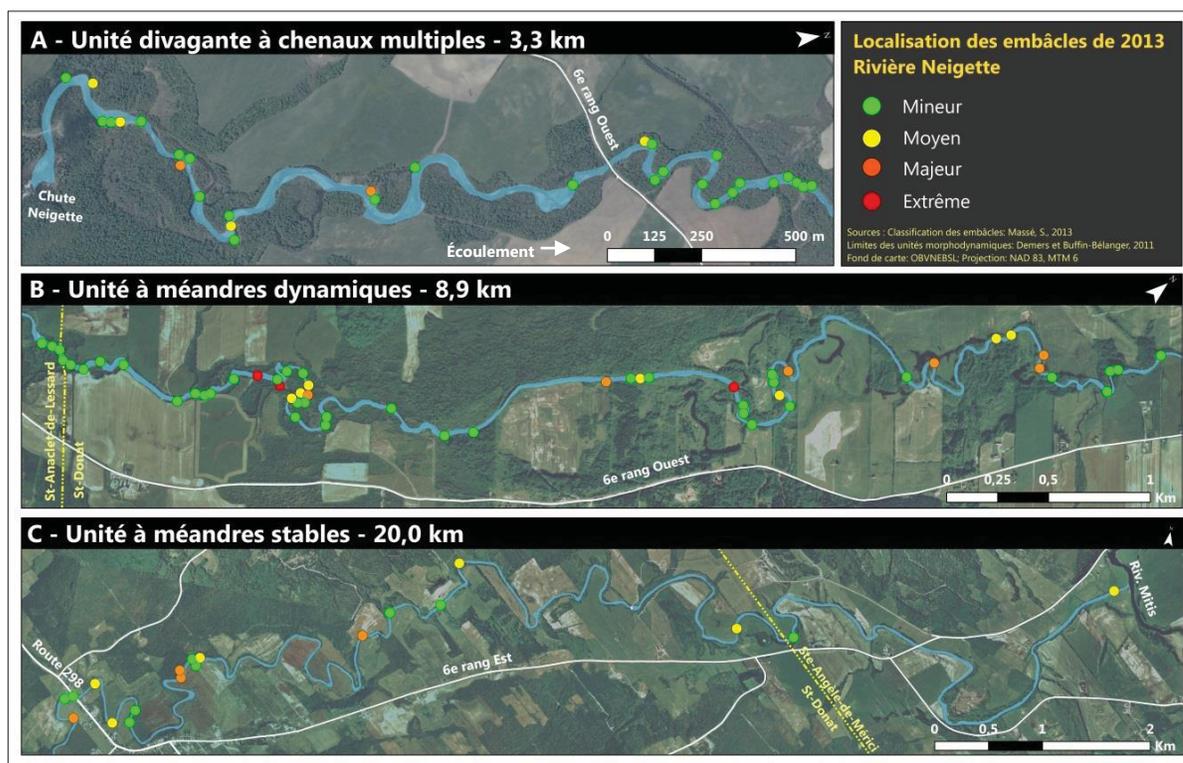


Figure 5.2.3. Carte de localisation des embâcles de bois mort répertoriés en juillet 2013

En 2013, l'unité divagante à chenaux multiples (A) en amont du tronçon à l'étude comprenait 31 embâcles de bois mort sur 3,3 km, soit 9,4 par km, ce qui correspond à la concentration d'embâcles la plus élevée des 3 unités morphodynamiques. La longueur de l'unité A correspond à 10 % de la longueur totale du segment à l'étude. Mais, elle comprend 30 % des embâcles caractérisés en 2013. Bien que les embâcles soient nombreux, ils sont généralement peu volumineux puisque seulement 2 embâcles majeurs et 4 embâcles moyens ont été caractérisés dans ce tronçon. Ainsi, 81 % des embâcles étaient de niveau mineur. Un seul embâcle occupait le chenal dans toute sa largeur, tandis que 9 embâcles obstruaient partiellement le chenal dans des proportions variant de 30 à 70 % de la section transversale. 20 embâcles étaient disposés latéralement contre l'une ou l'autre des berges et 5 embâcles se sont formés sur des bancs d'accumulation centraux ou latéraux. En tout, 10 embâcles ont été relevés à la base de la rive concave d'un méandre.

Pour l'unité B à méandres dynamiques, 55 embâcles de bois mort ont été caractérisés sur 8,9 km, ce qui représente une concentration de 6,2 embâcles par km. L'unité B comprend 52 % de tous les embâcles de bois mort recensés, alors qu'elle ne représente que 28 % de la longueur totale du tronçon à l'étude. Les 3 embâcles de niveau extrême sont compris dans cette unité fluviale. En outre, on dénote 39 embâcles mineurs, ce qui correspond à 71 % de tous les embâcles de l'unité morphodynamique, 7 moyens et 6 majeurs. En ce qui concerne leur configuration, 32 étaient accumulés contre une berge (taux d'obstruction inférieur à 25 %), 4 étaient constitués de quelques troncs disposés de manière perpendiculaire à l'écoulement et 8 obstruaient partiellement le chenal (taux d'obstruction entre 30 et 90 %). De plus, 11 embâcles occupaient la totalité de la section transversale dont 2 ne semblaient pas ancrés aux berges ou au lit et flottaient à la surface de l'eau.

En aval, l'unité à méandres stables (C) regroupe 19 embâcles de bois mort sur une distance de 20,0 km ce qui équivaut à 1,0 embâcle par km. Bien que la longueur de l'unité C corresponde à 62 % de la longueur totale du segment à l'étude, elle ne comprend que 18 % de tous les embâcles caractérisés en 2013. Dans cette unité, la proportion des

embâcles mineurs diminue au profit des embâcles moyens et majeurs. En outre, on signale 7 embâcles latéraux occupant tout au plus 25 % du périmètre mouillé, 6 embâcles partiels (taux d'obstruction entre 30 et 90 %) et 6 embâcles totaux dont 3 semblaient flotter à la surface de l'eau.

Contrairement aux résultats de l'inventaire de 2012, le test khi-deux souligne que les proportions des niveaux d'embâcles de 2013 sont similaires d'une unité morphodynamique à l'autre (khi-deux = 7,26 ; p-value = 0,12). Le test a été réalisé en considérant seulement les niveaux mineur, moyen et majeur et malgré le fait que l'échantillon ne respectait pas la condition d'utilisation voulant que 85 % des données soient égales ou supérieures à 5 (dans ce cas-ci, 67 % des données étaient égales ou supérieures à 5).

Pour l'ensemble du tronçon à l'étude de la rivière Neigette, les embâcles mineurs et moyens représentent 86 % des embâcles de bois mort répertoriés lors de la campagne de terrain de l'été 2013. Par ailleurs, la majorité des embâcles de 2013 (57 %) étaient disposés parallèlement à l'une des berges, alors que 3 % étaient des troncs transversaux, 22 % obstruaient partiellement le chenal et 18 % occupaient toute la largeur de la rivière.

Au cours de l'inventaire de 2013, la composition de chaque embâcle a été relevée en évaluant les proportions de troncs, de branches et de souches. Le tableau 5.2.3 présente les résultats pour chaque unité morphodynamique. On remarque d'abord qu'en moyenne, un embâcle est constitué à 59,7 % de troncs, à 34,0 % de branches et à 6,4 % de réseaux racinaires. L'analyse des résultats pour chaque unité fluviale ne permet pas de déceler des tendances distinctivement significatives dans la composition des embâcles. Les écarts-types des distributions sont très élevés, particulièrement pour les proportions de troncs et de branches.

Tableau 5.2.3. Composition des embâcles de bois mort de 2013. La valeur entre parenthèses correspond à l'écart-type.

Unité morphodynamique	Troncs (%)	Branches (%)	Racines (%)
A- Divagante à chenaux multiples (n=31)	57 (29,9)	37 (30,9)	7 (9,3)
B- Méandres dynamiques (n=56)	62 (26,1)	31 (25,0)	7 (11,4)
C- Méandres stables (n=18)	58 (17,8)	38 (20,1)	4 (7,6)
Total (n=105)	60 (25,9)	34 (26,1)	6 (10,2)

Par ailleurs, la provenance du bois mort composant les embâcles varie de manière significative selon les unités morphodynamiques ($\chi^2 = 9,08$; $p\text{-value} = 0,05$). Les données relatives à l'évaluation de la provenance du bois mort sont présentées dans le tableau 5.2.4. On constate d'abord que pour l'ensemble du tronçon à l'étude, 43 % des embâcles sont composés de débris dont la source est proximale. Ce taux diminue significativement pour l'unité C, puisque seulement 32 % des embâcles sont composés de bois mort de source proximale. En ce qui concerne les embâcles composés principalement de bois mort en provenance de l'amont, on voit que leur proportion augmente selon la succession longitudinale des unités morphodynamiques. En effet, 13 % des embâcles de l'unité A sont formés de bois mort en provenance de l'amont, alors que c'est le cas pour 25 % des embâcles de l'unité B et pour 47 % des embâcles de l'unité C. L'importante proportion d'embâcles de l'unité C étant composés principalement de débris en provenance de l'amont est responsable de 38 % du χ^2 total calculé pour l'échantillon (valeur de $\chi^2 = 3,46$). Enfin, 45 % des embâcles de l'unité A sont formés de bois provenant à la fois de l'amont et de source proximale. Pour les unités B et C, les proportions d'embâcles dont le bois mort provient de sources amont et proximale diminuent et sont respectivement de 27 % et de 21 %

Tableau 5.2.4. Nombre d'embâcles par unité fluviale selon la provenance du bois mort

Unité morphodynamique	Proximale	Amont	Proximale et amont
A- Divagante à chenaux multiples (n=31)	13 (42 %)	4 (13 %)	14 (45 %)
B- Méandres dynamiques (n=55)	26 (47 %)	14 (25 %)	15 (27 %)
C- Méandres stables (n=19)	6 (32 %)	9 (47 %)	4 (21 %)
Total (n=105)	45 (43 %)	27 (26 %)	33 (31 %)

Le tableau 5.2.5 montre la répartition du nombre d'embâcles par niveau d'intensité et la source des bois morts qui les composent. On constate d'abord que la proportion d'embâcles formés par des débris de source proximale diminue quand leur niveau d'intensité augmente. En effet, 58 % des embâcles mineurs sont formés par des bois morts de source proximale, alors que ce n'est le cas que pour 18 % des embâcles moyens. Aucun embâcle majeur et extrême n'est composé de bois mort de source proximale. Une tendance inverse est perceptible pour les bois morts en provenance de l'amont, dont la proportion augmente selon le niveau d'intensité. Les embâcles extrêmes sont composés à 100 % de bois morts provenant de l'amont et transportés par l'écoulement. Ce constat est tout à fait logique puisque les transferts proximaux à l'embâcle, par l'érosion des berges et la chute de débris dans le cours d'eau, ne peuvent expliquer à eux seuls l'important volume de bois mort entassé dans les embâcles extrêmes. Le bois mort en provenance de l'amont compose 67 % des embâcles majeurs, 23 % des embâcles moyens et seulement 16 % des embâcles mineurs. Enfin, les embâcles moyens sont majoritairement composés de bois provenant à la fois de source proximale et de l'amont dans une proportion de 59 %, tandis que la provenance est mixte pour 26 % des embâcles mineurs et 33 % des embâcles majeurs. Le test khi-deux n'a pu être réalisé puisque seulement 42 % des valeurs sont supérieures à 5. La condition d'utilisation voulant que 85 % des valeurs soient supérieures à 5 n'est donc pas respectée, même en excluant les données des embâcles extrêmes.

Tableau 5.2.5. Nombre d'embâcles par niveau et selon la provenance du bois mort

Niveau d'intensité	Proximale	Amont	Proximale et amont
Mineur (n=73)	42 (58 %)	12 (16 %)	19 (26 %)
Moyen (n=17)	3 (18 %)	4 (23 %)	10 (59 %)
Majeur (n=12)	0	8 (67 %)	4 (33 %)
Extrême (n=3)	0	3 (100 %)	0
Total (n=105)	45 (43 %)	27 (26 %)	33 (31 %)

Par ailleurs, l'état des berges a été noté pour chaque site caractérisé par la présence d'un embâcle de bois mort. La grande majorité des embâcles de bois mort sont localisés à des endroits où les berges sont en érosion. Ainsi, 90 % des embâcles de l'unité A, 70 % de ceux de l'unité B et 60 % de ceux de l'unité C étaient associés à l'érosion d'au moins une berge. On note alors une diminution de l'amont vers l'aval de la proportion des embâcles associés à de l'érosion. En outre, de l'accumulation sédimentaire a été observée sur l'une ou l'autre des berges soit en amont, au droit ou en aval de 26 % des embâcles de l'unité A et de 29 % des embâcles de l'unité B. Aucune zone d'accumulation sur les berges n'a été constatée pour les 18 embâcles de l'unité C.

En analysant l'état des berges de part et d'autre des embâcles selon leur niveau d'intensité, on constate que 75 % des embâcles mineurs, 88 % des embâcles moyens et 75 % des embâcles majeurs sont associés à de l'érosion. De plus, de l'accumulation sédimentaire a été observée sur l'une ou l'autre des berges soit en amont, au droit ou en aval de 47 % des embâcles mineurs et de 24 % des embâcles majeurs. Aucun embâcle moyen n'était associé à de l'accumulation sédimentaire. En ce qui concerne les embâcles extrêmes, l'état des berges des 3 sites était stable à l'exception de la rive droite au site n° 4925 qui était en accumulation.

La présence de mouilles en amont, au droit et en aval des embâcles présents dans les unités A et B a été analysée. Sur les 86 embâcles présents dans les 2 unités, 22 % (19 embâcles) étaient associés à une mouille à l'amont, 62 % (53 embâcles) à une mouille au niveau de l'embâcle et 21 % (18 embâcles) à une mouille à l'aval. Le tableau 5.2.6 montre la position des mouilles associées aux embâcles selon les unités morphodynamiques.

Tableau 5.2.6. Nombre d'embâcles où une mouille a été constatée en amont, au droit ou en aval

Unité morphodynamique	Amont	Embâcle	Aval
A- Divagante à chenaux multiples (n=31)	5 (16 %)	16 (52 %)	6 (19 %)
B- Méandres dynamiques (n=55)	14 (25 %)	37 (66 %)	12 (21 %)
Total (n=86)	19 (22 %)	53 (62 %)	18 (21 %)

Par ailleurs, les résultats du test khi-deux soulignent que les proportions d'embâcles associés à des mouilles ne varient pas de manière significative d'une unité morphodynamique à l'autre (khi-deux = 4,68 ; p-value = 0,19). Le test a été réalisé malgré le fait que l'échantillon ne respectait pas la condition d'utilisation voulant que 85 % des données soient égales ou supérieures à 5 (dans ce cas-ci, 75 % des données étaient égales ou supérieures à 5). La proportion d'embâcles associés à des mouilles est supérieure dans l'unité B que dans l'unité A. Pour les 2 unités, on dénote que 31 %, soit 27 embâcles, n'étaient associés à aucune mouille, 44 % (38 embâcles) à une mouille, 13 % (11 embâcles) à 2 mouilles et 12 % (10 embâcles) avaient à la fois des mouilles en amont, au droit et en aval. Le tableau 5.2.7 montre le nombre de mouilles par embâcles selon les unités morphodynamiques.

Tableau 5.2.7. Nombre d'embâcles selon le nombre de mouilles par site

Unité morphodynamique	0	1	2	3
A- Divagante à chenaux multiples (n=31)	10 (32 %)	17 (55 %)	2 (6,5 %)	2 (6,5 %)
B- Méandres dynamiques (n=55)	17 (31 %)	21 (38 %)	9 (16 %)	8 (15 %)
Total (n=86)	27 (31 %)	38 (44 %)	11 (13 %)	10 (12 %)

L'analyse des mouilles a aussi été réalisée selon le niveau d'intensité des embâcles des unités A et B et les résultats sont présentés dans le tableau 5.2.8. On constate d'abord que les embâcles majeurs sont ceux qui ont la plus grande proportion de mouilles en amont, au droit et en aval. La proportion de mouilles directement au droit des embâcles semble augmenter selon le niveau d'intensité. En effet, on constate que 55 % des embâcles mineurs, 82 % des embâcles moyens et 88 % des embâcles majeurs étaient localisés au-dessus d'une mouille.

Tableau 5.2.8. Nombre de sites par niveaux d'intensité présentant une mouille en amont, au droit et en aval de l'embâcle dans les unités morphodynamiques A et B

Niveau d'intensité	Amont	Embâcle	Aval
Mineur (n=64)	12 (19 %)	35 (55 %)	14 (22 %)
Moyen (n=11)	2 (18 %)	9 (82 %)	1 (9 %)
Majeur (n=8)	3 (38 %)	7 (88 %)	3 (38 %)
Extrême (n=3)	2 (67 %)	2 (67 %)	0
Total (n=86)	19 (22 %)	53 (62 %)	18 (21 %)

Par ailleurs, une forte proportion (38 %) des sites dans les unités morphodynamiques A et B où des embâcles mineurs ont été répertoriés ne présentaient aucune fosse, tandis que 42 % des embâcles étaient marqués par la présence d'une fosse (tableau 5.2.9). Ensuite, une

seule mouille a été constatée pour 82 % des embâcles moyens. De plus, seulement 9 % des embâcles moyens n'avait pas de mouille tant en amont, en aval et au droit des embâcles. On constate aussi que 50 % des embâcles majeurs étaient caractérisés par la présence de 2 fosses. Finalement, 2 des 3 embâcles extrêmes avaient à la fois des fosses en amont et au droit des embâcles et un seul embâcle était caractérisé par la présence d'aucune fosse. Il n'a pas été possible de réaliser un test khi-deux avec cet échantillon, puisque 38 % des valeurs sont supérieures à 5. La condition d'utilisation voulant que 85 % des valeurs soient supérieures à 5 n'est donc pas respectée.

Tableau 5.2.9. Nombre de sites par niveaux d'intensité selon leur nombre de mouilles répertoriées dans les unités morphodynamiques A et B

Niveau d'intensité	0	1	2	3
Mineur (n=64)	24 (38 %)	27 (42 %)	5 (8 %)	8 (13 %)
Moyen (n=11)	1 (9 %)	9 (82 %)	0	1 (9 %)
Majeur (n=8)	1 (13 %)	2 (25 %)	4 (50 %)	1 (13 %)
Extrême (n=3)	1 (33 %)	0	2 (67 %)	0
Total (n=86)	27 (31 %)	38 (44 %)	11 (13 %)	10 (12 %)

5.2.2 Variabilité interannuelle de la position et de la configuration des embâcles

5.1.2.1 Entre septembre 2012 et juillet 2013

Les résultats des inventaires de 2012 et de 2013 ont pu être comparés pour l'analyse de la dynamique temporelle du bois mort de la zone caractérisée lors des deux campagnes de terrain, s'étendant du pont couvert (à 2 400 m de la chute Neigette) au pont du 6^e rang Est (à 28 460 m de la chute) sur une distance de 26,1 km. La figure 5.2.4 illustre les variations du nombre d'embâcles par niveau. On constate que le nombre d'embâcles

mineurs a augmenté entre septembre 2012 et juillet 2013 passant de 43 à 61. Le nombre d'embâcles moyens a diminué de 17 à 13. On dénote un seul embâcle majeur de plus en 2013 et le nombre d'embâcles extrêmes n'a pas fluctué. Toutefois, ces différences dans le nombre d'embâcles par niveau pour les 2 intervalles ne sont statistiquement pas significatives (khi-deux = 2,29 ; p-value = 0,32).

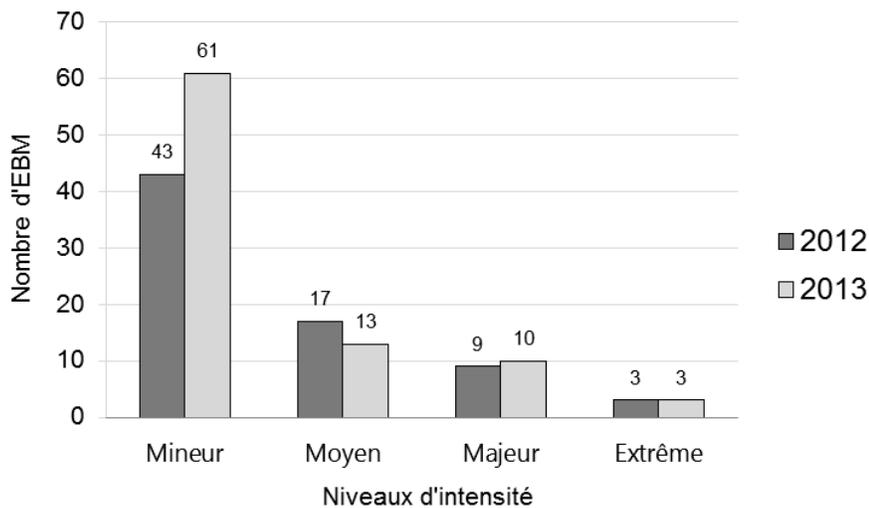


Figure 5.2.4. Comparaison du nombre d'EBM par niveau d'intensité de 2012 et de 2013

Par ailleurs, 20 embâcles de bois mort caractérisés en 2012 ont été disloqués, redistribués ou évacués du système durant l'intervalle entre les inventaires. Les 3 embâcles démantelés mécaniquement dans le cadre de ce projet ont été inclus dans ce nombre. En 2013, 35 nouveaux embâcles de bois mort ont été relevés dans le même tronçon caractérisé en 2012. On constate que la mobilité du bois mort est davantage marquée pour les petits embâcles, puisque 11 embâcles mineurs ont été évacués et 25 ont été formés. Mais, proportionnellement les embâcles moyens et majeurs sont aussi très dynamiques. Il n'y a que les embâcles extrêmes dont le nombre n'a pas fluctué entre 2011 et 2013. Le tableau 5.2.10 illustre les fluctuations du nombre d'embâcles évacués et nouvellement formés entre 2012 et 2013.

Tableau 5.2.10. Évolution interannuelle (2012-2013) du nombre d'embâcles de bois mort

Niveau d'intensité	2012	2013	Évacués*	Nouveaux*
Mineur	43	61	11 (26 %)	25 (41 %)
Moyen	17	13	6 (33 %)	5 (38 %)
Majeur	9	10	3 (38 %)	5 (50 %)
Extrême	3	3	0	0
Total	72	87	20 (28 %)	35 (40 %)

* Les proportions d'embâcles évacués et nouveaux ont été respectivement calculées à partir du nombre d'embâcles de 2012 et du nombre d'embâcles de 2013.

La figure 5.2.5 montre la position des embâcles formés et des embâcles évacués du système entre 2012 et 2013. Pour l'unité divagante à chenaux multiples (A), le nombre d'embâcles de bois mort est stable puisque 3 embâcles ont été évacués (2 mineurs et un majeur) et 3 nouveaux embâcles mineurs se sont formés. L'unité à méandres dynamiques (B) présente la plus importante variabilité du nombre d'embâcles de bois mort puisque 13 ont été disloqués (7 mineurs, 4 moyens et 2 majeurs) et 21 nouveaux ont été formés (16 mineurs, 2 moyens et 3 majeurs). Le dynamisme du bois mort est aussi mis en évidence dans l'unité à méandres stables (C) puisque 4 embâcles ont été évacués (2 mineur, 1 moyen et 1 majeur) et 11 ont été formés (6 mineurs, 3 moyens et 2 majeurs).

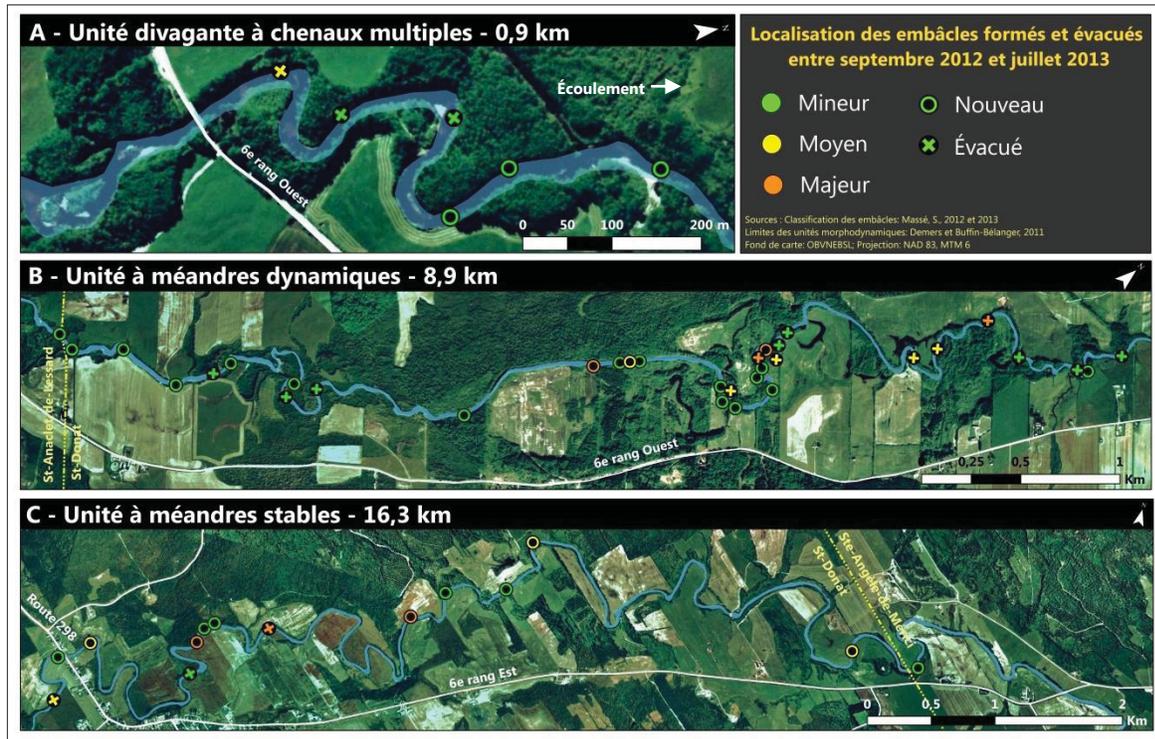


Figure 5.2.5. Carte de localisation des embâcles de bois mort formés et évacués entre 2012 et 2013

Par ailleurs, la composition des embâcles nouvellement formés a été relevée. Le tableau 5.2.11 présente les proportions moyennes de troncs, de branches et de racines contenues dans chaque nouvel embâcle. On constate que la composition des nouveaux embâcles n'est pas très différente à celle de l'ensemble des embâcles présents en 2012 et en 2013.

Tableau 5.2.11. Composition des embâcles de bois mort nouvellement formés. La valeur entre parenthèses correspond à l'écart-type de la distribution.

	Troncs	Branches	Racines
Nouveaux embâcles (n=35)	59 % (26,3)	33 % (26,0)	8 % (13,4)
Embâcles caractérisés en 2012 et en 2013 (n=52)	58 % (27,3)	37 % (27, 2)	7 % (7,4)

Par ailleurs, la provenance moyenne du bois mort composant les 35 embâcles formés entre 2012 et 2013 est très similaire des 52 embâcles caractérisés lors des 2 inventaires (khi-deux = 0,11 ; p-value = 0,95), comme le montrent les résultats dans le tableau 5.2.12.

Tableau 5.2.12. Provenance des bois morts composant les embâcles nouvellement formés

	Proximale	Amont	Proximale et amont
Nouveaux embâcles (n=35)	16 (46 %)	9 (26 %)	10 (28 %)
Embâcles caractérisés en 2012 et en 2013 (n=52)	23 (44 %)	15 (29 %)	14 (27 %)

Pour les 52 embâcles de bois mort présents lors des 2 inventaires, les données ont été comparées afin d'évaluer les changements dans leur configuration et leurs dimensions. Lors des analyses, il a été constaté que les données de volume corrigé ne sont pas suffisamment cohérentes avec la réalité pour indiquer quantitativement la nature des changements morphologiques des embâcles. Bien que la densité de bois mort influence grandement le volume réel d'un embâcle, elle n'est pas prise en compte dans la méthode de Thevenet (1998) pour le calcul du volume corrigé. Il a toutefois été possible de déterminer de manière qualitative l'évolution de chaque embâcle en considérant les données de volume, le nombre de bois mort par embâcle, le pourcentage d'obstruction du chenal et par l'observation des séquences temporelles de photographies. La figure 5.2.6 montre les diagrammes de dispersion pour le volume corrigé et le nombre de bois mort pour chaque embâcle caractérisé lors des 2 inventaires. Dans les 2 cas, la majorité des données sont concentrées près de la droite, ce qui souligne et la plupart des embâcles sont demeurés stables entre 2012 et 2013.

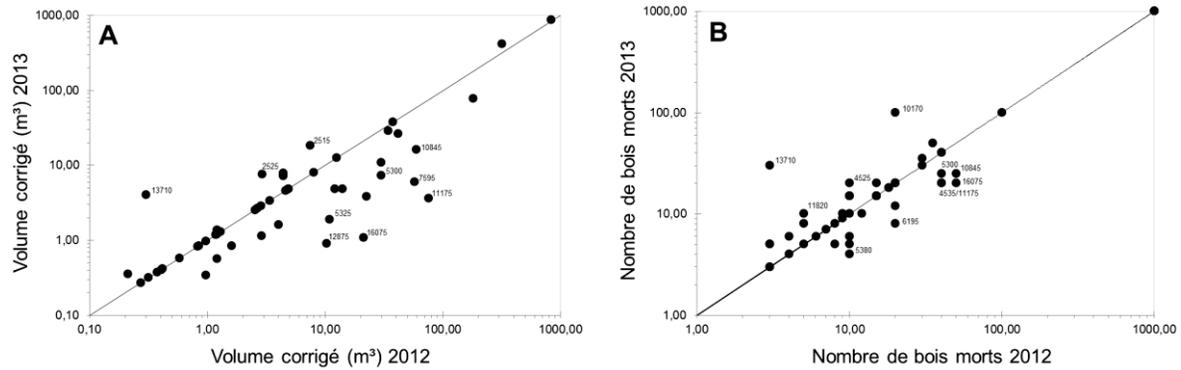


Figure 5.2.6. Diagrammes de dispersion des valeurs de volume corrigé (A) et du nombre de bois mort (B) pour les embâcles présents en 2012 et 2013. (Les embâcles dont le volume ou le nombre de bois mort a augmenté sont à gauche de la droite 1:1 et ceux dont ces variables ont diminué sont à droite de cette dernière.)

Dans l'ensemble, 10 embâcles de bois mort semblent avoir augmenté de taille, 21 ont diminué et 21 n'ont pas subi de modifications significatives de leur taille ou de leur configuration. Le tableau 5.2.13 présente la nature des modifications des 5 embâcles ayant proportionnellement le plus augmenté de taille, tandis que le tableau 5.2.14 expose les caractéristiques des 6 embâcles ayant le plus diminué. Le niveau d'intensité de certains embâcles a été redéfini lors de l'inventaire de 2013. À titre d'exemple, la figure 5.2.7 montre l'augmentation de taille entre de 2012 et 2013 de l'embâcle n° 4525 et la figure 5.2.8 montre l'évolution de l'embâcle n° 16075 dont la taille a diminué entre les deux intervalles.

Tableau 5.2.13. Caractéristiques des embâcles dont la taille a le plus augmenté entre 2012 et 2013

N° de l'embâcle	Niveau		Gain de volume (%)	Gain de bois morts
	2012	2013		
2515	2	2	148	5
2525	1	1	159	5
4525	1	1	64	10
10170	2	3	1	80
13710	1	2	1233	27



Figure 5.2.7. Embâcle n° 4525 vu de l'amont en 2012 et en 2013

Tableau 5.2.14. Caractéristiques des embâcles dont la taille a le plus diminué entre 2012 et 2013

N° de l'embâcle	Niveau		Perte de volume (%)	Perte de bois morts
	2012	2013		
4535	2	1	-83	-20
5300	2	1	-75	-15
7595	2	1	-89	-8
10845	2	1	-73	-25
11175	3	3	-95	-20
12875	1	1	-91	-4
16075	3	2	-95	-30



Figure 5.2.8. Embâcle n° 16075 vu de l'amont en 2012 et en 2013

Pour les embâcles de niveau extrême (n^{os} 4925, 4960 et 8075), des mosaïques ont été créées avec les photographies obtenues avec le drone télécommandé. Par manque de repères géolocalisés sur le terrain, il n'a pas été possible de superposer adéquatement les photographies prises à différents intervalles. La marge d'erreur et les déformations de l'imagerie optique liées au géoréférencement étaient trop importantes pour déceler les changements dans la configuration et le volume des embâcles extrêmes. Toutefois, l'analyse visuelle des photographies prises lors des inventaires permet de croire que les embâcles extrêmes n'ont pas subi de changements majeurs entre septembre 2012 et juillet 2013. L'analyse des séries de photographies des caméras installées à proximité des embâcles n^{os} 4925, 8075 et 12520 n'ont pas non plus permis de visualiser des changements majeurs.

5.1.2.2 *Entre novembre 2011 et septembre 2012*

Les photographies des embâcles et la cartographie réalisée par Cédric Charest, technicien en aménagement et en urbanisme à la MRC de la Mitis, à la suite de l'inventaire ont permis de comparer sommairement l'évolution de la distribution des embâcles entre l'automne 2011 et l'automne 2012 sur le territoire de St-Donat. L'inventaire a débuté à 0,4 km en aval de la limite amont de l'unité à méandres dynamique (B) pour se terminer à 3 km

après la limite avec l'unité à méandres stables (C). Le tableau 5.2.15 présente les résultats et la figure 5.2.9 illustre la position des embâcles relevés en 2011.

Tableau 5.2.15. Comparaison du nombre d'embâcles recensés à St-Donat en 2011 et en 2012

Niveau d'intensité	2011	2012	Évacués [†]	Nouveaux [†]
Mineur	7	30	3 (43 %)	26* (87 %)
Moyen	9	14	1 (11 %)	6* (43 %)
Majeur	8	6	3 (38 %)	3* (50 %)
Extrême	3	3	-	-
Total	27	53	7 (26 %)	35* (66 %)

[†] Les proportions d'embâcles évacués et nouveaux ont été respectivement calculées à partir du nombre d'embâcles de 2012 et du nombre d'embâcles de 2013

* Comprend les embâcles possiblement présents en 2011 mais n'ayant pas été relevés

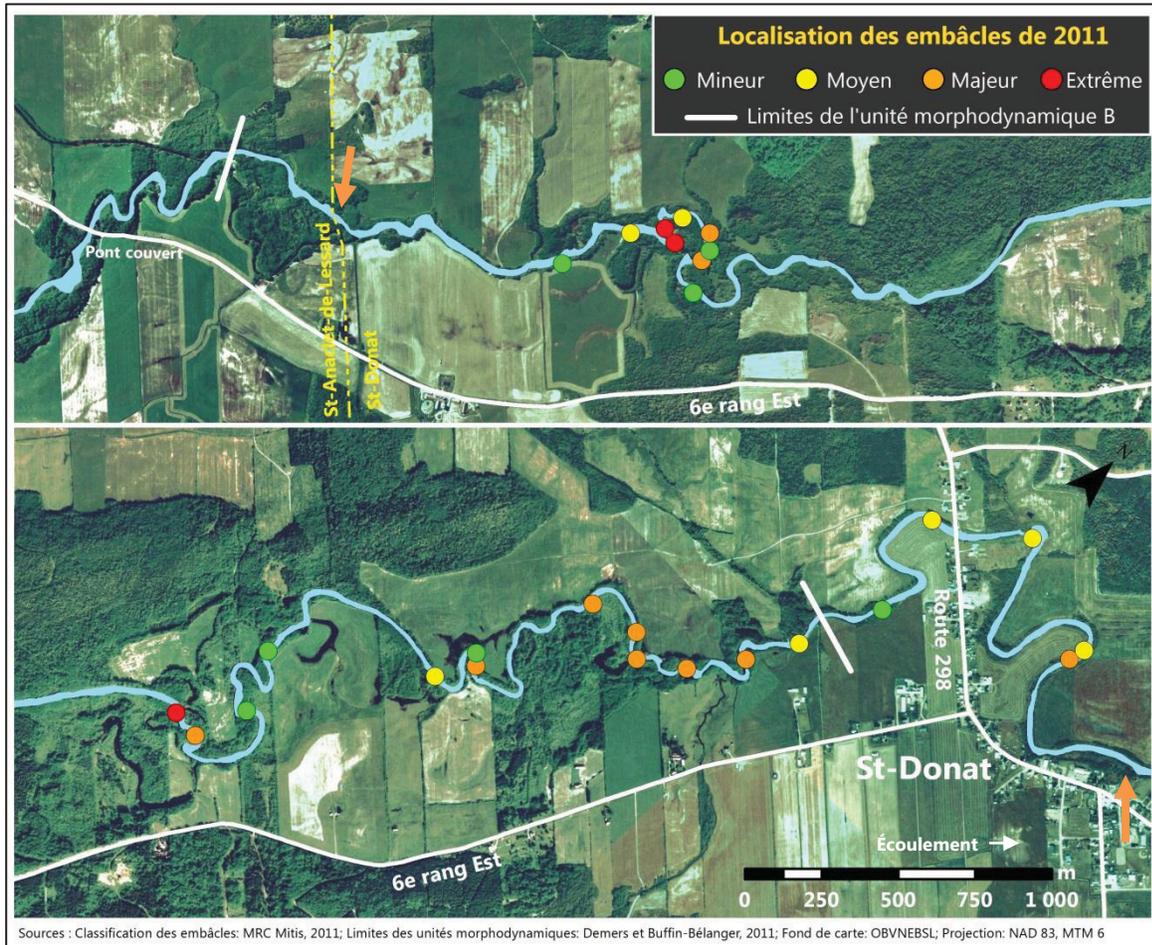


Figure 5.2.9. Carte de localisation des embâcles de bois mort relevés en 2011.
Les flèches indiquent le début et la fin de la zone caractérisée.

Tout d'abord, les variations entre les deux inventaires peuvent s'expliquer en partie par les différences des critères méthodologiques utilisés par les personnes ayant réalisé les inventaires et leur objectivité quant au classement des embâcles par niveau d'intensité. De plus, les embâcles mineurs disposés latéralement aux berges n'ont pas tous été relevés en 2011. Seulement les embâcles transversaux qui modifiaient considérablement l'écoulement étaient caractérisés. Le niveau de l'eau était d'ailleurs plus élevé lors de l'inventaire de 2011. À l'automne 2012, certains propriétaires riverains ont affirmé n'avoir jamais constaté un écoulement aussi faible dans la rivière Neigette. De ce fait, il est possible que de

nombreux embâcles mineurs et moyens de faible hauteur fussent submergés en 2011, alors qu'ils étaient apparents en 2012. Comme les embâcles mineurs ont tous été caractérisés en 2012, leur nombre a considérablement augmenté, soit de 7 à 30. D'ailleurs, 16 des 30 embâcles mineurs relevés en 2012 étaient disposés latéralement contre l'une ou l'autre des berges et il est possible qu'ils n'aient pas été pris en compte par les techniciens en 2011.

En outre, il est possible de confirmer la formation de 3 nouveaux embâcles majeurs (n^{os} 8805, 10845 et 12520). Une conversation avec les techniciens ayant réalisé l'inventaire de 2011 a permis de valider que les 3 embâcles n'ont pas été simplement omis. Par ailleurs, on constate que 7 des 27 embâcles caractérisés en 2011 ont été démantelés, redistribués vers l'aval ou sur la plaine alluviale ou encore évacués du système puisqu'ils n'ont pas été observés lors de l'inventaire de septembre 2012.

Sur les 20 embâcles présents en 2011 et en 2012, le niveau de seulement 3 embâcles de bois mort a été modifié après l'inventaire de 2012, ce qui suggère que la majorité n'a pas subi de variations majeures de leur volume. L'embâcle n^o 5300 était considéré comme étant majeur en 2011 a été reclassé en embâcle moyen et les embâcles majeurs n^{os} 5300 et 10220 ont été reclassés comme étant de niveau moyen en 2012. La comparaison des photographies a permis d'observer la diminution du volume de ces 3 embâcles. Pour les autres embâcles, il est difficile d'évaluer l'évolution de leur configuration puisque leurs dimensions n'ont pas été mesurées lors du premier inventaire. Par ailleurs, 3 des 20 embâcles relevés à la fois en 2011 et en 2012 (n^{os} 102220, 11775 et 12325) ont été disloqués entre septembre 2012 et juillet 2013.

Enfin, malgré les lacunes méthodologiques et le fait qu'un nombre indéterminé d'embâcles mineurs et moyens aient échappé à l'inventaire de 2011 en raison du niveau d'eau élevé, on peut tout de même présager une augmentation du nombre d'embâcles dans le tronçon de St-Donat.

5.2.3 Analyse de l'effet du bois mort sur la rétention de l'écoulement

5.2.3.1 Tronçon avec embâcles multiples

L'analyse des séries temporelles de niveaux d'eau enregistrés en amont et en aval d'un segment de 540 m, qui comprenait à l'été 2012 3 embâcles mineurs, 3 moyens, 1 majeur et 2 extrêmes, révèle l'effet du bois mort sur la rétention de l'écoulement (voir figure 4.2.7 pour la localisation). La figure 5.2.10 présente les variations de niveaux d'eau des 2 capteurs et la courbe de différence des niveaux d'eau (Z) corrigée avec le coefficient de pente.

De manière générale, lors des périodes où la température est inférieure à 0 °C (pas de ruissellement) et entre les épisodes de pluie, on constate que la courbe de ΔZ corrigée oscille autour de 0 (zones blanches sur la figure 5.2.10). Cela souligne que les valeurs enregistrées en amont et en aval sont similaires quand le niveau d'eau est bas et qu'il n'y a donc pas de rétention de l'écoulement en amont (voir figure 4.2.9 illustrant les 3 types de scénarios). Toutefois, on constate que pour les 6 événements hydrologiques A, B, C, D, E et F, les valeurs de ΔZ corrigées sont supérieures à 0, ce qui signifie que le niveau d'eau en amont est supérieur à celui en aval indépendamment de la pente naturelle du cours d'eau (zones mauves sur la figure 5.2.10). Le tableau 5.2.16 montre les pics de refoulement (valeur max de Z corrigé) enregistrés pour les événements A, B, C, D, E et F. L'amplitude de chaque événement de rétention est aussi indiquée dans le tableau. L'amplitude a été calculée à partir des données du capteur en amont (amplitude = $Z_{\max} - Z_{\min}$).

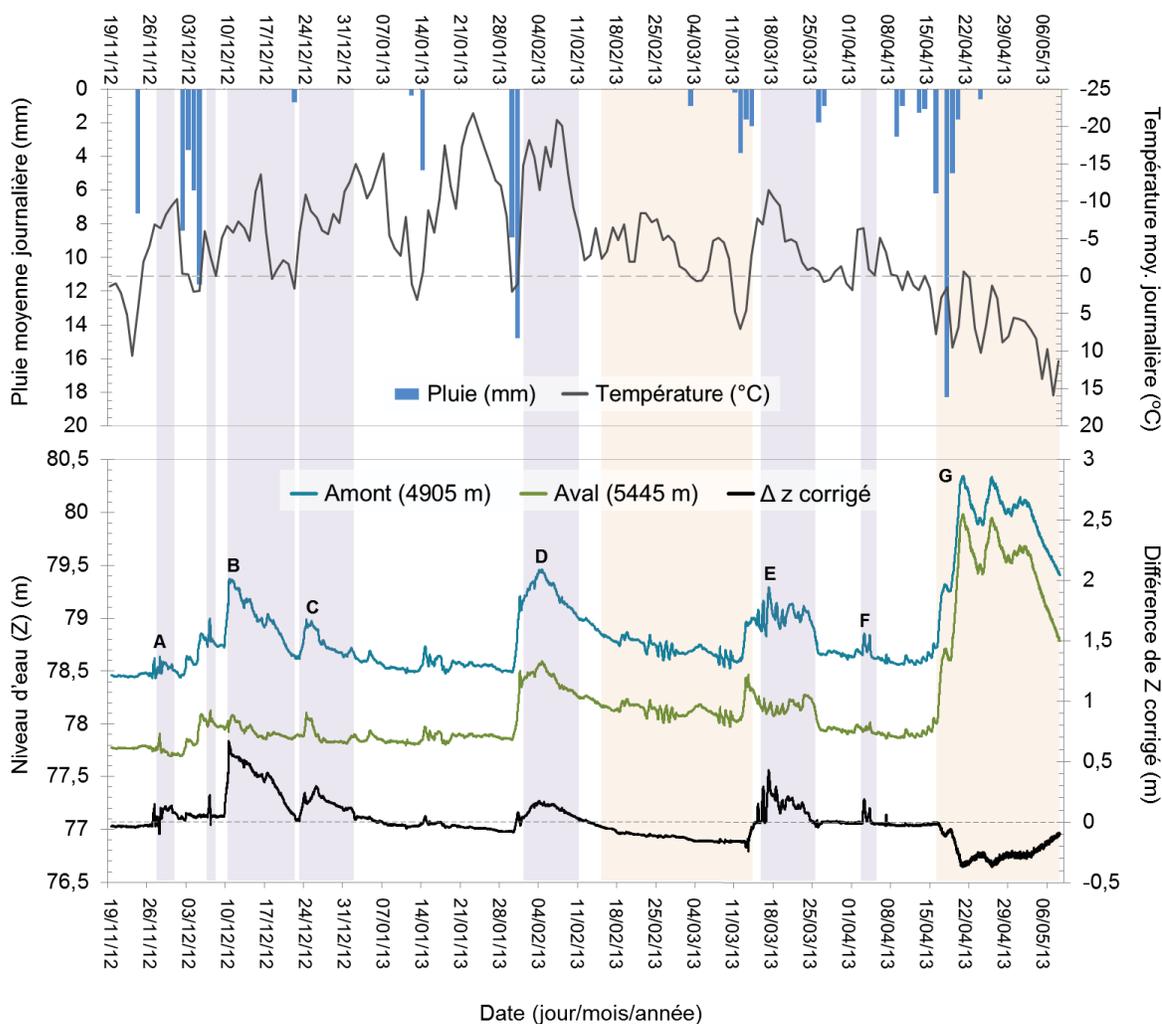


Figure 5.2.10. Évolution temporelle des niveaux d'eau enregistrés en amont et en aval du tronçon fortement encombré de bois mort. Le trait pointillé de la section supérieure représente le point de congélation. Dans la section inférieure, les zones blanches correspondent aux périodes sans refoulement ($Z_{\text{corr}} \approx 0$), les zones mauves représentent les phases de refoulement ($Z_{\text{corr}} > 0$) et les zones orangées correspondent aux épisodes où le niveau d'eau en aval surpasse celui de l'amont indépendamment de la pente ($Z_{\text{corr}} < 0$).

Tableau 5.2.16. Amplitude et pic de refoulement calculés pour les événements hydrologiques A à F

Événement	Amplitude (m) en amont	Pic de refoulement (m) (valeur max de Z corrigé)
A (29 nov. – 1 ^{er} déc.)	0,17	0,14
B (9 – 16 déc.)	0,62	0,67
C (23 – 27 déc.)	0,37	0,28
D (30 janv. – 11 fév.)	0,97	0,16
E (12 – 26 mars)	0,67	0,41
F (1 ^{er} – 4 avril)	0,19	0,18

Pour l'événement B, on remarque que le pic de refoulement est supérieur à l'amplitude et que ces deux valeurs sont similaires pour l'évènement F. L'analyse chronologique de l'évènement B révèle une augmentation de 0,63 m en 21 h du niveau d'eau en amont, tandis que la réponse hydrologique en aval est pratiquement nulle (partie A de la figure 5.2.11). Le constat est similaire pour l'évènement F, caractérisé par 2 remontées du niveau d'eau en amont, mais qui sont imperceptibles à l'aval (partie B de la figure 5.2.11). La succession d'embâcles de bois mort semble pouvoir affecter considérablement l'effet d'une crue en aval. Par ailleurs, les conditions hydrologiques antécédentes à l'évènement B, soit la légère remontée du niveau d'eau observée quelques jours plus tôt en raison des 29,6 mm de pluie tombés entre le 2 et le 6 décembre, peuvent possiblement expliquer le pic de refoulement supérieur à l'amplitude de l'évènement.

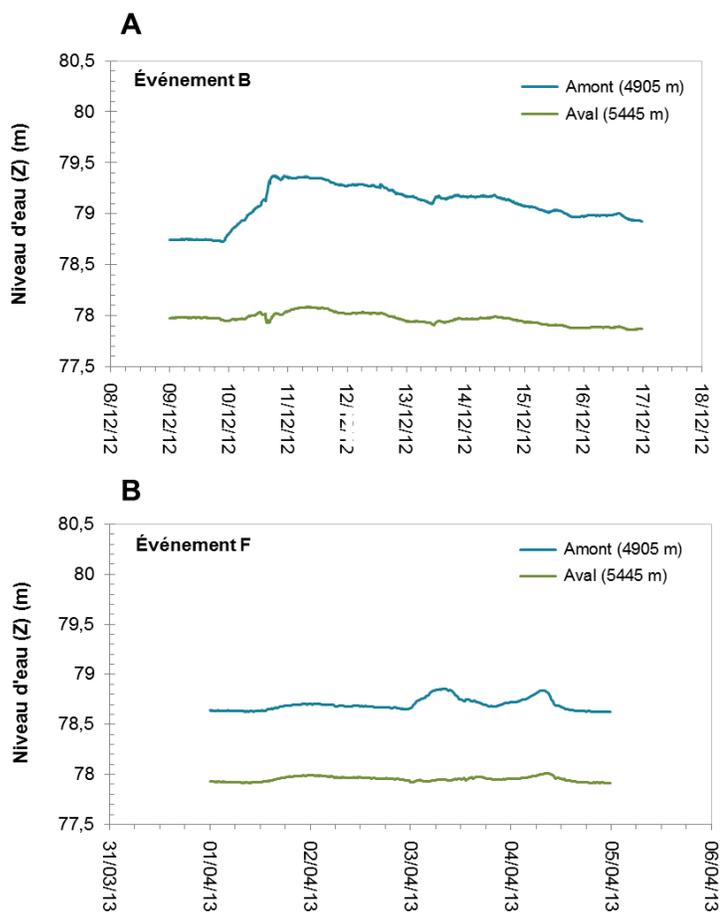


Figure 5.2.11. Évolution temporelle des niveaux d'eau enregistrés en amont et en aval lors des événements hydrologiques B (partie A) et F (partie B)

Pour les événements A, C, D et E, la courbe de ΔZ corrigée suit étroitement l'évolution temporelle des capteurs de pression (figure 5.2.10). Cela suggère que le refoulement était maximal lors de l'atteinte du pic d'amplitude de l'événement hydrologique, puis s'atténue au rythme de la décrue. L'intensité de refoulement par rapport l'amplitude de l'événement varie considérablement d'un événement à l'autre.

En ce qui concerne l'événement hydrologique G, débutant le 16 avril 2013 et correspondant à la fonte du couvert nival, il a été enclenché par de fortes précipitations liquides (26,3 mm entre le 16 et le 20 avril) et des températures moyennes journalières

nettement au-dessus du point de congélation. En analysant la figure 5.2.10, on constate que l'événement G est le seul qui présente une valeur de ΔZ corrigée négative, et ce, pour toute la durée de l'événement. Cela suggère que le potentiel de rétention en période de forte crue est nul, puisque les niveaux d'eau enregistrés par les 2 capteurs sont très rapprochés. Comme la pente du cours d'eau est minimale entre les sites compte tenu de l'inondation, la soustraction du coefficient de pente est responsable des valeurs négatives durant la crue (voir partie C de la figure 4.2.9). Par ailleurs, outre l'événement G, les épisodes où la différence de Z corrigée est inférieure à 0 semblent correspondre à la lente phase de décrue de l'événement hydrologique D.

Pour évaluer la similitude entre les variations temporelles des capteurs de niveau d'eau et pour calculer le décalage temporel entre les séquences, des corrélations croisées ont été réalisées. Pour l'ensemble de la période de prise de données s'étirant du 19 novembre 2012 au 8 mai 2013, la corrélation croisée souligne qu'il n'y a aucun décalage entre les séquences ($R^2 = 0,95$). Mais, en analysant individuellement chaque événement hydrologique (tableau 5.2.17), on constate que les capteurs de pression sont fortement décalés pour les événements A, B, C, E et F. L'incohérence des valeurs de décalage (valeurs négatives ou très élevées) et le faible R^2 soulignent l'absence de similarité entre la réponse hydrologique en amont et en aval lors de ces 5 événements. Toutefois, pour les événements D et G de forte amplitude, soit respectivement de 0,95 m et de 1,69 m, la valeur de décalage obtenue avec les corrélations croisées n'est que de 15 minutes ($R^2 = 0,99$). Les capteurs amont et aval évoluent donc de manière similaire lors de ces 2 événements. Il est à noter que le refoulement en amont lors de l'événement D est proportionnellement inférieur à celui calculé pour les événements A, B, C, E et F, possiblement en raison de la similitude des réponses hydrologiques captées en amont et en aval.

Tableau 5.2.17. Valeurs de décalage calculées par corrélations croisées pour chaque événement

Événement	Décalage (h)	R ²
A (29 nov. – 1 ^{er} déc.)	-28,00	0,66
B (9 – 16 déc.)	-6,00	0,57
C (23 – 27 déc.)	-1,50	0,74
D (30 janv. – 11 fév.)	0,25	0,99
E (12 – 26 mars)	154,00	0,61
F (1 ^{er} – 4 avril)	-34,50	0,61
G (16 avril – 8 mai)	0,25	0,99

5.2.3.2 Embâcle extrême n° 8075

La figure 5.2.12 présente les variations temporelles des niveaux d'eau enregistrés en amont et en aval du plus grand embâcle de la rivière Neigette, soit l'embâcle extrême n° 8075 qui obstrue totalement le chenal sur plus de 60 m de longueur. Comme pour les séquences temporelles obtenues pour le tronçon de 540 m précédemment décrites, la différence Z corrigée est relativement centrée sur 0 (zones blanches), ce qui indique que les niveaux enregistrés en amont et en aval de l'embâcle n° 8075 sont généralement similaires. Sur la figure, les mêmes événements hydrologiques que ceux identifiés pour la séquence précédente ont été analysés.

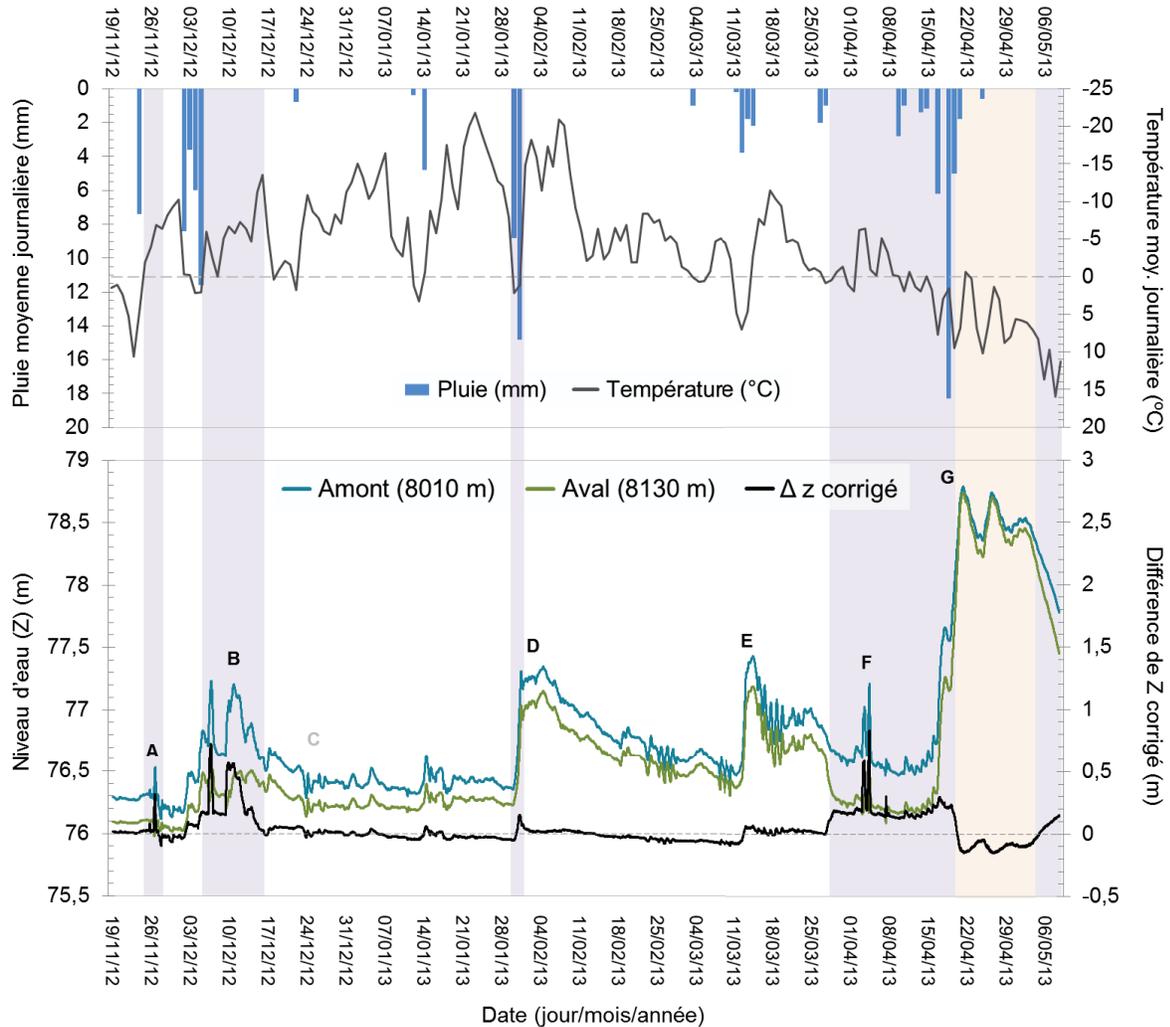


Figure 5.2.12. Évolution temporelle des niveaux d'eau enregistrés en amont et en aval de l'embâcle n° 8075. Le trait pointillé de la section supérieure représente le point de congélation. Dans la section inférieure, les zones blanches correspondent aux périodes sans refoulement ($Z_{\text{corr}} \approx 0$), les zones mauves représentent les phases de refoulement ($Z_{\text{corr}} > 0$) et les zones orangées correspondent aux épisodes où le niveau d'eau en aval surpasse celui de l'amont indépendamment de la pente ($Z_{\text{corr}} < 0$).

Tout d'abord, les séquences de variations du niveau d'eau ne permettent pas d'identifier clairement l'événement C (23 au 27 décembre) comme ce fut possible avec les données des capteurs installés de part et d'autre du tronçon de 540 m. Il semble que la réponse hydrologique du cours d'eau par rapport à la précipitation de 0,8 mm et de la fonte du couvert de neige induite par les températures ayant frôlé 2 °C ait été moins importante pour les capteurs en amont et aval de l'embâcle n° 8075. Ainsi, l'événement C n'est pas considéré pour l'analyse des niveaux d'eau de part et d'autre de l'embâcle extrême.

Concernant les événements A, B, D et F, le niveau d'eau en amont est supérieur à celui en aval comme le montrent les valeurs positives de la courbe de ΔZ corrigée (zones mauves). L'embâcle avait donc un effet de refoulement sur l'écoulement lors de ces 4 événements hydrologiques. L'événement F présente une longue phase de refoulement, soit d'un peu plus de 3 semaines (entre le 27 mars et le 19 avril). La présence d'un couvert de glace durant cette période a pu influencer la réponse hydrologique des capteurs de niveau d'eau et accentuer les valeurs de Z corrigé. Par ailleurs, aucun refoulement de l'écoulement n'est constaté pour l'événement E, bien que ce fût le cas en amont du tronçon de 540 m. L'amplitude calculée en amont pour les événements A à F et la valeur maximale de ΔZ corrigée qui leur est associée sont présentées dans le tableau 5.2.18.

Tableau 5.2.18. Amplitude et pic de refoulement calculés pour les événements hydrologiques A à F

Événement	Amplitude (m) en amont	Pic de refoulement (m) (valeur max de Z corrigé)
A (27 nov. – 30 nov.)	0,23	0,26
B (5 – 17 déc.)	0,79	0,68
D (30 janv. – 11 fév.)	0,92	0,10
E (11 – 18 mars)	0,91	0,02
F (3 – 5 avril)	0,59	0,78

Pour les événements A et F, la valeur maximale de ΔZ corrigée est supérieure à l'amplitude, tandis qu'elle est légèrement inférieure pour l'événement B. Les événements D et E présentent les plus fortes valeurs d'amplitude, mais l'effet de rétention de l'écoulement est minime. L'embâcle a eu peu d'impact sur la transmission de l'onde de crue au cours de ces événements de grandes amplitudes.

En période de forte crue (événement G), l'embâcle extrême n'a pas d'effet de rétention de l'écoulement (zone orangée sur la figure 5.2.12). Tout d'abord, les pics de niveau d'eau enregistrés en amont et en aval de l'embâcle sont très semblables (figure 5.2.13). La similarité de réponses hydrologiques enregistrées en amont et en aval laisse présager que le niveau d'eau est rehaussé de manière étendue spatialement, d'autant plus que les valeurs négatives de ΔZ corrigées montrent un abaissement de la pente à la surface de l'eau. À la toute fin de la séquence, lors de la décrue, les valeurs de ΔZ corrigées redeviennent positives (figure 5.2.12), ce qui suggère que l'effet du bois mort sur la transmission vers l'aval de l'écoulement reprend quand les niveaux d'eau diminuent. La signature de la crue printanière sur la séquence de niveaux d'eau est d'ailleurs très similaire à celle de la séquence pour le tronçon de 540 m situé en amont.

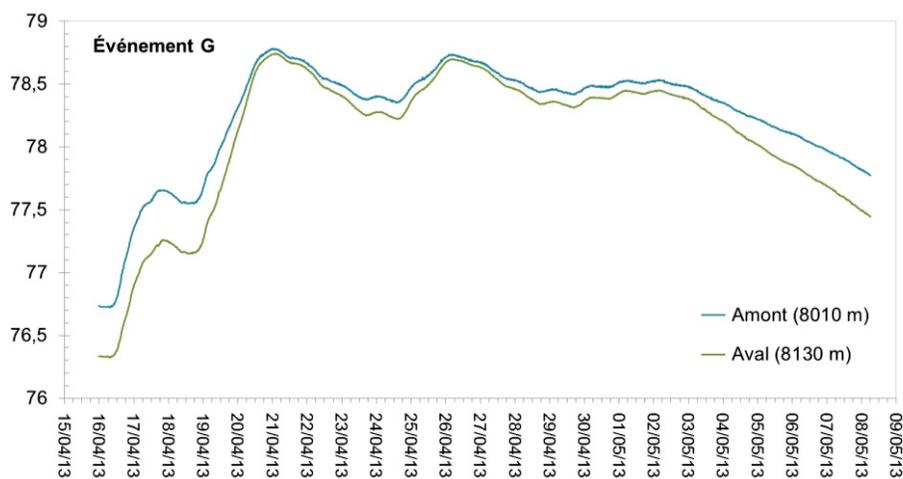


Figure 5.2.13. Évolution des niveaux d'eau enregistrés par les capteurs en amont et en aval de l'embâcle n° 8075 au cours de la crue printanière

Pour l'ensemble de la séquence s'étirant du 19 novembre 2012 au 8 mai 2013, le décalage calculé par la corrélation croisée est de 2 h ($R^2 = 0,98$). Le décalage est important, puisque seulement 120 m séparent les deux capteurs. En moyenne, la vitesse de l'écoulement serait de 0,017 m/s, ce qui est très faible. Cela porte à croire que l'embâcle extrême provoque de manière générale la rétention de l'écoulement en amont et retarde le transfert de l'écoulement vers l'aval, même si ce constat n'est pas perceptible par l'étude de la courbe de ΔZ corrigée.

Les résultats des corrélations croisées réalisées pour chaque événement hydrologique sont présentés dans le tableau 5.2.19. On constate que les capteurs de pression sont fortement décalés pour les événements A, B et F. Les valeurs élevées et le faible R^2 associés à ces 3 événements soulignent l'absence de similarité entre la réponse hydrologique en amont et en aval. Pour les événements D, E et G de forte amplitude (respectivement de 0,92 m, 0,91 m et 2,04 m), les valeurs de décalage sont davantage crédibles en raison de leur fort coefficient de corrélation (entre 0,99 et ≈ 1). Les séquences de l'événement D sont décalées de 1,75 h, celles de l'événement E de 15 minutes, et celles de l'événement G de 30 minutes.

Tableau 5.2.19. Valeurs de décalage calculées par corrélations croisées pour chaque événement

Événement	Décalage (h)	R^2
A (27 nov. – 30 nov.)	43,75	0,76
B (5 – 17 déc.)	6,50	0,50
D (30 janv. – 11 fév.)	1,75	0,99
E (11 – 18 mars)	0,25	≈ 1
F (3 – 5 avril)	5,00	0,76
G (16 avril – 8 mai)	0,50	≈ 1

Par ailleurs, l'amplitude, le temps de montée et le décalage entre les pics enregistrés en amont et en aval ont été relevés pour 24 épisodes d'augmentation du niveau d'eau (figure 5.2.14). Pour 22 épisodes, l'amplitude de la crue en amont était supérieure à celle de l'aval. Il est intéressant de constater que les 2 épisodes dont l'amplitude de la crue était supérieure en aval se sont déroulés les 16 et 22 avril soit durant le début de la crue printanière provoqué par des températures maximales journalières entre 3,1 et 17,5 °C et une précipitation de 26,3 mm étalée sur 4 jours.

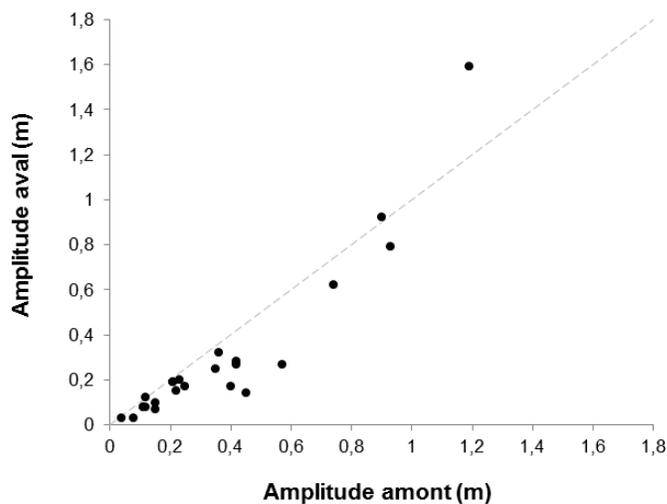


Figure 5.2.14. Diagramme de dispersion des valeurs d'amplitude calculées par les capteurs en amont et en aval pour 24 épisodes d'augmentation du niveau d'eau

La méthode préconisée pour évaluer l'effet des embâcles de bois mort sur la rétention de l'écoulement comporte toutefois certaines limites. La géométrie hydraulique, soit la relation entre le niveau d'eau et la morphologie de la section transversale, peut nécessairement influencer la réponse hydrologique enregistrée par les capteurs et il est normal que la relation hauteur d'eau – débit ne possède pas les mêmes caractéristiques en amont et en aval. De plus, comme la période d'enregistrement s'échelonne de l'automne 2012 au printemps 2013, la glace a pu influencer localement les niveaux d'eau. Néanmoins,

les données sont ici interprétées principalement selon deux variables moins sensibles à la géométrie du chenal et aux conditions glacielles : 1) le moment où survient la valeur maximale d'un événement de crue et 2) les différences relatives d'amplitude entre les fluctuations amont et aval. Ces deux variables permettent d'examiner et de discuter des 3 types d'événements hydrologiques présentés dans la figure 4.2.9.

5.3 ÉVALUATION DES EFFETS DU DEMANTELEMENT SUR LA DYNAMIQUE FLUVIALE

5.3.1 Suivi de la dynamique du bois mort

Lors de la campagne de terrain de l'été 2013, il a été constaté que des embâcles de bois mort s'étaient reformés aux sites des embâcles démantelés n^{os} 8205 et 10930. L'embâcle n^o 8205 s'est reformé près de la rive gauche par l'accumulation de quelques bois morts contre une grosse souche n'ayant pu être retirée (figure 5.3.1). Quant au site n^o 10930, une vingtaine de nouveaux bois morts se sont accumulés et l'embâcle occupe maintenant environ 90 % de la largeur du chenal (figure 5.3.2). Pour les deux sites, les bois morts ancrés au lit qui n'avaient pu être retirés en 2012 semblent avoir provoqué l'accumulation de nouveaux bois morts. L'analyse des photos de la caméra de surveillance installée en aval de l'embâcle permet de confirmer que le bois mort s'est déposé lors de la décrue de juin 2013. Il est à noter qu'un barrage de castor s'est formé entre les campagnes de terrain du 27 juillet et du 15 septembre à une vingtaine de mètres en aval de l'embâcle. Le tableau 5.3.1 présente à la fois les dimensions des embâcles avant leur démantèlement, les caractéristiques des débris n'ayant pu être retirés et les dimensions des embâcles reformés en 2013. On constate que le volume des embâcles des sites n^{os} 8205 et 10930 caractérisés en 2013 est significativement moins important qu'avant le démantèlement et que leur densité est également moins grande.



Figure 5.3.1. Configuration de l'embâcle n° 10930 et du barrage de castor à l'été 2013



Figure 5.3.2. Configuration de l'embâcle n° 8205 à l'été 2013

Tableau 5.3.1. Caractéristiques des amas de bois mort des sites n^{os} 8205 et 10930 entre 2012 et 2013

	Site n° 8205			Site n° 10930		
	Embâcle initial	Bois morts restants	Embâcle 2013	Embâcle initial	Bois morts restants	Embâcle 2013
Niveau	2	1	1	3	1	2
Obstruction (%)	100	10	20	100	40	90
Longueur (m)	6,0	3,0	14,0	14,0	6,7	10,0
Largeur (m)	21,0	5,0	8,0	16,0	3,3	15,0
Hauteur (m)	1,7	0,6	0,6	1,7	0,3	0,4
Volume corrigé (m³)	21,4	0,9	6,7	38,1	0,7	6,0
Densité	Moyenne	Faible	Faible	Élevée	Faible	Faible
Nombre de bois mort	15	3	5	25	4	20

5.3.2 Suivi de la morphologie du lit et des berges

5.3.2.1 Site n° 12010 (embâcle mineur)

Concernant l'évolution de la morphologie du chenal après le retrait de l'embâcle n° 12010 (figure 5.3.3), on constate que le lit a subi une légère incision d'environ 0,15 m en amont du bois mort transversal qui était appuyé sur le lit (transect 7). Le volume de sédiments érodés dans cette zone est d'environ 1,28 m³. En aval de ce tronç, la fosse déjà présente en 2012 a été surcreusée d'environ 0,40 m (3,11 m³) (transect 8). Toutefois, on constate une aggradation du lit vers la berge gauche de l'ordre de 0,30 m (1,45 m³) (transect 8). Une importante zone d'accumulation est aussi perceptible sur la rive droite, à l'endroit où une souche a été retirée en 2012 (transect 7). Le lit à cet endroit présente un rehaussement jusqu'à 0,56 m et le volume de sédiments accumulé est évalué à 8,39 m³. Cette zone était d'ailleurs en érosion avant le démantèlement et les résultats montrent au contraire que la zone était en accumulation lors du relevé topographique de l'été 2013. Un peu en aval, on constate une tendance à l'érosion sur la berge droite entre les transects 6 et 5. L'incision varie à cet endroit entre 0,15 et 0,25 m pour une perte de 4,38 m³ de

sédiments. On remarque également des variations légères du niveau du lit en aval de l'embâcle et une tendance à l'accumulation sur la berge droite et à l'érosion et l'incision sur la berge gauche. Quant à la section située en amont, la morphologie du lit semble plutôt stable et n'a pas subi de modifications majeures à la suite du retrait de l'embâcle mineur. De manière générale, le site n° 12010 est celui qui présente le moins de variations morphologiques.

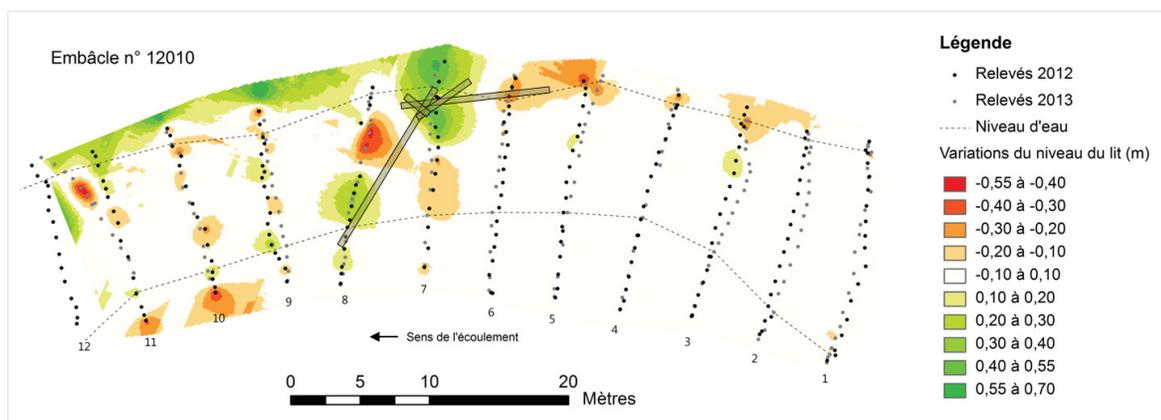


Figure 5.3.3. Évolution de la morphologie du lit du site n° 12010 entre septembre 2012 et juillet 2013

5.3.2.2 Site n° 8205 (embâcle moyen)

La matrice des variations du niveau du lit entre l'automne 2012 et l'été 2013 (figure 5.3.4) montre une tendance à l'accumulation vers la rive gauche en amont et au droit de l'embâcle, soit entre les transects 2 et 10 (entre 0,12 et 0,18 m d'incision). À l'opposé, les relevés effectués sur la berge droite entre les transects 2 et 9 semblent indiquer une étroite bande d'érosion d'environ 0,25 m de profondeur.

Au droit de l'embâcle retiré (transects 7 et 8), une zone d'accumulation s'étire sur la majorité de la section transversale au niveau du lit. Les valeurs d'aggradation varient entre 0,13 et 0,23 m pour un volume de sédiments de 4,55 m³. Immédiatement à l'aval de l'embâcle (transect 9 et 10), le lit du chenal a subi de l'incision de 0,14 à 0,27 m de profondeur pour un volume de sédiments évacués d'environ 5,66 m³.

En aval, la rive droite a subi de l'érosion verticale au niveau des transects 11 à 15 de l'ordre d'environ 0,30 m. Quant au lit, des zones d'accumulations sont présentes sur la rive droite vers le transect 10 (0,43 m), au centre du transect 11 (0,37 m) et vers la rive gauche pour les transects 12 (0,41 m), 13 (0,61 m) et 14 (0,42 m). Le volume total de sédiments accumulés dans ces zones est estimé à 35,46 m³. Le lit au niveau du transect 14 présente une légère zone incision vers la rive droite jusqu'à 0,23 m de profondeur pour un volume d'environ 3,35 m³. Enfin, les valeurs d'érosion entre les transects 14 et 15 sur la rive gauche semblent avoir été surestimées par l'interpolation spatiale puisque la zone présentant les plus grandes valeurs d'érosion est située entre les points topographiques, comme c'est d'ailleurs le cas pour la zone complètement en amont entre les transects 1 et 2 sur la rive droite.

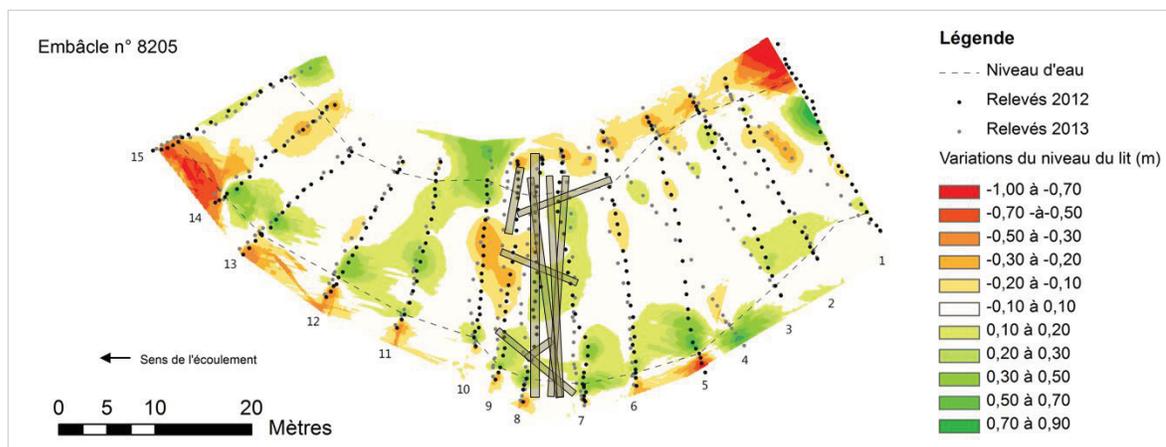


Figure 5.3.4. Évolution de la morphologie du lit du site n° 8205 entre septembre 2012 et juillet 2013

5.3.2.3 Site n° 10930 (embâcle majeur)

Tout d'abord, la figure 5.3.5 présente les variations morphologiques interannuelles pour le site n° 10930. En amont de l'embâcle, une zone d'accumulation est perceptible sur la rive droite entre les transects 2 et 4. L'accumulation sédimentaire entre ces transects, évaluée à 26,39 m³, semble être surestimée par rapport aux valeurs de la matrice d'interpolation à l'endroit des points topographiques. À proximité des transects 2, 3 et 4, où les données de 2012 et de 2013 sont presque superposées, le lit est rehaussé respectivement d'environ 0,37 m, 0,32 m et 0,27 m. Sur la rive gauche, on constate plutôt de l'incision entre les transects 2 et 4 de l'ordre de 0,15 à 0,20 m, pour un volume de sédiments évacués estimé à 1,56 m³.

Au niveau de l'embâcle, la berge droite semble avoir subi de l'érosion particulièrement prononcée, jusqu'à 0,82 m, à l'endroit du transect 5. Le rapprochement des points topographiques de 2012 et de 2013 permet de croire que cette valeur n'est pas surestimée par l'interpolation géostatistique. Bien que cette zone d'érosion s'étire vers l'aval jusqu'au transect 7, le manque de données topographiques vers les transects 6 et 5 ne permet pas de définir adéquatement l'extension spatiale de la zone d'érosion. Un peu en aval de l'embâcle, une zone d'accumulation au niveau du lit est perceptible au niveau du transect 5, mais l'espacement entre les points topographiques est trop élevé pour confirmer que cette zone est réellement en accumulation. Par contre, le recoupement adéquat des points topographiques des transects 6 et 7 montre de l'accumulation sédimentaire jusqu'à 0,22 m 0,23 m vers la rive droite et jusqu'à vers la rive gauche au niveau de l'embâcle pour un volume total estimé à 6,48 m³.

Tout juste en aval de l'embâcle, au transect 8, le lit du chenal présente une zone d'accumulation relativement étendue avec un rehaussement jusqu'à 0,25 m. Le volume de sédiments accumulés est évalué à 4,96 m³. Sur la berge droite, l'accumulation sédimentaire s'élève par endroits à 0,40 m près des transects 8 et 9. Entre les transects 10 et 12, on remarque la présence d'une grande zone d'érosion et d'incision. Il est possible que le

surcreusement et l'érosion soient en lien avec le barrage de castor érigé à cet endroit. Le barrage avait pour effets de retenir l'écoulement vers la rive gauche et de provoquer une petite chute vers la rive droite. Sur la rive gauche, le surcreusement du lit atteint 0,80 m, tandis qu'il est de 0,34 m vers le centre du chenal et de 0,37 m vers la rive droite. Pour l'ensemble de la zone d'érosion entre les transects 10 et 12, le volume de sédiments évacué est estimé à 81,65 m³. Finalement, les zones d'accumulation situées complètement en aval semblent avoir été surestimées puisqu'elles se situent entre les relevés topographiques.

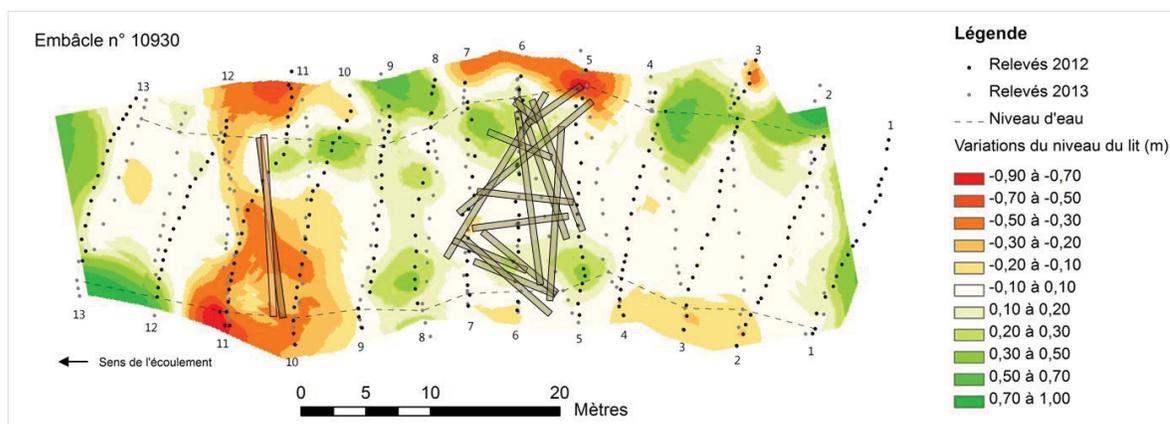


Figure 5.3.5. Évolution de la morphologie du lit du site n° 10930 entre septembre 2012 et juillet 2013

CHAPITRE 6

DISCUSSION

Tout d'abord, les interrelations entre la position et la configuration des embâcles et les caractéristiques hydrogéomorphologiques de la rivière seront élaborées. La segmentation fluviale réalisée par Demers et Buffin-Bélanger (2011) constitue le cadre d'analyse pour l'étude des liens entre le bois mort et les styles fluviaux de la rivière Neigette. La compréhension de la dynamique fluviale a été renforcée par l'analyse approfondie de la variabilité longitudinale de 3 paramètres hydrogéomorphologiques : l'érodabilité (migration latérale historique), de la largeur du chenal actif et du profil en long. Les résultats de la caractérisation hydrogéomorphologique permettent à la fois de valider la segmentation morphodynamique de Demers et Buffin-Bélanger (2011), de mieux comprendre le comportement hydrogéomorphologique propre à chaque unité et d'expliquer la distribution spatiale des embâcles de bois mort de la rivière Neigette. De plus, l'inventaire des embâcles de juillet 2013 constitue le cadre de référence pour l'analyse de la distribution spatiale du bois mort, puisqu'il couvre la totalité des 32,1 km du tronçon à l'étude et que davantage de variables ont été considérées comparativement à l'inventaire sommaire effectué en septembre 2012. Par la suite, la dynamique spatiale du bois mort de l'amont vers l'aval et la dynamique interannuelle des embâcles entre 2011 et 2013 seront discutées. Puis, les impacts morphologiques observés à la suite du démantèlement de 3 embâcles seront analysés et comparés avec les constats émanant d'expériences similaires.

6.1 INTERRELATIONS ENTRE LE BOIS MORT ET L'HYDROGÉOMORPHOLOGIE

6.1.1 Unité divagante à chenaux multiples (A)

Il est reconnu que les rivières caractérisées par une succession d'embâcles de bois mort présentent généralement une plus grande variabilité de la largeur du chenal actif (Montgomery *et al.*, 2003; Gurnell, 2013). Sur la rivière Neigette, l'unité divagante à chenaux multiples (A) renferme la plus grande concentration d'embâcles de bois mort, soit 9,5 embâcles par km en 2013, et elle détient la plus importante variabilité de la largeur active du chenal. La largeur moyenne du chenal pour les photos aériennes de 2004 était de 23,2 m avec un écart-type de 6,8 m.

Plusieurs études ont montré l'effet de la présence d'embâcles de bois mort totaux en rivière sur l'élargissement du chenal et l'augmentation de la variabilité de la largeur active (p. ex. Keller et Swanson, 1979; Piégay et Gurnell, 1997; Montgomery *et al.*, 2003). Les embâcles de bois mort obstruant la totalité de la section transversale sont susceptibles d'engendrer le refoulement de l'écoulement et de concentrer l'énergie cinétique vers les berges, ce qui accentue l'érosion et contribue à l'élargissement progressif du cours d'eau. Toutefois, dans le tronçon divagant à chenaux multiples de la rivière Neigette, un seul embâcle occupait la totalité de la section transversale et seulement 2 embâcles obstruaient plus de 50 % de la largeur du chenal sur les 31 embâcles de bois mort répertoriés en 2013. L'effet du bois mort sur la morphologie du chenal est maximal pour les embâcles bloquant complètement l'écoulement (Piégay et Gurnell, 1997; Gurnell *et al.*, 2002; Curran, 2010). Ainsi, il est peu probable que les petits embâcles, bien que particulièrement nombreux, exercent un contrôle significatif sur la variabilité morphologique en plan du tronçon divagant à chenaux multiples.

Les variations longitudinales de la largeur du chenal augmentent la fréquence de zones de rétrécissement et de confinement qui sont particulièrement propices à l'accumulation du bois mort (Therrien, 1997; Boivin et Buffin-Bélanger, 2010). L'effet de

goulot d'étranglement ne semble toutefois pas constituer un facteur important dans la formation des embâcles de bois mort de l'unité A, compte tenu du peu d'embâcles totaux. En effet, le seul embâcle qui obstruait totalement l'écoulement a été formé par l'accumulation de bois mort contre l'amont d'un îlot central végétalisé qui séparait l'écoulement dans deux chenaux (figure 6.1.1).



Figure 6.1.1. Embâcle majeur n° 745 formé par l'accumulation de bois mort en amont d'un îlot central végétalisé

Au cours des campagnes de terrain, la variabilité des formes et des profondeurs du lit telle que relatée par Demers et Buffin-Bélanger (2011) a été constatée pour l'unité A. Les zones de faible profondeur et les bancs d'accumulation constituent également des éléments morphologiques propices à l'accumulation du bois mort en rivière (Keller et Swanson, 1979; Boivin et Buffin-Bélanger, 2010; Gurnell, 2013). Sur les 31 embâcles recensés dans l'unité A, 5 embâcles, dont 2 de niveau majeur, étaient constitués de bois mort accumulé sur un banc d'accumulation (figure 6.1.2). Il est reconnu que le bois mort peut affecter la configuration des bancs d'accumulation (Abbe et Montgomery, 1996; Gurnell *et al.*, 2002 ; Merritt, 2013). Il est possible que les embâcles localisés sur des bancs d'accumulation dans l'unité A influencent la dynamique sédimentaire locale, particulièrement les embâcles majeurs. En outre, 26 % des embâcles de l'unité A étaient associés à de l'accumulation

sédimentaire sur l'une ou l'autre des berges. Mais, les impacts directs des embâcles sur la rétention des sédiments n'ont pas été approfondis dans le cadre de cette étude.



Figure 6.1.2. Embâcle majeur n° 1505 disposé sur un banc d'accumulation latéral

De plus, 25 des 31 embâcles étaient disposés latéralement aux berges. Les embâcles latéraux sont formés par l'accumulation du bois mort sur le lit dans une zone peu profonde ou par l'enchevêtrement de bois mort contre la berge ou contre des arbres riverains affaissés. D'ailleurs, 10 des 25 embâcles latéraux ont été relevés au pied de la berge concave d'un méandre (figure 6.1.3), zone propice à la formation d'embâcles de bois mort en raison de la concentration de l'écoulement qui accentue l'érosion (Gurnell *et al.*, 2002, Kail, 2003; Curran, 2010). L'affaissement ou la chute d'arbres riverains matures peut amorcer la formation d'un embâcle de bois mort en interceptant des débris flottants en provenance de l'amont (Baillie *et al.*, 2008; Wohl et Beckman, 2014b). En analysant les résultats de l'évaluation de la provenance du bois mort composant les embâcles de l'unité A, on constate que la plupart se sont formés directement à l'endroit où des arbres riverains s'étaient affaissés. En effet, 87 % des embâcles répertoriés comprenaient du bois mort provenant directement de l'une des berges proximales. Ainsi, la faible profondeur du chenal et l'érosion des berges concaves semblent constituer les principaux facteurs

morphologiques responsables de l'accumulation du bois mort dans l'unité divagante à chenaux multiples.



Figure 6.1.3. Embâcle mineur n° 505 formé au pied d'une berge concave en érosion

Par ailleurs, 52 % des embâcles de bois mort de l'unité A étaient localisés directement au-dessus d'une mouille. La turbulence et les courants de recirculation au niveau du lit sont amplifiés par la présence d'un embâcle et peuvent engendrer un surcreusement suffisant pour initier la formation d'une mouille (Keller et Swanson, 1979; Abbe et Montgomery, 1996; Kail, 2003). Il n'est toutefois pas possible d'estimer le nombre de mouilles directement reliées au surcreusement induit par les embâcles, mais la proportion élevée d'embâcles associés à une mouille porte à croire que le bois mort a un effet sur la morphologie du lit de l'unité A. À titre d'exemple, Baillie *et al.* (2008) ont évalué que la morphologie de 43 % des mouilles répertoriées dans la portion d'ordre 5 de la rivière Whirinaki en Nouvelle-Zélande était directement influencée par la présence d'embâcles de bois mort.

À la lumière des constats précédents, la géométrie du tronçon divagant à chenaux multiples ne semble pas être dictée par la présence des embâcles de bois mort, mais plutôt

par le contexte morphosédimentaire et hydrogéomorphologique. Les fluctuations longitudinales de la largeur du chenal reflèteraient plutôt le morphodynamisme latéral du tronçon A (Piégay *et al.*, 2005b). En effet, le coefficient de pente de 0,0043 m/m dans l'unité A renforce la puissance spécifique du tronçon et conditionne son dynamisme hydrogéomorphologique. L'érodabilité des berges de l'unité A est élevée en raison de la nature friable des dépôts glaciaires de granulométrie grossière, ce qui permet la migration latérale du cours d'eau et son élargissement (Demers et Buffin-Bélanger, 2011).

L'analyse des tracés fluviaux historiques a permis de mettre en évidence la mobilité latérale du chenal principal de la rivière Neigette. Entre 1963 et 2004, le taux moyen de migration latérale par année a été estimé à 0,49 m dans le segment divagant à chenaux multiples. En outre, cela équivaut approximativement à une superficie de plaine alluviale de 65 750 m² érodée sur 41 ans. Dans les systèmes alluviaux et semi-alluviaux, l'érosion des berges représente le principal mode de transfert de matière ligneuse du milieu terrestre au milieu fluvial (Keller et Swanson, 1979; Piégay *et al.*, 2005a; Boivin et Buffin-Bélanger, 2010; Gurnell, 2013). Une superficie érodée additionnelle de 7 425 m² a été attribuée aux 2 avulsions identifiées dans le tronçon A entre 1963 et 2001. L'initiation d'un nouveau tronçon fluvial ou la migration du tracé principal dans un chenal secondaire génère de l'érosion et le déracinement de la végétation (Phillips, 2012). Les avulsions peuvent ainsi contribuer à augmenter le volume de bois mort acheminé au cours d'eau et déclencher la formation de nouveaux embâcles.

Compte tenu de l'intensité des ajustements morphosédimentaires qui caractérise l'unité A, l'importante érosion fluviale implique que des volumes considérables de débris ligneux sont acheminés dans le cours d'eau. En considérant les superficies érodées par érosion latérale et par avulsion, 73 175 m² de plaine alluviale forestière ont été retranchés entre 1963 et 2004 dans le tronçon fluvial de 3,3 km de longueur. Ainsi, l'unité divagante à chenaux multiples constitue une zone de production massive de bois mort en rivière.

Aucune évaluation quantitative de la densité de la bande forestière riveraine n'a été réalisée dans le cadre de cette étude pour estimer le volume de bois par m² compris dans la

plaine alluviale de la rivière Neigette. Toutefois, l'exercice a été réalisé pour le corridor fluvial de la rivière St-Jean en Gaspésie dans le cadre de l'étude de Boivin et Buffin-Bélanger (2010). Les vallées de la Neigette et de la St-Jean sont localisées dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune (MRN, 2013), ce qui permet de croire que la dynamique écologique et les essences arborescentes qui caractérisent les deux environnements sont similaires. La densité de bois (m^3/m^2) a été quantifiée pour 6 tronçons fluviaux. En moyenne, les auteurs ont calculé une densité de $0,1 \text{ m}^3$ de matière ligneuse par m^2 de plaine alluviale. En transposant ce coefficient aux berges de la rivière Neigette, $7\,317,5 \text{ m}^3$ de bois mort auraient pu être transférés au cours d'eau par l'érosion des berges et les avulsions entre 1963 et 2004 dans le tronçon divagant à chenaux multiples, pour un taux de recrutement de $178,47 \text{ m}^3/\text{an}$. Il s'agit néanmoins d'une estimation sommaire, puisque la densité de la ripisylve du corridor Neigette n'a pas fait l'objet d'analyses approfondies. Le volume total de bois mort compris dans les embâcles de bois mort de l'unité A en 2013 a été évalué à 221 m^3 , ce qui correspond à un ordre de grandeur similaire au volume estimé de bois mort recruté annuellement par l'érosion des berges.

6.1.2 Unité à méandres dynamiques (B)

L'unité à méandres dynamiques (B) qui succède vers l'aval à l'unité divagante à chenaux multiples comprend 55 embâcles, soit 52 % des embâcles de bois mort du tronçon à l'étude. L'unité B est caractérisée par l'équivalent de 6,2 embâcles par km, comparativement à 9,4 par km pour l'unité A. Bien que la concentration d'embâcles soit inférieure, elle est tout de même importante, puisque pour les 32,1 km du tronçon à l'étude, l'équivalent de 3,3 embâcles par km ont été recensés en 2013.

Tout d'abord, la largeur moyenne de 18,3 m est la plus faible des 3 unités morphodynamiques. Avec un écart-type de 3,8 m, la dispersion des valeurs de largeur est aussi la plus centrée sur la moyenne, ce qui reflète une variabilité morphologique en plan moins importante. De plus, la régression linéaire montre une réduction progressive de la

largeur de l'amont vers l'aval dans l'unité B. La configuration géométrique du chenal en relation avec la taille des débris est le facteur le plus déterminant pour la formation d'un embâcle (Keller et Swanson, 1979; Gurnell, 2013). Plus le chenal est étroit, plus les chances d'obstruction par des débris ligneux sont grandes (Piégay et Gurnell, 1997; Gurnell *et al.*, 2002; Montgomery *et al.*, 2003; Piégay *et al.*, 2005a).

Dans l'unité B, on constate une augmentation de la proportion d'embâcles occupant 50 % ou plus de la section transversale par rapport à l'unité A. En effet, 11 embâcles totaux, 3 embâcles partiels obstruant au moins 50 % de la largeur du chenal et 5 embâcles formés de troncs transversaux ont été dénombrés en 2013. Les embâcles totaux n^{os} 11175 et 11285 n'étaient pas ancrés au lit et étaient composés de débris flottant à la surface de l'eau (figure 6.1.4). Ces embâcles se sont formés dans la portion aval de l'unité B, près de la transition avec l'unité à méandres stables (C), où le chenal s'approfondit progressivement. L'enchevêtrement de bois mort en provenance de l'amont contre des arbres riverains affaiblis a initié la formation de ces embâcles.

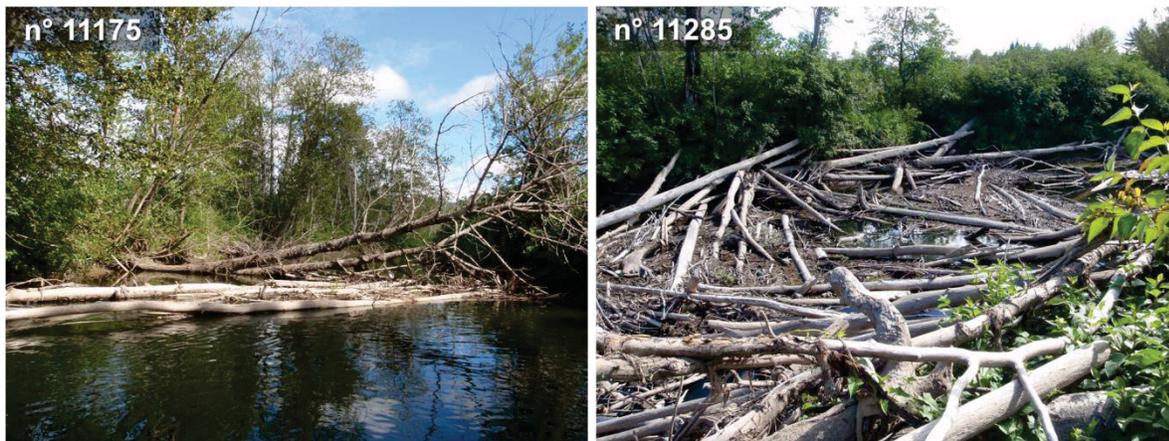


Figure 6.1.4. Embâcles flottants n^{os} 11175 et 11285 dans la portion aval de l'unité B

La figure 6.1.5 représente la dispersion de la largeur moyenne de l'unité B des parcelles de 100 m de longueur sans embâcle, des parcelles avec embâcles latéraux et des

parcelles avec embâcles obstruant la majorité de la section transversale. Bien que la différence soit faible, la largeur des parcelles avec embâcles latéraux ou centraux est significativement plus élevée que celle des parcelles obstruant la majorité du chenal ($t = 2,12$; $p = 0,03$). On remarque que la médiane des valeurs de largeur des parcelles comprenant des embâcles latéraux ou centraux (taux d'obstruction $\geq 40\%$) est supérieure à la médiane des largeurs des parcelles sans embâcle. Les embâcles latéraux et centraux sont plus répandus dans les zones où le chenal est plus large. Il est intéressant de constater que la médiane de la largeur des sections comprenant des embâcles occupant au moins 50 % de la largeur est inférieure à celle calculée pour les parcelles sans embâcle. Ainsi, les sections étroites semblent propices à l'accumulation du bois mort sous la forme d'embâcles totaux, d'embâcles partiels majeurs et d'embâcles composés de troncs affaissés transversalement.

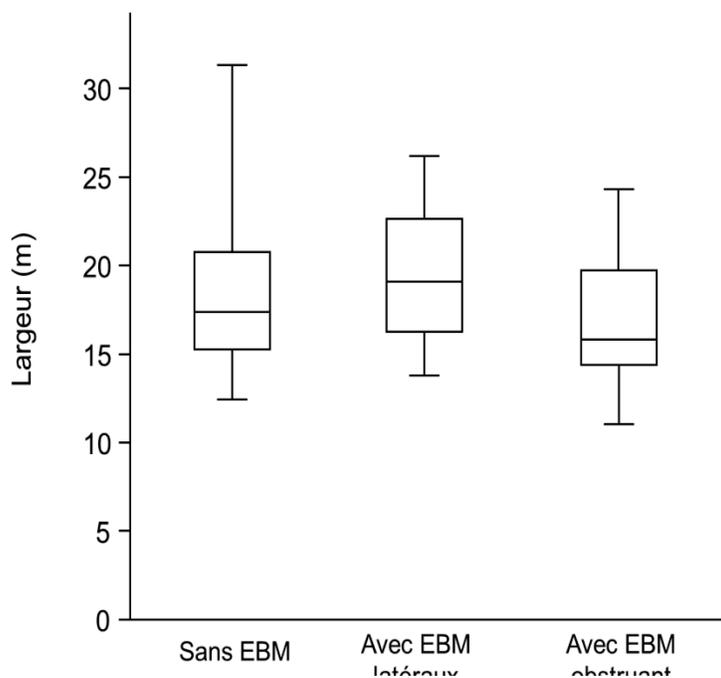


Figure 6.1.5. Comparaison des distributions statistiques de la largeur moyenne de l'unité B des parcelles sans embâcle, des parcelles avec embâcles latéraux et des parcelles avec embâcles obstruant la majorité de la section transversale

Tout comme pour l'unité divagante en amont, la faible profondeur de la rivière et la présence de nombreux seuils et bancs d'accumulation propices à l'accumulation du bois mort a été constatée dans le tronçon à méandres dynamiques. Sur les 36 embâcles partiels et latéraux de l'unité B, 7 étaient disposés sur un banc d'accumulation et 8 étaient localisés au pied d'une berge concave en érosion. Les 21 autres embâcles étaient formés par l'accumulation de débris dans une zone latérale de faible profondeur ou par des bois morts entremêlés dans la végétation riveraine ou dans des arbres affaissés. En outre, 74 % des embâcles répertoriés comprenaient du bois mort provenant directement de l'une des berges proximales. Bref, la faible profondeur, la présence de bancs d'accumulation et l'érosion des berges concaves des méandres favorisent l'accumulation du bois mort sous forme d'embâcles latéraux dans l'unité à méandres dynamiques. D'autre part, de l'accumulation sédimentaire a été observée sur l'une ou l'autre des berges de 29 % des embâcles de l'unité B, mais les données récoltées ne permettent pas d'attribuer ces zones d'accumulation directement à la présence des embâcles.

Par ailleurs, 66 % des embâcles de bois mort de l'unité B étaient localisés au-dessus d'une mouille. Il est possible que les embâcles aient causé le surcreusement du lit et la formation de mouilles (Abbe et Montgomery, 1996; Gurnell *et al.*, 2002; Montgomery *et al.*, 2003). Comme 2/3 des embâcles étaient associés à une mouille, il est fortement probable que le bois mort puisse affecter la distribution et la configuration des mouilles dans l'unité à méandres dynamiques. Mais, des travaux de terrain supplémentaires auraient été nécessaires pour déterminer le nombre de mouilles de surcreusement directement attribuables à la présence d'un embâcle de bois mort.

La pente moyenne de 0,0006 m/m calculée pour l'unité B est nettement inférieure à celle de 0,0043 m/m qui caractérise l'unité en amont. La réduction de la puissance spécifique induite par la rupture de pente dans l'unité B peut être en partie responsable des nombreuses accumulations de bois mort. Comme l'écoulement du cours d'eau y est moins compétent pour engendrer le transport du bois mort, le transfert du bois mort vers l'aval est

moins efficace ce qui favorise la formation d'embâcles (Keller et Swanson, 1979; Boivin et Buffin-Bélanger, 2010).

Ensuite, l'analyse de l'évolution temporelle du tracé fluvial de l'unité à méandres dynamiques entre 1963 et 2004 a permis de mettre en évidence un taux moyen annuel de migration latérale de 0,26 m. Bien que ce taux ne représente qu'environ la moitié du taux de recul annuel calculé pour l'unité A, il est tout de même considérable puisqu'il est responsable de l'érosion d'une superficie de plaine alluviale estimée à 95 522 m² sur une période de 41 ans. De plus, les 5 avulsions identifiées ont provoqué l'érosion d'une superficie de 16 359 m² durant la même période. La plaine alluviale de l'unité B présente beaucoup de formes topographiques négatives associées au morphodynamisme latéral du chenal (Lauzon, 2007; Demers et Buffin-Bélanger, 2011). Les bras de méandres abandonnés et les marques de recoupement de méandres sont facilement repérables par photo-interprétation (p. ex. voir figure 3.4.4). La diminution de la pente, la faible profondeur du chenal et la réduction de la granulométrie du lit et des berges (Demers et Buffin-Bélanger, 2011) sont des facteurs morphologiques favorisant les avulsions dans l'unité B (Hooke, 2004; John et Klein, 2004; Phillips, 2012).

Le recul annuel des berges et les avulsions sont certainement responsables d'une proportion importante du volume de bois mort acheminé dans le cours d'eau (p.ex. Keller et Swanson, 1979; Piégay *et al.*, 2005a; Boivin et Buffin-Bélanger, 2010). En considérant le coefficient de densité forestière calculé par Boivin et Buffin-Bélanger (2010) pour la rivière St-Jean, on peut estimer à 11 188 m³ le volume de bois mort transféré au cours d'eau entre 1963 et 2004 en raison du dynamisme morphologique de l'unité B, pour un taux 272,88 m³/an. À titre indicatif, le volume total compris dans les embâcles de bois mort de l'unité B est évalué à 1670 m³. Environ 81 % de ce volume sont concentrés dans les 3 embâcles extrêmes n^{os} 4925, 4960 et 8075.

La présence des 3 embâcles les plus importants de la rivière Neigette dans l'unité à méandres dynamiques semble être le reflet de la faible capacité de l'écoulement à redistribuer le bois mort vers l'aval. Aussi, ces embâcles sont localisés dans des segments

dont la configuration et la morphologie sont propices à l'accumulation des débris ligneux. Tout d'abord, l'embâcle extrême n° 8075 est situé dans une boucle de méandre située immédiatement après le plus long tronçon rectiligne de tout le tracé à l'étude qui s'étire sur environ 1 km. Il est probable que la linéarité, l'homogénéité de la largeur et de la profondeur et l'absence de bancs d'accumulation dans le segment précédent favorisent le transit de bois mort vers l'aval. Ainsi, le bois mort en transport lors des crues transite facilement dans le tronçon linéaire, mais il s'accumule dès le premier méandre. Sur les photographies aériennes, l'embâcle n° 8075 est perceptible à partir de 2001. On peut présager que l'embâcle s'est formé entre 1980 et 2001 (figure 6.1.6).

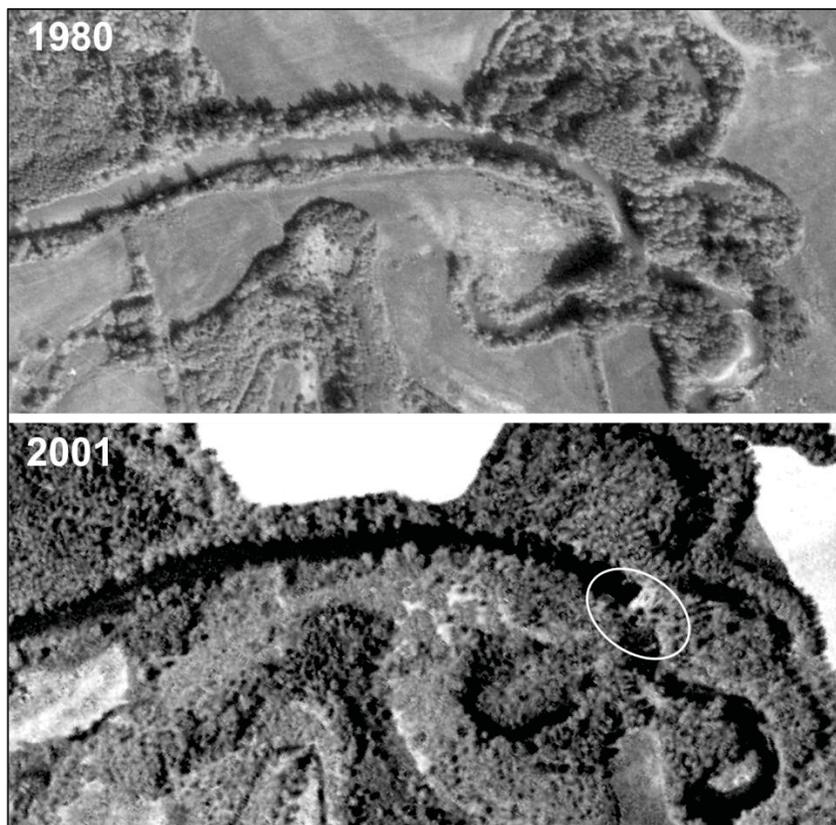


Figure 6.1.6. Embâcle extrême n° 8075 perceptible par photos aériennes à partir de 2001

Les embâcles extrêmes n^{os} 4925 et 4960 sont quant à eux localisés un en face de l'autre (figure 6.1.7). En analysant les photographies aériennes, on remarque que le recouplement d'un méandre a eu lieu à cet endroit entre 1980 et 2001. L'embâcle n^o 4960 est perceptible sur les images aériennes de 2001 et clairement visible sur les images de 2004 (figure 6.1.8). Il est localisé dans le nouveau segment initié lors du recouplement. Sur la photo de 2004, l'embâcle n^o 4960 semble être plus étendu vers l'aval qu'il ne l'est aujourd'hui. En effet, l'embâcle s'étire sur environ 75 m en 2004, alors que la longueur mesurée sur le terrain en 2013 était de 33 m. Entre 2004 et aujourd'hui, l'embâcle extrême a probablement provoqué la redirection de l'écoulement dans l'ancien chenal principal. Aujourd'hui, l'embâcle de bois mort n^o 4960 occupe la largeur totale du recouplement de sorte que l'écoulement s'effectue principalement dans le plus long segment en période d'étiage. Par ailleurs, l'embâcle n^o 4925 occupe la totalité de la largeur à l'endroit où le chenal diverge du segment recoupé (figure 6.1.8). La dérivation de l'écoulement et du bois mort en période de crue vers l'ancien chenal a pu entraîner l'accumulation du bois mort, puisque le chenal à cet endroit ne mesure qu'environ 15 m de largeur. L'embâcle n^o 4925 n'est toutefois pas perceptible par photos aériennes, probablement parce qu'il a été formé après 2004. Lors des campagnes de terrain, il a été constaté que l'embâcle n^o 4960 semblait plus vieux parce qu'il était partiellement colmaté par des sédiments fins et colonisé par la végétation, contrairement à l'embâcle n^o 4925 qui ne l'était pas.



Figure 6.1.7. Imagerie aérienne des embâcles n^{os} 4925 et 4960 obtenue avec le drone télécommandé en octobre 2013

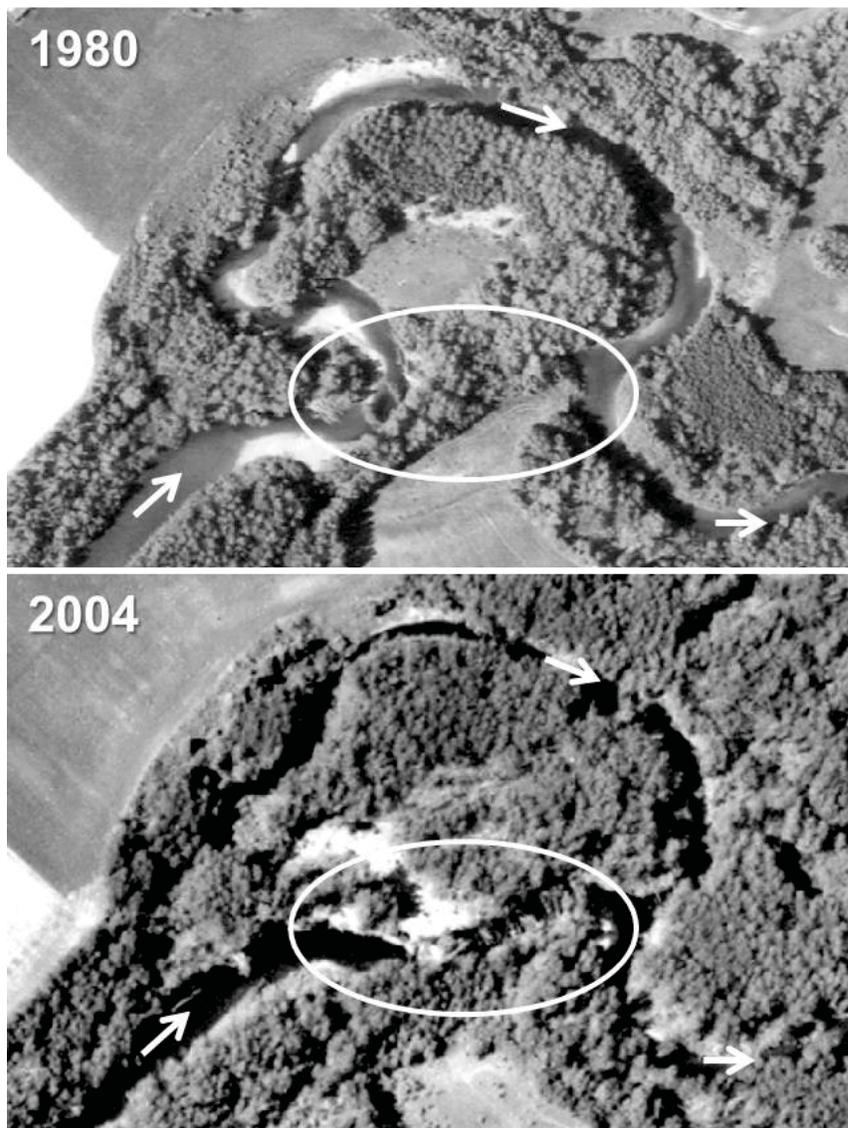


Figure 6.1.8. Recouplement d'un méandre et formation de l'embâcle extrême n° 4960 entre 1980 et 2004

Par ailleurs, l'analyse des capteurs de niveau d'eau situés en amont et en aval du tronçon comprenant 9 embâcles dont les embâcles extrêmes n^{os} 4925 et 4960 et du tronçon comprenant l'embâcle n° 8075 permet de visualiser le potentiel de rétention du bois mort dans ces 2 segments de l'unité à méandres dynamiques (B). Bien que les effets de la géométrie transversale et de la présence d'un couvert de glace durant les mois hivernaux

n'aient pu être quantifiés, l'étude des décalages entre les capteurs amont et aval permet de valider l'hypothèse de départ à propos des 3 scénarios proposés à la figure 4.2.10. En effet, en période de faible débit, la différence entre les niveaux d'eau en amont et en aval indépendamment du coefficient de pente (Z_{corr}) est pratiquement nulle, ce qui signifie que le bois mort n'a pas d'impact sur l'écoulement. Au cours du principal événement de crue enregistré durant la période de prise de données qui correspond à la crue printanière de 2013, on constate que le bois mort n'a aucun effet de refoulement, probablement parce que les embâcles sont majoritairement submergés. Par contre, lors des événements hydrologiques reliés à des précipitations liquides ou à un redoux des températures en hiver, on constate que le niveau d'eau en amont est supérieur à celui en aval vraisemblablement en raison de la présence du bois mort obstruant l'écoulement. Par ailleurs, l'atténuation de la réponse hydrologique induite par le bois mort a été mise en évidence par les temps de décalage résultant des corrélations croisées effectuées pour chaque événement hydrologique. De manière générale, les phases de refoulement sont plus longues dans le tronçon de 540 m avec 9 embâcles que dans le segment de 110 m comprenant l'embâcle n° 8075, possiblement en raison de la plus grande concentration de bois mort et de la plus grande distance entre les 2 capteurs. Par ailleurs, on observe des variations importantes entre les 2 sites selon les événements hydrologiques. Par exemple, l'événement B s'étant déroulé du 9 au 16 décembre 2012 était marqué par des pics de refoulement similaires dans le tronçon de 540 m (9 embâcles) et dans le tronçon de 110 m (embâcle n° 8075), respectivement de 0,67 m et de 0,68 m. Toutefois, l'événement F du 1^{er} au 4 avril 2013 présente des pics de refoulement très différents pour les 2 sites, soit de 0,18 m pour le tronçon de 540 m et 0,78 de part et d'autre du tronçon de 110 m. Dans le cas de l'événement F, il est possible que la présence d'un couvert de glace ait biaisé les données et engendré ces différences majeures entre les 2 séries de niveaux d'eau.

6.1.3 Unité à méandres stables (C)

L'unité C est caractérisée par une succession de méandres stables de grande amplitude incisant des dépôts marins argileux fortement cohésifs. Bien que cette section de 20 km représente 62 % de la longueur totale du tronçon à l'étude, elle ne comprend que 19 embâcles de bois mort, soit 18 % des embâcles relevés en 2013. Ainsi, l'unité C est caractérisée par environ un embâcle par km, ce qui est considérablement inférieur à la concentration de bois mort des 2 unités morphodynamiques en amont.

Dans les systèmes fluviaux caractérisés par la présence d'embâcles de bois mort, le volume de bois contenu dans le chenal diminue parallèlement à l'augmentation de la largeur et de la profondeur du chenal vers l'aval (Piégay *et al.*, 2005a; Gurnell *et al.*, 2002; Gurnell, 2013). En effet, le nombre d'embâcles compris dans tronçon de méandres stables (C) à l'aval est considérablement inférieur en raison notamment de l'élargissement du chenal. La largeur moyenne calculée pour l'unité C est de 21,8 m avec un écart-type de 4,1 m. La régression linéaire montre une augmentation progressive de la largeur du chenal vers l'aval (voir figure 5.1.4). De plus, la profondeur du chenal dans l'unité C est plus importante qu'en amont. La bathymétrie y est plus homogène de sorte qu'il n'y a pas de succession de seuils et de mouilles. Les seuils présents dans l'unité C sont uniquement localisés à la confluence des petits affluents agricoles et sont d'ailleurs perceptibles sur le profil en long (voir figure 5.1.6). Aucun embâcle n'a été observé sur ces seuils lors des inventaires de 2012 et de 2013. Comparativement aux unités A et B en amont, la proportion des embâcles mineurs et latéraux (47 %) comprise dans l'unité C diminue significativement au profit des embâcles moyens (32 %) et majeurs (21 %) obstruant la majeure partie de la section transversale. Les segments de faible profondeur et les bancs d'accumulation propices à la formation des embâcles latéraux sont moins fréquents qu'en amont. Par ailleurs, aucune zone d'accumulation sédimentaire sur les berges n'a été constatée à proximité des 18 embâcles de l'unité C en raison de l'encaissement du chenal qui réduit la connectivité avec la plaine alluviale.

De plus, l'encaissement du chenal de même que la hauteur et la verticalité des berges sont des facteurs défavorables à l'accumulation du bois mort en rivière (Keller et Swanson, 1979; Gurnell *et al.*, 2002; Piégay *et al.*, 2005a). Les 6 embâcles partiels et les 6 embâcles totaux de l'unité C étaient majoritairement formés de bois mort entremêlé dans des arbres riverains affaissés et ne semblaient pas toujours ancrés au lit. La largeur des parcelles comprenant des embâcles est significativement inférieure à celle des parcelles sans embâcle ($t = 2,78$; $p = < 0,01$) (figure 6.1.9). En analysant la largeur des parcelles de l'unité C comprenant des embâcles de bois mort, on constate que 89 % des embâcles sont localisés dans des segments dont la largeur est inférieure à la valeur médiane calculée pour les parcelles sans embâcle. Les segments étroits favorisent ainsi l'accumulation du bois mort dans l'unité à méandres stables.

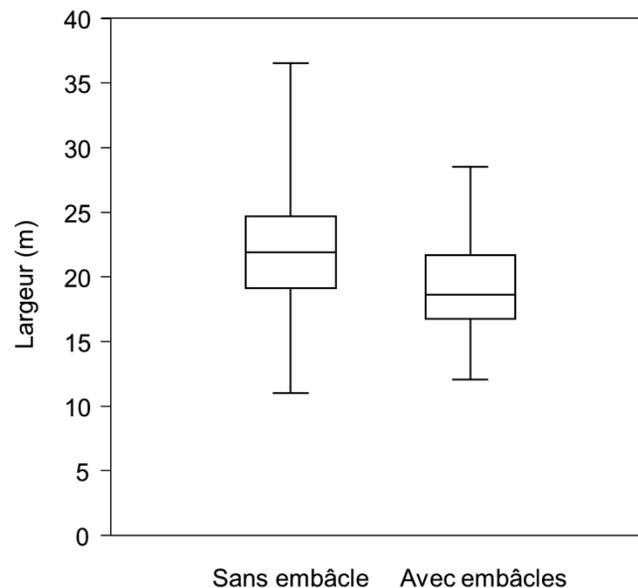


Figure 6.1.9. Comparaison des distributions statistiques de la largeur moyenne des parcelles de l'unité C sans embâcle et des parcelles avec embâcles

De plus, la proportion d'embâcles formés par des bois morts en provenance de l'amont est significativement plus importante dans l'unité C (47 %) que dans les unités A

(13 %) et B (25 %). Les débris ligneux sont plus efficacement transportés dans les chenaux larges et profonds (Gurnell *et al.*, 2002; Baillie *et al.*, 2008). Ainsi, la morphologie de l'unité C permet un transfert plus efficace des bois morts vers l'aval, ce qui peut expliquer qu'une plus grande proportion d'embâcles est formée de bois mort en transit s'accumulant dans des zones préférentielles, notamment les segments plus étroits.

Par ailleurs, la migration latérale des méandres stables n'a pas pu être calculée par l'analyse des tracés fluviaux historiques. Les taux de migration étaient négligeables et probablement inférieurs à la marge d'erreur liée au géoréférencement et à la numérisation des tracés fluviaux. La trajectoire morphologique de l'unité C semble très stable et ne permet de visualiser aucune avulsion ou recoupement de méandres pour la période couverte par l'imagerie aérienne soit entre 1963 et 2004. La cohésion des sédiments fins d'origine marine limite considérablement l'érosion des berges dans ce segment (Demers et Buffin-Bélanger, 2011). Les faibles taux d'érosion peuvent aussi expliquer la diminution de la proportion d'embâcles formés de débris de provenance proximale comparativement aux unités A et B. L'affaissement d'arbres riverains et la formation subséquente d'embâcles de bois mort sont moins propices en raison de la stabilité latérale de l'unité C.

Théoriquement, les impacts hydrogéomorphologiques du bois mort diminuent vers l'aval à mesure que la concentration de bois mort diminue et que le chenal s'élargit (Baillie *et al.*, 2008). La faible concentration d'embâcles dans l'unité C laisse effectivement présager que le rôle du bois mort sur la dynamique fluviale y est moindre comparativement aux unités A et B caractérisées par une densité élevée de bois mort. Dans le cadre de cette étude, il aurait été intéressant de mieux documenter les effets hydrogéomorphologiques induits par chaque embâcle pour être en mesure de décrire les patrons longitudinaux de l'influence du bois mort sur la dynamique fluviale.

6.2 DYNAMIQUE DES EMBÂCLES DE BOIS MORT

6.2.1 Dynamique spatiale du bois mort de l'amont vers aval

Tout d'abord, les embâcles de bois mort relevés en 2012 et en 2013 sont distribués spatialement selon des patrons longitudinaux similaires. Pour les deux inventaires, on constate une concentration des embâcles dans la portion amont du tronçon de 32,1 km à l'étude de la rivière Neigette. En 2013, 87 des 105 embâcles étaient répartis dans les deux unités morphosédimentaires les plus dynamiques situées dans les 12,2 km en aval de la chute. En d'autres mots, 83 % des embâcles de bois mort relevés étaient concentrés dans un segment n'équivalant qu'à 38 % du tronçon à l'étude. En 2012, l'inventaire n'a pas couvert les 2,4 premiers km de l'unité A. Malgré cela, 86 % des embâcles alors recensés étaient localisés dans les 2 premières unités.

En outre, on constate une diminution de la concentration d'embâcles de bois mort de l'amont vers l'aval. En 2013, l'unité divagante à chenaux multiples (A) en amont comprenait l'équivalent de 9,4 embâcles par km, tandis que l'unité à méandres dynamiques (B) était caractérisée par la présence de 6,2 embâcles par km. En aval, l'unité à méandres stables comprenait l'équivalent de seulement un embâcle par km. La plus grande densité d'embâcle est localisée au km 4 où 14 embâcles ont été relevés. La figure 6.2.1 présente la localisation des embâcles répertoriés en juillet 2013 selon le profil en long et le nombre d'embâcles par km de l'amont vers l'aval.

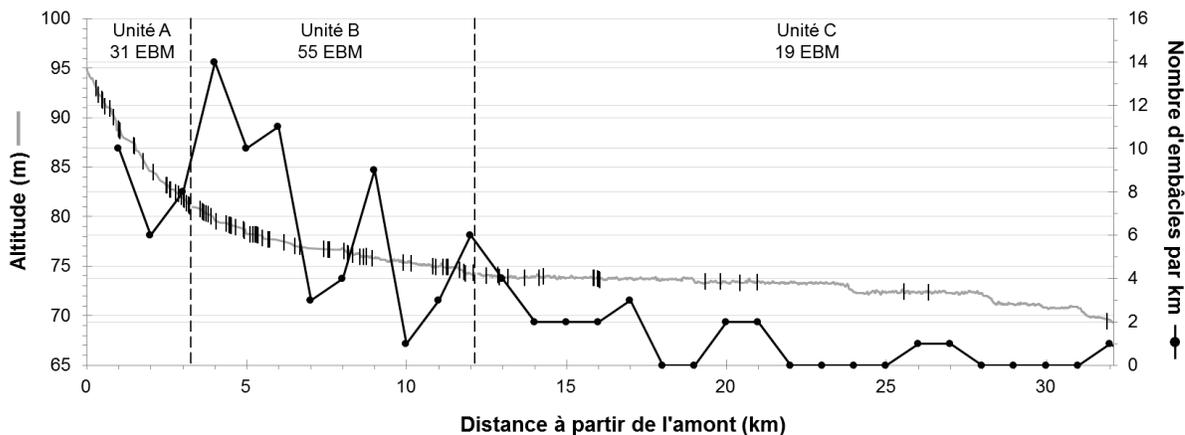


Figure 6.2.1. Distribution des embâcles de bois mort de 2013 sur le profil en long (traits noirs sur courbe grise) et variation longitudinale du nombre d'embâcles par km (courbe noire)

Les patrons de distribution des bois morts et leur recrutement varient selon le style fluvial et la dynamique hydrogéomorphologique (Piégay, 2003; Lassetre *et al.*, 2008). À l'échelle d'un bassin versant, la concentration des embâcles est généralement maximale dans les cours d'eau intermédiaires caractérisés par des segments de faible largeur et de faible profondeur et par une dynamique hydrogéomorphologique favorisant des taux importants de recrutement (Gurnell, 2003; Piégay, 2003; Baillie *et al.*, 2008; Seo *et al.*, 2010; Moulin *et al.*, 2011; Wohl et Beckman, 2014b). Dans la portion amont de la rivière Neigette, les zones de faibles profondeurs, les berges basses, les segments étroits, la forte sinuosité et la présence de structures rugueuses dans le lit mineur, comme des bancs d'accumulation et des îlots végétalisés, favorisent l'accumulation et la rétention du bois mort et sont en effet responsable de la formation de la majorité des embâcles partiels et latéraux dans les unités A et B. La fréquence de ces éléments morphologiques a d'ailleurs été identifiée par Moulin *et al.* (2011) pour expliquer la forte concentration de 21,5 embâcles par km recensée dans la portion amont de la rivière Roanoke en Caroline du Nord (É-U).

De nombreuses études sur la répartition spatiale du bois mort en rivière soulignent une diminution de la fréquence des embâcles avec l'élargissement progressif du chenal vers

l'aval (Bilby, 1984; Keller et Swanson, 1979; Piégay et Gurnell, 1997; Piégay *et al.*, 2005a; Montgomery *et al.*, 2003; Baillie *et al.*, 2008; Wolh et Jaeger, 2009; Moulin *et al.*, 2011). La réduction significative de la concentration d'embâcles de l'amont vers l'aval semble en effet être attribuable à l'augmentation de la largeur et de l'encaissement du chenal. À titre d'exemple, une réduction considérable a aussi été notée dans la portion aval de la rivière Roanoke (2,2 embâcles par km, comparativement à une moyenne de 11 par km) (Moulin *et al.*, 2011). Tout comme pour les derniers 20 km du tronçon à l'étude, le tronçon était caractérisé par une réduction du rapport largeur/profondeur comparativement à l'amont, par une augmentation de la hauteur des berges et par une réduction de la sinuosité du tracé. La configuration morphologique du chenal dans la portion aval de la rivière Neigette permet un transport plus efficace des débris vers l'aval et éventuellement leur transfert dans la rivière Mitis. La réduction de la connectivité entre la berge et le chenal en raison de l'encaissement réduit aussi les risques de formation d'embâcles latéraux (Moulin *et al.*, 2011).

Par ailleurs, la distribution des embâcles est étroitement associée au morphodynamisme de la rivière Neigette qui conditionne la dynamique de recrutement du bois mort. Les taux d'érosion importants calculés en amont du tronçon à l'étude sont nécessairement responsables en partie de l'importante densité d'embâcles de bois mort. Les recoupements de méandres et les avulsions qui caractérisent la dynamique morphosédimentaire de la portion amont du tronçon à l'étude génèrent des apports ponctuels dans le cours d'eau. Les arbres délogés, brisés ou déracinés à la suite d'un réajustement brusque du tracé fluvial contribuent au volume de bois disponible pour la formation d'embâcles (Phillips, 2012). À l'échelle d'un bassin versant, les tronçons caractérisés par des taux élevés de migration latérale sont souvent ceux renfermant les plus grands volumes de bois mort. Par exemple, Boivin et Buffin-Bélanger (2010) ont montré que la majorité des embâcles de bois mort de la rivière St-Jean en Gaspésie était située dans la portion amont correspondant à une importante zone de production de bois mort en raison de la mobilité latérale du cours d'eau. D'ailleurs, ce tronçon fortement dynamique serait responsable de la production du bois mort accumulé dans l'embâcle à l'embouchure

s'étirant sur plus de 3 km. Dans la portion aval de la rivière Neigette, la cohésion des sédiments argileux d'origine marine dans lesquels s'incise le chenal réduit considérablement l'érodabilité (Demers et Buffin-Bélangier, 2011), ce qui limite ainsi le recrutement du bois mort.

La diminution de la concentration d'embâcles dans l'unité B comparativement à l'unité A peut s'expliquer par une réduction du volume de bois mort acheminé au cours d'eau compte tenu des taux moins élevés de recul des berges. Dans le cadre de cette étude, il n'a pas été possible d'évaluer la proportion de bois mort accumulé dans le cours d'eau provenant de l'érosion des berges. Mais, on a pu constater une diminution de l'amont vers l'aval de la proportion d'embâcles associés à de l'érosion. Effectivement, 90 % des embâcles de l'unité A, 70 % de ceux de l'unité B et 60 % de ceux de l'unité C étaient associés à l'érosion d'au moins une berge. De plus, l'analyse de la provenance du bois mort composant les embâcles a révélé une augmentation vers l'aval de la proportion de bois mort en provenance de l'amont. Ainsi, la contribution du transport de bois mort en provenance de l'amont augmente en importance vers l'aval.

En raison des activités sylvicoles ayant eu lieu aux abords de la rivière Neigette dans les années 1970, la ripisylve est aujourd'hui majoritairement composée de peupliers faux-tremble (*Populus tremuloides*) matures approchant la fin de leur cycle vital (Lauzon, 2007). Il est reconnu que les zones riveraines caractérisées par des peuplements de spécimens âgés sont susceptibles de fournir de plus importants volumes de bois au cours d'eau, mais également de grandes pièces de bois propices au développement d'embâcles (Collins *et al.*, 2002, Curran, 2010). Whol et Beckman (2014b) ont étudié la répartition des embâcles de bois mort sur 16 rivières du Colorado et ont montré que les segments renfermant les plus importants volumes de bois mort étaient bordés de peuplements matures. En outre, la décimation de l'orme d'Amérique aux abords de la rivière Neigette en raison de la graphiose (Gauthier, 2009) a également pu accentuer les taux de recrutement de bois mort. Par conséquent, l'augmentation des taux de recrutement par la mortalité naturelle de

spécimens riverains au cours des dernières années pourrait être en partie responsable de la concentration importante d'embâcles de bois mort dans la rivière Neigette.

Le ratio entre la taille des débris ligneux et la taille du chenal dans lequel ils chutent constitue en facteur déterminant dans la formation des embâcles de bois mort dans les rivières intermédiaires (Keller et Swanson, 1979; Piégay et Gurnell, 1997; Gurnell *et al.*, 2002; Gurnell, 2003; Montgomery *et al.*, 2003; Moulin *et al.*, 2011; Wohl et Beckman, 2014b). Les peupliers faux-tremble à maturité qui bordent la rivière Neigette peuvent atteindre plus de 25 à 35 m de hauteur (MNR, 2014), ce qui est grandement supérieur à la largeur moyenne du chenal qui est de 20,95 m. Bien que les segments de largeur étroite soient plus répandus en amont, la taille des bois morts acheminés au cours d'eau peut surpasser la largeur du chenal sur l'ensemble du tronçon à l'étude et favoriser la formation d'embâcles (Baillie *et al.*, 2008). La chute d'arbres matures dans un cours d'eau est l'un des principaux facteurs initiant la formation d'un embâcle. En raison de la dimension et de leur poids, les gros débris s'ancrent facilement au lit et aux berges et agissent comme pièce maîtresse pour la rétention des débris plus petits en provenance de l'amont (Curran, 2010). De plus, l'affaissement d'arbres riverains avec leur souche favorise davantage l'ancrage du bois mort. Le rôle des gros débris ligneux dans l'initiation des embâcles est d'ailleurs mis en évidence dans le cas des embâcles qui se sont reformés aux sites n^{os} 8205 et 10930 après les démantèlements de l'automne 2012. Lors du démantèlement de ces embâcles, de grosses souches ancrées au lit n'ont pu être retirées avec la machinerie disponible. Ainsi, ces pièces de bois ont contribué à reformer les embâcles de bois mort aux mêmes endroits en ramassant des bois morts en transit. Il est aussi intéressant de noter qu'en raison de l'étendue latérale et de la robustesse de leurs branches, les essences feuillues, comme l'orme et le peuplier, s'entremêlent facilement à des éléments de rugosité ce qui favorise la formation d'embâcles (Montgomery, 2003).

Au cours des campagnes de terrain de 2012 et de 2013, une dizaine de barrages et de huttes de castor ont été observés dans le tronçon à l'étude (figure 6.2.2). Le peuplier faux-tremble qui domine largement la bande forestière riveraine constitue l'essence de

prédilection pour l'alimentation du castor. Indirectement, les castors contribuent à augmenter le volume de bois disponible pour la formation d'embâcles en augmentant le nombre de bois morts jonchés aux abords du cours d'eau (Smith *et al.*, 1993). En période de crue, les troncs rongés stockés sur la plaine d'inondation sont mis en transport. De plus, la dislocation de barrages de castors lors d'une crue peut provoquer la redistribution des débris ligneux vers l'aval (Therrien, 1997).

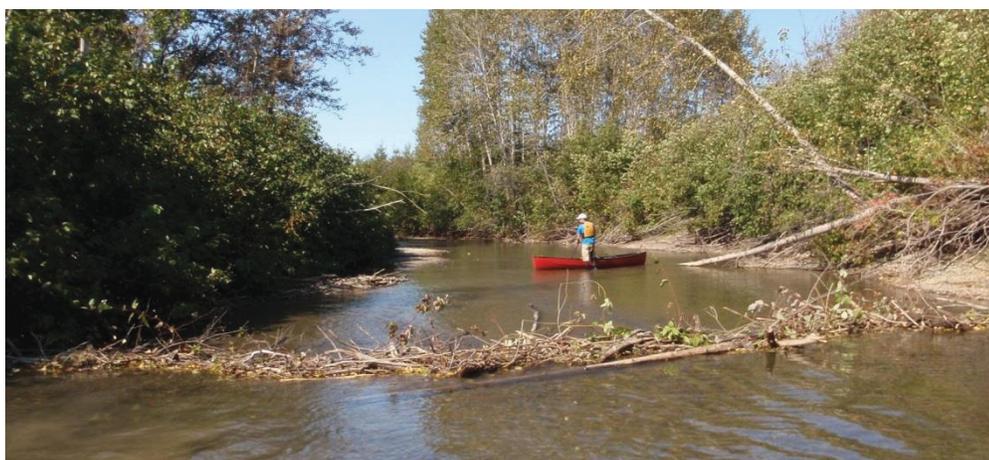


Figure 6.2.2. Barrage de castor relevé en 2012 à 8 520 m en aval de la chute Neigette

Pour synthétiser les constats précédemment exposés, la figure 6.2.3 présente un modèle de la dynamique de recrutement et des accumulations de bois mort de l'amont vers l'aval dans la rivière Neigette en relation avec les caractéristiques principales du chenal. Les tendances longitudinales de la magnitude de processus et des phénomènes sont présentées sur un axe relatif et sans échelle.

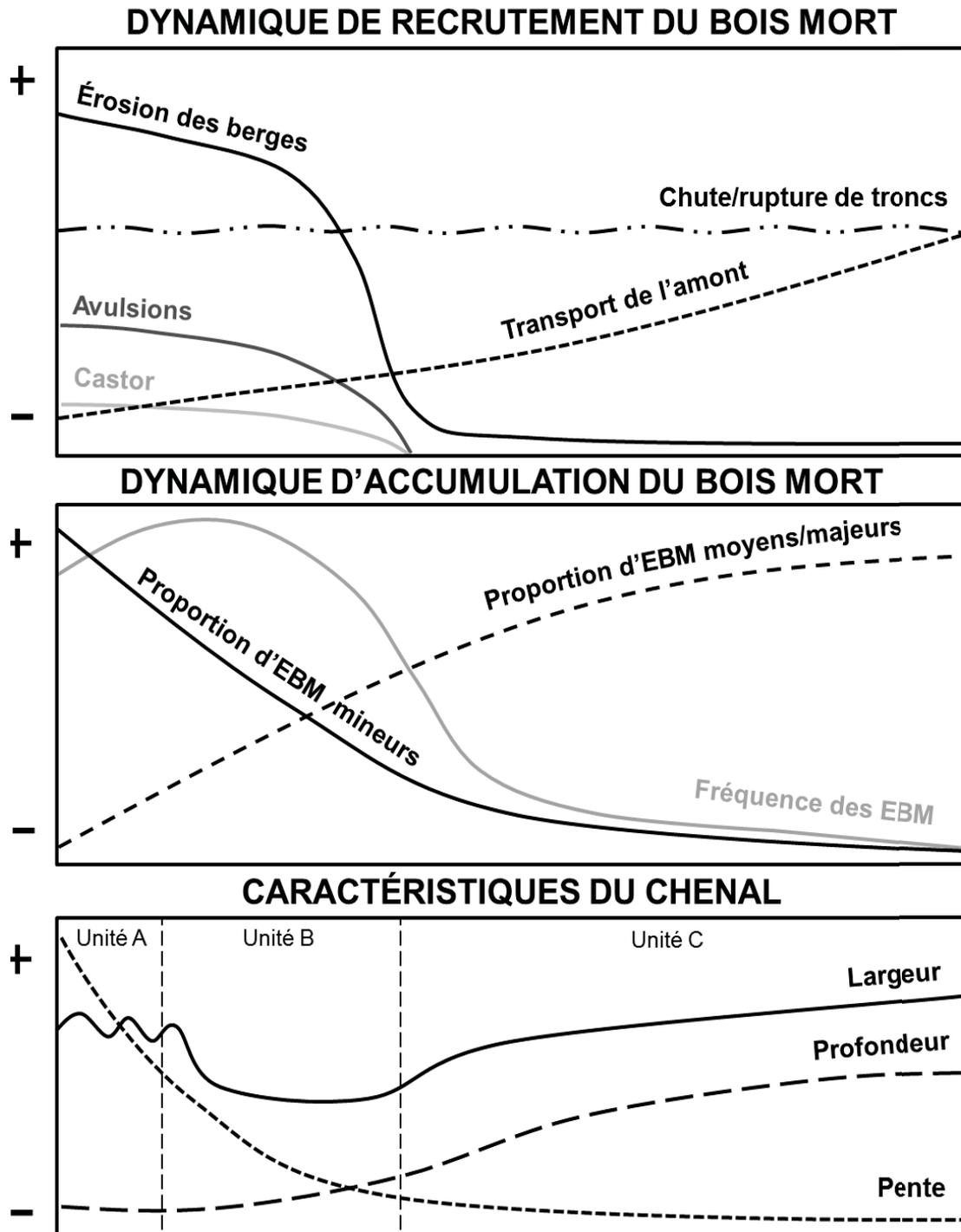


Figure 6.2.3. Modèle des dynamiques de recrutement et de l'accumulation du bois mort dans la rivière Neigette. (La magnitude des processus et des phénomènes est représentée sur un axe relatif et n'est pas à l'échelle.)

Il aurait été pertinent dans le cadre de ce projet de recherche de mieux comprendre la dynamique écologique de la ripisylve de la rivière Neigette. La quantification de la composition de la bande riveraine, l'analyse de la densité forestière, l'évaluation de la taille des spécimens riverains et l'étude de l'historique des perturbations écologiques auraient permis de mieux comprendre la dynamique de recrutement de bois mort dans le système fluvial. Le couplage de ces données aux taux d'érosion latérale qui ont été calculés aurait permis d'avoir une meilleure idée des volumes de bois mort acheminés dans le cours d'eau et de calculer un bilan ligneux relativement précis. L'analyse plus raffinée de la composition des embâcles de bois mort aurait aussi permis d'identifier les espèces les plus fréquemment observées dans le chenal. D'ailleurs, la quantification des souches rongées sur la bande riveraine et l'évaluation de la proportion de billots à l'extrémité biseautée accumulée dans la rivière auraient permis de mieux décrire l'impact des castors sur le recrutement et la rétention du bois mort.

La migration latérale et la chute naturelle de bois mort dans le cours d'eau sont les principaux facteurs de recrutement identifiés pour le tronçon à l'étude de la rivière Neigette. Pour comprendre l'ensemble de la dynamique de recrutement dans le tronçon à l'étude, il aurait été nécessaire de quantifier le bois mort en provenance de l'amont de la chute Neigette et des tributaires, dont la Petite rivière Neigette. À l'été 2013, une excursion a été effectuée dans le tronçon de la rivière Neigette compris entre le village de St-Marcellin et la chute Neigette. La campagne de terrain n'a permis de relater aucun embâcle de bois mort dans les 10 km en amont de la chute, ce qui laisse croire que les apports de bois mort en provenance de ce segment sont limités. Des démarches qui n'ont malheureusement pas abouti avaient été entreprises avec la Ville de Rimouski afin d'installer une caméra vidéo près de la station de pompage d'eau potable située à une centaine de mètres en aval de la chute Neigette. Elle devait surveiller en continu le transit du bois mort dans la rivière. Un tel suivi aurait permis de quantifier le volume de bois mort en provenance de la partie supérieure du bassin versant qui est acheminé au tronçon à l'étude. Les séquences vidéos sont très efficaces pour l'étude du transit des bois morts à l'échelle d'une section transversale (MacVicar *et al.*, 2009). De plus, une descente en canot

sur les 10 derniers km de la Petite rivière Neigette, principal affluent de la Neigette, a permis d'observer 9 embâcles de bois mort mineurs à l'été 2013. Des travaux supplémentaires auraient été nécessaires pour quantifier les apports annuels en bois mort en provenance de la Petite rivière Neigette.

6.2.2 Dynamique interannuelle du bois mort

La comparaison des résultats des inventaires des embâcles de 2011, de 2012 et de 2013 met en évidence la dynamique et la mobilité interannuelle du bois mort dans la rivière Neigette. En juillet 2013, 28 % des embâcles relevés sur les 26,1 km du tronçon inventorié en septembre 2012 (20 embâcles) avaient été redistribués ou évacués du système. De plus, 40 % des embâcles relevés en 2013 (35 embâcles) s'étaient récemment formés puisqu'ils n'avaient pas été répertoriés en 2012. Sur le tronçon d'environ 11,5 km caractérisés par les techniciens de la MRC de la Mitis en 2011, l'inventaire de 2012 a révélé l'évacuation de 7 des 27 embâcles initialement recensés et la formation de 35 nouveaux embâcles.

Les phases de transport du bois mort en rivière sont conditionnées par le régime hydrologique et par la relation entre les propriétés physiques des débris (dimension, forme, densité, orientation) et la taille du cours d'eau (Braudrick et Grant, 2000; Curran, 2010; Seo *et al.*, 2010). À l'échelle d'un bassin versant, le bois mort devient mobile dans les segments fluviaux de taille intermédiaire en raison de l'élargissement du chenal et de l'augmentation de la puissance hydraulique (Seo et Nakamura, 2009; Wohl et Jaeger, 2009). Théoriquement, le bois mort en rivière est transporté durant les crues, puis il est déposé sur le lit ou contre des éléments de rugosité quand le débit diminue et n'est plus suffisamment compétent pour le transport (Seo et Nakamura, 2009). Les différences majeures observées dans la distribution spatiale des embâcles entre l'automne 2011 et l'été 2013 montrent que le régime hydrologique de la rivière Neigette est marqué par des phases où le volume d'eau est suffisant pour initier la flottaison et la redistribution des bois morts.

La mobilité du bois mort est bien documentée dans les cours d'eau de montagne et les grandes rivières (p. ex. Seo *et al.*, 2010; Wohl et Beckman, 2014b), mais un nombre limité d'études s'intéressent à la dynamique temporelle dans les cours d'eau de taille intermédiaire. Toutefois, l'étude de Curran (2010) réalisée sur la rivière San Antonio au Texas, dont la largeur varie entre 25 et 40 m, souligne le dynamisme des embâcles de bois mort dans un cours d'eau de taille comparable à celle de la Neigette. En 2003, 73 embâcles de bois mort avaient été relevés sur un tronçon de 72 km. Lors d'un second inventaire en 2007, l'auteur a dénombré 142 embâcles, soit près du double de la concentration initiale. De plus, tous les embâcles recensés 4 ans plus tôt avaient été mobilisés ou avaient subi d'importants changements morphologiques. Le bois mort composant les embâcles évacués a été redistribué sous la forme de multiples embâcles mineurs, de sorte que le volume global de bois mort dans la rivière San Antonio n'a pas significativement augmenté entre 2003 et 2007. En outre, le plus important débit enregistré sur la rivière San Antonio durant la période d'étude n'était que de 10 % supérieur au débit maximal moyen. Ainsi, les variations du patron de distribution du bois mort sont attribuables au régime hydrologique normal sans événement de magnitude exceptionnelle. Les travaux de Curran (2010) soulignent la mobilité à moyen terme du bois mort dans les rivières intermédiaires et laissent présager qu'un suivi temporel plus étendu sur la rivière Neigette permettrait de mettre en évidence la mobilité de la majorité des embâcles.

Le régime hydrologique de la rivière Neigette est marqué par un pic de crue au printemps relié essentiellement à la fonte du couvert nival (voir figure 3.2.1). La mobilité du bois mort est donc généralement maximale durant les mois d'avril et de mai, puisque l'augmentation du débit favorise la flottabilité et le transport des débris ligneux. En analysant les photos obtenues avec les caméras de surveillance disposées en bordure de la rivière, on constate que le bois mort est seulement mobile en période de haut niveau d'eau au printemps (figure 6.2.4). L'analyse de l'ensemble des séquences d'imagerie *in situ* disponible entre l'automne 2012 et le printemps 2014 n'a pas permis de déceler du bois mort en transit hormis durant les crues printanières. Ainsi, les crues printanières de 2012 et

de 2013 sont probablement les seuls événements hydrologiques ayant contribué à modifier le patron de distribution de bois mort en rivière durant la période d'étude.



Figure 6.2.4. Images transmises à 30 minutes d'intervalle par la caméra de surveillance en amont de l'embâcle extrême n° 8075 soulignant le transport du bois mort en période de crue

Par ailleurs, il est reconnu que les événements hydrologiques de magnitude extrême et de faible récurrence peuvent provoquer une reconfiguration majeure du patron de distribution du bois mort accumulé dans un système fluvial (p. ex. Piégay et Gurnell, 1997; Moulin et Piégay, 2014; Boivin *et al.*, 2014). En effet, les niveaux d'eau exceptionnels peuvent engendrer la mise en transport de bois mort accumulé dans le lit majeur rarement inondé et les forts débits peuvent disloquer des embâcles dont l'ancrage était normalement suffisant pour assurer leur stabilité. Dans les tronçons alluviaux ou semi-alluviaux, les ajustements morphosédimentaires associés aux crues extrêmes peuvent aussi accroître le recrutement de bois mort par érosion et par avulsions. À titre d'exemple, Boivin et Buffin-Bélanger (2013) ont noté des différences majeures dans le patron de distribution du bois mort de la rivière Saint-Jean en Gaspésie à la suite de la crue historique de décembre 2010. À l'été 2010, 97 embâcles avaient été recensés sur un tronçon de 60 km. À l'été 2011, le nombre d'embâcles avait pratiquement triplé pour un total de 288, principalement en raison du captage des bois morts accumulés sur le lit majeur et des ajustements

morphosédimentaires occasionnés par la crue. De plus, Moulin et Piégay (2004) ont étudié la dynamique à long terme du bois mort accumulé dans le Rhône et ont aussi convenu que les phases de recrutement et de bouleversement du patron de distribution des embâcles de bois mort sont fortement corrélées avec le débit : plus il est élevé, plus la mobilité du bois est importante. De même, pour deux événements hydrologiques rapprochés et de magnitude similaire, le second génère significativement moins de bois mort, puisque le premier événement « nettoie » le chenal de ses débris ligneux et qu'un certain laps de temps est nécessaire pour rétablir la disponibilité du bois mort.

Dans le cas de la rivière Neigette, les crues printanières de 2012 et 2013 n'ont pas été exceptionnelles d'un point de vue hydrologique. Comme les données de débit de la rivière Neigette sont seulement disponibles pour une période limitée entre 1975 et 1997, les données hydrologiques de la Petite rivière Neigette ont été analysées pour évaluer la magnitude des crues de 2012 et de 2013. Les valeurs moyennes journalières du débit proviennent de la station 021916 du CEHQ située à environ 6 km en amont de la confluence avec la rivière Neigette. Pour la période couverte par la série de données, soit de 2001 à 2013, le débit journalier maximal atteint annuellement est d'en moyenne 19,88 m³/s. La figure 6.2.5 montre l'histogramme des valeurs maximales du débit moyen journalier entre 2001 et 2013. On constate que les débits maximaux de 2012 et de 2013, respectivement de 15,68 et de 17,18 m³/s, sont en dessous de la moyenne. Le régime hydrologique de la Petite rivière Neigette n'a pas subi de crue exceptionnelle depuis le début de l'étude, ce qui suggère que c'est également le cas pour la rivière Neigette.

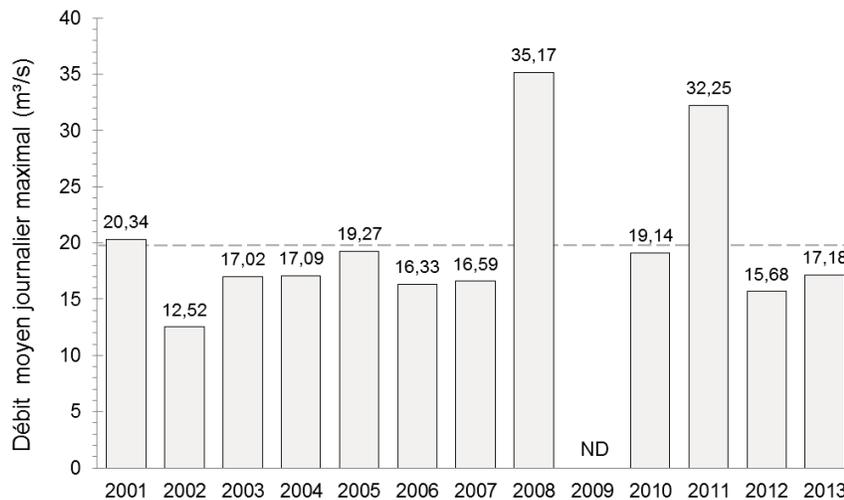


Figure 6.2.5. Histogramme du débit moyen journalier maximal enregistré sur la Petite rivière Neigette entre 2001 et 2013. (Le trait en pointillé correspond à la valeur moyenne de 19,88 m³/s.)

De plus, la durée des événements hydrologiques favorables au transport du bois mort en rivière est également un facteur qui détermine la magnitude des variations dans la distribution des embâcles dans un système fluvial (Gurnell, 2013). La figure 6.2.6 montre le nombre de jours par année depuis 2001 où un débit moyen supérieur à 10 m³/s a été enregistré à la station hydrométrique de la Petite rivière Neigette. Pour les années 2012 et 2013, on remarque qu'un débit moyen journalier supérieur à 10 m³/s n'a été atteint respectivement qu'à 7 et à 13 reprises, ce qui est en dessous de la moyenne annuelle de 14,7 jours. Ainsi, on peut présager que la rivière Neigette n'a pas été marquée par des événements hydrologiques majeurs de longue durée durant la période à l'étude.

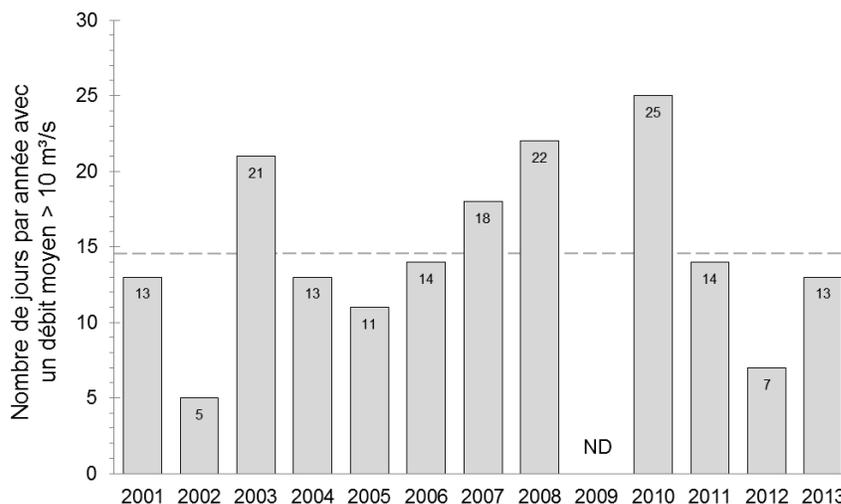


Figure 6.2.6. Histogramme du nombre de jours par année où un débit moyen supérieur à $10 \text{ m}^3/\text{s}$ a été enregistré sur la Petite rivière Neigette entre 2001 et 2013. (Le trait en pointillé correspond à la valeur moyenne de 14,7 jours par année.)

À la lumière des analyses du régime hydrologique de la Petite rivière Neigette, on peut présager qu'aucune crue exceptionnelle n'a marqué la rivière Neigette durant la période d'étude et que les variations observées dans la distribution des embâcles de bois mort entre les inventaires de 2011, de 2012 et de 2013 sont attribuables à la dynamique hydrogéomorphologique normale du système fluvial. Toutefois, l'analyse des tracés fluviaux historiques réalisée pour le tronçon à l'étude de la rivière Neigette souligne le dynamisme à long terme de la rivière Neigette. Les taux importants de migration latérale, les avulsions, les recouvrements de méandres et les nombreux milieux humides hérités de la dynamique latérale témoignent du potentiel morphogène des crues de la rivière Neigette. Une inondation majeure accompagnée de recouvrements de méandres et d'avulsions pourrait engendrer des pics de production et de transport du bois mort, comme ce fut le cas sur la rivière St-Jean en 2013 (Boivin et Buffin-Bélanger, 2013; Boivin *et al.*, 2014).

Par ailleurs, l'analyse statistique des variations interannuelles du nombre d'embâcles par niveau montre que les embâcles moyens et majeurs sont proportionnellement aussi dynamiques que les embâcles mineurs, même s'ils sont moins nombreux. Entre 2011 et

2013, 8 nouveaux embâcles majeurs ont été formés alors que 3 ont été évacués. La dynamique hydrogéomorphologique de la rivière Neigette en période de crue printanière permet ainsi la mobilité et la reconfiguration des embâcles majeurs. L'étude de Curran (2010) sur la rivière San Antonio avait également souligné le dynamisme temporel des embâcles majeurs s'étendant au-delà de la largeur plein-bord, puisque tous les embâcles majeurs avaient été redistribués en l'espace de 4 ans.

Cependant, les embâcles de niveau extrême n^{os} 4925, 4960 et 8075 constatés sur le terrain depuis 2011 sont d'une ampleur contrastante par rapport aux autres embâcles recensés sur la Neigette. Les embâcles très volumineux peuvent persister beaucoup plus longtemps que les embâcles mineurs qui sont dynamiques au fil des crues (Piégay et Gurnell, 1997). Dans les systèmes fluviaux intermédiaires caractérisés dont les crues morphogènes sont relativement rares, les embâcles de bois mort peuvent persister durant les décennies (Wohl et Beckman, 2014b). En Colombie-Britannique, Keller et Tally (1979) ont étudié des embâcles de taille considérable dont la formation remonte à plus de 200 ans. L'analyse des photographies aériennes révèle que la formation des 3 embâcles extrêmes de la rivière Neigette est relativement récente (n^o 4925 = après 2004; n^{os} 4960 et 8075 = entre 1980 et 2001). Compte tenu de leur volume et de leur ampleur par rapport à la taille du chenal, ces embâcles vont sans doute persister durant plusieurs décennies, à moins d'un événement hydrologique extrême. La datation au carbone 14 des bois morts composant ces embâcles serait pertinente pour reconstituer leur origine (Hyatt et Naiman, 2001; MacVicar *et al.*, 2009). Toutefois, cette méthode s'avère peu efficace pour les essences de la famille des salicacées, comme en fait partie le peuplier (*Populus sp.*), dont la croissance est peu influencée par les variations climatiques saisonnières et qui sont caractérisées des taux de décomposition rapide (MacVicar *et al.*, 2009). D'éventuelles analyses dendrochronologiques devraient ainsi être dirigées vers des bois morts d'essence résineuse ou de bois dur.

Par ailleurs, l'analyse de la mobilité du bois mort ne révèle pas de différence significative entre les unités morphodynamiques, ce qui souligne que les embâcles sont

dynamiques indépendamment du style fluvial. Toutefois, l'inventaire des embâcles réalisé en 2012 ne couvrait que 27 % de l'unité divagante à chenaux multiples (A) et que 82 % de l'unité à méandres stables (C). La comparaison de la distribution interannuelle des embâcles de bois mort répartis sur la totalité du tronçon à l'étude pourrait permettre de mieux cerner la dynamique temporelle du bois mort dans chaque unité morphodynamique.

De plus, l'augmentation du nombre d'embâcles révélée en 2012 dans le tronçon de St-Donat et en 2013 pour un segment de 26,1 km n'est pas nécessairement le reflet d'une augmentation du volume de bois mort recruté dans le chenal, mais elle peut être liée à la redistribution du bois mort sous la forme d'embâcles plus petits, mais plus fréquents. L'analyse approfondie des volumes annuels de bois mort recruté, accumulé et évacué permettrait de quantifier un bilan ligneux et de mieux comprendre la dynamique temporelle des embâcles de bois mort de la rivière Neigette.

Concernant les 52 embâcles caractérisés à la fois entre 2012 et 2013, 10 ont augmenté, 21 ont diminué et 21 sont demeurés stables. L'analyse des données de volume corrigé, du nombre de bois morts, du pourcentage d'obstruction et les photographies des embâcles n'a permis l'évaluation des changements dans la configuration des embâcles entre 2012 et 2013 que sur une base qualitative. Au départ, l'hypothèse était que la comparaison des volumes corrigés calculés pour les 2 années allait permettre d'évaluer de manière relativement précise l'évolution interannuelle des embâcles. Mais, les mesures de volume corrigé ne sont pas assez précises pour déterminer de manière adéquate l'évolution temporelle des embâcles, notamment puisqu'elle ne considère pas leur densité. Pour mieux décrire la variabilité interannuelle des embâcles individuels, des méthodes alternatives pourraient être envisagées. Par exemple, l'utilisation d'un LiDAR terrestre ou la récolte de données photométriques à différents intervalles permettrait de générer des modèles numériques d'élévation à très haute résolution qui pourraient être comparés.

De plus, les photos prises avec les caméras de surveillance installées à proximité des 3 embâcles extrêmes n'ont pas permis de décrire quantitativement leur évolution temporelle. L'extraction de données quantitatives des images provenant des caméras *in situ*

aurait notamment nécessité des mesures précises de l'angle de vue de l'appareil et de l'échelle des images. Mais, l'analyse qualitative des séries de photos confirme que les embâcles n^{os} 4925, 4960 et 8075 n'ont pas subi de modifications majeures entre l'automne 2012 et le printemps 2014.

L'analyse de l'imagerie à très haute résolution obtenue avec le drone télécommandé peut s'avérer une voie adéquate pour le suivi interannuel d'embâcles de bois mort (p.ex. MacVicar *et al.*, 2009). Mais, pour décrire précisément l'évolution temporelle des embâcles, un grand nombre de points de contrôle sur le terrain géolocalisés au D-GPS serait nécessaire. Dans le cadre de ce projet, le faible nombre de repères a engendré des déformations et des problèmes d'échelle qui ne permettaient pas de superpositionner convenablement les séries d'images. Le géoréférencement d'images à haute résolution et à petite échelle est d'ailleurs beaucoup plus complexe que les images aéroportées couvrant un grand territoire. Surtout quand on s'intéresse à un petit objet, la marge d'erreur doit être la plus faible possible.

Par ailleurs, l'utilisation de transpondeurs passifs (*PIT-tags*) ou de radiotransmetteurs aurait permis de suivre le déplacement de bois morts témoins et de combler le manque de connaissance sur la redistribution du bois mort lors des crues (MacVicar *et al.*, 2009). Un tel suivi permettrait de définir des seuils de mobilité en relation avec les propriétés physiques des débris et les conditions hydrologiques de la rivière Neigette. Une analyse à plus long terme de la mobilité permettrait aussi d'évaluer le temps de résidence des bois morts dans le corridor fluvial de la Neigette.

6.3 EFFETS DU DEMANTELEMENT D'EMBACLES SUR LA DYNAMIQUE FLUVIALE

Le démantèlement d'un embâcle de bois mort dans un tronçon alluvial entraîne des changements morphologiques dont l'intensité dépend du volume de bois mort retiré, de la configuration géomorphologique du site et du régime hydrologique qui conditionne la redistribution des sédiments de fond (p.ex. Macdonald et Keller, 1987; Smith *et al.*, 1993a; Díez *et al.*, 2000). Les ajustements morphologiques peuvent débiter immédiatement après les travaux, mais ils sont généralement plus intenses en période de fort débit (Smith *et al.*, 1993a ; Klein *et al.*, 1997). Même en période d'étiage, la capacité de l'écoulement est généralement suffisante pour initier le transport des sédiments fins qui étaient retenus par les débris ligneux et les acheminer vers l'aval (Smith *et al.*, 1993b). Lors du démantèlement des embâcles n^{os} 12010 (mineur), 8205 (moyen) et 10930 (majeur) sur la rivière Neigette, l'augmentation de la turbidité de l'eau et la migration de sédiments fins avaient d'ailleurs été observées (Denis *et al.*, 2013). Toutefois, la mobilisation des sédiments plus grossiers nécessite un écoulement compétent. Il est fort probable que les ajustements morphologiques constatés par la comparaison des relevés topographiques réalisés avant et après le démantèlement des 3 embâcles se soient principalement déroulés lors de la crue printanière de 2013.

Tout d'abord, la cartographie des variations topographiques du site n^o 12010 (voir figure 5.3.3) montre une zone d'incision au niveau du transect 7, soit immédiatement en amont du bois mort transversal qui était appuyé sur lit. Le tronc avait comme effet de retenir une certaine quantité de sédiments fins et son retrait a permis leur redistribution vers l'aval et possiblement leur accumulation vers la berge gauche au niveau du transect 8. Les volumes érodés en amont et accumulés en aval sont d'ailleurs similaires : respectivement 1,28 m³ et 1,45 m³. En outre, le surcreusement d'une mouille localisée vers la berge droite immédiatement en aval de l'embâcle a été constaté. Il est reconnu que la réduction de la rugosité induite par le retrait du bois mort a pour effet d'augmenter la vitesse au niveau du lit (p. ex. Smith *et al.*, 1993b; Keller et Macdonald, 1995; Lisle, 1995; Daniels et Rhoads, 2007). Il est ainsi probable que le renforcement du cisaillement causé par le retrait de

l'embâcle n° 12010 ait pu provoquer le surcreusement de la mouille. Par ailleurs, l'embâcle avait comme effet de concentrer l'écoulement vers la rive droite et d'amplifier l'érosion de la berge. Le relevé topographique réalisé en 2013 permet plutôt de constater de l'accumulation sédimentaire vers la rive droite où se situait l'embâcle ainsi qu'en aval. La redistribution de l'écoulement sur l'ensemble de la section transversale à la suite du retrait du bois mort semble avoir atténué le recul de la berge droite et même favorisé la sédimentation.

Des 3 embâcles démantelés, le site de l'embâcle mineur n° 12010 est celui qui présente le moins de changements morphologiques. Théoriquement, la magnitude des impacts hydrogéomorphologiques liés au retrait du bois mort est proportionnelle à la taille de l'embâcle retiré (Bilby, 1984; Shields et Smith, 1992; Smith *et al.*, 1993a; Daniels et Rhoads, 2007). Comme l'embâcle n° 12010 était le plus petit des embâcles démantelés, les effets sur la morphologie du chenal sont limités. De plus, l'embâcle n° 12010 est localisé près de la zone de transition entre les unités B et C. Ainsi, la cohésion accrue des sédiments fins d'origine marine vers l'aval peut aussi possiblement expliquer la faible réponse morphosédimentaire enregistrée à la suite de l'intervention.

Ensuite, la cartographie des variations du niveau du lit du site n° 8205 (voir figure 5.3.4) met en évidence l'aggradation du lit au droit de l'embâcle retiré. En aval de l'embâcle, le lit est plutôt en incision. L'embâcle n° 8205 occupait la totalité de la section transversale et était formé de débris enchevêtrés contre une souche ancrée au lit vers la berge gauche. Au centre du chenal, les bois morts avaient pour effet de diriger et de concentrer l'écoulement vers le lit. L'aggradation au niveau de l'embâcle retiré semble être le reflet de la diminution du cisaillement provoqué par une redistribution de l'énergie hydraulique sur l'ensemble du profil vertical. Ainsi, la fosse de surcreusement se trouvant sous l'embâcle aurait été remblayée. De plus, l'incision en aval de l'embâcle (transects 9 et 10) peut être attribuée au transfert vers l'aval des sédiments qui s'accumulaient tout juste après la mouille. D'ailleurs, à une dizaine de mètres en aval (transects 11 et 12), on constate que le lit du chenal est en partie surélevé par rapport au relevé topographique pré-

démantèlement, probablement en raison de la migration des sédiments qui s'accumulaient à la sortie de la fosse de surcreusement. Bref, on observe une uniformisation des profondeurs du lit où était situé l'embâcle, soit entre les transects 7 et 10. L'homogénéisation des profondeurs et le remplissage des mouilles de surcreusement sont des impacts reconnus du retrait du bois mort en rivière (p.ex. Smith *et al.*, 1993a; Diez *et al.*, 2000). La figure 6.3.1 illustre l'évolution de la morphologie du lit à la suite du démantèlement de l'embâcle n° 8205.

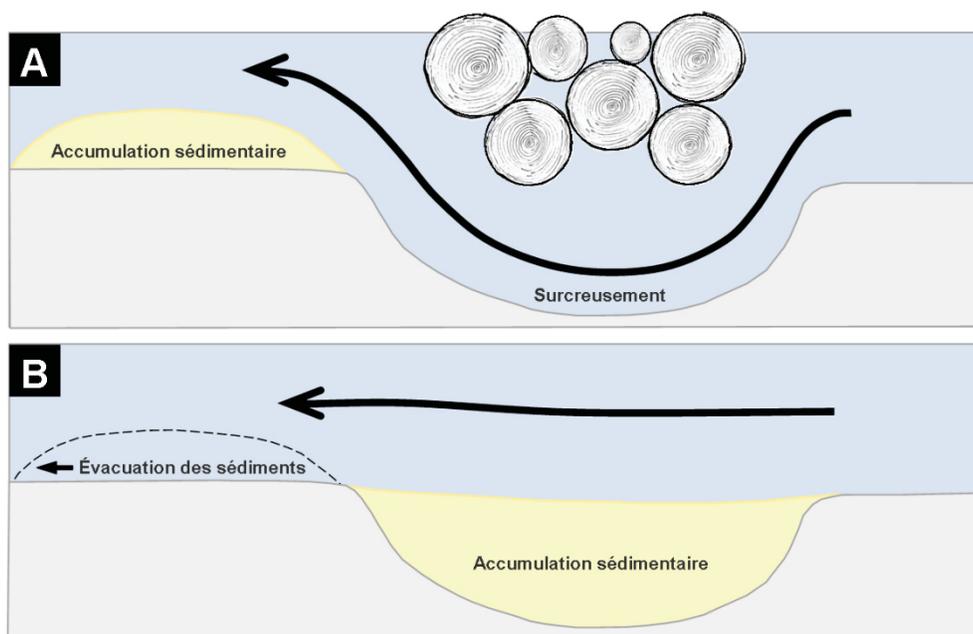


Figure 6.3.1. Schéma de la morphologie du lit avant (A) et après (B) le démantèlement de l'embâcle n° 8205

Quant à la topographie du site de l'embâcle majeur n° 10930, elle présente relativement peu de changements à la suite du démantèlement (voir figure 5.3.5). Mais, on constate le recul de la berge au niveau de l'embâcle, entre les transects 5 et 7. Ce segment était déjà en érosion avant le démantèlement. L'embâcle semblait d'ailleurs avoir été formé par la chute d'arbres riverains en provenance de cette berge. La réduction de la rugosité

induite par le retrait des bois morts a possiblement eu pour effet d'accroître localement la vitesse et d'accentuer l'érosion (Bilby, 1984; Lisle, 1995; Chin *et al.*, 2002). De plus, les débris ancrés au lit qui n'ont pu être retirés lors de l'opération pourraient concentrer l'écoulement vers cette berge. Par ailleurs, le lit du chenal présente une légère tendance à l'aggradation à l'endroit où était situé l'embâcle (transects 5, 6 et 7), mais aussi en aval (transects 8 et 9). Comme pour le retrait de l'embâcle moyen n° 12010, l'accrétion verticale d'environ 25 cm peut s'expliquer par le remblaiement de la fosse de surcreusement qui était entretenue par l'amas de bois mort. La redistribution de la vitesse sur l'ensemble du profil vertical et la diminution de la turbulence au niveau du lit ont pu favoriser l'accumulation sédimentaire au droit et en aval de l'embâcle démantelé. De plus, le barrage de castor formé à l'été 2013 est associé à une importante zone d'érosion dont le volume sédimentaire évacué est estimé à 81,65 m³. Les barrages de castors obstruant complètement le profil transversal ont généralement pour effet de favoriser l'accumulation en bloquant physiquement le transit sédimentaire (Pollock *et al.*, 2007; Riggsbee *et al.*, 2013; Curran et Cannatelli, 2014). Dans le cas présent, le barrage occupait environ 75 % de la largeur du chenal et concentrait l'écoulement vers la rive droite. L'augmentation de la turbulence induite en amont du barrage partiel a possiblement provoqué la mise en transport des sédiments de fond et l'érosion progressive du lit et des berges (Curran et Cannatelli, 2014). En aval, les courants de recirculation et la turbulence ont également pu causer le surcreusement du lit, phénomène morphologique couramment observé directement en aval des embâcles de bois mort et des barrages de castor (Abbe et Montgomery, 1996; Pollock *et al.*, 2007; Abbe et Montgomery, 2003; Gurnell, 2013; Riggsbee *et al.*, 2013).

Enfin, l'analyse comparée des relevés topographiques réalisés avant et après le démantèlement des embâcles n°s 12010 (mineur), 8205 (moyen) et 10930 (majeur) montre des changements importants dans la morphologie du lit et des berges de ces 3 sites. Cependant, il n'est pas possible d'attribuer complètement ces variations au démantèlement des embâcles. Dans les rivières de substrat meuble, il est certain que les crues génèrent des modifications morphologiques. Parallèlement aux travaux de démantèlement, il aurait été

intéressant d'effectuer des relevés topographiques dans des segments de référence pour quantifier les variations morphologiques liées à l'évolution « naturelle » du chenal.

L'échantillonnage de la granulométrie du lit aurait pu être réalisé avant et après les démantèlements pour mieux comprendre les impacts des opérations. L'augmentation du cisaillement au niveau du lit causé par le retrait d'un embâcle de bois mort a généralement pour effet d'accroître la taille moyenne des sédiments de fond et affecter l'habitat de la faune benthique (Keller et Macdoland, 1995; Lisle, 1995). Une plus grande résolution de points topographiques aurait aussi permis de diminuer la marge d'erreur liée à l'interpolation spatiale. L'utilisation d'un LiDAR terrestre aurait permis de mieux décrire l'évolution latérale du chenal suivant le démantèlement des embâcles.

Finalement, les nouveaux embâcles qui se sont reformés aux sites des embâcles démantelés n^{os} 8205 et 10930 en l'espace de 10 mois témoigne de la dynamique interannuelle du bois mort de la rivière Neigette. Dans le cas des embâcles reformés, les gros débris ancrés au lit qui n'ont pu être retirés lors des opérations peuvent être responsables du trappage de bois mort en provenance de l'amont. Mais, il est aussi possible que les sites soient des endroits préférentiels pour l'accumulation du bois mort. L'étude de Curran (2010) sur la rivière San Antonio souligne que sur une période de 4 ans, 34 % des embâcles nouvellement formés se sont érigés à des endroits où des embâcles avaient préalablement été disloqués.

Une approche conservatrice devrait être adoptée à propos du démantèlement d'embâcles de bois mort (Keller et Macdonald, 1995). Les embâcles qui ne présentent pas de menace à l'intégrité des infrastructures et à la sécurité des riverains devraient être conservés en raison de leurs avantages écologiques et parce que les coûts engendrés ne valent pas les faibles changements espérés sur l'écoulement (Piégay & Gurnell, 1997). Des actions ciblées telles que la stabilisation des berges et des campagnes de plantation pour la diversification de la ripisylve pourraient être efficaces pour réduire les taux de bois mort acheminés au cours d'eau.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La rivière Neigette est caractérisée par un nombre élevé d'embâcles de bois mort dont certains ont pour effet d'accentuer l'érosion des berges et d'amplifier les débordements de crue, ce qui pose des problèmes pour les propriétaires riverains de St-Donat et de St-Anaclet de Lessard. Les résultats issus de ce mémoire ont permis de décrire la dynamique spatiale des embâcles et de mieux comprendre les interrelations entre le bois mort et la dynamique hydrogéomorphologique de la rivière Neigette. Ainsi, la migration latérale en amont et le vieillissement des peuplements forestiers riverains ont été identifiés comme les principaux facteurs de recrutement du bois mort dans le système fluvial. La concentration d'embâcles est maximale dans les 12 premiers km du tronçon à l'étude, alors qu'elle décroît progressivement vers l'aval en raison de l'élargissement du chenal. Par ailleurs, les résultats issus des inventaires réalisés en 2012 et en 2013 mettent en évidence la mobilité interannuelle de bois mort de la rivière Neigette. En l'espace d'une année, 20 embâcles ont été disloqués et 35 se sont formés. Bref, l'étude souligne l'importante variabilité spatiale et temporelle du bois mort dans la rivière Neigette. Aussi, le démantèlement expérimental de 3 embâcles de bois mort a permis de combler en partie les lacunes sur la compréhension de la réponse morphosédimentaire d'un tronçon fluvial de taille intermédiaire à la suite de ces opérations.

Les résultats présentés dans ce mémoire permettront aux gestionnaires de mieux appréhender la dynamique du bois mort sur la rivière Neigette et d'opter pour des stratégies de gestion adaptées. Afin de gérer les embâcles de bois de manière durable, il est impératif de considérer l'interdépendance entre les zones de recrutement et d'accumulation de bois mort. En outre, l'information et la sensibilisation des populations riveraines s'avèrent une avenue efficace pour promouvoir les bénéfices écologiques du bois mort en rivière, qui sont

souvent plus importants que les impacts négatifs, et pour enclencher une réflexion collective sur les alternatives au démantèlement des embâcles de bois mort.

Finalement, il serait pertinent de réaliser une analyse approfondie des risques d'inondation et d'érosion dans la vallée de la rivière Neigette en relation avec la présence des embâcles de bois mort. L'approche hydrogéomorphologique par espace de liberté, qui inclut l'espace d'inondabilité et l'espace de mobilité du cours d'eau, pourrait être préconisée. En lui accordant un espace de liberté, la rivière peut évoluer librement, ce qui limite les risques pour les citoyens et les infrastructures. La délimitation de l'espace de liberté permettrait à la fois d'optimiser la gestion des risques fluviaux, de préserver les services écologiques liés au bois mort et de forger la culture du risque auprès des citoyens de la vallée de la Neigette.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbe, T.B. et Montgomery, D.R. 1996. Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers. *Regulated Rivers: Research and Management*, 12: 201-221.
- Abbe, T.B. 2000. Patterns, mechanics and geomorphic effects of wood debris accumulations in a forest river system. Thèse de doctorat. Department of Geological Sciences, University of Washington, États-Unis. 241 p.
- Abbe, T.B. et Montgomery, D.R. 2003. Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington. *Geomorphology*, 51: 81-107.
- 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*, 256: 20-27.
- Benda, L., Miller, D., Sias, J., Martin, D., Bilby, R., Veldhuisen, C. et Dunne, T. 2003. Wood Recruitment Processes and Wood Budgeting. In : Gregory, S.V., Boyer, K.L. et Gurnell, A.M. (eds). The Ecology and Management of Wood in World Rivers. *American Fisheries Society Symposium*, 37: 49-73.
- Berg, N., Carlson, A. et Azuma, D. 1998. Function and dynamics of woody debris in stream reaches in the central Sierra Nevada, California. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55: 1807-1820.
- Beschta, R.L. 1979. Debris removal and its effects on sedimentation in an Oregon Coast Range stream. *Northwest Science*, 53 (1): 71-77.
- Bilby, R.E. 1984. Removal of woody debris may affect stream channel stability. *Journal of Forestry*, 82: 609-613.
- Bilby, R.E. et Ward, J.W. 1991. Characteristics and function of LWD in streams draining old-growth, clear-cut, and second-growth forests in southwestern Washington. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 48: 2499-2508.

- Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Demers, S., Olsen, T., Ouellet, M.A., Choné, G., Cloutier, C.A. et Needelman, M. 2013a. Espace de liberté: Un cadre de gestion intégrée pour la conservation des cours d'eau dans un contexte de changements climatiques. Rapport remis à Ouranos. 122 pages + annexes.
- Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Demers, S. et Olsen, T. 2013b. Improvement of streams hydro-geomorphological assessment using LiDAR DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38 (15) : 1808-1821.
- Boivin, M. et Buffin-Bélanger, T. 2010. Étude hydrogéomorphologique liée à la présence de bois morts dans le corridor fluvial de la rivière St-Jean, Gaspé. Rapport présenté à la Société de gestion des rivières de Gaspé Inc. Laboratoire de recherche en géomorphologie et de dynamique fluviale, Université du Québec à Rimouski, 99 p.
- Boivin, M. et Buffin-Bélanger, T. 2013. Modélisation de bilans ligneux de rivières semi-alluviales de la Gaspésie, Québec : Le cas de la rivière Saint-Jean. Rapport d'étape (2011-2012) présenté à la Société de Gestion des Rivières de Gaspé Inc. Laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale, LGDF-003-UQAR. 16 p.
- Boivin, M., Buffin-Bélanger, T. et Piégay, H. 2014. Interannual monitoring of the dynamics of large wood in a 60 km river corridor, the Saint-Jean river, Gaspe peninsula, Québec (2010-2013). Affiche présentée à l'AAG Annual Meeting, Tampa, Floride, avril 2014.
- Boyer, K.L., Berg, D.R. et Gregory, S.V. 2003. Riparian management for wood in rivers. In : Gregory, S.V., Boyer, K.L. et Gurnell, A.M. (eds). *The Ecology and Management of Wood in World Rivers. American Fisheries Society Symposium*, 37: 407-420.
- Braudrick, C.A. et Grant, G.E. 2000. When do logs move in rivers? *Water Resources Research*, 36 (2): 571-583.
- Brierley, G.J., Brooks, A.P., Fryirs, K. et Taylor, M.P. 2005. Did humid-temperate rivers in the Old and New Worlds respond differently to clearance of riparian vegetation and removal of woody debris? *Progress in Physical Geography*, 29 (1): 27-49.
- Buffin-Bélanger, T. Roy, A.G. et Demers, S. 2013. Turbulence in River Flows. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), *Treatise in Geomorphology*. Academic Press, Elsevier, San Diego, CA, Volume 9, Fluvial Geomorphology, Chapitre 6, pp. 69-86.

- Chin, A., Laurencio, L.R., Daniels, M.D., Wohl, E. Urban, M.A., Boyer, K.L., Butt, A., Piégay, H. et Gregory, K.J. 2012. The significance of perceptions and feedbacks for effectively managing wood in rivers. *River Research and Application*, DOI: 10.1002/rra.2617, 14 p.
- Church, M. 2013. Steep Headwater Channels. *In*: Shroder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), *Treatise in Geomorphology*. Academic Press, Elsevier, San Diego, CA, Volume 9, Fluvial Geomorphology, Chapitre 27, pp. 528-549.
- Citterio, A. 1996. Dynamique de prise en charge et de dépôt des débris ligneux dans les systèmes Ain et Drome. Mémoire de Maîtrise, Université Lyon III, France, 72 pp.
- Collins, B.D., Montgomery, D.R. et Haas, A.D. 2002. Historical changes in the distribution and functions of large wood in Puget Lowland rivers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59: 66-76.
- Curran, J.C. 2010. Mobility of large woody debris (LWD) jams in a low gradient channel. *Geomorphology*, 116: 320-329.
- Curran, J.C. et Cannatelli, K.M. 2014. The impact of beaver dams on the morphology of a river in the eastern United States with implications for river restoration. *Earth Surface Processes and Landforms*, DOI: 10.1002/esp.3576. 9 pp.
- Dallaire, A., Lair, S. et Dorais, M. 2010. Mortalité de saumons atlantique au cours de l'été 2009 dans la rivière Saint-Jean, Gaspésie, Québec. Centre québécois sur la santé des animaux sauvages, Centre Canadien Coopératif de la Santé de la Faune – Région du Québec. [En ligne] URL: <http://quebec.ccwhc.ca/?p=589>. Consulté le 28 avril 2014.
- Daniels, M.D. 2006. Distribution and dynamics of LWD and organic matter in a low-energy meandering stream. *Geomorphology*, 77: 286-298.
- Daniels, M.D. et Rhoads, B.L. 2007. Influence of experimental removal of large woody debris on spatial patterns of three-dimensional flow in a meander bend. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32: 450-474.
- 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*, 55 (3) : 318-333.

- Denis, C., Massé, S., Buffin-Bélanger, T et Gendron, M. 2013. Gestion des embâcles de bois mort et analyse du potentiel récréatif de la rivière Neigette. Organisme des Bassins Versants du Nord-Est du Bas-St-Laurent. 86 pages + annexes.
- De Smith, M.J., Goodchild, M. et Longley, P.A. 2007. Geospatial analysis – A comprehensive guide to principles, techniques and software tools. Second version, Winchelsea Press, 491 pp.
- Díez, J.R., Larrañaga, S., Elosegil, A et Pozo, J. 2000. Effect of removal of wood on streambed stability and retention of organic matter. *Journal of the North American Benthological Society*, 19 (4): 621-632.
- Downs, P.W. et Simon, A. 2001. Fluvial geomorphological analysis of the recruitment of large woody debris in the Yalobusha River network, Central Mississippi, USA. *Geomorphology*, 37: 65-91.
- Downward, S.R., Gurnell, A.M. et Brookes, A. 1994. A methodology for quantifying river channel planform change using GIS: variability in stream erosion and sediment transport. *In Proceedings of the Canberra Symposium, Canberra, 1994.* Olive LJ, Loughran RJ, Kesby JA (eds). International Association of Hydrological Sciences, Publication 224; pp. 449–456.
- Eaton, B.C., Hassan, M.A. et Davidson, S.L. 2012. Modeling wood dynamics, jam formation, and sediment storage in a gravel-bed-stream. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, 117 (4): , DOI: 10.1029/2012JF002385.
- Eaton, B.C. et Hassan, M.A. 2013. Scale-dependent interactions between wood and channel dynamics: Modeling jam formation and sediment storage in gravel-bed streams. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, 118 (4): 2500-2508.
- Ferguson, R. 2013. Reach-Scale Flow Resistance. *In: Shroder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), Treatise in Geomorphology.* Academic Press, Elsevier, San Diego, CA, Volume 9, Fluvial Geomorphology, Chapitre 5, pp. 50-68.
- Gauthier, P. 2009. Caractérisation des bandes riveraines des tributaires de la rivière Neigette sur le territoire de Saint-Donat (Québec) en 2008. Comité de Développement Durable Saint-Donat Mitis. 27 p. + annexes.
- Gurnell, A.M. et Sweet, R. 1998. The distribution of large woody debris accumulations and pools in relation to woodland stream management in a small, low-gradient stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2: 1101-1121.

- Gurnell, A.M., Piégay, H., Swanson, F.J. et Gregory, S.V. 2002. Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology*, 47: 601-619.
- Gurnell, A.M. 2003. Wood storage and mobility. In : Gregory, S.V., Boyer, K.L. et Gurnell, A.M. (eds). *The Ecology and Management of Wood in World Rivers. American Fisheries Society Symposium*, 37: 75-91.
- Gurnell, A.M. 2013. Wood in Fluvial Systems. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), *Treatise in Geomorphology*. Academic Press, Elsevier, San Diego, CA, Volume 9, Fluvial Geomorphology, Chapitre 11, pp. 163-188.
- Gregory, K.J., Gurnell, A.M. et Hill, C.T. 1985. The permanence of debris dams related to river channel processes. *Hydrological Sciences Journal*, 30 (3): 371-381.
- Gregory, K.J. et Davis, R.J. 1992. Coarse woody debris in stream channels in relation to river channel management in woodland areas. *Regulated Rivers: Research and Management*, 7: 117-136.
- Hétu, B. 1998. La déglaciation de la région de Rimouski, Bas-St-Laurent (Québec) : Indices d'une récurrence glaciaire dans la mer de Goldthwait entre 12 400 et 12 000 BP. *Géographie physique et Quaternaire*, 52 (3) : 325-347.
- Hooke, J.M. 2004. Cutoffs galore! : Occurrence and causes of multiple cutoffs on a meandering river. *Geomorphology*, 61: 225-238.
- Hyatt, T.L. et Naiman, R. 2001. The residence time of large woody debris in the Queets River, Washington, USA, *Ecological Applications*, 11 (1): 191-202.
- Hygelund, B. et Manga, M. 2003. Field measurements of drag coefficients for model LWD. *Geomorphology*, 51 (3): 175-185.
- John, S. et Klein, A. 2004. Hydrogeomorphic effects of beaver dams on floodplain morphology: avulsion processes and sediment fluxes in upland valley floors (Spessart, Germany). *Quaternaire*, 15: 219-231.
- Kail, J. 2003. Influence of large woody debris on the morphology of six central European streams. *Geomorphology*, 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*, 4: 361-380.

- Keller, E.A. et Tally, T. 1979. Effects of large organic material on channel form and fluvial processes in the coastal redwood environment. *In*: Rhodes, D.D. et Williams, G.P. (Eds.). *Adjustments of Fluvial Systems*, Kendall/Hunt Publishing Co., Binghamton, NY, pp. 167-197.
- Keller, E.A. et Macdonald, A. 1995. River channel change: The role of large woody debris. *In*: Gurnell, A et Petts, G. *Changing river channels*. John Wiley and Sons, 216-236.
- Klein, R. Sonnevil, R. et Short, D. 1987. Effects of woody debris removal on sediment storage in a northwest California stream. *Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, Proceedings of the Corvallis Symposium*. IAHS Publication no. 165, 2 p.
- Klungle, M.M. 2006. An evaluation of large woody debris restorations on the Manistee and Au Sable Rivers, Michigan, Michigan State University, 80 p.
- Laquerre, S., Leduc, A. & Harvey, B.D. 2009. Augmentation du couvert en peuplier faux-tremble dans les pessières noires du nord-ouest du Québec après coupe totale. *Écoscience*, 16 (4) : 483-491.
- 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 Landforms*, 33: 1098-1112.
- Latterell, J.J. et Naiman, R.J. 2007. Sources and dynamics of large logs in a temperate floodplain river. *Ecological Applications*, 17 (4): 1127-1141.
- Lauzon, M., 2007. Évaluation de la qualité des berges et des bandes riveraines de la rivière Neigette sur le territoire de la municipalité de St-Donat. Comité d'étude sur les ressources forestières (CERF). Rapport présenté au Comité de développement local de St-Donat. 15 p. + annexes.
- Leeder, M.R. 1983. On the interactions between turbulent flow, sediment transport and bedform mechanics in channelized flows. *In*: J.D. Collinson et J. Lewen, *Modern and Ancient Fluvial Systems, International Association of Sedimentologists, Special Publication*, 6: 5-18.
- Lehtinen, R.M., Mundahl, N.D. et Madejczyk, J.C. 1997. Autumn use of woody snags by fishes in backwater and channel border habitats of a large river. *Environmental Biology of Fishes*, 49: 7-19.

- Le Lay, 2007. Les hommes et le bois en rivière - Représentations, pratiques et stratégies de gestion dans le cadre de l'entretien des cours d'eau. Thèse de doctorat. Université Jean Moulin-Lyon 3, France. 569 p.
- Lisle, T.E. 1995. Effects of coarse woody debris and its removal on a channel affected by the 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington. *Water Resources Research*, 31: 1797-1808.
- Macdonald, A. et Keller, E.A. 1987. Stream channel response to the removal of large woody debris, Larry Damm Creek, northwestern California. *Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, Proceedings of the Corvallis Symposium*. IAHS Publication no. 165, 2 p.
- MacVicar, B.J., Piégay, H., Henderson, A., Comiti, F., Oberlin, C. et Pecorari, E. 2009. Quantifying the temporal dynamics of wood in large rivers: field trials of wood surveying, dating, tracking, and monitoring techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 2031-2049.
- Manners, R.B., Doyle, M.W. et Small, M.J. 2007. Structure and hydraulics of natural woody debris jams. *Water Resources Research*, 43: 1-17.
- Marston, R.A., Girel, J., Pautou, G., Piégay, H., Bravard, J.P. et Arneson, C. 1995. Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology*, 13: 121-131.
- May, C.L. et Gresswell, R.E. 2004. Spatial and temporal patterns of debris-flow deposition in the Oregon Coast Range, USA. *Geomorphology*, 57: 135-149.
- Mellina, E. et Hinch, S.G. 2009. Influences of riparian logging and in-stream large wood removal on pool habitat and salmonid density and biomass: a meta-analysis. *Canadian Journal of Forest Research*, 39: 1280-1301
- Merritt, D.M. 2013. Reciprocal Relations between Riparian Vegetation, Fluvial Landforms and Channel Processes. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), *Treatise in Geomorphology*. Academic Press, Elsevier, San Diego, CA, Volume 9, Fluvial Geomorphology, Chapitre 14, pp. 219-243.
- Ministère des Ressources naturelles du Québec. 2013. Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. Gouvernement du Québec. [En ligne] URL: mrn.gouv.qc.ca/forets/inventaire/inventaire-zones-carte.jspjg. Consulté le 17 avril 2014.

- Ministère des Ressources naturelles du Québec. 2014. Le guide sylvicole du Québec – Outil de comparaison des essences. Gouvernement du Québec. [En ligne] URL: <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/essences/arbre.php?id=96>. Consulté le 23 avril 2014.
- Montgomery, D.R. 2003. Wood in rivers: interactions with channel morphology and processes. *Geomorphology*, 51: 1-5.
- Montgomery, D.R., Collins, B.D., Buffington, J.M. et Abbe, T.B. 2003. Geomorphic Effects of Wood in Rivers. In : Gregory, S.V., Boyer, K.L. et Gurnell, A.M. (eds). The Ecology and Management of Wood in World Rivers. *American Fisheries Society Symposium*, 37: 21-47.
- Moulin, B. et Piégay, H. 2004. Characteristics and temporal variability of large woody debris trapped in a reservoir on the River Rhone (Rhone): Implications for river basin management. *River Research and Applications*, 20: 79-97.
- 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 Surface Processes and Landforms*, 36: 1137-1151.
- Phillips, J.D. 2012. Log-jams and avulsions in the San Antonia River Delta, Texas. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37: 936-950.
- Piégay, H. 1993. Nature, mass and preferential sites of coarse woody debris deposits in the lower Ain Valley (Mollon Reach), France. *Regulated Rivers: Research and Management*, 8: 359-372.
- Piégay, H. et Gurnell, A.M. 1997. Large woody debris and river geomorphological pattern: examples from S.E. France and S. England. *Geomorphology*, 19: 99-116.
- Piégay, H. 2003. Dynamics of wood in large rivers. In : Gregory, S.V., Boyer, K.L. et Gurnell, A.M. (eds). The Ecology and Management of Wood in World Rivers. *American Fisheries Society Symposium*, 37: 109-134.
- Piégay, H., Le Lay, Y.-F. et Moulin, B. 2005a. Les risques liés aux embâcles de bois dans les cours d'eau : état des connaissances et principes de gestion. In : Vallauri, D., André, J., Dodelin, B., Eynard-Machet, R. et Rambaud, D. (coord.), *Bois mort et à cavités. Une clé pour des forêts vivantes*. Paris, Lavoisier et Editions Tec et Doc, p. 193-202.

- Piégay, H., Darby, S.E., Mosselman, E. et Surian, N. 2005b. A review of techniques for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing river bank erosion. *River Research and Applications*, 21: 773-789.
- Platts, W.S., Armour, C., Gordon, D., Bryant, M., Bufford, J.L., Cuplin, P., Sherman, J., Lienkaemper, G.W., Monsen, G.W., Nelson, R.L., Sedell, J.R. et Tuhy, J.S. 1987. Methods for evaluating riparian habitats with applications to management. Gen. Tech. Rep. Int. 221, USDA Forest Service, Ogden, 177 pp.
- Pollock, M.M., Beechie, T.J. et Jordan, C.E. 2007. Geomorphic changes upstream of beaver dams in Bridge Creek, an incised stream channel in the interior Columbia River basin, eastern Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32: 1174-1185.
- Riggsbee, J.A., Doyle, M.W., Julian, J.P., Manners, R., Muehlbauer, J.D., Sholtes, J. et Small, M.J. 2013. Influence of Aquatic and Semi-Aquatic Organisms on Channel Forms and Processes. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), *Treatise in Geomorphology*. Academic Press, Elsevier, San Diego, CA, Volume 9, Fluvial Geomorphology, Chapitre 12, pp. 189- 202.
- Schenk, E.R., Moulin, B., Hupp, C.R. et Richter, J.M. 2014. Large wood budget and transport dynamics on a large river using radio telemetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39: 487-498.
- Seo, J.I. et Nakamura, F. 2009. Scale-dependent controls upon the fluvial export of large wood from river catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 786-800.
- 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*, 6: 271-287.
- Shields, F.D. et Smith, R.H. 1992. Effects of large woody debris removal on physical characteristics of a sand-bed river. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2: 145-163.
- Shields, F.D. et Gippel, C.J. 1995. Prediction of woody debris removal on flow resistance. American Society of Civil Engineers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 121: 341-354.
- Smith, R.D., Sidle, R.C., Porter, P.E. et Noel, J.R. 1993a. Effects of experimental removal of woody debris on the channel morphology of a forest, gravel-bed stream. *Journal of Hydrology*, 152: 153-178.

- Smith, R.D., Slide, R.C. et Porter, P.E. 1993b. Effects of bedload transport of experimental removal of woody debris from a forest gravel-bed stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18: 455-468.
- Statistique Canada. 2012a. St-Donat, Québec (Code 2409030). Profil du recensement, Recensement de 2011, produit n° 98-316-XWF au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 24 octobre 2012. [En ligne] URL : <http://www12.statcan.gc.ca/censusrecensement/2011/dppd/prof/index.cfm?Lang=F>. Consulté le 25 janvier 2013.
- Statistique Canada. 2012b. St-Anaclet-de-Lessard, Québec (Code 2410030). Profil du recensement, Recensement de 2011, produit n° 98-316-XWF au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 24 octobre 2012. [En ligne] URL : <http://www12.statcan.gc.ca/censusrecensement/2011/dpd/prof/index.cfm?Lang=F>. Consulté le 25 janvier 2013.
- Stein, M.L. 1999. Interpolation of spatial data – Some theory for kriging. Springer Series in Statistics, New York, 247 pp.
- Therrien, J. 1997. Guide technique sur le démantèlement d'embâcles. Fondation de la Faune du Québec. Ste-Foy. 55 p.
- Thevenet, A. 1998. Intérêt des débris ligneux grossiers pour les poissons dans les grandes rivières — Pour une prise en compte de leur dimension écologique dans la gestion des cours d'eau. Thèse de doctorat, Laboratoire Hydroécologie Quantitative, CEMAGREF – Division Biologie des Écosystèmes Aquatiques, Université Claude Bernard, Lyon I, 321 pp.
- 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 and Management*, 14: 467-483.
- United States Department of Agriculture (USDA) Forest Service. 2014. Bagley Fire debris on Shasta Lake. Shasta-Trinity National Forest. [En ligne] URL: fs.usda.gov/Internet/FSE_MEDIA/stelprdb5419340.jpg. Consulté le 23 janvier 2014.
- Van der Nat, D., Tockner, K., Edwards, P.J. et Ward, J.V. 2003. Large wood dynamics of complex Alpine river floodplains. *Journal of the North American Benthological Society*, 22(1): 35-50

- Van-Wier, S. 2012. Développement et application d'un système mobile de laser terrestre pour quantifier le bilan sédimentaire des plages. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 95 pp.
- Wallerstein, N.P., 1999. Impact of large woody debris on fluvial processes and channel geomorphology in unstable sand-bed rivers. Thèse de doctorat, University of Nottingham, Nottingham, 263 pp.
- Warren, D.R. et Clifford, E.K. 2003. Brook trout (*Salvelinus fontinalis*) response to wood removal from high-gradient stream of the Adirondack Mountains (N.Y., U.S.A.). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 60: 379-389.
- Wohl, E. et Goode, J.R. 2008. Wood dynamics in headwater streams of the Colorado Rocky Mountains. *Water Resources Research*, 44: doi:10.1029/2007WR006522, 14 pp.
- Wohl, E. et Jaeger, K. 2009. A conceptual model for the longitudinal distribution of wood in mountain streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 329-344.
- Wohl, E. et Beckman, N.D. 2014a. Leaky rivers: Implications of the loss of longitudinal fluvial disconnectivity in headwater streams. *Geomorphology*, 205: 27-35.
- Wohl, E. et Beckman, N. 2014b. Controls on the longitudinal distribution of channel-spanning logjams in the Colorado Front Range, USA. *River Research and Applications*, 30: 112-131.
- Zimmermann, A.E. 2013. Step-Pool Channel Features. *In*: Shroder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), *Treatise in Geomorphology*. Academic Press, Elsevier, San Diego, CA, Volume 9, Fluvial Geomorphology, Chapitre 20, pp. 346-363.