Numéro National de Thèse : 2016LYSEN006

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée par
l'Ecole Normale Supérieure de Lyon

En cotutelle avec l'**Université du Québec à Rimouski**

Ecole Doctorale N°483
Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science Politique, Sociologie, Anthropologie

Spécialité de doctorat : Géomorphologie fluviale
Discipline : Géographie

Soutenue publiquement le 09/06/2016, par :
Maxime BOIVIN

Analyse par bilan ligneux de la dynamique des bois morts à multiples échelles spatiales et temporelles dans une rivière semi-alluviale de région froide

Devant le jury composé de :

Kneeshaw, Daniel	Professeur	Université du Québec à Montréal	Président de jury
Boucher, Étienne	Professeur	Université du Québec à Montréal	Examinateur interne
Marty, Pascal	Professeur	École Normale Supérieure Lyon	Examinateur interne
Iroumé, Andrès	Professeur	Universidad Austral de Chile	Examinateur externe
Buffin-Bélanger, Thomas	Professeur	Université du Québec à Rimouski	Co-tuteur de thèse
Piégay, Hervé	Professeur	École Normale Supérieure de Lyon	Directeur de thèse

Composition du jury:

Daniel Kneeshaw, président du jury, Université du Québec à Montréal

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

Hervé Piégay, directeur de recherche, École Normale Supérieure de Lyon

Étienne Boucher, examinateur interne, Université du Québec à Montréal

Pascal Marty, examinateur interne, École Normale Supérieure de Lyon, France

Andrès Iroumé, examinateur externe, Universidad Austral de Chile, Chili

Guillaume Marie, représentant du doyen des études de cycles supérieurs, UQAR

Dépôt initial le 7 mars 2016 Dépôt final le 7 juillet 2016

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.

Aux femmes de ma vie, Marie-Hélène, Anna-Ève et ma chère mère !

La vie n'est certainement pas un long fleuve tranquille, la vie ressemblerait plutôt à une rivière tantôt calme, douce, chantante... à d'autres moments plus vives, agitées et tumultueuse...

ANONYME

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé (es), supporté (es) et enduré (es) dans la réalisation de ce doctorat depuis toutes ces années. La réalisation d'un doctorat n'est pas une tâche aisée et plusieurs personnes gravitent de près et de loin lors de la réalisation d'une thèse. Je suis extrêmement reconnaissant d'avoir reçu autant d'appuis et de supports durant la réalisation de ce projet. Vous faites partie de cette thèse et sans vous, mon cheminement académique et professionnel ne serait pas où il est aujourd'hui. Merci !

Premièrement, à **Tom**, mon directeur de recherche à l'UQAR et ami depuis déjà près de 8 ans. À tous ces moments passés en ta compagnie, de la Gaspésie jusque dans les rocheuses, en passant par Chapoton en France et le Japon, je n'ai que de bons souvenirs pour toutes ces heures de route et à chaque moment « *d'imprégnation* » d'un paysage en ta compagnie. Je n'ai que des éloges pour toi, cher Tom! Merci pour tout et merci de m'avoir transmis ta passion si généreuse de la science et de la géomorphologie fluviale. Malgré notre première rencontre en 2008 où tu me disais que je pouvais encore changer d'idée et choisir un autre directeur, car aucun de tes étudiants n'avait encore gradué, je n'ai jamais regretté un instant mon choix de domaine et surtout, de directeur. Félicitation, tu as plusieurs étudiants gradués à ton actif maintenant et tu es un meilleur directeur jour après jour. Merci de m'avoir fait confiance comme tu l'as fait et de tous les moments où tu as été présent pour moi. Que notre collaboration en géomorphologie fluviale et comme ami se poursuive pour encore plusieurs années. Merci Tom!

À **Hervé**, mon directeur de recherche à l'ENS-Lyon, merci de m'avoir accepté comme étudiant, malgré ton horaire déjà surchargé. Un grand merci pour ton support moral, tes idées et ton expertise sur le bois mort. J'ai vraiment été choyé d'être ton étudiant de doctorat et d'avoir eu toutes ces discussions autour du bois mort, tant en Gaspésie, à Lyon, en Italie et au Japon. Malgré ton horaire chargé, tu as toujours réussi à trouver un

moment pour m'aider à avancer grâce à tes commentaires toujours constructifs, merci. Je souhaite que nos collaborations se poursuivent après cette thèse, car tu es vraiment une personne incroyable et généreuse de ta personne. Merci Hervé !

Aux **Fluvios**, du laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale à l'UQAR, merci pour tous ces moments passés avec vous! Merci pour les soirées fluviales, les échanges d'idées et les campagnes de terrains stimulantes. Vous êtes devenu des amis (es), plus qu'uniquement des collègues. Le laboratoire change et évolue avec le temps, les visages se renouvellent, mais cette même passion pour la géomorphologie fluviale perdure. Longue vie au Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale de l'UQAR.

Au **laboratoire de Lyon**, merci pour ces rencontres fructueuses que ma cotutelle m'a permis! Encore une fois, plusieurs collègues sont devenus des amis (es) avec le temps et ce fut un plaisir de travailler et de passer du temps avec vous. Un merci particulier à ***Boulou***, pour ton accueil chaleureux à chacune de mes visites et pour mon intégration en tant que québécois de soirée, devenu 1/3 français. Que de bons souvenirs de la France. Au plaisir de vous revoir en France, au Québec ou ailleurs sur cette terre.

Cette thèse (avec près de 10 mois de terrain) n'aurait jamais pu voir le jour sans l'aide de mes multiples **assistants de terrain**. Merci à Taylor, Sylvio, Jean-Philippe, Claude-André, Marion, Dany, Volodia, Pierre, Nadia, Simon et finalement, un énorme merci sincère à mon amie **Véronic Parent** qui a été ma collègue durant 3 étés de terrain. Véro, merci de m'avoir supporté, remonté le moral et d'avoir accepté de mesurer autant de bois mort avec moi! Malgré la tâche, ton sourire et ta bonne humeur ont facilité mes terrains et rendu ce travail, un peu lourd parfois, en une tâche agréable en ta compagnie;) Merci Véro! Un merci spécial aussi à **Marie-Andrée Dufresne**, fière Gaspésienne qui m'a permis de devenir 1/3 gaspésien durant toutes ces années et qui m'a fait découvrir sa Gaspésie natale avec humour, bonheur et une amitié sincère qui en découle. Un second merci spécial à **Claude Poirier** de la SGRG à Gaspé qui m'a grandement aidé sur le terrain, par nos discussions sur le cas des embâcles et par les nombreux services rendus au courant de cette thèse, Merci Claude et toujours un plaisir de discuter avec toi près de la belle Saint-Jean.

Merci au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), au Fonds québécois de recherche Nature et technologie (FQRNT), à développement économique du Canada (DEC-Canada), à la Société de Gestion des Rivières de Gaspé (SGRG), à la Fondation du Saumon du Grand Gaspé (FSGG), à la ville de Gaspé, au Centre d'Études Nordiques (CEN), à Boréas, à EnviroNord et à la FUQAR pour leurs supports financiers durant ces années de thèse.

À mes **parents,** Denise et Gilles, merci pour votre soutien dans toutes ces années d'étude. J'ai toujours eu votre appui (ou presque) dans la réalisation de mes multiples projets, pas toujours simples. Maman, les multiples voyages que j'ai réalisés avant mon retour à l'université ne t'enchantaient pas et tu avais peur que je ne retourne jamais à l'école. À 32 ans, tu dois être contente que j'y sorte finalement. La force interne qui m'habite est certainement héritée de toi ma chère mère et de Gilles, mon père d'adoption. Merci de votre soutien et je suis heureux et chanceux de vous avoir comme parent.

À **Marie-Hélène**, ma chérie. C'est un peu grâce à la géographie et à cette thèse que nos chemins se sont croisés et recroisés depuis maintenant 8 ans. Merci pour tout, de tes encouragements dans les moments les plus difficiles, comme dans tous nos nombreux moments heureux ensemble. Tu es un amour incroyable et tu me supportes dans tous mes projets, parfois un peu fou ou *pas d'allure* comme tu dis. Merci pour tous ces moments où j'ai été moins présent, en conférences, sur le terrain et dans cette thèse. Je suis heureux et réellement chanceux de t'avoir dans ma vie et je t'aime plus que tout. Merci ma chérie d'être dans ma vie, je t'aime et mon amour pour toi grandit jour après jour !

Ma chère **Anna-Ève**, dire que j'étais loin de t'imaginer dans ma vie quand j'ai commencé ce doctorat. Au moins, je vais terminer avant que tu entres à l'école comme dirait ta maman, *fiou*…Tu es un rayon de soleil dans ma vie, tu me remontes le moral quand les journées sont grises et ton amour inconditionnel pour moi est plus que réciproque. Je t'aime mon cœur d'amour et je suis choyé de t'avoir comme petite fille.

AVANT-PROPOS

Ce projet de recherche, mais surtout l'idée de travailler sur la dynamique du bois en rivière m'est apparu dans la rivière de Mont-St-Pierre en haute-Gaspésie. J'étais assistant de terrain à cette époque et j'avais été impressionné par la quantité et par l'impact que pouvait avoir le bois en rivière sur la géomorphologie et dynamique fluviale. J'ai alors commencé à regarder pour des études au Québec et je ne trouvais rien sur le sujet. J'ai donc proposé à mon directeur Thomas de travailler ensemble sur le sujet de la dynamique du bois mort dans les rivières de la Gaspésie et heureusement, il a foncé avec moi dans ce projet.

Je suis très heureux d'avoir travaillé sur ce sujet et de voir l'intérêt suscité par nos recherches et d'avoir initié d'autres étudiants à travailler sur le bois en rivière dans le cadre de projets de maîtrise, de DESS et de projets de stage en géographie me réjouit. Ces différents projets réalisés depuis 2009 ont permis d'augmenter significativement nos connaissances sur la dynamique du bois en rivière au Québec, mais aussi d'intérêt scientifique au niveau mondial reconnu aujourd'hui.

Ensuite, la rivière Saint-Jean, avec ces embâcles uniques au monde dans son delta est devenue le site d'étude principal de cette thèse. La Saint-Jean et l'une des plus belles rivières que j'ai pagayé dans ma vie. Elle mérite toutes les heures que j'ai passées à mesurer des accumulations de bois, à mesurer des cailloux, des tempêtes de neige subies et des nombreuses petites blessures durant ces quatre années de terrain. C'est une rivière unique et j'espère continuer à travailler sur cette rivière dans de futurs projets de recherche.

La thèse est composée de trois articles scientifiques rédigés en anglais qui ont été respectivement publiés, acceptés ou soumis à des revues scientifiques internationales avec comité de lecture. Les autres sections de la thèse sont rédigées en français selon les exigences de l'Université du Québec à Rimouski. J'ai agi à titre de premier auteur pour les trois articles, ce qui signifie que j'ai été le principal responsable de la collecte des données, des analyses, de l'interprétation des données et de la rédaction de ces chapitres/articles. Mon directeur à l'UQAR Thomas Buffin-Bélanger et mon directeur à l'ENS-Lyon, Hervé Piégay sont deuxième et troisième auteur des trois articles composant la thèse et ils ont participé à la réflexion et dans la relecture des articles. Afin de faciliter la lecture individuelle de chaque chapitre, les articles ont été conservés dans leur intégralité ce qui entraîne certaines répétitions notamment dans les sections décrivant le site d'étude et la méthodologie.

RÉSUMÉ

Cette thèse de doctorat constitue une analyse de la dynamique du bois mort en rivière par une approche de bilan ligneux multiscalaire dans une rivière semi-alluviale de région froide: la rivière Saint-Jean, Gaspé. L'étude de la variabilité spatiale et temporelle de la dynamique du bois mort a été réalisée grâce à une approche méthodologique combinant quatre années de terrain et par l'analyse de documents historiques. Les rivières de la péninsule gaspésienne produisent et transportent annuellement de grandes quantités de bois mort. Cette production provient à la fois de la puissance spécifique élevée des cours d'eau et de berges composées de sédiments peu cohésifs et comportant une ripisylve arborescente généralement dense. Jusqu'en 2015, le delta de la rivière Saint-Jean comportait plusieurs embâcles de bois de très grandes tailles. Ces embâcles se mettent en place depuis les années 1960, ils représentent une opportunité unique de quantifier et d'appliquer un budget ligneux pour cerner les variables clefs liées à la dynamique du bois mort à multiples échelles spatiales et temporelles.

Dans le premier chapitre de la thèse, nous avons décrit le fonctionnement et l'évolution temporelle des embâcles dans le delta de la rivière Saint-Jean et présenté la dynamique du bois à l'échelle du bassin versant. Ce chapitre montre que la rivière Saint-Jean est caractérisée par une importante dynamique du bois mort qui favorise la formation d'embâcles dans le delta et le long du corridor fluvial. Nos résultats montrent que la quasi-totalité des bois morts en rivière est produite par la migration latérale et par l'influence de la morphologie. La densité des arbres en bandes riveraines est très élevée, ce qui favorise un recrutement important de bois mort pour le système. Au niveau des accumulations dans le corridor fluvial, deux zones accumulent la majorité des bois et ces premiers résultats montrent une mobilité importante qui peut varier fortement d'une année à l'autre. Avec ce chapitre, nous confirmons que le cas de la rivière Saint-Jean est un site d'étude exceptionnelle afin d'appliquer et de valider un budget ligneux et de quantifier les différentes composantes et facteurs clés dans la dynamique du bois à l'échelle de bassin versant.

Dans le deuxième chapitre, nous avons analysé la variabilité interannuelle de la dynamique du bois mort et quantifié l'effet d'évènements hydrométéorologique de faibles récurrences. Pour documenter la variabilité interannuelle des bois en rivière dans la rivière Saint-Jean, 4 suivis annuels ont été réalisés entre 2010-2013 pour localiser et décrire plus de 1000 embâcles de bois et plus de 2000 bois morts individuels le long d'un tronçon de rivière de 60 km. L'évènement hydrométéorologique intense de décembre 2010 a engendré une crue majeure dans la région, ce qui a provoqué une migration latérale importante dans

la rivière Saint-Jean. Les résultats indiquent que le recrutement de bois mort entre 2010 et 2013 représente 57% de la production totale pour la période 2004 et 2013 et que les volumes de bois accumulé le long du corridor fluvial sont 4 fois plus élevés en 2013 qu'en 2010. Au niveau de la mobilité, l'analyse d'imagerie vidéo de trois évènements différents ont montré que l'intensité (nombre de bois par minute) du transport de bois pouvait être jusqu'à dix fois supérieures durant un évènement avec débâcle mécanique glacielle, comparativement à un évènement hydroclimatique en eau libre.

Dans le troisième chapitre, nous avons réalisé une analyse par bilans ligneux et une analyse de la trajectoire écohydrophormologique sur une période de plus de 50 ans. Nous avons quantifié chaque composante (intrant, accumulé et sorti) d'un budget ligneux à multiples échelles spatio-temporelles. Nous avons utilisé les données de volumes accumulés dans le delta de la rivière Saint-Jean depuis 1963 afin de clore une analyse par bilan ligneux. Ces analyses ont montré et quantifié la très grande variabilité d'un bilan ligneux à multiples échelles spatiales et temporelles. Autant à l'échelle interannuelle, qu'à l'échelle décennale, la dynamique du bois mort comporte des périodes où l'entrée de bois, le stockage et la mobilité diffèrent selon les contextes écohydromorphologiques. La trajectoire écohydromorphologiques suggère une augmentation de la dynamique fluviale en raison d'un changement significatif dans l'hydrologie conduisant à une plus grande production et mobilité des bois morts et par l'augmentation des volumes accumulés dans le corridor de la RSJ depuis 2004.

Mots clés: bois mort en rivière; bilan ligneux; multiéchelles temporelles et spatiales; transport de bois en rivière; delta, géomorphologie fluviale; trajectoire écohydromorphologiques; monitorage vidéo.

ABSTRACT

This thesis is an analysis of the dynamics of large wood in river by a multi-scale large wood budget approach in a semi-alluvial river of cold regions: the Saint-Jean River, Gaspé. The study of the spatial and temporal variability of the dynamics of large wood was carried out through a methodological approach combining four years of field and by analyzing historical documents. The rivers of the Gaspé Peninsula produce annually and carry large amounts of large wood. This production comes from the high specific power of rivers and by banks composed of noncohesive sediment and having a generally dense riparian forest tree. Until 2015, the Delta of the Saint-Jean River had several very large jams. These jams are put in place since the 1960s, they represent a unique opportunity to quantify and apply a wood budget and to identify key variables related to the dynamics of large wood at multiple spatial and temporal scales.

In the first chapter, we described the function and the temporal evolution of large wood jams in the delta of the Saint-Jean River and presented the dynamics of large wood in the watershed. This chapter shows that the Saint-Jean River is characterized by high dynamics of large wood that promote large jams in the delta and along the fluvial corridor. Our results show that almost all large wood in river is produced by lateral migration and by the influence of the morphology. The density of trees in riparian areas is very high, which favors a major recruitment of large wood to the system. For the accumulations in the river corridor, two areas accumulate the majority of wood and these first results show a significant mobility, which can fluctuate substantially from year to year. With this chapter, we confirm that the case of the Saint-Jean River is a unique study site to apply and validate a large wood budget and to quantify the various components and key factors in the dynamics of large at the watershed scale.

In the second chapter, we analyzed the interannual variability of the dynamics of large wood and quantified the effect of low-recurrence hydro-meteorological events. To document the interannual variability of large wood in the Saint-Jean River, 4 annual surveys were made between 2010 to 2013 to locate and describe more than 1000 large wood jams and over than 2000 individual large wood along a river corridor of 60 km long. The intense hydrometeorological event in December 2010 resulted in a major flood in the area, causing significant lateral migration in the Saint-Jean River. The results indicate that the recruitment of large wood between 2010 and 2013 represents 57% of the total production for the period 2004 and 2013 and large wood volumes accumulated along the river corridor are 4 times higher in 2013 than in 2010. In terms of mobility, video analysis of three different events showed that the intensity of the transport (number of large wood per minute) can be higher to ten times during an event with mechanical ice-breakup, compared to an open water.hydroclimatic event.

In the third chapter, we conducted an analysis by large wood budget and analysis of eco-hydromorphological trajectory over more than 50 years. We quantified each component (input, output and accumulated) of a large wood budget at multiple spatial and temporal scales. We used the volumes of data accumulated in the delta of the Saint-Jean River since 1963 to close an analysis of large wood budget. These analyzes demonstrated and quantified the large variability of a large wood budget at multiple spatial and temporal scales. At the interannual scale or decadal, scale, the dynamics of large wood have periods when the input, storage and mobility of large wood differ according to eco-hydromorphological contexts. The eco-hydromorphological trajectory suggests an increase in river dynamics due to a significant change in the hydrology, resulting in higher production and mobility of large wood and increased in volumes accumulated in the corridor of the Saint-Jean River since the last decade.

Keywords: large wood in river; wood budget; temporal and spatial multi-scale; wood transport; delta; fluvial geomorphology; eco-hydromorphological trajectory; video monitoring.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ix

AVANT-PROPOS xiii

RÉSUMÉ xvi

ABSTRACT xix

TABLE DES MATIÈRES xxii

LISTE DES TABLEAUX xxvi

LISTE DES FIGURES xxvii

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES xxxiii

LISTE DES SYMBOLES xxxiv

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

I. 1 DYNAMIQUE DU BOIS MORT EN RIVIERE: PERSPECTIVES ET QUESTIONS DE RECHERCHE 1

I.1.1 Le cas des embâcles de la rivière Saint-Jean 4

I.1.2 La notion de bilan ligneux 7

I.2 LA QUANTIFICATION DES COMPOSANTES DU BILAN LIGNEUX 13

I.2.1 Intrant du bois mort (W) 13

I.2.2 L'accumulation des bois morts (ΔS) 15

I.2.3 La mobilité des bois morts (F) 19

I.2.4 Les bois morts éliminés par fragmentation/décomposition (D) 22

I.3 QUESTIONS DE RECHERCHE 23

I.4 OBJECTIFS DE LA THESE 27

I.5 APPROCHE METHODOLOGIQUE 29

I.5.1 Site d'étude: Le bassin versant de la rivière Saint-Jean....30
I.5.2 La quantification des composantes d'un bilan ligneux....33
I.5.3 Quantification des embâcles de bois morts dans le corridor fluvial....35
I.5.4 Quantification des flux....38
I.5.5 Analyse des images aériennes et satellites....40
I.6 ORGANISATION DE LA THESE ET LIENS ENTRE LES CHAPITRES....43

CHAPITRE 1 LES EMBACLES DE LA RIVIERE SAINT-JEAN, GASPE (QUEBEC, CANADA): UNE STRUCTURE DYNAMIQUE D'ACCUMULATION DES BOIS TRANSPORTES DU BASSIN VERSANT....46

1.1 RESUME EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE....46
1.2 THE RAFT OF THE SAINT-JEAN RIVER, GASPÉ (QUÉBEC, CANADA): A DYNAMIC FEATURE TRAPPING MOST WOOD TRANSPORTED FROM THE CATCHMENT....48
1.2.1 Résumé en Anglais....48
1.3 INTRODUCTION....50
1.4 STUDY SITE....54
1.5 METHODOLOGY....56
1.5.1 Analysis of raft evolution since 1963....56
1.5.2 Wood mapping along the channel length....57
1.5.3 Quantification of historical wood recruitment in the river corridor....59
1.6 RESULTS....61
1.6.1 Raft dynamics through time....61
1.6.2 Large wood accumulation along the river profile....65
1.6.3 Large wood recruitment....69
1.7 DISCUSSION....70
1.7.1 Natural recovery....70
1.7.2 A great raft trapping most wood resulting from floodplain erosion....71
1.7.3 Factors controlling wood discharge and raft evolution....72
1.8 CONCLUSION....74
1.9 ACKNOWLEDGEMENTS....75

CHAPITRE 2 MOBILITÉ INTERANNUELLE (2010-2013) DES BOIS MORTS DANS UN CORRIDOR FLUVIAL EXPOSÉ À UNE CRUE DE RÉCURRENCE 50-ANS ET A LA DYNAMIQUE DES GLACES DE RIVIÈRE 76

2.1 RESUME EN FRANÇAIS DU DEUXIEME ARTICLE 76

2.2 INTERANNUAL KINETICS (2010-2013) OF LARGE WOOD IN A RIVER CORRIDOR EXPOSED TO A LOW RECURRENCE-FLOOD AND TO FLUVIAL ICE DYNAMICS 79

2.2.1 Résumé en Anglais 79

2.3 INTRODUCTION 80

2.4 STUDY SITE 83

2.5 METHODOLOGY 87

2.5.1 Discharge series analysis 87

2.5.2 Wood censing and characteristics 88

2.5.3 Wood dynamics and local controlling factors 89

2.6 RESULTS 92

2.6.1 Interannual changes in large wood characters 92

2.6.2 Longitudinal patterns of large wood deposits 95

2.6.3 Temporal pattern of large wood input and output 98

2.6.4 Factors controlling changes in wood volume in the reach 100

2.7 DISCUSSION 107

2.7.1 Event-based controls of interannual LW kinetics 107

2.7.2 Longitudinal geomorphic processes controlling LW transfers 111

2.8 CONCLUSION 113

2.9 ACKNOWLEDGEMENTS 115

CHAPITRE 3 ESTIMATION À MULTIPLES ÉCHELLES SPATIO-TEMPORELLES DE BILAN LIGNEUX DE L'INTER DÉCENNAL À L'INTERANNUEL DANS UN SYSTÈME FLUVIAL TEMPÉRÉ-FROID 116

3.1 RESUME EN FRANÇAIS DU TROISIEME ARTICLE 116

3.2 ESTIMATION OF WATERSHED AND RIVER CORRIDOR LARGE WOOD BUDGETS AT INTER-DECADAL TO INTER-ANNUAL SCALES IN A COLD-TEMPERATE FLUVIAL SYSTEM 118
3.2.1 Résumé en Anglais 118
3.3 INTRODUCTION 119
3.4 BACKGROUND ON LARGE WOOD BUDGETS 120
3.5 STUDY SITE 124
3.6 METHODOLOGY 128
3.6.1 Definition of large wood budget components 128
3.6.2 Estimating large wood budget components for the Saint-Jean River. 130
3.6.1 Drivers of changes in large wood budgets 133
3.7 RESULTS 135
3.7.1 Decennial large wood budget at the watershed scale 135
3.7.1 Inter-annual large wood budget at the river-reach and watershed scale 140
3.7.2 Drivers of changes in the components of the large wood budget 144
3.8 DISCUSSION 147
3.8.1 Large wood budget: validation, learning and perspectives 147
3.8.2 Multi-temporal scale approach, a promising strategy to diagnose river equilibrium and associated large wood dynamics 150
3.9 CONCLUSION 152
3.10 ACKNOWLEDGEMENTS 153
CONCLUSION GÉNÉRALE 154
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 168

LISTE DES TABLEAUX

Introduction

Tableau 1. Les différentes équations de bilan ligneux, les variables utilisées, les sources de données et la validation et application de ces équations dans la littérature..... 11

Tableau 2. Les facteurs favorisant la mise en place des EBM selon Abbe (2003) et Thérien (1997)..... 15

Chapitre 1

Tableau 3. General characteristics of the large wood documented in the Saint-Jean River corridor (IQR=interquartile range)..... 66

Chapitre 2

Tableau 4. LW volume (m^3) recruitment (LW exported to the SJR delta and LW accumulated in the fluvial corridor) during the four years of monitoring (2010–2013) and the reference period (2004–2013) determined using aerial photography..... 99

Chapitre 3

Tableau 5. Methodology for the quantification of each component of the large wood budget in the Saint-Jean River 133

Tableau 6. Large wood budget estimation between 1963 and 2013. *LW volume estimations..... 148

LISTE DES FIGURES

Introduction

Figure 1. Grands titres d'articles de journaux et de reportages télévisuels réalisés sur les embâcles de la rivière Saint-Jean depuis l'été 2009. Sources: Graffici (A); Radio-Canada, 2015 (B); Le Soleil, 2014 (C) et; Journal de Québec, 2015 (D). 5

Figure 2. Photographies obliques d'une (A) section de l'embâcle du chenal sud dans la rivière Saint-Jean en 2011 et (B) du delta de la RSJ en 2015 après le démantèlement. *Les lettres encerclées représentent les mêmes emplacements sur chacune des photos et la lettre (C) présente la zone de dépôt du bois retiré de l'embâcle durant le démantèlement. 6

Figure 3. Modèle conceptuel d'analyse par bilan ligneux (A) et de la dynamique du transport de BM (B) à l'échelle d'un tronçon fluvial (cellule hydromorphologique) (adaptée de Martin et Benda, 2001) 8

Figure 4. (A) Processus de recrutement de bois morts par l'érosion des berges (modifiée de Abbe, 2001) et; (B-C) deux exemples de processus de recrutement sur la rivière Saint-Jean. 14

Figure 5. Classification des types d'embâcle et impacts sur le chenal (modifiée d'Abbe et Montgomery, 2003) 17

Figure 6. Exemples d'impacts de la dynamique sur les hauteurs d'eau atteinte et les cicatrices glacielles sur la végétation en bande riveraine (A); et sur l'abrasion et la fragmentation des bois morts dans un corridor fluvial (B). 25

Figure 7. Transport de bois durant un évènement de débâcle de glace (A et B) et de transport de bois durant un évènement de crue sans glace (C et D) 26

Figure 8. Localisation du bassin versant de la rivière Saint-Jean, du corridor fluvial étudié de 60 kilomètres de long, du raft dans son delta et présentation du modèle numérique d'élévation. 31

Figure 9. Dynamique fluviale amont-aval dans le corridor fluvial de 60 kilomètres sur la rivière Saint-Jean. *Les cercles qui délimitent les sections représentent graphiquement la largeur moyenne de la plaine alluviale. 32

Figure 10. Exemple de mesures d'embâcles et de bois mort individuel dans le corridor fluvial de la rivière Saint-Jean. 36

Figure 11. Estimation de la différence de mesures dans les volumes en bois accumulés dans le corridor fluvial de la rivière Saint-Jean entre septembre 2012 et octobre 2012. (La ligne pointillée représente la droite X=Y). 38

Figure 12. Configurations des deux caméras vidéo dans la section aval de la rivière Saint-Jean (Caméra 1: PK 7 et; Caméra 2: Pk 2.5). 40

Figure 13. Modèle d'estimation du pourcentage d'erreur dans les mesures d'érosion des berges et des taux de recrutement de bois pour les surfaces d'érosion circulaires (A) et les surfaces d'érosion en forme d'ellipse (B). 42

Figure 14. Les différentes composantes d'un bilan ligneux et les variables clés dans la dynamique du bois mort en fonction des liens entre les différents chapitres de la thèse 43

Chapitre 1

Figure 15. Raft in the estuary of the Saint-Jean River on the Gaspé Peninsula, Québec, Canada. (A) and (B) Part of raft in central channel and position where the pictures were taken in (C). (C) Upstream part of the raft in central channel in 2011. 53

Figure 16. (A) Large-scale map showing the general location of the Saint-Jean River in Québec, Canada. (B) Location of the Saint-Jean River on the Gaspé Peninsula. (C) Detailed map showing the studied river corridor with distance from river mouth in km (kilometric point: PK). (D) Satellite image of the Saint-Jean River delta where the large wood rafts occupy large sections of the three main delineated channels. 55

Figure 17. Theoretical examples of the method used to measure the 'air–wood' volume of large wood (LW) accumulations. The width (w), the average thickness (h) and the length (L) of a simple rectangular are measured to the nearest centimetre using a rigid and flexible graduated ruler. 58

Figure 18. Model to estimate error during measurement of the eroded floodplain surface using projected ellipse forms. 60

Figure 19. Aerial photographs from 1963, 1975, 1993, 2004, and 2013 are showing the evolution of large wood jams (LWJ) in three channels of the Saint-Jean River delta. See text for comments. 62

Figure 20. Drawing showing the evolution of the large wood jam (LWJ) surfaces in three channels of the Saint-Jean River delta between 1963 and 2013. The different tones of gray indicate year of formation in the raft. 64

Figure 21. (A) Relationship between river discharge (Q max (m^3/s)) and LW discharge (Q wood (m^3)) in the Saint-Jean River over time; (B) the scatter plot of the flow. (Triangle symbol indicates an important ice breakup event in 2012); and (C) flood series between 1999 and 2013. 65

Figure 22. (A) Cumulative curves for the number and volume of large wood jams and individual trunks along the river corridor. (B) Longitudinal distribution of bar surface area per kilometre and cumulative curves for the volume of wood in transit along the Saint-Jean River corridor. 68

Figure 23. Longitudinal distribution of erosion rates (m^2/km) and cumulative curves (%) for the eroded surfaces and the wood volume input into the river system. 69

Chapitre 2

Figure 24. (A) Map showing the location of the Saint-Jean River in Québec, Canada. (B) Location of the Saint-Jean River on the Gaspé Peninsula. (C) Detailed map showing the studied river corridor with distances from the river mouth (in km). 84

Figure 25. Large wood jam accumulations in the SJR corridor. (A) Meander jams, (B) secondary channel jams, (C) bank deposit jams, (D) bar apex jams, (E) oblique view of south channel raft, and (F) aerial view of large jam rafts in the upstream part of the SJR delta. 86

Figure 26. Time series of the estimated SJR discharge (QSJR) between January 2010 and December 2014. The four sampling periods (black triangles) and the three analyzed flood events (grey triangles) are indicated. 88

Figure 27. Video camera set-up in SJR. (A) Video camera in situ, (B) view of the spring 2014 flood event, and (C) view of the March 2012 ice breakup event. 91

Figure 28. Variations in numbers of accumulations of total LWJ, LWJ > 100 m^3, and LWJ > 1000 m^3 (A); for individual wood pieces (B); and large wood volume for LWJ (C); and for LWI (D) between 2010 and 2013. (Note: LW volumes in 2010 were adapted from Boivin et al. (2015) so that LW volume could be analyzed at the same scale between years). 93

Figure 29. Characteristics of LWJ: width (A), height (B), length (C), wood volume (D), number of logs (E), and distance from the channel centre (F) between 2010 and 2013. 94

Figure 30. Frequency histogram for the sign sequences of volume changes (A) and the change in number of LW in LWJ (B) for 91 LWJ between 2010 and 2013. 95

Figure 31. Cumulative wood volume (A: in m^3; B: in %) for 2010, 2011, 2012, and 2013 along the SJR corridor. The longitudinal profile (altitude, m) is also shown. 96

Figure 32. Spatiotemporal variability between each year of the survey (2010–2013) of (A) LWJ volume (m^3) per kilometre and (B) number of LWJ per kilometre. 98

Figure 33. (A) Scatter plot of the flow and LW volumes exported to the SJR delta for the period 1999-2014 (adapted from Boivin et al., 2015). Number of large wood transported per minute during three flood events: (B) mechanical ice breakup event in March 2012, (C) open-water flood event in May 2013, and (D) open-water flood event in May 2014. (E) Boxplot presenting number of LW transported per minute for the three events. Note: axis for number of LW per minute in B is 10 times smaller than for (A) and (C); grey rectangles represent missing data during night because of darkness and dashed lines represent the average values of transport rates at the event scale; (triangle symbol in (A) indicates an important ice-breakup event in 2012). 102

Figure 34. LWJ volume in 2013 (A) in relation to geomorphological features: unit stream power in 2013 (B), erosion rate per year between 2004 and 2013 (C), and bar surface area in 2013 (D) along the 60 km river reach of SJR. 103

Figure 35. Geomorphological relationship between sinuosity (A), erosion rate (B and E), unit stream power (C), and bar surface area (D and F) on LWJ dynamics for the six 10 km reaches (indicated by numbers) of the SJR fluvial corridor: 1 = 0-10 km, 2 = 10-20 km, 3 = 20-30 km, 4 = 30-40 km, 5 = 40-50 km, 6 = 50-60 km. (G) LW density over the four years for reaches with the highest LW volumes and bar surface areas. Error bars represent the 95% confidence interval for each river reach, the dashed line in (D) represents a homogeneous LW density by bar surface area with a

ratio of 1 m^3 per 25 m^2 and E and F represents the LW volume standard deviation between the four-year surveys. 106

Figure 36. Conceptual model on processes of transport of LW with ice break-up and without ice break-up. 110

Figure 37. Conceptual model of LW dynamics during an open-water event (A) and an ice breakup event (B). The light grey areas represent LW flux, the dark grey areas represent LW recruitment, the solid lines show flow magnitude, and the dashed lines show water level. Note: Time scale is in days for an open-water event (A) and time scale is in hours for an ice-breakup event (B). 111

Chapitre 3

Figure 38. Components and interrelations of the large wood dynamics in rivers of cold regions framed into a wood budget approach. 123

Figure 39. (A) Large-scale map showing the location of the Saint-Jean River in Québec, Canada. (B) Location of the Saint-Jean River on the Gaspé Peninsula. (C) Detailed map showing the studied river corridor with distance from the river mouth in kilometres (kilometric point: PK) 125

Figure 40. (A) Aerial photography (drone) of the Saint-Jean delta in July 2015, after dismantling of the main large raft in the south channel. (B) Photography during the dismantling in February 2015 and (C) Area of deposited LW from the raft in February 2015. (B) and (C) represent the position where the pictures were taken in (A). *The red circle represents the deposition area of the removed wood of the raft in winter 2015 and line represent limits of the raft in 1963, 2004 and 2013. 127

Figure 41. Definition of the temporal windows for which the components of the large wood budget can be quantified for the SRJ. 131

Figure 42. Large wood input by lateral erosion and erosion rates between 1963 and 1993 (A), between 1993 and 2004 (B) and between the period 2004 and 2013 (C). 136

Figure 43. Large wood budget per year estimation at fluvial corridor scale between 1963 and 2013 (A), between 2010 and 2013 (B), between 1963 and 1993 (C); 1993 and 2004 (D) and between 2004 and 2013 (E). 138

Figure 44. Relation between LW volume dynamics: (A) Between LW ouput and LW input during different periods of time; (B) between large wood output/evacuated and large wood input at the reach and watershed scale (*the dashed line represents the relationship X=Y); (C) between large wood accumulated and large wood input and; (D) large wood accumulated and large wood output/evacuated. 140

Figure 45. Wood volume variation between 2010 and 2013 in each reach section of the river 141

Figure 46. Interannual variation in the large wood budget at fluvial corridor scale between 2010-2013 (A) and annually between 2010-2011, 2011-2012 and 2012-2013 (B)..... 143

Figure 47. Eco-hydromorphological trajectory of Saint-Jean River over the period 1963-2013 for the three geomorphological unit's area. QAM: maximum annual discharge. (Triangles represent aerials photography use for analysis)..... 145

Figure 48. Large wood dynamics trajectory of Saint-Jean River over the period 1963-2013 for the three geomorphological unit's area. (Triangles represent aerials and satellites imagery use for analysis and black lines represent an annual survey)..... 146

Figure 49. Large wood trajectory in the Saint-Jean River in the last 50 years (adapted from Dufour and Piégay, 2009)..... 152

Conclusion générale

Figure 50. Les principales composantes de la dynamique du bois mort analysées dans cette thèse et les liens entre les différents chapitres. 155

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

BM	Bois mort
DBH	diameter at breast height
DHB	Diamètre hauteur poitrine
EBM	Embâcle de bois mort
IQR	Interquartile ranges
LW	Large wood
LWJ	Large wood jam
LWR	Large wood in river
ρw	proportion of air in wood / proportion d'air dans le bois
PK	Point kilométrique
RMSE	Root mean square error.
RSJ	Rivière Saint-Jean
SE	Standard error
SGRG	Société de gestion des rivières de Gaspé
SJR	Saint-Jean River
TH	Tree height / hauteur des arbres

LISTE DES SYMBOLES

E	Volume de bois éliminé
F	Volume de bois transporté/mobilisé
g	Accélération gravitationnelle
H	Thickness / épaisseur
Ha	Hectare
km	Kilomètre
km^2	Kilomètre carré
L	Length / longueur
m	Mètre
m^3	Mètre cube
p	Probabilité (en statistiques)
p	Density of water / Densité de l'eau
Q	Discharge / débit
S	Channel slope / Pente du chenal
Vaw	air–wood volume (m^3) / Volume air-bois (m^3)
W	Volume de bois recruté (*input)*
W	Width / largeur

ΔS Changement dans le volume de bois accumulé

ω Unit stream power

INTRODUCTION GÉNÉRALE

I. 1 DYNAMIQUE DU BOIS MORT EN RIVIERE: PERSPECTIVES ET QUESTIONS DE RECHERCHE

Au Québec, il y a émergence des méthodes hydrogéomorphologiques pour la gestion des rivières depuis la dernière décennie alors que la recherche focalise davantage sur des approches appliquées et à l'échelle du système fluvial (Roy, 2012). Récemment, plusieurs études originales portant sur la géomorphologie fluviale appliquée, avec un intérêt marqué pour l'étude des systèmes fluviaux dans leur ensemble ont été publiées (ex.: Aubry *et al.,* 2013; Demers *et al*., 2014; Biron *et al*., 2014; Buffin-Bélanger *et al*., 2015; Dugdale *et al.,* 2015; Lagadec *et al.,* 2015; Morin *et al.*, 2015). Les recherches portent sur une multitude de thèmes, par exemple: le transport des sédiments, les bilans sédimentaires, les risques d'inondation, l'érosion des berges, ou encore le concept d'espace de liberté. Cependant, avant cette thèse, peu d'études avaient abordé la dynamique du bois mort (BM) dans les cours d'eau québécois et de régions froides. Du côté de la gestion des cours d'eau, plusieurs outils ont été développés en France et ailleurs afin d'optimiser la gestion des cours d'eau avec BM (Le Lay et Piégay, 2007). Les connaissances sur la dynamique et la gestion des BM au Québec sont encore limitées (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010b; Denis *et al*., 2013, Boivin *et al*., 2015; Massé et Buffin-Bélanger, 2016). Il existe très peu d'outils pour promouvoir une gestion éclairée, saine et durable du BM en rivière et avant nos travaux, le seul document disponible pour les gestionnaires de cours d'eau portait uniquement sur le démantèlement d'embâcles (Thérien, 1997). De plus, les bois en rivière sont avant tout perçus comme une source de nuisance par la population (Le Lay et Piégay, 2007; Chin *et al*., 2008; Chin *et al*., 2014), alors même que de nombreuses études soulignent les bénéfices écosystémiques qu'ils procurent (ex.: Mossop et Bradford, 2004; Thévenet, 1998). L'un des principaux problèmes est lié à leur mobilité (Piégay *et al*., 2015) qui peut engendrer un

risque pour l'exercice de certains usages et pour la sécurité publique. Ils peuvent être introduits dans des secteurs à faible risque, mais parcourir des distances importantes et faire obstacle à l'écoulement dans des secteurs aval plus sensibles. Ainsi, lorsqu'il y a présence de bois mort dans un chenal, des impacts positifs et/ou négatifs peuvent survenir et cette réalité est méconnue et peu prise en compte dans la gestion des cours d'eau au Québec. En partant des principes 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 » (Loi sur les compétences municipales, 2005), il est nécessaire maintenant de considérer la dynamique des bois en rivière dans nos analyses de la dynamique fluviale. Au cours des dernières années, plusieurs problématiques liées à la présence du bois mort ont été étudiées par des approches hydrogéomorphologiques au Québec (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010b; Denis *et al*., 2013; Massé, 2014), mais le manque de connaissance concernant la dynamique des BM à l'échelle du bassin versant persiste, tant au niveau national qu'international.

À l'échelle internationale, l'étude de la dynamique du bois mort est aussi relativement nouvelle en géomorphologie fluviale (Montgomery et Piégay, 2003), datant de la fin des années 1970 (ex., Keller et Tally, 1979; Bilby et Likens, 1980). Les bois morts peuvent avoir des effets significatifs sur la structure des écoulements (Abbe et Montgomery, 1996), le transport des sédiments (Assani et Petit, 1995; Cadol et Wohl, 2011), l'organisation des formes fluviales (Keller et Tally, 1979; Nakamura et Swanson, 1993; Lisle, 1995; Montgomery *et al*., 1995) et le style fluvial (Keller et Swanson, 1979; Hickin, 1984; Piégay, 1993; Piégay et Marston, 1998; Sear *et al.*, 2010). Les boisements sont fréquents sur les berges des cours d'eau et les bois morts font partie de la dynamique naturelle des rivières (Montgomery et Piégay, 2003). La dynamique des BM fait l'objet d'étude dans plusieurs pays au cours des quarante dernières années (Montgomery et Piégay, 2003). Les études portant sur les caractéristiques et les fonctions des BM en rivières ont été initiées dans le nord-ouest des États-Unis durant les années 1970 (par exemple, Keller et Tally, 1979; Bilby et Likens, 1980), avec des exemples récents au Japon (Seo *et al*., 2008;

Seo et Nakamura, 2009); aux États-Unis (Wohl et Jaeger, 2009; Moulin *et al*., 2011; Wohl, 2011); dans le nord-ouest du Canada (Kramer et Wohl, 2014); en Australie (Kitchingman *et al*., 2015); au Chili (Ulloa *et al*., 2015); et en Europe (Wyżga et Zawiejska, 2005; Ruiz-Villanueva *et al*., 2014; Lucía *et al*., 2015; Osei *et al*., 2015).

D'un point de vue scientifique, le développement de bilans ligneux à l'échelle de bassins versants et de tronçons fluviaux est novateur au niveau mondial (Moulin, 2005; Benda *et al*., 2003). Seo et Nakamura (2009) et Seo *et al*. (2010) ont souligné l'importance d'analyser la dynamique du bois mort à différentes échelles spatiales, mais aussi les difficultés liées à l'acquisition de données à l'échelle de long corridor et de bassin versant. La littérature est multiple en ce qui a trait à l'influence du BM sur les processus et les formes dans un système fluvial, mais très peu d'articles ont quantifié les flux de bois mort à l'échelle de bassins versants (Wohl et Jeager, 2009). Compte tenu des nouveaux enjeux pratiques et des avancées technologiques récentes, l'étude des flux de bois et l'établissement de budget ligneux à l'échelle de bassins versants sont des créneaux novateurs pour la recherche au Québec et dans le monde. Le calcul de bilan ligneux à l'échelle d'un bassin versant ouvrira la voie à l'analyse des facteurs contrôlant ces flux et à la quantification de la variabilité géographique et temporelle. Cela viendra combler une grande lacune pour la gestion des rivières québécoises et répondra à plusieurs questions de recherches actuelles. À plus long terme, ces éléments permettront également de formuler des recommandations pour gérer ces flux, voire des protocoles d'intervention et de gestion au long terme.

Cette thèse est dans la mouvance des études hydrogéomorphologiques visant la compréhension des systèmes fluviaux dans leur ensemble et dans un contexte de changements environnementaux. Elle consiste à comprendre la dynamique du bois mort dans les rivières graveleuses de régions froides et à développer une nouvelle méthode d'analyse par l'approche de bilan ligneux à l'échelle du bassin versant. Cette nouvelle méthode va permettre de: 1) quantifier les flux de bois sur des fenêtres d'observation précises avec des nouvelles méthodes; 2) de quantifier les intrants et les extrants de bois sur

différentes sections fluviales; 3) de quantifier la rétention de bois sur des tronçons fluviaux et 4) de développer et appliquer une nouvelle approche par bilan ligneux grâce aux éléments 1, 2 et 3. Les résultats ont permis d'observer, de quantifier et de comparer la variation spatiale et temporelle de la dynamique du BM à l'échelle d'un bassin versant sur une période de plus de 50 ans. Finalement, les résultats de recherche apporteront des informations clés sur cette dynamique aux gestionnaires de cours d'eau et permettront d'améliorer les méthodes de gestion des BM au Québec et ailleurs dans le monde.

I.1.1 Le cas des embâcles de la rivière Saint-Jean

La problématique des embâcles de bois mort (EBM) sur la rivière Saint-Jean (RSJ) a commencé à l'été 2009 et 2010 où 150 saumons ont été retrouvés morts durant l'été (Wadham-Gagnon and Castilloux, 2010) le long du corridor fluvial de la RSJ. Les premières études ont émis l'hypothèse que le problème pouvait être lié à la montaison au travers d'embâcles de bois immenses créant un stress physique sur les saumons (Dallaire, 2009; Wadham-Gagnon and Castilloux, 2010; GÉNIVAR, 2011). Le BM en rivière est actuellement considéré par les gestionnaires, comme ayant un impact négatif sur la faune aquatique et comme un facteur de risques hydrauliques (érosion, inondation, déstabilisation des infrastructures…), mais les données scientifiques sont manquantes. Les embâcles de la RSJ ont fait l'objet d'un suivi médiatique important depuis 2009, ceux-ci étant souvent présentés de manière négative en lien avec la perception que les gestionnaires se faisaient de ces embâcles (Figure 1). Depuis les années 1990, la Société de gestion des rivières de Gaspé (SGRG) désire effectuer des travaux afin de faciliter la montaison du saumon, ce qui implique le démantèlement partiel ou total de ces embâcles.



Figure 1. Grands titres d'articles de journaux et de reportages télévisuels réalisés sur les embâcles de la rivière Saint-Jean depuis l'été 2009. Sources: Graffici (A); Radio-Canada, 2015 (B); Le Soleil, 2014 (C) et; Journal de Québec, 2015 (D).

Les embâcles de bois dans le delta de la RSJ sont parmi les plus gros recensés au monde (Figure 2A). Il s'agit d'un site d'étude unique pour documenter la formation d'embâcle et pour le développement de bilan ligneux à l'échelle d'un bassin versant. Le cas de ces embâcles dans la RSJ est un exemple concret où la gestion mérite d'être davantage éclairée. Ce cas peut en outre servir de base pour formuler un protocole de gestion qui soit applicable plus largement aux cours d'eau du Québec et de régions froides. Les gestionnaires de la SGRG ont finalement opté pour un démantèlement complet de l'embâcle présent dans le chenal principal à l'hiver 2015 (Figure 2B). Les changements environnementaux (augmentation des précipitations liquides et solides, augmentation des redoux hivernaux…) observés actuellement en Gaspésie (Bernatchez *et al.*, 2008) risquent notamment d'influencer le recrutement et le transport du BM et, par conséquent, de compromettre les investissements effectués pour dégager le chenal si l'embâcle se reforme

rapidement suite au démantèlement. Il devient nécessaire d'estimer les quantités de bois disponibles dans le cours d'eau et susceptibles d'y être introduits dans les prochaines années afin d'estimer les coûts annuels d'intervention, mais surtout, pérenniser les actions entreprises sur cet embâcle, lors de son démantèlement partiel en 2015.

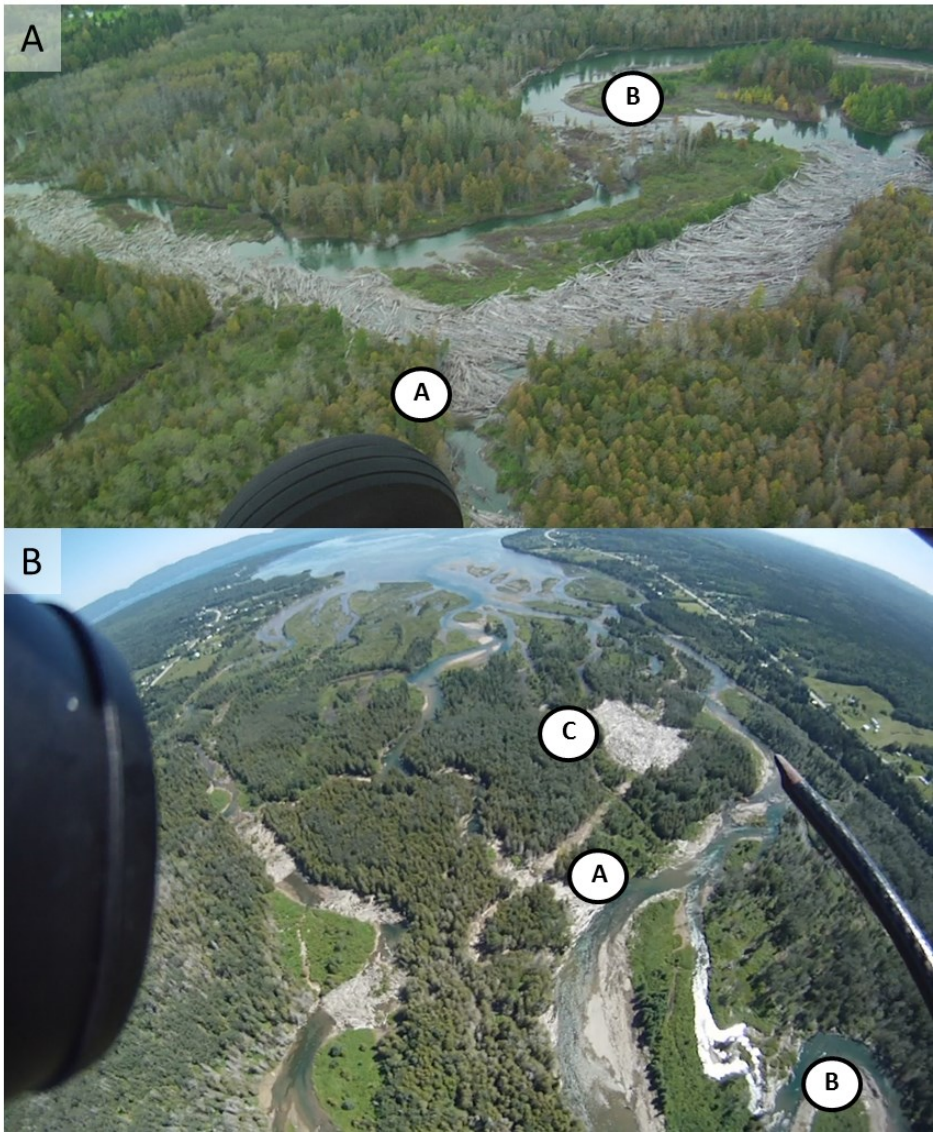


Figure 2. Photographies obliques d'une (A) section de l'embâcle du chenal sud dans la rivière Saint-Jean en 2011 et (B) du delta de la RSJ en 2015 après le démantèlement. *Les lettres encerclées représentent les mêmes emplacements sur chacune des photos et la lettre (C) présente la zone de dépôt du bois retiré de l'embâcle durant le démantèlement.

L'embâcle de la RSJ est un excellent environnement physique et humain pour la réalisation de ce projet de recherche. Dans le cadre de cette thèse, nous utilisons les embâcles terminaux de la RSJ afin d'estimer les volumes de bois produits et exportés par le bassin versant depuis 1963. Cette structure naturelle de rétention de la majorité des bois morts transportés depuis les secteurs amont est unique au monde à notre connaissance. En plus, nous disposons de tronçons où les bandes riveraines n'ont pas été modifiées par des actions humaines au cours des derniers siècles et d'autres tronçons où les coupes forestières sont omniprésentes depuis le 19e siècle (Côté *et al.,* 2004).Cette thèse s'attarde à quantifier et à déterminer les variables de contrôles des principales composantes de la dynamique du BM en rivière par une approche de bilan ligneux.

I.1.2 La notion de bilan ligneux

Cette section présente la dynamique du bois mort selon la formulation d'un bilan ligneux. Un bilan ligneux constitue une méthode systémique pour modéliser et pour quantifier la dynamique du BM à différentes échelles spatio-temporelles. Un tel budget représente un bilan de masse qui considère les entrées, les accumulations et les exports de BM. Keller et Swanson (1979) ont été les premiers à conceptualiser la dynamique du BM dans un cadre de budget ligneux en y présentant les différentes composantes et la grande variabilité des processus en lien avec la dynamique du BM en rivière.

Les analyses par bilan ligneux sont relativement récentes et le tableau 1 présente les principales études recensées dans ce domaine. Un des premiers cadres d'analyse (Figure 3) fut développé par Martin et Benda (2001) afin de calculer un bilan ligneux dans un petit bassin versant du Nord-Ouest américain (132 km²) où la hauteur des arbres est supérieure à la largeur du chenal, limitant la mobilité des BM. Au même titre qu'un bilan sédimentaire, le bilan ligneux fait référence à la quantification des intrants de bois mort par rapport au volume de bois stocké dans le système, au volume accumulé sur la plaine alluviale ou en transit dans un corridor fluvial et au volume expulsé du système (Benda et Sias., 2003; Montgomery *et al*., 2003). Il est calculé à partir des intrants (*input*), des extrants (*output*) et

de la décomposition/fragmentation (*decay*) des bois morts dans un système fluvial (Figure 3). Benda et Sias (2003) ont été les premiers à proposer une formulation mathématique (Tableau 1) permettant d'estimer un bilan ligneux et distinguant les différentes caractéristiques de la dynamique du bois mort.

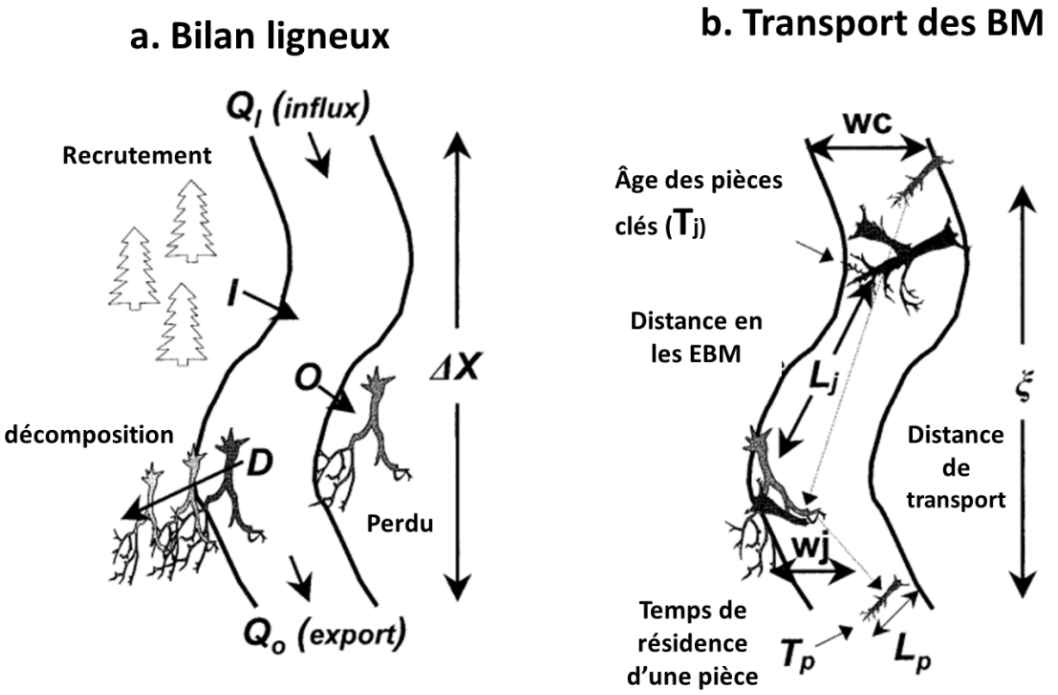


Figure 3. Modèle conceptuel d'analyse par bilan ligneux (A) et de la dynamique du transport de BM (B) à l'échelle d'un tronçon fluvial (cellule hydromorphologique) (adaptée de Martin et Benda, 2001)

Boivin et Buffin-Bélanger (2010b) ont proposé une autre équation pour répondre à une demande des gestionnaires de la RSJ afin d'estimer les volumes de BM produits, accumulés et exportés du bassin versant entre 1963 et 2004. À l'inverse d'un bilan ligneux ou sédimentaire traditionnel où l'équation est basée sur la quantification des stocks accumulés dans un système, cette méthode de quantification a permis de valider et de quantifier le flux total produit sur une période de temps donnée, afin d'estimer les coûts d'entretien annuel de la gestion des BM à l'échelle d'un bassin versant. Cette méthode

d'application est similaire à une approche par bilan hydrique où l'objectif est de quantifier un flux (débit liquide) en un point donné et pour une période donnée.

Wohl (2011) propose une adaptation de l'équation de bilan ligneux de Benda et Sias (2003) pour y intégrer les volumes de bois stockés dans les barrages de castors. Wohl (2011) met en avant que chaque variable n'a pas le même poids, selon le milieu d'étude. Une proposition d'ajustement de l'équation est appliquée afin de refléter l'importance relative plus élevée de certaines variables dans des tronçons fluviaux selon sa dynamique (par exemple: importance plus élevé pour Li et ΔSc pour les sections confinées comparativement à une importance plus grande pour Lo et B pour les sections non confinées)

Une troisième équation, fondée sur le nombre de BM dans un corridor fluvial a été développée avec des données d'accumulation *in situ* et à l'aide d'un modèle de probabilité Monte-Carlo dans deux environnements différents du parc national de Yellowstone aux É-U: 1) bassin versant sans feu de forêt; et 2) bassin versant ayant subi des feux de forêt (Marcus *et al*., 2011). Ces auteurs ont cartographié la distribution des accumulations de BM dans plusieurs tronçons fluviaux totalisant une longueur de 73.4 km pour le développement d'un modèle de prédiction pour la production, le transport et les accumulations de BM dans un système fluvial. À l'échelle du tronçon fluvial, le modèle de prédiction a montré une faible relation entre le nombre de BM et la largeur du chenal et aucune relation entre le nombre de BM et les variations morphologiques ou encore avec la présence ou absence de feu de forêt (Marcus *et al*., 2011).

Récemment, Benda et Bigelow (2014) ont testé l'équation proposée par Benda et Sias (2003) avec des données *in situ* de recrutement, d'accumulation et de transport de BM dans 4 cours d'eau (bassin versant < 30 km²) en Californie. Ces auteurs ont montré que la différence dans les volumes en BM dans un cours d'eau est influencée principalement par trois conditions locales: les taux d'érosion, la mortalité de la forêt et la présence de mouvements de masse.

La quantité et le type de bois entré, accumulé et exporté d'un système fluvial sont influencés par la morphologie, les paramètres hydroclimatiques et les caractéristiques de la végétation riveraine d'un cours d'eau (Keller et Swanson, 1979). 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). 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 et de la dynamique fluviale (Montgomery *et al*., 2003). Si le volume de bois produit et en transit dans le système fluvial est supérieur à celui annuellement évacué, la concentration d'EBM est généralement importante (Montgomery *et al*., 2003) et une augmentation de ces volumes sera constante dans le temps. Les variations spatio-temporelles du bilan ligneux peuvent occasionner des bouleversements hydrogéomorphologiques comparables aux modifications du bilan sédimentaire ou du débit dans une rivière (Montgomery *et al*., 2003). La variation des volumes de BM dans un système dépend principalement des taux de production de BM, de la quantité de BM en transition dans le système et des évènements hydroclimatiques permettant d'initier leur transport. Les avancées en termes de bilan ligneux sont significatives depuis les 10 dernières années, mais le développement dans des contextes environnementaux variés est nécessaire, car il s'agit d'une composante essentielle afin d'estimer les avantages écosystémiques potentiels versus les désavantages liés aux risques associés aux BM en rivière (Gurnell, 2013). Afin d'améliorer les approches par bilan ligneux, il est nécessaire d'augmenter nos connaissances sur les différentes composantes, d'incorporer la dynamique fluviale dans les modèles et d'acquérir des données de terrain pour valider cette approche (Gurnell, 2013).

Tableau 1. Les différentes équations de bilan ligneux, les variables utilisées, les sources de données et la validation et application de ces équations dans la littérature.

Auteurs	Benda and Sias (2003)	Boivin et Buffin-Bélanger (2010)	Wohl (2011a, 2011b) (adaptée de Benda et Sias (2003)	Marcus et al. (2011)
Équation Bilan ligneux simplifiée	ΔS=[IΔx-LΔx+(Qi-Qo)-D]Δt	Vp = Va + Vt + Ve	ΔSc = [Li - Lo + Qi/Δx - Qo/Δx - D + B] Δt	Count = L + (3*C) + (8*J) Vexp = Wexp (V Ftot + Vu + Vs(t- 1))
Variables	ΔS : Changement dans les volumes accumulés	Vp: volume de bois morts produits par le bassin versant	ΔSc : Changement dans les volumes accumulés	Count: nombre de pièces de BM par 100 mètres de tronçon de rivière
	Δx : Tronçon de rivière	Va : Volume accumulé dans le bassin versant	Δx : Tronçon de rivière	L : nombre de bois mort individuel (BMI)
	Δt : Intervalle de temps	Vt: Volume de BM transporté	Δt : Intervalle de temps	C : Nombre de BM groupé de 2 à 5 BMI (cluster)
	I : recrutement de BM	Ve : Volume de BM évacué d'un bassin versant	Li : recrutement latéral de BM	J : nombre d'embâcles de bois mort (6 pièces +)
	L : perte de BM par accumulation sur une plaine alluviale		Lo : perte de BM par accumulation sur une plaine alluviale et par la migration du chenal	Vex : Volume de BM exporté d'un tronçon pour une année
	Qi : Transport durant les crues à l'intérieur du Δx		Qi : Transport durant les crues à l'intérieur du Δx	Wexp : Pourcentage de BM mobilisé
	Qo : Transport durant les crues à l'extérieur du Δx		Qo : Transport durant les crues à l'extérieur du Δx	Vftot : BM tombé dans le tronçon pour une année
	D : Décomposition/fragmentation in situ des BM		D : Décomposition/fragmentation in situ des BM	Vu : Volume de bois introduit par les tronçons amont
			B : accumulation de BM dans les barrages de castors	Vs : Volume de bois accumulé de l'année précédente
Sources des variables	**Volume produit :** Identification in situ de la provenance de chaque pièce selon quatre catégories: érosion des berges; mouvement de terrain, mortalité et de causes anthropiques	**Volume produit :** Calcul basé sur des images aériennes et satellites de l'érosion des berges et sur la densité de végétation en bande riveraine entre 1963 et 2013	**Volume produit :** Basé sur des données moyennes dans la littérature sur les taux de mortalité chronique, par chablis et par les feux de forêt. Aucune donnée sur les volumes produits par l'érosion ou les mouvements de masse.	**Volume produit :** Modélisation de probabilité de recrutement et basée sur une valeur de densité en bande riveraine
	Volume accumulé : Mesures *in situ* de chaque accumulation de BM.	**Volume accumulé :** Calcul basé sur des données de mesure des accumulations in situ pendant 4 ans	**Volume accumulé :** Basé sur des données moyennes dans la littérature de relation entre la largeur du chenal et le volume accumulé et sur une estimation selon le nombre de barrages de castor par km.	**Volume accumulé :** Volume estimé selon les équations de Volume produit, de volume transporté et de volume exporté.
	Volume transporté : Le temps de résidence est calculé à partir du volume total en BM divisé par le taux de recrutement.	**Volume transporté :** Calcul basé sur des données de caméra vidéo en continu pendant 4 ans	**Volume transporté :** Aucune donnée et non-intégrée au modèle	**Volume transporté :** Estimation selon une courbe régionale de seuil de transport du bois
	Volume exporté : Estimation qualitative de la fragmentation/décomposition *in situ* et utilisation des données de temps de résidence relatifs pour estimer les volumes exportés.	**Volume exporté :** Calcul basé sur des images aériennes et satellites des rafts dans le delta du système fluvial entre 1963 et 2013	**Volume exporté :** Basé sur des données de fragmentation/décomposition dans la littérature. Aucune donnée sur les BM exporté par le transport fluvial et estimation personnelle de l'auteur sur les BM évacués dans la plaine alluviale	**Volume exporté :** Estimation selon la différence de volume dans le tronçon d'une année à l'autre
Applications et validation	**Benda et al., 2004** : 7 tronçons : Moyennes d'aire de drainage : 2,8km², moyenne de longueur des tronçons :1086 mètres; Ordre 1 à 2 **Benda et Bigelow, 2014** : 7 tronçons : Moyennes d'aire de drainage : 12,8km², moyenne de longueur des tronçons :1277 mètres	Calcul basé sur un corridor fluvial et un bassin versant de 1134 km², d'une longueur de 60 km et d'ordre 3 à 5	Données proviennent de plusieurs études sur des petits cours d'eau (<30 km²) montagnards au Colorado. Modèle non validé sur le terrain.	Modélisation basée sur les caractéristiques de 6 tronçons de rivières : Moyennes d'aire de drainage : 62km²; moyenne de longueur des tronçons : 12,1 km; Ordre 2 à 5

Ces équations reflètent la diversité des processus contrôlant la dynamique du BM, mais également la variabilité des échelles de temps et d'espace sur lesquelles ont été appliquées ces dernières. Les différents processus qui gouvernent les variables de la dynamique du bois en rivière peuvent influencer la quantité et les caractéristiques des BM, de l'échelle du tronçon fluvial jusqu'à celle du bassin versant. Ces processus peuvent survenir sur différentes périodes de temps, de la crue annuelle à plusieurs décennies et même des siècles (Hyatt et Naiman, 2001). La majorité des études sur la dynamique du bois en rivière ont focalisé sur un sous-ensemble du bilan ligneux, en analysant généralement des parties d'un budget ligneux (voir la revue de Hassan *et al*., 2005) et encore moins à multiples échelles spatiale et temporelle sur plus de 50 ans.

Peu d'études portent sur l'application de bilan ligneux à l'échelle de grands bassins versants où la mobilité des BM est plus marquée que dans les petits cours d'eau. Ainsi, les données de terrain (particulièrement les données de BM exportés et accumulés) sont rares pour tester ce cadre d'analyse à l'échelle du bassin (Benda et Sias, 2003; Seo *et al*., 2010). Les résultats de Marcus *et al*. (2011) ont montré l'importance de mesurer quantitativement les BM et les paramètres géomorphologiques sur une grande échelle spatiale et temporelle en raison de perturbation (feu par exemple) qui peut affecter la grande variabilité observée sur la dynamique des BM en rivière et sur la morphologie. Schenk *et al*. (2014) abondent dans le même sens sur la rivière Roanoke où de grandes perturbations (feu et glissement de terrain par exemple) compliquent l'application d'un budget ligneux et nécessitent un large suivi temporel et spatial afin d'y intégrer cette variabilité. Schenk *et al*. (2014) ont estimé le bilan ligneux d'un corridor fluvial de 210 km sur la rivière Roanoke en Caroline du Nord (É-U). Cette analyse a permis d'estimer que 5% des BM se renouvellent annuellement par les différents processus de recrutement et que 16% se déplacent annuellement (Schenk *et al*., 2014). L'application à l'échelle de longs corridors fluviaux et/ou des bassins versants constitue un défi et une composante importante de la dynamique du BM (Seo *et al*., 2010). Les prochaines sections présentent en détail les principales composantes de la dynamique du BM en rivière pour une analyse et la quantification par bilan ligneux.

I.2 LA QUANTIFICATION DES COMPOSANTES DU BILAN LIGNEUX

La quantification de toutes les composantes d'un bilan ligneux est complexe ce qui peut expliquer son absence dans la littérature. Le nombre de composantes et de processus est élevé ce qui rend les mesures fastidieuses, particulièrement sur des systèmes couvrant de grandes distances. Certaines composantes ont davantage été étudiées et quantifiées (accumulations et recrutement du bois par exemple), tandis que d'autres sont plus difficiles à quantifier (BM exporté, temps de résidence, décomposition par exemple). Cette section présente les avancées récentes dans la quantification des quatre composantes principales d'un bilan ligneux: 1) les intrants de BM (W), 2) les accumulations de BM et les changements dans les volumes accumulés (ΔS), 3) la mobilité et les flux du bois dans un système fluvial (F) et finalement, 4) les bois morts éliminés par décomposition et fragmentation (D).

I.2.1 Intrant du bois mort (W)

Plusieurs processus contribuent à alimenter le cours d'eau en BM: les arbres morts en place et tombants dans le cours d'eau (Benda et Sias, 2003), les glissements de terrain, l'érosion des berges et les recoupements de méandres (May et Gresswell, 2003; Swanson, 2003), les inondations (Ruiz-Villanueva *et al*., 2012), les tempêtes (vents et verglas), les feux de forêt (Benda et Sias, 2003; Rosso *et al*., 2007), les coupes en bandes riveraines, la dislocation de barrages de castors et les avalanches de neige dans les régions nordiques. Parmi ces processus, l'érosion des berges constitue la source de bois morts la plus fréquente et la plus constante dans les rivières d'ordre 3 et plus (Abbe et Montgomery, 2003) et dans les cours d'eau alluviaux (Murphy et Kosky, 1989; Latterell et Naiman, 2007). Un taux d'urbanisation très faible et une densité végétale en bande riveraine parfois très élevée vont influencer la production du bois en rivière en augmentant les volumes de BM recrutés. Cependant, dans les cours d'eau contraints par la lithologie, la production de bois mort est généralement plus faible, car les taux de migration latérale des cours d'eau sont souvent moins élevés en raison de la dureté de la roche qui contrôle le tracé des cours d'eau (Keller

and Swanson, 1979; Nakamura and Swanson, 1993) et les BM seront davantage le produit d'autres processus.

La figure 4 illustre l'ajout de bois dans le système fluvial par l'érosion d'une berge (Abbe, 2001). La migration latérale d'un cours d'eau expose la berge concave à une érosion produite par l'écoulement. Lorsque l'érosion de la berge entraîne la chute d'un tronc dans le cours d'eau, il y a une déviation de l'écoulement qui peut augmenter l'érosion sur cette même berge. Ainsi, d'autres arbres sont donc ajoutés au cours d'eau, ce qui vient modifier la dynamique locale de l'écoulement et accentuer davantage les contraintes hydrauliques sur la berge déjà en érosion. La migration latérale peut donc s'accroitre encore et favoriser plus encore l'entrée de troncs d'arbres dans le chenal (Piégay et Gurnell, 1997; Abbe, 2001; Abbe et Montgomery, 2003).

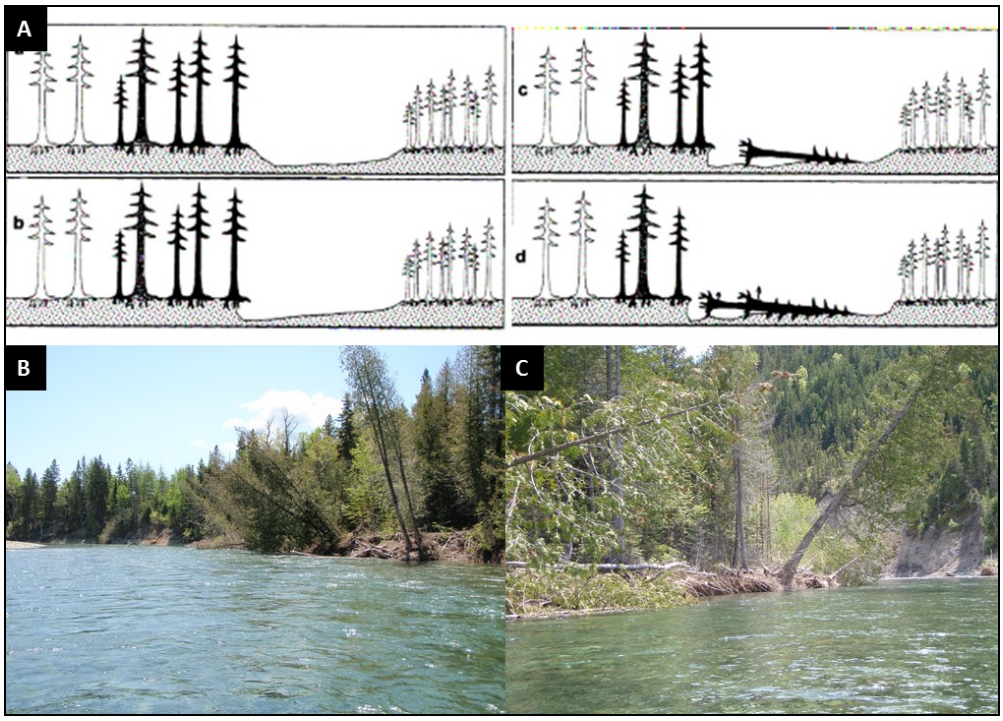


Figure 4. (A) Processus de recrutement de bois morts par l'érosion des berges (modifiée de Abbe, 2001) et; (B-C) deux exemples de processus de recrutement sur la rivière Saint-Jean.

I.2.2 L'accumulation des bois morts (ΔS)

Les accumulations de bois en rivière se divisent en deux types: les pièces individuelles (BMI) et les embâcles de bois (EBM), composés d'un minimum de trois pièces. Abbe et Montgomery (2003) et Thérien (1997) identifient onze facteurs favorisant la mise en place d'embâcles dans un système fluvial, regroupé selon trois origines (Tableau 2). Les zones préférentielles d'accumulation du bois mort sont contrôlées par trois facteurs principaux: 1) la morphologie de la rivière; 2) les forçages externes et historiques et; 3) les modifications anthropiques dans un bassin versant.

Tableau 2. Les facteurs favorisant la mise en place des EBM selon Abbe (2003) et Thérien (1997)

Origine	Facteurs
Morphologiques	**1. Les zones de rétrécissement, bancs d'accumulation et blocs;**
	2. Les zones d'eau peu profonde;
	3. La faible pente d'un cours d'eau;
	4. Les bifurcations brusques du lit d'un cours d'eau;
	5. Les petits cours d'eau de moins de 10 mètres de largeur;
Recrutement des BM	**6. Les berges à substrats meubles;**
	7. Le type et le stade de maturité du couvert forestier riverain;
	8. Les causes naturelles comme un glissement de terrain, un feu, ou une crue de forte intensité;
Gestion et occupation du territoire	**9. Les ponts, les ponceaux sous-dimensionnés et les infrastructures en rivières;**
	10. De façon indirecte: les coupes forestières;
	11. Les mauvaises pratiques forestières en bordure des cours d'eau.

Les bois morts peuvent rester en place pour une longue période de temps (Bilby, 2003) ou être transportés depuis leur source selon différents processus liés aux conditions hydrauliques et à la morphologie (Braudrick et Grant, 2001). Dans les deux cas, ils contribuent à la formation d'embâcles. Les effets sont multiples et sont différents selon la

source du bois, le type d'embâcle et le positionnement dans le bassin versant (Figure 5). Abbe et Montgomery (2003) présentent une classification des types d'embâcles qui tient compte de la source, du type de transport et de la position dans le bassin versant (Figure 5). Ils regroupent les embâcles en trois grands types: 1) les embâcles de type *in situ*; 2) les embâcles de transport; et 3) les embâcles de combinaison (*in situ* et de transport). Il est à noter que selon les auteurs, plus de la moitié des embâcles ont un impact significatif sur la morphologie des systèmes fluviaux, par exemple, sur la diversification des formes, l'accumulation de sédiments et l'érosion des berges. La configuration des embâcles de BM varie de l'amont vers l'aval en raison de la capacité de l'écoulement à redistribuer efficacement les bois dans un système fluvial. Dans les cours d'eau de premier ordre, les BM sont souvent localisés à proximité de leur lieu de chute puisque l'écoulement et la hauteur d'eau sont généralement insuffisants pour permettre leur redistribution. Les cours d'eau intermédiaires sont suffisamment larges pour permettre la mise en mouvement et l'accumulation de BM de tailles plus élevées. Les plus grandes rivières sont généralement caractérisées par la présence sporadique de BM et d'EBM sur les bancs d'accumulation centraux et latéraux et au-delà de la limite du lit mineur (Keller et Swanson, 1979) et le temps de résidence est proportionnel au taux de mobilité du chenal (Moulin, 2005).

La présence de bois morts stables et bien positionnés (parallèles à la berge) près d'une berge en érosion peut également diminuer les taux d'érosion (Abbe et Montgomery, 1995; Montgomery et Piégay, 2003) et diminuer sporadiquement le taux de recrutement. Les bois morts ne sont donc pas systématiquement un facteur d'érosion, ils peuvent au contraire participer à la stabilisation du chenal ou des berges. La technique du peigne de Lachat (1984) consistant à entasser branches, troncs et arbres parallèlement au sens du courant afin de protéger les berges en érosion est un bon exemple. On retrouve aussi plusieurs exemples du rôle stabilisant du bois mort dans les cours d'eau de montagne où les bois morts participent à l'équilibre morphologique des rivières en limitant le transfert des sédiments et en réduisant la force de l'écoulement sur le lit et les berges (Abbe, 2001).

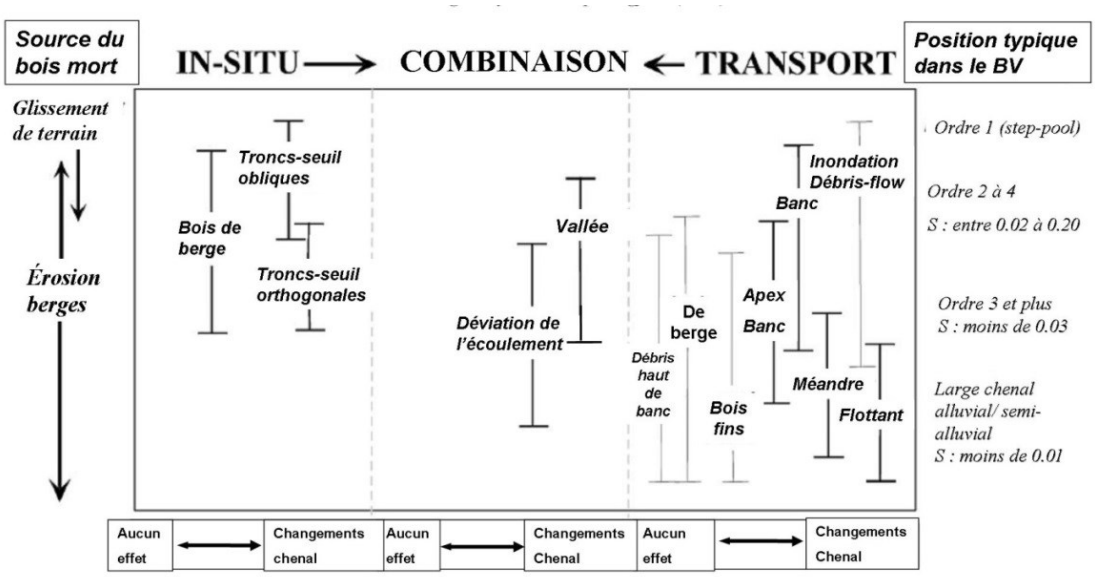


Figure 5. Classification des types d'embâcle et impacts sur le chenal (modifiée d'Abbe et Montgomery, 2003)

De manière générale, les accumulations de BM en amont des bassins versants sont de faible taille et peu organisées. Progressivement vers l'aval, les embâcles sont plus volumineux et davantage structurés par la force de l'écoulement (Montgomery *et al*., 2003). Généralement, le nombre d'embâcles de bois diminue progressivement vers l'aval alors que le chenal devient plus large que la hauteur des arbres riverains. La capacité d'accumulation de bois tend à être plus élevée dans les cours d'eau drainants des forêts anciennes et matures, que dans ceux qui sont riverains d'une jeune forêt (Gurnell, 2013; Jackson et Wohl, 2015). Finalement, les embâcles de grandes tailles semblent plus stables dans le temps que les embâcles de petite taille, qui peuvent être plus dynamiques et mobiles durant les évènements hydrométéorologiques (Piégay et Gurnell, 1997).

Les accumulations de BM en rivière constituent la composante du bilan la plus fréquemment mesurée, particulièrement dans le cas des petites rivières. Pour les grands cours d'eau et à l'échelle de longs corridors fluviaux, les données de mesures de volumes sont plus rares, particulièrement pour des suivis de plusieurs années. Moulin *et al*. (2011), ont utilisé des données vidéo par hélicoptère afin d'analyser la distribution spatiale et les

caractéristiques physiques de plus de 10 600 accumulations (5368 BM et 5356 EBM) sur 177 km de long sur la rivière Roanoke, É-U. Ces données ont par la suite été réutilisées afin d'établir un budget ligneux sur ce long corridor fluvial (Schenck *et al*., 2014). Atha (2014) a utilisé des images satellites de Google Earth afin d'extraire différentes données géomorphologiques (ex.: élévation, pente, largeur…) et positionner et estimer le nombre de BM et d'EBM dans un corridor fluvial de 73 km de long sur la rivière Queets dans le nord-ouest des États-Unis. Des mesures de distributions des accumulations de BM ont aussi été effectuées à l'aide d'imageries aériennes, à l'échelle de courts tronçons de rivière (Marcus *et al*., 2002) et à l'échelle d'un delta (Boivin et Buffin-Bélanger, 2010b). Latterell et Naiman (2007) ont analysé la dynamique d'accumulation par photographies aériennes sur quatre tronçons de 2 km de long sur la rivière Queets, É-U. Ils ont aussi quantifié le recrutement de BM par l'érosion entre 1939 et 2002 (intervalle moyen de 9 ans entre les photos) sur l'ensemble de ce bassin versant de 1200 km². Lassettre *et al*. (2008) ont été parmi les premiers à réaliser deux campagnes de mesure afin d'analyser l'évolution de la distribution et de la fréquence d'accumulation de BM dans un long corridor fluvial (36 km) sur une période de 10 ans l'aide de photographies aériennes obliques. Cependant, la variabilité interannuelle reste méconnue, particulièrement pour les grandes rivières.

Malgré le nombre considérable de publications sur la distribution des accumulations en BM et les liens avec la morphologie dans un long corridor fluvial, plusieurs questions de recherches restent en suspens. À l'échelle des bassins versants et de longs corridors fluviaux, quels sont les secteurs qui produisent le plus et quels sont les secteurs qui piègent la majorité des BM? En termes de dynamique temporelle des BM, les observations et mesures sur le long terme sont extrêmement rares (Iroumé *et al*., 2015). Dans le cadre d'analyses par bilan ligneux sur une longue période d'observation, l'accumulation dans de nombreuses zones de stockage à l'échelle de bassin versant complique la validation d'un bilan (Carmona *et al*., 2002; Seo and Nakamura, 2009; Seo *et al*., 2010). Généralement, l'application de bilan ligneux à de grandes échelles spatiales et temporelles reste incertaine, étant donné le temps nécessaire de transfert des BM de l'amont vers l'aval et les différents cycles dépôt – reprise que cela génère au sein d'un tronçon (Seo *et al*., 2010). La

dynamique des zones d'accumulations est une donnée quasi absente. Les secteurs qui piègent ou qui produisent la majorité du BM sont-ils les mêmes d'une année à l'autre ou d'une décennie à l'autre (Lassettre *et al*., 2008)?

I.2.3 La mobilité des bois morts (F)

La redistribution des BM et leur évacuation d'un système fluvial sont principalement conditionnées par les événements hydrométéorologiques et la morphologie du chenal (Hassan *et al.,* 2005). Les crues majeures jouent un rôle significatif dans la distribution spatiale et la dynamique du bois mort (Piégay et Gurnell, 1997; Golladay *et al.* (2007). À la suite d'épisodes de forte pluviosité ou de la fonte rapide du couvert nival, les BM en rivière sont susceptibles d'être transportés par l'onde de crue. La majorité du transport de BM s'effectue durant la montée de la crue (MacVicar et Piégay, 2012; Kramer et Wohl, 2014), pouvant même être jusqu'à quatre fois plus élevé que durant la période de décrue (MacVicar et Piégay, 2012). Il existe différentes méthodes directes (Caméra in situ, transpondeurs actifs et passifs, traceurs GPS, peinture…) et indirectes (comparaison des volumes introduits accumulés et exportés) pour quantifier le taux de transport de BM en rivière. Moulin et Piégay (2004) ont montré que les quantités de BM augmentent généralement avec l'intensité d'un évènement hydrométéorologique, mais que deux crues successives de même intensité ne transporteront pas nécessairement une quantité identique due à un temps nécessaire de renouvellement des stocks entre les évènements hydrométéorologiques. Pour les milieux nordiques, les données sont absentes et les interrelations entre la dynamique des glaces et le transport du bois mort font partie des questions de recherches fondamentales auxquelles il est nécessaire de répondre aujourd'hui (Kramer et Wohl, 2014; Wohl, 2015).

Lyn *et al*. (2003) furent les premiers à utiliser des caméras vidéo afin de suivre qualitativement l'accumulation de BM en un point donné. Ils ont surveillé un pont sensible à l'accumulation de bois afin d'évaluer l'efficacité d'une structure de déviation, mais sans quantifier les flux de BM. Plus récemment, une méthode d'estimation et de quantification

des flux de bois par caméra vidéo a permis d'identifier le taux de transport durant différentes crues sur l'Ain en France (MacVicar et Piégay, 2012). Ces auteurs ont travaillé sur le développement d'une méthode de calcul de volume de bois transporté en rivière à l'aide d'image vidéo et de transpondeurs actifs et passifs, afin d'analyser les variables explicatives de la mise en transport du bois et les volumes transportés dans différentes conditions d'écoulement afin de détecter un seuil de mis en mouvement. Par la suite, MacVicar *et al*. (2009) ont développé le premier algorithme de détection automatique des flux de BM et ont atteint un taux de détection de près de 90% sur la rivière d'Ain en France, mais avec une marge d'erreur due à l'absence d'image durant la nuit limitant l'estimation totale durant un évènement. Récemment, Kramer et Wohl (2014) ont utilisé un système de caméra photo afin d'obtenir une série d'images à intervalle de temps de une à quinze minutes afin d'estimer le flux de BM sur la rivière aux Esclaves (Slave River) dans le nord-ouest du Canada. Les résultats montrent que le biais est très faible avec un intervalle de temps d'une minute et elles ont ainsi pu établir un seuil de mise en transport des bois dans cette rivière des régions nordiques. Les analyses par caméra vidéo semblent avoir le plus grand potentiel afin de quantifier les flux totaux de BM transportés à l'échelle d'évènements hydrométéorologiques (MacVicar *et al*., 2009), mais le développement des algorithmes de détection est encore nécessaire afin d'améliorer leur efficacité et la précision sur différents sites d'études et différents types de milieux (Lemaire *et al*., 2015). Aussi, la détection durant la nuit reste un défi de taille afin d'obtenir l'ensemble des flux lors d'un évènement hydrométéorologique.

Plusieurs études depuis le milieu des années 2000 ont effectué le suivi de pièces individuelles à l'aide de peinture et de pièces de métal (Moulin, 2005; Daniels, 2006; Warren and Kraft, 2008; Wohl and Goode, 2008; Iroumé *et al*., 2010), de transpondeurs actifs et passifs (MacVicar *et al*., 2009; Schenk *et al*., 2014) et finalement de GPS (Ravazzolo *et al*., 2015). Aux États-Unis, Schenk *et al*. (2014) ont pu estimer le pourcentage de déplacement des BM par différentes techniques de suivi (transpondeurs actifs, marquage peinture, mesures *in situ)* et ont montré que 16% des bois se déplacent annuellement à l'échelle d'un corridor fluvial.

A l'échelle d'un corridor fluvial ou d'une section de rivière, la mobilité des BM peut aussi être évaluée en comparant les accumulations (ΔS) sur une période de temps donné (échelle de la crue, annuellement, décennale…) (Wohl et Goode, 2008). Cette méthode indirecte pour mesurer le transport, à l'image de l'approche morphologique du transport des sédiments est une méthode précise pour évaluer le volume total transporté entre les suivis, mais ne permet pas de quantifier le flux à l'échelle de la crue. Le nombre d'études est limité, particulièrement pour des suivis interannuels à long terme (plus de deux ans) et encore plus rares à de grandes échelles spatiales. Wohl et Goode (2008) ont réalisé un suivi interannuel de 11 ans sur cinq petits cours d'eau montagnards du Colorado (aire de drainage de 9.2 à 32.3 km²) et ont observé une mobilité annuelle de 16 à 23% des pièces. Latterrel et Naiman (2007) ont montré que la majorité des BM recrutés par l'érosion étaient transportés à l'intérieur d'une période de 5 ans sur la rivière Queets. Autant par photographies aériennes que par des mesures sur le terrain, ces données montrent une importante mobilité des BM, mais nécessite un temps considérable pour quantifier à de grandes échelles spatiales.

Au niveau de la mobilité et des extrants de BM par transport fluvial, l'estimation d'un volume de BM sortant est complexe à établir à l'échelle d'un long corridor fluvial ou d'un bassin versant. Il est difficile à quantifier, car le processus peut s'effectuer sur une longue période de temps et les mesures fastidieuses à effectuer sur de grands cours d'eau. Il n'existe pas de données dans la littérature sur les volumes exportés par le transport fluvial à l'échelle d'un grand bassin versant où la mobilité des BM est importante. Selon Hassan *et al*. (2005), seuls Lienkaemper et Swanson (1987) ont estimé un pourcentage de BM évacués d'un système par le transport fluvial dans de petits cours d'eau (largeur entre 3.5m et 24m) du Nord-Ouest américain. Cette donnée primordiale pour établir un bilan ligneux à l'échelle d'un bassin versant ou d'un long corridor fluvial où la mobilité des BM est importante fait défaut dans la quasi-totalité des études sur le BM. Il s'agit de la composante d'un bilan ligneux la moins étudiée et avec le moins de données de terrain (Hassan *et al*., 2005), alors qu'elle est nécessaire pour clore un bilan ligneux.

Une des solutions pour quantifier cette composante est d'utiliser des réservoirs (Moulin et Piégay, 2004; Seo *et al.*, 2008; Benacchio *et al*., soumis), des structures de stockages (Lyn *et al.*, 2003) installées sur des cours d'eau ou encore des lacs naturels (Waldner *et al*., 2007). Moulin et Piégay (2004) ont utilisé le réservoir du barrage de Génissiat sur le haut Rhône en France afin de calculer les volumes de BM provenant de la portion amont (taille de bassin versant de 10 190 km²). Ces données montrent que les quantités de BM augmentent avec l'intensité d'une crue, mais que deux crues successives de même intensité n'apportent pas la même quantité de bois. Seo *et al*. (2008) ont quantifié les exports de BM par transport fluvial dans 131 réservoirs localisés au Japon dans des cours d'eau de tailles différentes: petits cours d'eau (taille de bassin versant: 6-20 km²), intermédiaires (20-100 km²) et dans de grands bassins versants (>100 km²). Les résultats montrent que le taux de transport durant des évènements de forts débits est modéré dans les petits cours d'eau, élevé dans les rivières intermédiaires et faible dans les grandes rivières. Le faible taux de transport dans les grandes rivières serait expliqué par l'accumulation des BM dans la plaine alluviale, limitant ainsi son export vers l'exutoire et menant à sa décomposition/fragmentation sur place (Seo *et al*., 2008).

I.2.4 Les bois morts éliminés par fragmentation/décomposition (D)

Les BM sortent également du système fluvial par la décomposition et la fragmentation des pièces et sont ainsi stockés sous forme de matière organique dans le corridor fluvial ou sont exportés sans être alors intégrés au bilan ligneux du fait de la taille minimale retenue. Le temps de décomposition des BM peut être très lent selon les conditions hydroclimatiques, l'espèce du bois, le taux de submersion et d'enfouissement sous les sédiments (Harmon *et al*., 1986). Par exemple, les conifères sont plus résistants que les feuillus dans un climat froid de type boréal (Harmon 1982, Harmon *et al*., 1986; Alban et Pastor 1993, Tarasov et Birdsey 2001, Brais *et al*., 2006, Saint-Germain *et al*., 2007) et les taux de décomposition seront plus bas dans les cours d'eau des climats tempérés et boréaux (Wohl et Jaegger, 2009). Dans les grands cours d'eau, la décomposition du BM est généralement plus faible que dans les petits cours d'eau, car la

mobilisation des BM est plus importante dans les grands systèmes (Hassan *et al.,* 2005). Arsenault *et al*. (2007) ont observé que le processus de décomposition était quasi-absent dans un cours d'eau boréal, dû à un enfouissement très rapide des pièces. Ce processus d'évacuation des BM est majeur dans plusieurs cours d'eau (de milieu tropical par exemple), mais relativement faible dans un contexte de mobilité des BM interannuelle importante et de climat froid, peu propice à une décomposition rapide. Cependant, la présence d'un couvert de glace et de débâcles glacielles peut engendrer une fragmentation plus rapide des BM par abrasion, mais aucune étude n'a encore abordé ce phénomène. Les processus et les taux de décomposition/fragmentation des BM restent mal compris (Hassan *et al*., 2005) et seraient particulièrement intéressants à étudier dans de futurs projets de recherches.

L'ensemble des principales composantes d'un bilan réfère au concept de résidence dans un système fluvial. Le temps de résidence des BM dans une analyse de bilan ligneux est contrôlé par plusieurs facteurs et montre une très grande variabilité selon les milieux (Powell *et al*., 2009; Hyatt and Naiman, 2001). Le temps de résidence peut varier de quelques années, à plusieurs centaines d'années et même sur des périodes de plus de 1400 ans (Swanson *et al*., 1976; Hyatt and Naiman, 2001). Le temps de résidence est donc influencé et conditionné par le climat, le type de forêts, la taille des BM, leur positionnement dans le système, les conditions *in situ* du lieu d'accumulation, la géomorphologie et la dynamique fluviale et le type d'événement hydrométéorologique (e.g., Harmon *et al*., 1986; Naiman *et al*., 2002; Wohl, 2013).

I.3 QUESTIONS DE RECHERCHE

Le BM en rivière a été étudié sous différents angles depuis le début des années 1970. Lors de la troisième rencontre de Forest Practices Riparian Management Committee (Durst et Ferguson, 2000), trois lacunes majeures avaient été soulignées et elles sont toujours d'actualité aujourd'hui à la lumière de la littérature publiée depuis le début des années

2000. Ces questions de recherche représentent différents défis qui ont orienté les objectifs de cette thèse.

La première se rapporte à la quasi-absence de données sur les moyennes et grandes rivières naturelles et non aménagées (>300 km²), et plus encore sur les rivières de régions froides (Wohl, 2013). Les rivières de régions froides ont la particularité d'avoir généralement un couvert de glace pendant plusieurs mois durant l'hiver. Ces couverts de glace, parfois importants, rendent les cours d'eau de ces milieux vulnérables aux embâcles et débâcles de glace et les événements de débâcle sont les risques les plus importants pour la dynamique des rivières avec glaces (Ashton, 1986). La débâcle peut se produire tout au long de l'hiver (Beltaos, 2007), mais généralement au printemps lorsque la neige fond et la température augmente rapidement. Il existe deux types de débâcles glacielles: 1) la débâcle thermique, où le couvert de glace fond lentement et sur place par les processus d'échanges de chaleur entre la glace, l'eau et l'air (Prowse et Marsh, 1989; Beltaos, 1997). Le second type est la débâcle mécanique, où la fonte et la montée des eaux sont importantes et très rapides (Figure 6A) et engendrent un morcèlement et une mobilité rapide du couvert de glace non détérioré (Beltaos, 1997). Ces glaces modifient la dynamique hydrogéomorphologique et par conséquent modifient la dynamique du bois mort en rivière (Figure 6). Le besoin de connaissances relatives à la dynamique du bois mort dans les régions nordiques est reconnu dans la littérature comme étant un enjeu (Ex. Kramer et Wohl, 2014).

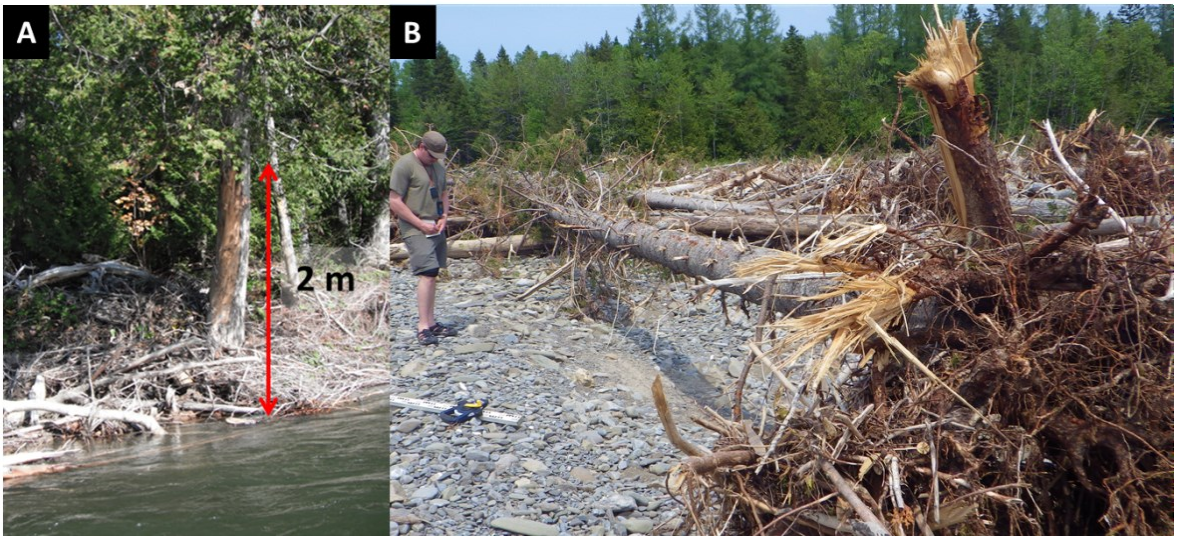


Figure 6. Exemples d'impacts de la dynamique sur les hauteurs d'eau atteinte et les cicatrices glacielles sur la végétation en bande riveraine (A); et sur l'abrasion et la fragmentation des bois morts dans un corridor fluvial (B).

Plusieurs questions de recherche restent sans réponse quant aux liens entre la dynamique glacielle et la dynamique du bois en rivière. Quels sont les effets des embâcles et des débâcles de glace sur le recrutement, l'accumulation et le transport des BM? Est-ce que les glaces ont un effet sur la densité, la structure et sur la dynamique d'accumulation des bois dans un système fluvial de régions froides? Quelle est l'importance des embâcles/débâcles de glace sur la mobilisation et sur la distance de transport des bois en rivière versus les crues sans glace (Figure 7)? Quel est l'effet de la glace sur la fragmentation et l'abrasion des BM durant leur transport par débâcle glacielle (Figure 6B) ? Cette thèse aborde certaines de ces questions de recherche au niveau des relations et effets de la glace, particulièrement au niveau de la mobilité des BM durant des évènements de débâcles mécaniques (Figure 7A et B), mais plusieurs thèmes de recherche potentiels seraient intéressants à étudier dans le futur afin d'améliorer nos connaissances.

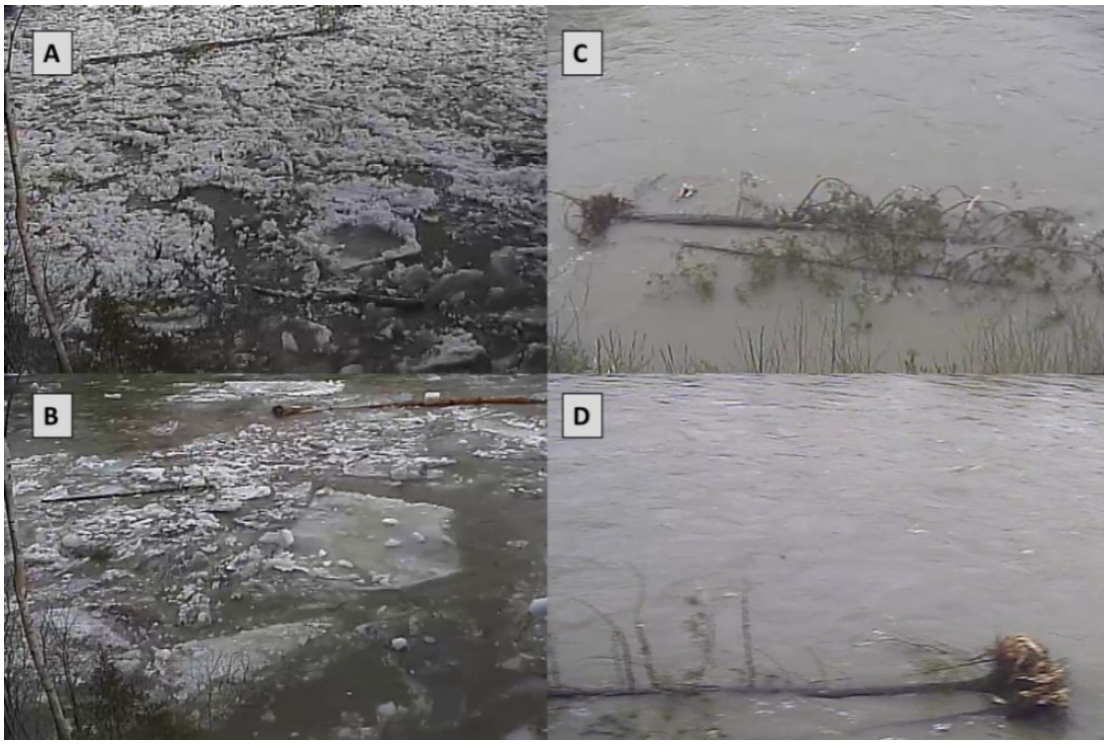


Figure 7. Transport de bois durant un évènement de débâcle de glace (A et B) et de transport de bois durant un évènement de crue sans glace (C et D)

La seconde lacune se rapporte à la calibration et à l'application de bilan ligneux (Wohl, 2015), autant pour les habitats (Durst et Ferguson, 2000), que pour la gestion intégrée des cours d'eau dans les rivières de tailles moyennes et grandes. Durst et Ferguson (2000) et Hogan (1987) insistent sur le fait que les bilans ligneux sont une information de base afin de comprendre et de quantifier la dynamique des bois morts aux différentes échelles spatiales (tronçons, corridors et bassins versants). Aujourd'hui encore, plusieurs de ces questions n'ont pas trouvé réponse, particulièrement à l'échelle des bassins versants et de longs corridors fluviaux. Ce type de recherche à l'échelle des bassins versants est difficile à réaliser, car les aires d'étude sont très grandes (Wohl *et al*., 2010), parfois difficiles d'accès et les phénomènes sont régis par de multiples facteurs à caractériser à larges échelles spatiales et temporelles. Au début des années 2000, des chercheurs ont commencé à étudier la dynamique du bois mort à l'échelle des tronçons fluviaux et des bassins versants, mais majoritairement dans de petits bassins versants. Martin et Benda

(2001) et Benda *et al*. (2003) ont ainsi développé un modèle quantitatif de bilan ligneux à l'échelle de bassin versant en s'appuyant sur les travaux conduits pour établir des budgets sédimentaires (Reid et Dunne, 1996). Leurs objectifs étaient d'évaluer les facteurs contrôlant la distribution spatiale et temporelle des bois en rivière, mais toujours appliqués à de petits bassins versants et sur une échelle de temps très courte.

Finalement, la troisième lacune identifiée par MacVicar *et al*. (2009) concerne le manque de données sur la dynamique spatio-temporelle du bois en rivière. Il y a un manque d'informations sur les variations temporelles de la dynamique du BM à l'échelle de corridors fluviaux et de bassins versants pour les grandes rivières, d'autant plus pour les rivières non aménagées (Gurnell et Sweet, 1998; Lassettre *et al*., 2008; Wohl, 2015). Cette composante majeure d'un bilan ligneux a été peu quantifiée étant donné les difficultés méthodologiques liées à sa mesure. Les études récentes (Moulin et Piégay, 2004; Benacchio *et al.*, soumis) montrent la complexité des relations entre les volumes transportés et les données hydrométéorologiques et plusieurs questions restent en suspens aujourd'hui. Quels sont les facteurs qui influencent les taux de transport du bois à l'échelle d'un bassin versant? Les concepts de disponibilité des BM et d'intervalle de temps entre les évènements de crue ont été soulignés dans la littérature, mais nécessitent plus d'effort afin d'établir les principaux facteurs influençant le transport du BM en rivière.

I.4 OBJECTIFS DE LA THESE

Cette thèse utilise les embâcles de bois dans le delta de la RSJ afin de quantifier le volume de bois exporté par l'ensemble du bassin versant, et ce, depuis les années 1960. À notre connaissance, le raft dans le delta de la RSJ est la seule entité naturelle accumulant la quasi-totalité des BM provenant d'un bassin versant. Il s'agit ainsi d'une occasion unique de documenter et de quantifier la dynamique du BM à l'échelle d'un bassin versant. Aujourd'hui, il est inhabituel d'observer des accumulations de BM aussi importantes en rivière, car une gestion des BM et le retrait systématique des BM en rivière limitent le développement de telle structure naturelle (Wohl, 2014).

Objectif principal

Cette thèse a comme objectif principal de documenter la dynamique du BM dans une rivière des régions froides en utilisant une approche de quantification par bilans ligneux. Cette quantification permettra de comprendre les paramètres et mécanismes qui influencent la dynamique du bois mort (intensité des événements de crue, géomorphologie du corridor, rôle de la glace…) à trois échelles spatiales, celle du tronçon fluvial, du corridor fluvial et du bassin versant. Les objectifs spécifiques permettront le développement d'un modèle d'analyse et de compréhension de la dynamique du bois mort applicable dans différents contextes fluviaux.

Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques et les hypothèses de cette thèse sont les suivants:

1) Analyser l'historique, le fonctionnement et la dynamique temporelle des embâcles de bois majeurs dans le delta de la RSJ et à l'échelle du bassin versant. (Chapitre 1);

   Hypothèse: Les embâcles majeurs dans le delta de la RSJ sont naturels et la formation est régie par la dynamique hydrogéomorphologique et la dynamique du bois mort de son bassin versant.

2) Analyser la variabilité spatio-temporelle du recrutement, des accumulations et des bois en transit à l'échelle d'un bassin versant et à l'échelle interannuelle afin d'identifier l'influence des évènements hydrométéorologiques de forte intensité (Chapitre 2);

   Hypothèse 1: La variabilité spatio-temporelle de la dynamique du bois mort est conditionnée par la morphologie fluviale et les caractéristiques des évènements hydroclimatiques.

   Hypothèse 2: Dans les régions nordiques, les débâcles de glace mécaniques influencent l'intensité du transport de bois mort.

3) Quantifier et valider un bilan ligneux à différentes échelles spatiales (Tronçon, corridor et bassin versant) et temporelles (50 ans, 10 ans et annuellement) afin de clarifier les relations entre la dynamique fluviale et la dynamique du bois mort (Chapitre 3).

   Hypothèse: Les EBM terminaux dans le delta de la RSJ permettent de clore un bilan ligneux et d'établir les liens entre la dynamique fluviale et la dynamique du bois mort à multiples échelles spatio-temporelles.

I.5 APPROCHE METHODOLOGIQUE

La méthodologie préconisée pour cette étude repose sur quatre campagnes de terrain effectuées entre 2010 et 2013, sur l'analyse d'images aériennes et satellites de 1963 à 2013 et sur l'analyse de données historiques de 1845 à 2014. Les campagnes de terrain ont permis la collecte d'informations en continu, à l'aide d'instruments automatisés (caméras vidéo et photo) installés sur différents tronçons de la RSJ et d'informations ponctuelles, par des mesures *in situ* permettant de quantifier les volumes et analyser les stocks accumulés et les intrants de BM. La méthodologie s'inspire et utilise des techniques et méthodes utilisées dans la littérature scientifique et qui ont démontré leur efficacité. L'originalité de cette méthodologie est de combiner des méthodes utilisées depuis plusieurs années (suivi terrain, images aériennes, documents historiques) avec des méthodes et technologies récentes (imageries *in-situ*, télédétection, imageries satellites hautes résolutions) sur des pas de temps annuels et décennaux. La méthodologie est systémique, car le projet de recherche consiste à documenter le fonctionnement et la dynamique du bois mort à différentes échelles, du tronçon fluvial au bassin versant afin d'étudier la complexité et les relations entre les systèmes fluviaux et la dynamique du bois mort par une approche de bilan ligneux. Cette thèse a été conditionnée par la disponibilité de photos aériennes, d'images satellites et les acquisitions de terrain. Aussi, cette méthode, par bilan ligneux a été développée et validée particulièrement pour les rivières à sédiments meubles (alluviales) et pour les rivières semi-alluviales. Nous présentons dans les prochaines sections le site

d'étude et les grandes lignes méthodologiques employées dans cette thèse. Les chapitres 1,2 et 3 présentent les méthodes propres à leurs résultats. Cependant, il semblait pertinent de définir davantage ces méthodes dans le cadre plus général de la thèse et aussi pour souligner des opportunités ou erreurs survenues durant le terrain et qui ne figurent pas dans les différents chapitres/articles.

I.5.1 Site d'étude: Le bassin versant de la rivière Saint-Jean

Cette thèse de doctorat a été réalisée dans le bassin versant de la rivière Saint-Jean situé sur la pointe Est de la péninsule gaspésienne, Québec (Figure 8). La RSJ a été choisie comme site d'étude, étant donné la présence d'embâcles majeurs dans son delta et le besoin de comprendre la dynamique du bois mort à l'échelle du bassin versant pour répondre à des enjeux opérationnels (Figure 1). Ainsi, nous utilisons le corridor fluvial de soixante kilomètres de la RSJ, considéré comme le bassin versant dû à la quasi-absence de dynamique du BM en amont de ce corridor (aucune érosion depuis 1963, aucun banc d'accumulation, largeur inférieure à la hauteur des arbres…). Ce corridor fluvial permet de réaliser une analyse de la dynamique du BM par bilan ligneux et permet de valider nos méthodes par les volumes accumulés dans les embâcles terminaux situés dans le delta de la RSJ depuis les années 1960. La RSJ est une rivière graveleuse semi-alluviale, naturelle et hydromorphologiquement dynamique présentant trois styles fluviaux distincts et aucun tributaire important sur les soixante kilomètres étudiés (Figure 9). Dans la portion amont (PK30-60) et la portion aval (Pk0-10), nous retrouvons un style à méandre libre s'exprimant au sein d'une large plaine alluviale par une mobilité importante du chenal principal. Dans ces sections, la largeur du chenal principal varie de 50 à 70 mètres avec des taux d'érosion et des processus d'avulsions supérieurs à 20,000 m^2 en termes de superficie érodée pour des périodes de 10 ans. Le tronçon situé sur la section intermédiaire du continuum fluvial (Pk10-30) présente un style plutôt rectiligne, semi-alluvial et contrôlé majoritairement par la présence de berges rocheuses. La migration latérale est très faible et peu de bancs d'accumulation caractérisent cette section. Finalement, le delta est de style anastomosé avec de multiples chenaux caractérisés par des sédiments sableux. Sa

dynamique depuis les années 1960 est largement influencée par la présence d'embâcles majeurs, générant des avulsions significatives tous les ±10-15 ans. Dans les deux dernières sections, la largeur moyenne des chenaux principaux varie de 20 à 40 mètres.

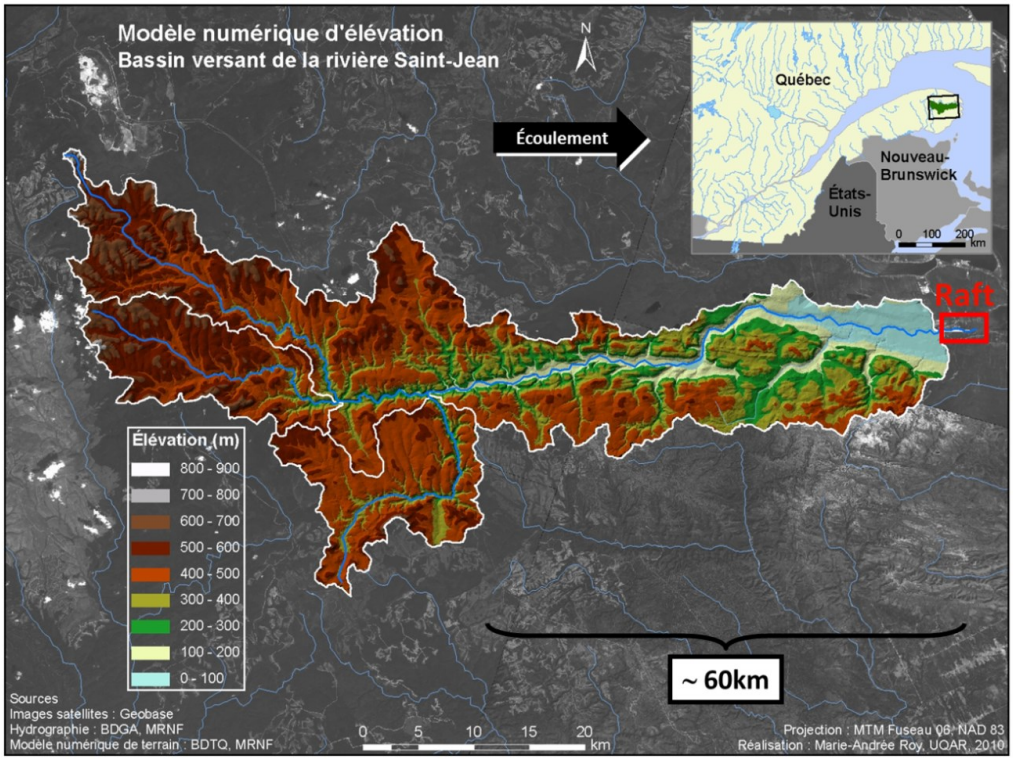


Figure 8. Localisation du bassin versant de la rivière Saint-Jean, du corridor fluvial étudié de 60 kilomètres de long, du raft dans son delta et présentation du modèle numérique d'élévation.

Le climat de la RSJ est considéré comme tempéré froid maritime (Bernatchez *et al.*, 2008) et les conditions hydrométéorologiques sont influencées par le relief des Appalaches et par la présence du golfe du Saint-Laurent. Le bassin versant de la RSJ couvre une superficie de drainage de 1134 km² avec une longueur approximative de 130 kilomètres et un débit moyen annuel de 30 m³/s. Il s'agit d'un régime hydrologique pluvionival, alimenté par une forte contribution en neige durant la période hivernale (moyenne annuelle en chute de neige = 371.8 cm) et une moyenne annuelle de précipitations liquides de 779.2 mm (Environnement Canada, 2014). La température se situe à 3.1°C en moyenne annuelle, mais

la moyenne hivernale peut descendre jusqu'à -8.8°C durant la saison froide de décembre jusqu'à avril. Le couvert de glace sur la RJS est présent généralement de décembre jusqu'à la fin avril, selon les conditions hydroclimatiques de la saison.

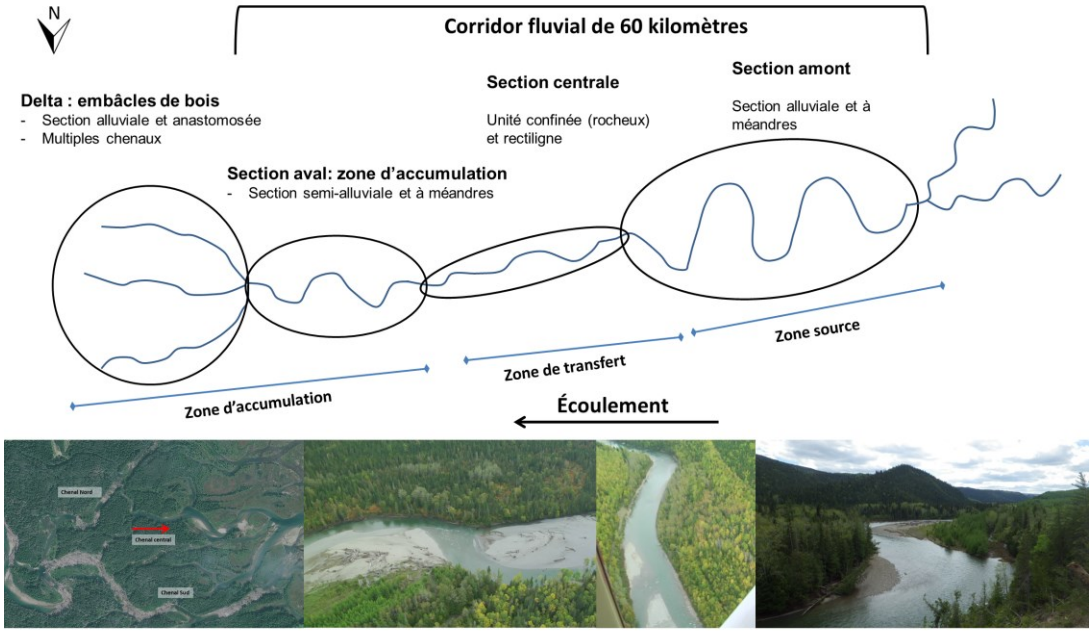


Figure 9. Dynamique fluviale amont-aval dans le corridor fluvial de 60 kilomètres sur la rivière Saint-Jean. *Les cercles qui délimitent les sections représentent graphiquement la largeur moyenne de la plaine alluviale.

Les pressions humaines sont relativement limitées dans le bassin versant, une dizaine de bâtiments seulement y étant implantés. L'activité forestière (coupes, route d'accès…) se développe cependant depuis la fin du 19e siècle et la pêche au saumon est un autre usage qui est en essor depuis les années 1960. La drave de bois sur la RSJ a été importante jusque dans les années 50-60. La présence d'une scierie avec une production élevée (4^{e} en volume pour la Gaspésie en 1937) à Douglastown confirme la présence de cette activité sur la RSJ (Fortier, 2011). L'arrêt de la drave sur la RSJ vers la fin des années 1950 (Fortier, 2011), concorde avec l'apparition des embâcles de bois dans le delta de la RSJ. Il est possible de croire que la drave a empêché la mise en place des embâcles à l'embouchure avant les années 1960 étant donné que le bois de coupe était sorti de la rivière avant d'arriver à

l'embouchure et que le chenal en amont était nettoyé année après année. Cependant, les activités liées à la drave peuvent parfois modifier la dynamique morphologique d'un cours d'eau du fait de travaux engagés pour minimiser la rugosité des sections. Ces changements, s'ils ont eu lieu sur la rivière Saint-Jean, peuvent avoir modifié la dynamique naturelle de la rivière. Historiquement, les coupes forestières se sont effectuées sur l'ensemble du bassin de l'aval vers l'amont, mis à part les fonds de vallée protégés pour la ressource saumon et d'accès difficile.

La RJS est l'une des rivières à saumon les plus réputées au monde. Cette activité rapporte plus de 4 millions de dollars en bénéfices directs et indirects et a une importance primordiale pour l'économie de la Gaspésie (Wadham-Gagnon et Castilloux, 2010; Bujold, 2011). La RSJ offre des conditions idéales pour examiner la dynamique des BM à l'échelle du bassin versant en raison de son côté naturel, d'un taux de recrutement élevé par érosion latérale, d'une mobilité importante du chenal dans son corridor fluvial et d'une capacité de rétention exceptionnelle du BM dans son delta depuis les années 1960.

I.5.2 La quantification des composantes d'un bilan ligneux

L'équation proposée et utilisée dans cette thèse pour quantifier un budget ligneux à l'échelle du système fluvial ou d'une section de rivière (indépendamment de la taille) en mètre cube (m^3) pour une période de temps donnée (inondation, année décennale ...) se décompose ainsi:

$$\mathbf{W = F + D + \Delta S / \Delta t} \qquad \mathbf{(I.1)}$$

où, W représente le taux d'intrant de BM en m^3/année; F, le flux de BM évacué par transport fluvial en m^3/année; D, le taux de BM éliminé dans un système fluvial en m^3/année; et ΔS, le taux de variation de volumes accumulés dans un système fluvial en m^3 pour une période de temps donnée (Δt). Chaque composante de cette équation peut être décomposée et utilisée indépendamment selon le milieu et le contexte environnemental:

$$\mathbf{W = [V_{lm} + V_m + V_{mm} + V_t + V_b + V_h] / \Delta t} \qquad \mathbf{(I.2)}$$

Où V représente les volumes de BM recrutés par la migration latérale (Vlm), par la mortalité des arbres tombant dans la rivière (Vm), par les processus de mouvements de masse (Vmm), par les tributaires (Vt), par l'activité des castors (Vb) et par les activités humaines (Vh) pour une période de temps donné (Δt) en m³;

$$\mathbf{F = [V_{ac} + V_{fp}]/\Delta t} \qquad \textbf{(I.3)}$$

Où V représente les volumes de BM en provenance du chenal actif (Vac) et en provenance de la plaine inondable (Vfb) mobilisés en dehors d'un système par transport fluvial pour une période de temps donné (Δt) en m³;

$$\mathbf{D = [V_d + V_f + V_{fi}]/\Delta t} \qquad \textbf{(I.4)}$$

Où V représente les volumes de BM éliminés d'un système fluvial par la décomposition (Vd) et par la fragmentation/abrasion durant un évènement de crue (Vf) et durant un évènement de débâcle mécanique de glace (Vfi) pour une période de temps donné (Δt) en m³; et finalement;

$$\mathbf{\Delta S = [V_{ac} + V_{afp}]_{Y2} - [V_{ac} + V_{fp}]_{Y1}} \qquad \textbf{(I.5)}$$

Où V représente les volumes de BM accumulés à l'intérieur du chenal actif (Vac) et accumulés dans la plaine inondable (Vfp) entre deux périodes de mesures, année Y1 et année Y2 par exemple, en m³. Ce budget change au fil du temps en fonction des variables de contrôles pour les intrants et les extrants. Parmi eux, les crues de fortes intensités sont les plus importantes. Il convient de noter que, dans une situation où l'on considère un corridor fluvial inférieur à la longueur totale de la rivière - comme c'est le cas dans cette étude - la portion amont du corridor fluvial est considérée comme un tributaire.

Cette équation de bilan ligneux est inspirée de Benda et Sias (2003), mais sa forme est légèrement différente des autres équations présentées dans le tableau 1. Elle diffère de ces équations, car elle exprime la dynamique du BM en termes de flux représenté en m³/année et à l'échelle d'un bassin versant. Les flux annuels peuvent ainsi s'exprimer pour une année donnée ou encore pour des périodes décennales et même sur une période de 50

ans, tel que réalisé dans cette thèse. Alors que l'équation de Benda et Sias (2003) est analogue à un budget sédimentaire, l'équation présentée ici a davantage de similitudes avec l'application d'un bilan hydrique visant à identifier le taux de recrutement de BM à un endroit donné pour une période de temps donnée (m^3 par an), en tenant compte des processus qui se produisent au sein d'un bassin versant. Enfin, une nouvelle composante est proposée dans l'équation I.4, incorporant les processus d'abrasion et de fragmentation par la dynamique des glaces de rivière (VFI), mais pour l'instant, nous avons besoin de plus de recherches pour appliquer ces processus dans une équation de budget ligneux.

I.5.3 Quantification des embâcles de bois morts dans le corridor fluvial

Des instruments ont permis de recueillir des données sur les niveaux d'eau (senseur de pression), le mouvement du BM et des EBM (caméras de chasse, caméra vidéo) et des données de température (senseur de température). Par la suite, quatre campagnes de terrain pour un total de 8 mois de mesures ont permis de quantifier la dynamique interannuelle du bois dans le corridor fluvial de 60 kilomètres de la RSJ par une approche de bilan ligneux. Lors des campagnes de terrain (2010, 2011, 2012 et 2013) effectuées sur la RSJ, nous avons localisé et caractérisé l'ensemble des pièces de bois et embâcles de bois présents dans le corridor fluvial (Figure 10). Les variables mesurées et les classes de taille utilisées pour caractériser les pièces de bois et notamment les embâcles sont basées sur les recherches de Wohl *et al.* (2010) afin d'avoir des données comparables avec celles acquises par d'autres chercheurs à l'échelle mondiale. Durant cette thèse, il a été considéré comme embâcle, toute accumulation de bois mort constituée d'un minimum de trois pièces de bois dont le diamètre unitaire est supérieur à 10 cm et la longueur supérieure à 1 mètre (Ex.: Murphy et Koski, 1989; Nakamura et Swanson, 1994; Piégay *et al*., 1999; Comiti *et al*., 2008; Wohl et Jaeger, 2009). La forme, le volume et la masse de chaque accumulation ont été mesurés selon les protocoles de Piégay (1993) et Citterio (1996).

Ainsi, chaque accumulation est considérée comme un volume géométrique air - bois ($V\text{-}m^3$):

$$V = d*l*L \qquad (2)$$

où d est l'épaisseur moyenne du dépôt (m), l est sa largeur moyenne (m) et L est sa longueur moyenne (m). La seconde partie de mesures consiste à caractériser les morceaux de bois mort à l'intérieur de chaque embâcle. Ainsi, le nombre de pièces est estimé selon le nombre de bois mesuré sur une portion de l'embâcle et ajusté avec la superficie de l'embâcle. Par la suite, le calcul de la circonférence et de la longueur d'un échantillon représentatif est évalué afin d'estimer les caractéristiques des BM à l'intérieur des EBM. Par la suite, pour différentes pièces de bois, sont déterminés le taxon, la présence ou absence de branches, de racines et de débris organiques associés. Finalement, les données sont intégrées dans un système d'information géographique (SIG) afin d'effectuer une cartographie et une analyse de la répartition amont-aval des dépôts.

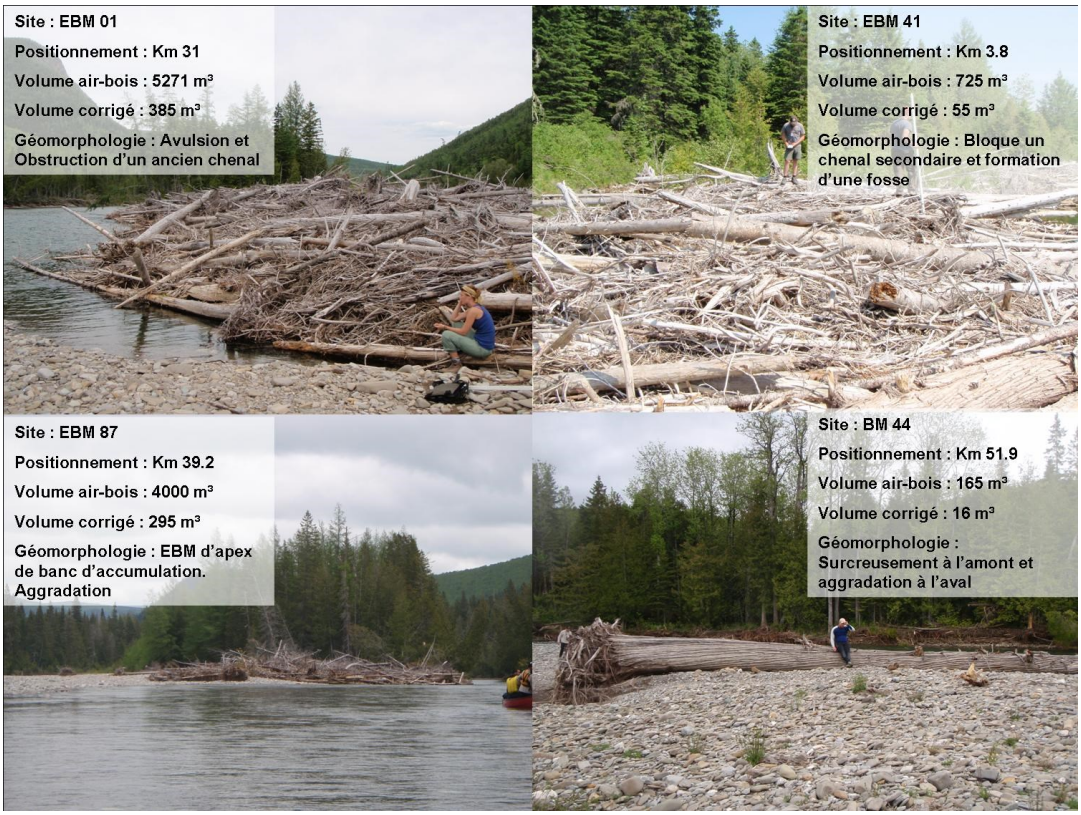


Figure 10. Exemple de mesures d'embâcles et de bois mort individuel dans le corridor fluvial de la rivière Saint-Jean.

L'estimation de l'erreur quant aux volumes mesurés est une composante importante dans le cadre de multiples mesures à différentes échelles spatiales et temporelles. Une situation particulière survenue en 2012 a conduit à dupliquer les mesures de volumes en BM accumulés dans le corridor fluvial. Un vol de données de terrain en septembre 2012 nous a obligés à recommencer notre campagne de terrain afin de mesurer l'ensemble des BM dans le corridor fluvial de la RSJ. Quelques semaines après le retour du deuxième terrain, les voleurs m'avaient renvoyé quelques carnets de terrain avec nos mesures effectuées en août 2012. Ainsi, nous avons pu comparer les mesures de volume sur 40 EBM identiques à deux reprises avec seulement un mois d'intervalle. Aucune crue ayant la capacité de transporter du bois n'a été observée entre les deux campagnes de terrain ce qui permet d'affirmer que les 40 mesures ont été effectuées sur des EBM identiques. Ces données offrent une occasion unique de valider l'exactitude et la précision des mesures de volume en bois dans le corridor fluvial (Figure 11). La figure 11 présente la régression linéaire issue des données avant et après le vol permettant d'estimer l'exactitude pour chaque mesure de volume en bois durant les campagnes de terrain. Au niveau de la précision, la différence moyenne observée entre les deux mesures est de 3.4%. On observe que la différence de mesure pour les accumulations supérieures à 100 m^2 est faible (différence de -.08%) comparativement aux accumulations plus petites (+7.2%) (Figure 11). Nous pouvons considérer que la méthode préconisée pour l'estimation des volumes en BM dans le corridor fluvial permet d'obtenir des valeurs d'une exactitude satisfaisante, et ce avec une précision suffisante pour analyser la variabilité interannuelle des accumulations en BM à l'échelle du corridor fluvial.

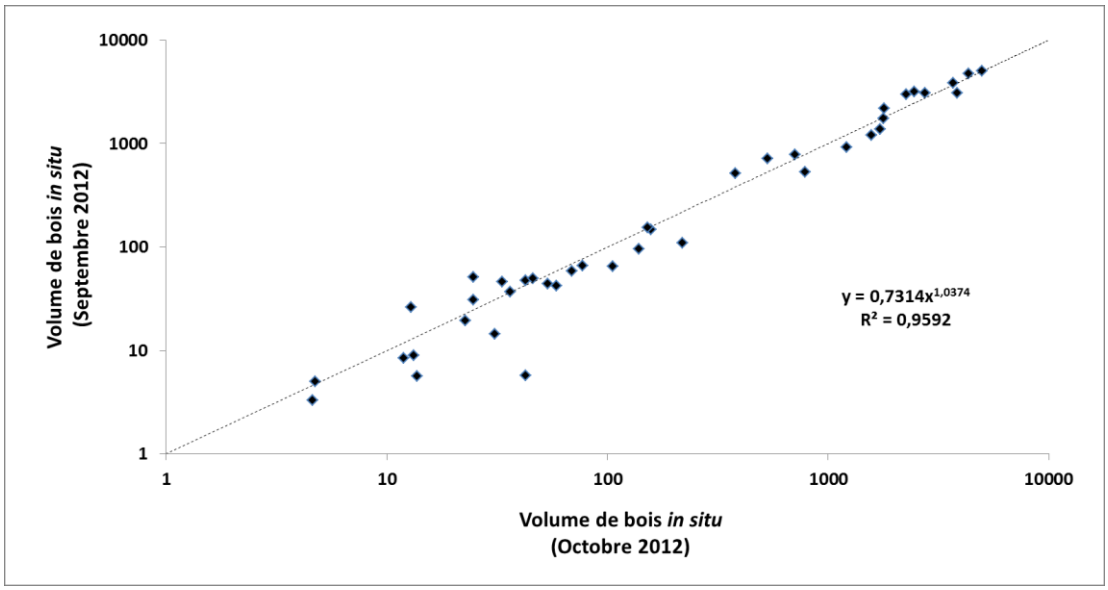


Figure 11. Estimation de la différence de mesures dans les volumes en bois accumulés dans le corridor fluvial de la rivière Saint-Jean entre septembre 2012 et octobre 2012. (La ligne pointillée représente la droite X=Y).

I.5.4 Quantification des flux

Six caméras automatiques *Reconyx* ont été installées sur les berges de la rivière afin d'avoir les crues en image, les hauteurs d'eau et l'évolution des différents embâcles à l'étude. Deux caméras vidéo en continu ont également été installées sur 2 sites afin de quantifier les volumes de bois transitant dans la rivière lors des épisodes de crues (Figure 12). Ces caméras permettent de suivre nos différents sites en continu afin d'établir les taux de transport de BM lors d'évènements hydrométéorologiques et d'effectuer une analyse temporelle de l'évolution et du fonctionnement des rafts dans le delta de la RSJ.

Les données vidéo de deux caméras sur une période de trois ans (2011 à 2014) représentent plus de 40 téraoctets de stockage. C'est une énorme quantité d'images vidéo à traiter. Une approche par détection automatique, basée sur les travaux de Ali et Tougne (2009), poursuivi par MacVicar et Piégay (2012) et récemment par Lemaire *et al*. (2015) a été testé sur ces données vidéo. Il s'avère que les algorithmes développés pour la caméra installée au Pont de Chazey sur l'Ain (France) ne sont pas encore totalement exportables à

d’autres sites. Une amélioration des algorithmes est nécessaire afin d’optimiser la détection automatique sur les deux caméras installées sur la RSJ. Les résultats préliminaires de détection automatique sur les caméras de la RSJ montrent un taux de détection moyen de 34%, avec une grande variabilité selon les séquences vidéo (détection des BM de 7.4% à 75% de taux de réussite). Un total de 25 séquences de dix minutes a été utilisé afin de valider la détection automatique. Une détection manuelle a été réalisée pour ces 25 séquences et comparée aux résultats obtenus avec le logiciel de détection automatique. Les taux d’erreurs les plus élevés apparaissent lorsque le nombre de BM par séquence est le plus élevé. Un autre problème lié à l’environnement de la RSJ est la présence d’évènement par débâcle de glace mécanique où la détection des bois est impossible étant donné le mélange de glace et bois mort qui empêche la détection automatique. Finalement, une détection manuelle a été réalisée sur les images vidéo pour trois évènements de crue afin d’estimer le nombre de BM transportés lors d’évènements hydrométéorologiques différents en 2012, 2013 et 2014. La méthode par détection automatique a un fort potentiel, mais des améliorations sont nécessaires avant d’utiliser cet outil sur des images fournies par d’autres caméras.

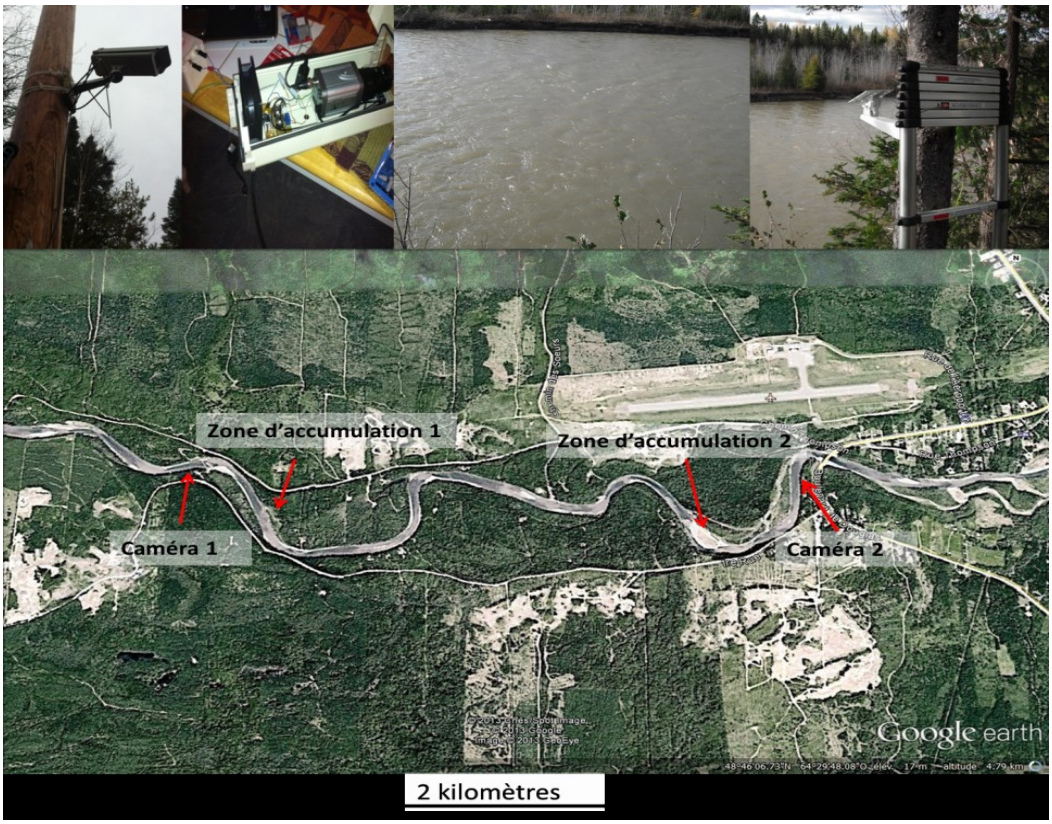


Figure 12. Configurations des deux caméras vidéo dans la section aval de la rivière Saint-Jean (Caméra 1: PK 7 et; Caméra 2: Pk 2.5).

I.5.5 Analyse des images aériennes et satellites

L'analyse des images aériennes et satellites a permis d'effectuer une analyse spatio-temporelle du bassin versant de la RSJ. La couverture des photos aériennes s'étend de 1963 à 2004 (1963, 1993, 2000 et 2004), celle des images LandSAT 7 de 1999 à aujourd'hui. Des images satellites GeoEye 1 complètent le dispositif pour 2012 et 2013. Ces images ont été utilisées afin de calculer deux composantes principales du budget ligneux: 1) le recrutement de bois par érosion latérale (W) et; 2) les exports aval (F) par le suivi de l'évolution de la superficie des rafts dans le delta. Ces images ont aussi servi à caractériser la dynamique et l'évolution spatio-temporelle des différentes composantes biophysiques et géomorphologiques à l'échelle du bassin versant.

Les photos aériennes permettent de caractériser les sites où des EBM sont susceptibles de se former, où l'érosion des berges introduit le bois et de caractériser les conditions physiques favorisant les accumulations. Les photos aériennes multidates et les photos aériennes hautes résolutions ont permis de déterminer le tracé des berges afin de mesurer les taux d'érosion, les bancs d'accumulation, les volumes de bois produits et géolocaliser les accumulations de bois importantes. Ces informations extraites et intégrées dans un système d'information géographique montrent l'évolution des stocks et des intrants de bois au cours des années de suivi, tout en précisant l'évolution et la dynamique de la rivière sur une période de temps donnée.

Les images satellites LandSAT 7 ont été utilisées pour la période 1999 à aujourd'hui afin de mesurer l'accroissement et l'évolution interannuelle des embâcles à l'embouchure de la RSJ et calculer le flux de bois sortant en lien avec les données de débit. La méthodologie choisie est d'utiliser une image satellite après chaque crue enregistrée sur le cours d'eau afin d'évaluer les volumes de bois transportés par le dernier épisode de crue. Les images ont ensuite été traitées avec le logiciel Envi 4.8 pour la classification et pour la détection automatique des superficies de bois mort dans le delta de la RSJ. Ces superficies ont ensuite été traitées avec un logiciel de cartographie pour une analyse spatiale et temporelle.

L'erreur planimétrique liée au géoréférencement des photos aériennes a été estimée en utilisant la méthode de la racine des moindres carrés (RMSE). Une erreur planimétrique moyenne de 2,04 m est ainsi déterminée. L'erreur planimétrique a été appliquée à des surfaces (cercles et ellipses) variant de 1 m^2 à 50,000 m^2. Cette erreur est ensuite considérée dans l'évaluation des superficies érodées et des volumes de bois calculés dans le delta afin d'estimer les erreurs de mesures de volumes. Pour évaluer l'effet de l'erreur planimétrique dans l'estimation des zones érodées, la marge d'erreur a été estimée en additionnant ou en soustrayant cette valeur en fonction de la forme de la zone en érosion identifiée par photo-interprétation (Figure 13). En additionnant l'erreur planimétrique, le changement dans la zone érodée varie entre 25% et 5% pour les petites surfaces de 20 000 m² et entre 4% et

0,52% pour les surfaces supérieures à 20 000 m². En soustrayant l'erreur planimétrique, la variation de superficie varie entre -22% et -5% pour les petites surfaces inférieures à 20.000 m² et entre -4% et -1.03% pour les surfaces supérieures à 20.000 m². Quatre modèles logarithmiques ont été construits pour décrire la relation entre le pourcentage d'erreur et la superficie érodée totale mesurée à partir des images aériennes (Figure 13). Ces modèles ont été utilisés pour déterminer les incertitudes (± valeurs) des surfaces érodées le long du corridor fluvial entre les photos aériennes de 1963 et de 2013. Sur le terrain d'étude, l'ensemble des surfaces érodées ont une superficie supérieure à 20 000 m², la marge d'erreur se situe donc entre 0,52% et 4% et entre -1.03% et -4%, ce qui est très faible pour ce type d'analyse.

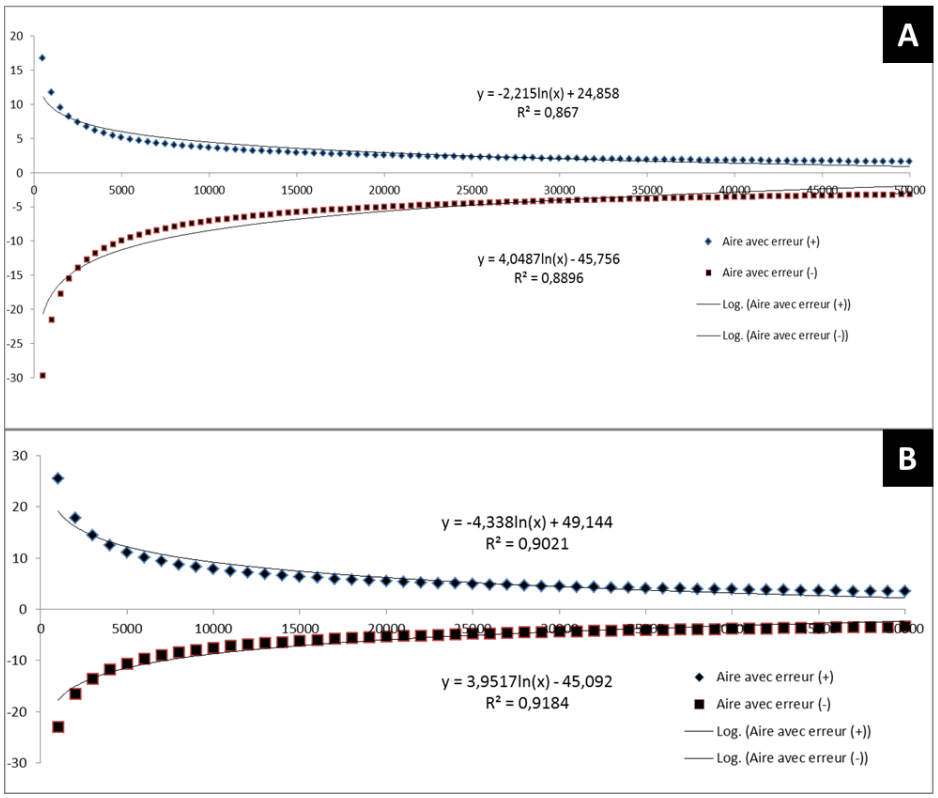


Figure 13. Modèle d'estimation du pourcentage d'erreur dans les mesures d'érosion des berges et des taux de recrutement de bois pour les surfaces d'érosion circulaires (A) et les surfaces d'érosion en forme d'ellipse (B).

I.6 ORGANISATION DE LA THESE ET LIENS ENTRE LES CHAPITRES

La thèse est organisée en trois chapitres qui correspondent à trois publications scientifiques qui sont respectivement publiée, acceptée et soumise à une revue internationale. Afin de répondre aux trois objectifs spécifiques de la thèse, les trois chapitres/articles abordent, à diverses résolutions spatiales et temporelles, la dynamique du bois mort à l'échelle d'un bassin versant de régions froides. Les liens et la continuité entre ces chapitres permettent d'identifier les facteurs clés qui influencent la variabilité spatio-temporelle du bois en rivière (Figure 14). Cette thèse et les trois chapitres/articles forment un tout qui permet d'alimenter la réflexion théorique pour l'application de bilan ligneux à partir des différentes analyses réalisées durant cette thèse.

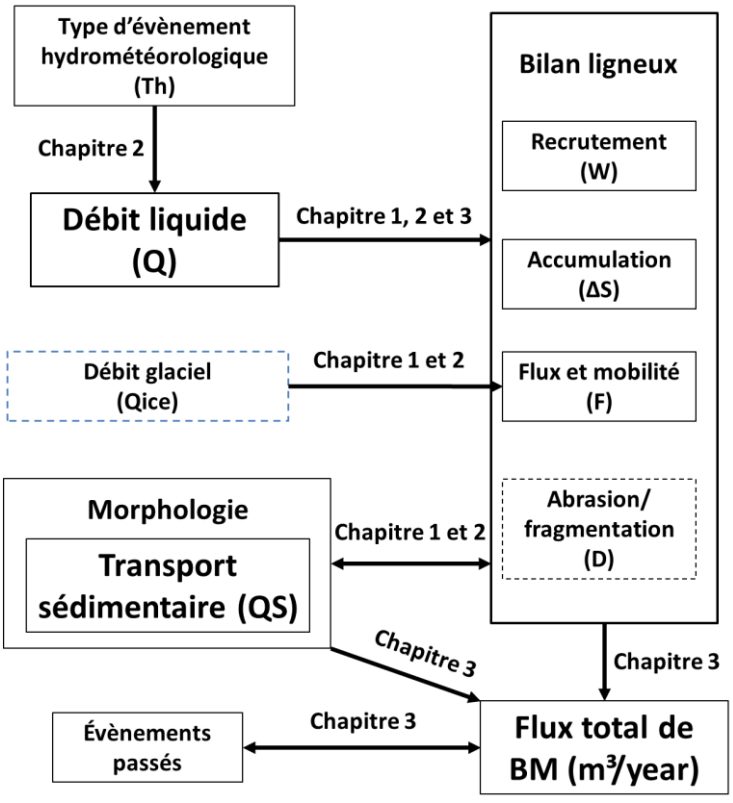


Figure 14. Les différentes composantes d'un bilan ligneux et les variables clés dans la dynamique du bois mort en fonction des liens entre les différents chapitres de la thèse

Dans le chapitre 1, la dynamique des embâcles dans le delta de la RSJ a été documentée afin d'identifier la dynamique temporelle de mise en place de ces embâcles depuis les années 1960. Une présentation des caractéristiques de la géomorphologie fluviale, de la forêt alluviale et des accumulations des BM sur plus de 60 kilomètres de rivière a permis d'exposer le caractère particulier de la dynamique du BM dans la RSJ. Le but principal de ce chapitre est d'analyser l'origine des embâcles majeurs dans le delta de la RSJ et de quantifier cette dynamique à multiples échelles temporelles. Ces analyses permettent de valider nos bilans ligneux à multiples échelles spatiales et temporelles présentés dans les chapitres 2 et 3.

Dans le chapitre 2, les données des quatre suivis *in situ* sont présentées afin d'identifier la dynamique du BM (intrant, mobilité et extrant) à une échelle interannuelle (2010-2013) sur l'ensemble du corridor fluvial de la RSJ. Le suivi effectué sur quatre années a permis de déterminer le rôle des évènements de faibles récurrences, mais de fortes intensités sur la production, l'accumulation dans un corridor fluvial et les sorties de bois en lien avec cette crue. Le rôle de la glace fluviale sur la dynamique du bois mort est aussi présenté et montre que la dynamique glacielle a une influence sur les volumes de bois transportés durant une crue avec débâcle mécanique. Ces données interannuelles permettent d'intégrer la variabilité interannuelle de la dynamique des bois dans nos analyses du bilan ligneux depuis les années 1960 qui sont présentées dans le chapitre 3.

Dans le Chapitre 3, une analyse par bilans ligneux et une analyse de la trajectoire écohydrophormologique sur une période de plus de 50 ans sont présentées. Nous avons quantifié chaque composante (intrant, accumulée et extrant) d'un budget ligneux à multiples échelles spatio-temporelles. Nous avons utilisé les données de volumes accumulés dans le delta de la rivière Saint-Jean depuis 1963 (Chapitre 1) afin de clore une analyse par bilan ligneux. Cette validation d'un bilan ligneux, à l'aide de données historiques et *in situ* (Chapitre 2), est à notre connaissance, une des premières études à valider un modèle conceptuel de bilan ligneux à multiples échelles spatiales et temporelles. Ces analyses montrent la très grande variabilité d'un bilan ligneux à multiples échelles spatiales et

temporelles et établie les liens avec la trajectoire écohydrophormologique de la RSJ depuis les années 1960. Ce chapitre qui termine la thèse montre que la RSJ tend à produire, accumuler et mobiliser plus de BM depuis le début des années 2000 que durant la période 1963-2004.

En conclusion, nous discutons de l'implication des résultats de cette thèse dans le développement des connaissances sur la dynamique des BM pour les rivières de régions froides. Les principales contributions de cette thèse sont soulignées et discutées dans un contexte d'avancement de nos connaissances, mais aussi au niveau de l'application de ces résultats dans un contexte de gestion des cours d'eau naturels de l'Est-du-Québec. La thèse se termine par une présentation des perspectives de recherches futures et des questions de recherches soulevées par cette thèse.

CHAPITRE 1
LES EMBACLES DE LA RIVIERE SAINT-JEAN, GASPE (QUEBEC, CANADA): UNE STRUCTURE DYNAMIQUE D'ACCUMULATION DES BOIS TRANSPORTES DU BASSIN VERSANT

1.1 RESUME EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE

Les rivières semi-alluviales de la péninsule gaspésienne (Québec, Canada) sont sujettes à recruter et à transporter de grandes quantités de bois en rivière. Le taux rapide de de migration latérale des berges, en raison de la forte énergie des écoulements et de berges non-cohésives permet le recrutement de bois qui, à son tour influence grandement la dynamique fluviale. Le delta de la rivière Saint-Jean accumule du bois en rivière depuis les années 1960, créant des avulsions fréquemment, et a permis la construction de trois embâcles de bois majeurs d'une longueur linéaire de plus de 3 km. Ce système d'embâcle est inhabituel dans les cours d'eau actuels et est le plus gros recensé actuellement au monde. Cette configuration des embâcles de la Saint-Jean offre une occasion unique d'appliquer un budget de bois en rivière à l'échelle d'un long corridor de la rivière et de mieux comprendre la dynamique des bois en rivières. Un budget ligneux comprend l'évaluation des volumes de bois (i) produits par l'érosion des berges (intrant), (ii) en transit dans le corridor de la rivière (déposé sur les bancs d'accumulation ou sur les marges du chenal), et (iii) accumulé dans le delta (sortie). Le budget ligneux est basé sur une analyse des photos aériennes depuis 1963 ainsi qu'un suivi sur le terrain réalisé en 2010, qui a été utilisé pour localiser et décrire les grandes accumulations de bois le long d'un tronçon de rivière de 60 km. Comprendre les grandes dynamiques interannuelles de bois dans la rivière Saint-Jean permet d'aider les gestionnaires de rivières à déterminer des solutions durables au niveau de la gestion de ces embâcles majeurs.

Ce premier article, intitulé « The raft of the Saint-Jean River, Gaspé (Québec, Canada): a dynamic feature trapping most wood transported from the catchment », provient de mes travaux de doctorat sur la rivière Saint-Jean en Gaspésie. J'ai effectué l'ensemble de la prise de mesures sur le terrain durant plus de quatre années. J'ai déposé les demandes de subventions, effectué et supervisé les travaux de terrain, effectué les analyses, la production des figures et la rédaction de la production scientifique. Je suis le premier auteur et mes deux directeurs m'ont encadré pour la réalisation de cet article. Il fut soumis en juin 2014 et accepté pour publication dans sa version finale en décembre 2014 par les éditeurs de la revue internationale Geomorphology. Cet article a été présenté en différentes parties aux conférences internationales suivantes: (1) Les Entretiens Jacques Cartier à Montréal à l'automne 2011 et à (2) Integrative Sciences Rivers. 1re conférence internationale. Lyon, France.

Dans l'organisation globale de la thèse, cet article présente la dynamique temporelle de mise en place des embâcles unique dans le delta de la RSJ depuis les années 1960. Une présentation des caractéristiques de la géomorphologie fluviale, de la forêt alluviale et des accumulations des BM sur plus de 60 kilomètres de rivière a permis d'exposer le caractère particulier de la dynamique du BM dans la RSJ. Le but principal de ce chapitre est d'analyser l'origine des embâcles majeurs dans le delta de la RSJ afin de quantifier cette dynamique à multiples échelles temporelles et d'analyser la dynamique du bois mort (recrutement et accumulation) dans le bassin versant. Les résultats de ce premier chapitre sont utilisés dans les chapitres 2 et 3 et permettent de valider nos bilans ligneux à multiples échelles spatiales et temporelles.

1.2 THE RAFT OF THE SAINT-JEAN RIVER, GASPÉ (QUÉBEC, CANADA): A DYNAMIC FEATURE TRAPPING MOST WOOD TRANSPORTED FROM THE CATCHMENT

1.2.1 Résumé en Anglais

The rivers of the Gaspé Peninsula, Québec (Canada), a coastal drainage system of the St. Lawrence River, receive and transport vast quantities of large wood. The rapid rate of channel shifting caused by high-energy flows and noncohesive banks allows wood recruitment that in turn greatly influences river dynamics. The delta of the Saint-Jean River has accumulated wood since 1960, leading to frequent avulsions over that time period. The wood raft there is now more than 3-km in length, which is unusual but natural. This jam configuration allows a unique opportunity to estimate a wood budget at the scale of a long river corridor and to better understand the dynamics of large wood (LW) in rivers. A wood budget includes the evaluation of wood volumes (i) produced by bank erosion (input), (ii) still in transit in the river corridor (deposited on sand bars or channel edges), and (iii) accumulated in the delta (output). The budget is based on an analysis of aerial photos dating back to 1963 as well as surveys carried out in 2010, all of which were used to locate and describe large wood accumulations along a 60-km river section. The main results of this paper show that the raft formation in the delta is dynamic and can be massive, but it is a natural process. Considering the estimated wood volume trapped in the delta from 1963 to 2013 (≈25,000 m^3), two important points are revealed by the quantification of the wood recruitment volume from 1963 to 2004 (≈27,000 m^3 ±400 m^3) and of the wood volume stored on the bars in 2010 (≈5950 m^3). First, the recruitment of large wood from lateral migration for the 40-year period can account for the volume of large wood in the delta and in transit. Second, the excess wood volume produced by lateral migration and avulsion represents a minimum estimation of the large wood trapped on the floodplain owing to wood volume that has decomposed and large wood that exited the river system. Rafts are major trapping structures that provide good potential sites to monitor wood delivery from the catchment through time and allow estimations of LW residence time while in transit.

These results contribute to understanding the interannual large wood dynamics in the Saint-Jean River and can assist river managers in determining sustainable solutions for coping with the issue of wood rafts in rivers.

Keywords: large wood; large raft; wood budget; watershed scale; wood transport; delta dynamics

1.3 INTRODUCTION

Large wood (LW) in rivers plays an important role in fluvial systems. It affects rivers by changing flow structure (Abbe and Montgomery, 1996; Piégay and Gurnell, 1997) and sediment transport dynamics (Assani and Petit, 1995; Montgomery *et al*., 2003; Skalak and Pizzuto, 2010) and by contributing to the development of fluvial forms (Keller and Tally, 1979; Nakamura and Swanson, 1993; Lisle, 1995; Montgomery *et al*., 1995) and fluvial styles (Keller and Swanson, 1979; Hickin, 1984; Piégay, 1993; Piégay and Marston, 1998; Sear *et al*., 2010). Also, LW promotes biodiversity by increasing the variability and quantity of fluvial habitats (Thévenet *et al*., 1998; Mossop and Bradford, 2004; Floyd *et al*., 2009; Howson *et al*., 2012). Despite the environmental benefits, vast LW accumulations can be problematic for human activities. It can enhance the intensity and frequency of bank erosion, flooding and avulsion processes and thus represents a natural hazard to human communities and infrastructures (Piégay *et al*., 2005).

Pioneering works on LW in rivers have described historical wood accumulations in North American rivers at the time of European colonization. The Great Raft of the Red River (a tributary of the Mississippi), for example, was a 300-km wood accumulation that had long persisted during the nineteenth century (McCall, 1988). In modern times, having such large rafts is very unusual because of river management, but a few cases have been documented in reservoirs where a dam blocks the transfer of wood downstream (Moulin and Piégay, 2004; Le Lay and Moulin, 2007; Fremier *et al*., 2010). On the Rhône River, for example, great quantities of drifting wood produced large rafts on the upstream side of the Génissiat dam that disturbed normal operations (Moulin and Piégay, 2004; Le Lay and Moulin, 2007). Wood removal is done several times a year, but it is a daunting task: extracting 5000 m³ can take several days and cost tens of thousands of dollars annually (Le Lay and Moulin, 2007). In more natural settings, channels of the San Antonio River delta (Texas) have been blocked by large wood rafts (> 2.5 km in 2010) and a series of rafts have formed since 1996, were removed, but then reformed again (Philipps, 2012). As observed by Philipps (2012), the link between large logjams and channel avulsion remains unclear in

deltas where the development of multiple distributaries that reduce the width of individual channels also enhances the probability of logjam formation. Although logjams certainly affect avulsions and block sediment transit, the interrelationships between logjams and avulsions may be more complex than initially thought (Phillips, 2012; Martin-Vide *et al*., 2014). A better understanding of LW dynamics in these situations could lead to alternative solutions to deal with raft formation (Moulin and Piégay, 2004).

Over the last few decades, most studies on LW dynamics have been carried out in small watershed streams (see the review in Seo *et al*., 2010), thus there is a clear need to develop management tools and strategies to deal with large wood in medium to large rivers (Kasprak *et al*., 2012) as well as in rivers of cold areas. A large body of literature exists on the interactions of LW and river forms and processes (Montgomery *et al*., 2003), but few studies have quantified the amount of wood along river corridors (Harmon *et al*., 1986) and examined the factors controlling its longitudinal distribution, especially in large rivers (Piégay, 2003; Wohl and Jaeger, 2009). Volumes of LW are highly variable and depend on the environment and on management practices. In terms of volume in natural (unmanaged) streams, the largest accumulations of wood (m^3/ha) have been observed in Hope Creek, California (USA), with 4500 m^3/ha (Keller *et al*., 1985) and in Hangover Creek, British Columbia (Canada), with 1700 m^3/ha (Hogan, 1985). Within the Tanama River in Alaska, LW volumes were found to vary between 0.82 and 5086 m^3/km (Ott *et al*., 2001).

Today, the main challenges for river managers dealing with LW are related to integrating large wood dynamics at the scale of fluvial systems. These challenges include (i) the identification of productive basins in terms of wood transport, (ii) the determination of local conditions that promote wood jams so that actions can be targeted, (iii) the determination of the spatial pattern of wood recruitment processes with the aim of mitigating wood transport, and (iv) the development of warning systems to prevent damage during floods.

The Saint-Jean River on the Gaspé Peninsula in Québec, Canada, represents an ideal study area to explore challenging issues related to large wood dynamics and provide

feedback for management. The river and its managers face several impacts from LW that affect river morphodynamics and its biological integrity: three massive rafts together block more than 3 km of channels in the river delta (Fig. 15). River managers are concerned that the rafts may hinder upstream migration of Atlantic salmon (Salmo salar): in 2009 and 2010, Wadham-Gagnon and Castilloux (2010) found more than 150 salmon (20% of the adult population) dead from injuries sustained by having to swim through the dense rafts. This has led managers to contemplate dismantling one of the rafts. Considering the volume of wood trapped in the rafts and the rates at which the rafts grow, it was apparent that a study of the LW dynamics in the Saint-Jean River system was needed to evaluate whether such an action would be successful. An accurate estimation of the amount of LW found in the upstream portion of the river as well as an understanding of its mobility is needed to determine adequate interventions. Furthermore, a better understanding of the production of large wood could lead to alternative solutions to cope with raft formation.

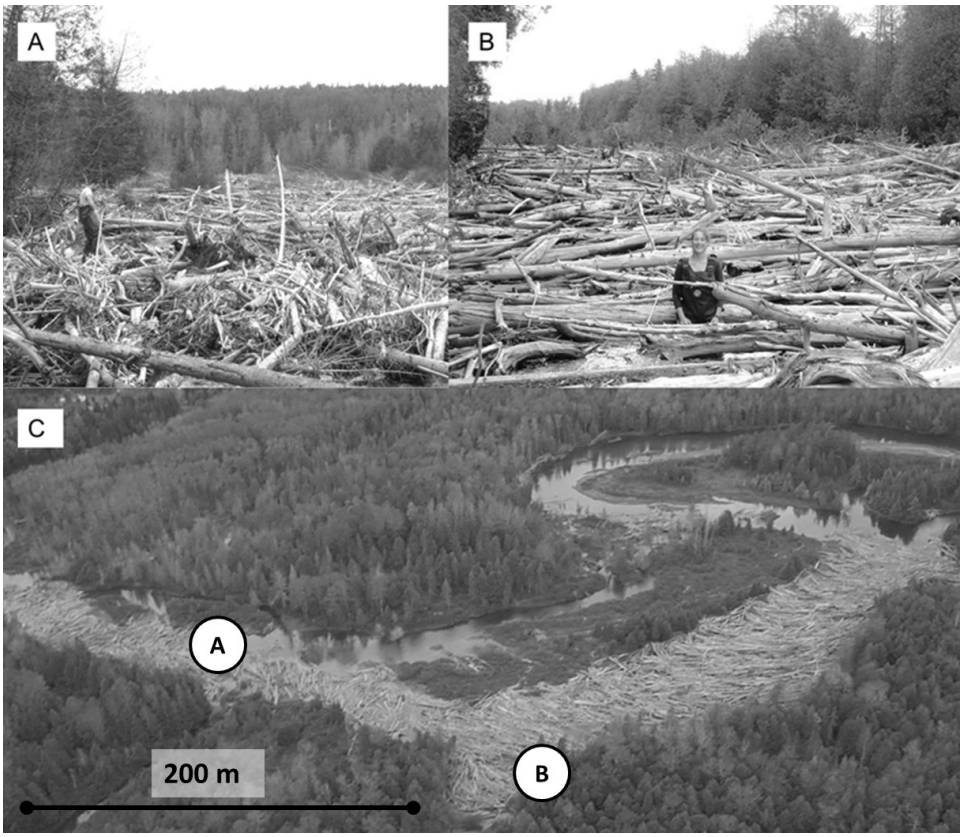


Figure 15. Raft in the estuary of the Saint-Jean River on the Gaspé Peninsula, Québec, Canada. (A) and (B) Part of raft in central channel and position where the pictures were taken in (C). (C) Upstream part of the raft in central channel in 2011.

This paper aims to improve our understanding of the unusual wood raft of the Saint-Jean River by documenting key components of the wood budget, namely the recruitment, transport, and accumulation of large wood in the river corridor. Three questions motivated the research implemented in this paper: i) How and why did the large raft of the Saint-Jean river form? ii) How did it evolve through time? and iii) How efficient is the raft in terms of a wood-trapping structure—is the wood trapped in the raft a good estimate of what the channel network is producing from bank erosion? To answer these questions, we relied on field measurements and aerial and satellite imagery to establish raft dynamics and wood delivery since 1963.

1.4 STUDY SITE

The Saint-Jean River is considered to be one of the 10 best salmon rivers in Québec, with an adult population exceeding 1200 individuals (Wadham-Gagnon and Castilloux, 2010), remote fishing locations, and magnificent scenery. It is located on the eastern portion of the Gaspé Peninsula in Québec, Canada, in the physiographic region of the Appalachian Mountains (Fig. 16). Elevations range from 700 m in the headwaters to sea level, where the river flows into the Bay of Gaspé through a delta that is subject to daily tides. It drains an area of 1130 km² and has an approximate length of 130 km and an average annual flow of 30 m³/s. The maximum recorded flow occurred in 2010 and exceeded 250 m³/s. The snow contribution is high, with a mean annual snowfall of 371.8 cm, and the mean annual rainfall is 779.2 mm (at Gaspé station). This leads to a snowmelt-dominated spring flood regime.

The Saint-Jean River is a dynamic gravel-bed river encompassing three specific river styles (Fig. 16C). Meandering sections are found where the valley is wide enough to form an alluvial plain. This occurs in the upstream (kilometric point [PK] 60-30) and downstream (PK10-0) sections where lateral migration and avulsion are the dominant fluvial processes. In these sections, river width varies between 50 and 70 m. In the middle section, bedrock and rock outcrops constrain river flow, so the river is relatively straight with alternating riffles and pools (PK30-10). The upstream and middle sections have an average slope of 0.40% and the downstream section an average slope of 0.27%. Finally, the delta is largely of the anastomosed style with fine sediments deposited from regular overbank flows and rafts generating frequent avulsions (PK3-0). In this section, the river divides into several channels with an average width varying between 20 and 40 m.

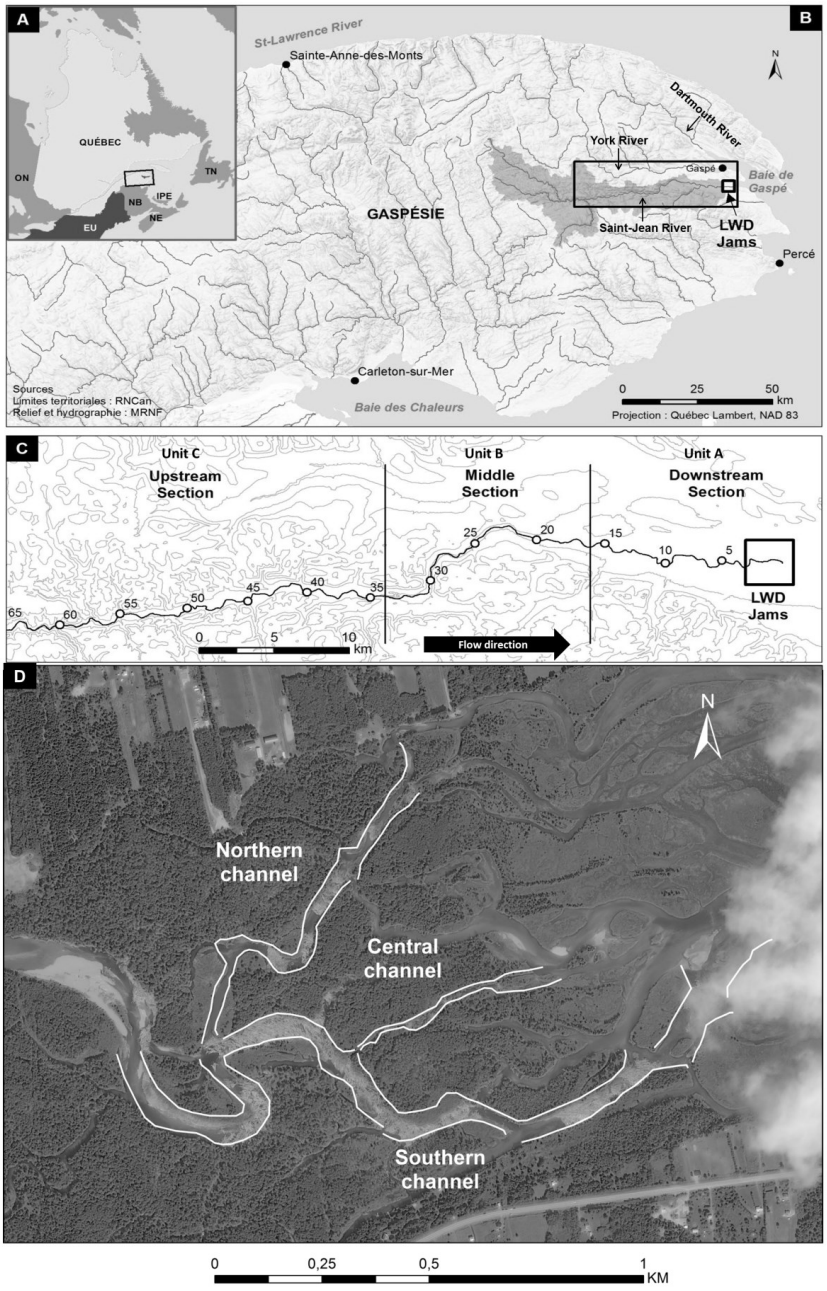


Figure 16. (A) Large-scale map showing the general location of the Saint-Jean River in Québec, Canada. (B) Location of the Saint-Jean River on the Gaspé Peninsula. (C) Detailed map showing the studied river corridor with distance from river mouth in km (kilometric point: PK). (D) Satellite image of the Saint-Jean River delta where the large wood rafts occupy large sections of the three main delineated channels.

The raft in the Saint-Jean River delta consists of three large rafts and several smaller jams (Fig. 16D). The raft in the southern channel covers nearly 2000 linear metres and that in the northern channel nearly 700 linear metres. The central channel raft covers nearly 300 linear metres, but it has been colonized by vegetation for more than 20 years. The rafts are spectacular: to our knowledge, none comparable are founded in Québec and few if any elsewhere in the world. The Saint-Jean delta has a high proportion of riparian trees (66%) consisting of a mature forest composed of large Thuyas occidentalis. The rest of the area is coastal marshland (33%), which extends only a short distance. The average number of channels in the delta's riparian area is 3.8 and 9.5 in the coastal marsh area.

1.5 METHODOLOGY

1.5.1 Analysis of raft evolution since 1963

Our estimation of the wood volume trapped in rafts followed the method developed by Piégay (1993) and Citterio (1996) and was applied to measurements from aerial orthophotos and satellite images. The spatiotemporal evolution of rafts from 1963 to 2013 is from the planimetric analysis of aerial photos (1963–2004), Landsat 7 imagery (1999–2011), and GeoEye satellite images (2012–2013). Estimated surface areas were multiplied by an estimated average wood thickness of 1.68 m (standard error of 0.06 m, which was obtained by averaging the mean thickness of 97 large wood jams [LWJ] measured in the Saint-Jean River corridor in 2010) and divided by the proportion of air-in-wood volume measurements proposed by Thévenet *et al*. (1998). This estimated average thickness was used because of the difficulty of accessing the delta and safely measuring raft thickness. The evolution of raft surfaces was investigated using aerial photos available for the delta (1963, 1975, 1993, and 2004), and the surface areas of wood accumulated between the aerial photos were quantified. The annual evolution of surfaces was also documented using free Landsat 7 imagery for 1999 to 2011 and GeoEye imagery for 2012 and 2013. Visual validation was carried out between aerial photos from 2004, 2012, and 2013 and from Landsat 7 imagery. Wood raft mapping was based on a visual detection of wood as its

texture on Landsat 7 imagery is clearly distinct from that of water. The Landsat 7 imagery method could only be applied to the southern channel because it was wide enough to encompass several pixels (ground resolution of 15 m). One image taken each year, after the spring flood (between June and October), was used to evaluate the new surface covered by raft accumulations in the delta.

1.5.2 Wood mapping along the channel length

The entire lower 60-km river corridor accessible from the road was surveyed by canoe to locate and characterize all large wood accumulations within the active channel. Accumulations were divided into two types: individual wood pieces and LWJ. An LWJ is an accumulation of more than three pieces of wood >10 cm in diameter and longer than 1 m (Wohl *et al*., 2010). For each jam, the shape, position, volume (air–wood volume), and mass were measured using the protocol described by Piégay (1993) and Citterio (1996). In that protocol, an LWJ is considered as a simple rectangular volume (in m^3) (Fig. 17):

$$Vaw = L*W*H \quad (1.1)$$

where Vaw is the air–wood volume (m^3), L is the average length (m), W is the average width (m), and H is the average thickness (m) of the wood accumulation. The air–wood volume includes both the wood and the air volume within the simple rectangular form. The wood volume (Vw) is then calculated from

$$Vw = Vaw*\rho w / 100 \quad (1.2)$$

where ρw is a proportion of air-in-wood volume measurements representing a ratio between the actual wood volume and the air–wood volume. Having an estimate of the wood volume allows a better comparison with the other wood volume estimations (input and output). Thévenet *et al*. (1998) proposed a proportion of air-in-wood volume of 89.50% ± 0.91% from several field measurements, and this proportion factor was thus adopted.

To evaluate uncertainties in the air-wood volume estimates, measurements of 40 LWJ were replicated at a one-month interval (end of August 2012 and early October 2012). No flood with sufficient power to transport LW or to introduce new LW from bank erosion occurred during that period, so a direct pairwise comparison could be made. The linear relation between the paired measurements had a strong coefficient of determination (R2 = 0.97) and a slope that was not significantly different from 1 (y = 1.034x - 7.8; 95% confidence interval (CI) for the slope: 0.976–1.093). This analysis suggests that the margin of error is almost nonexistent for accumulations having more than 200 m² and thus indicates that the measurement selected for wood accumulation is reliable, especially when most wood accumulations on the Saint-Jean River have air-wood volumes >200 m².

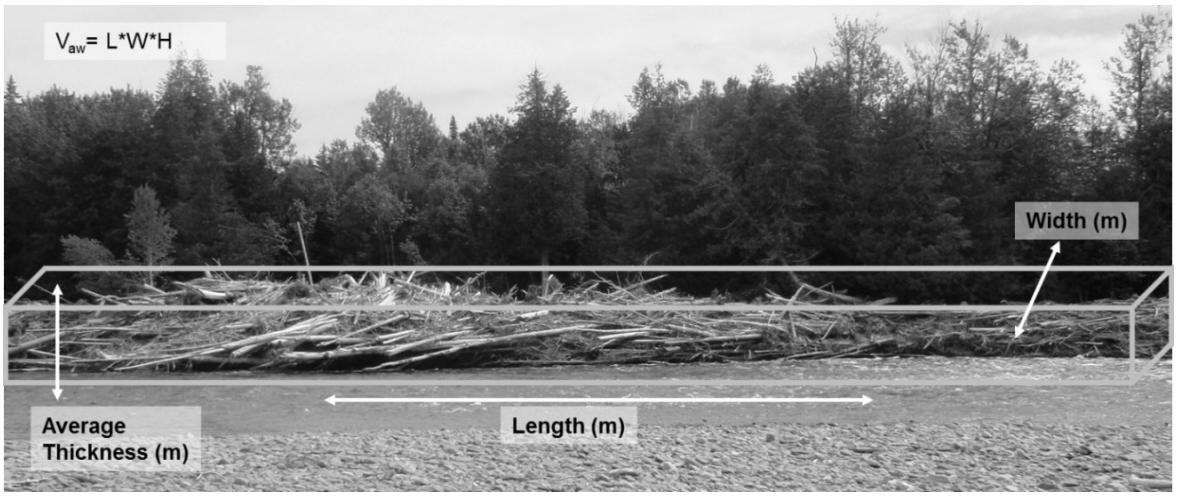


Figure 17. Theoretical examples of the method used to measure the 'air–wood' volume of large wood (LW) accumulations. The width (w), the average thickness (h) and the length (L) of a simple rectangular are measured to the nearest centimetre using a rigid and flexible graduated ruler.

As pointed out by Wohl *et al*. (2010), comparing wood volumes between studies is difficult because metrics are heterogeneous. The amount of wood in a river is generally measured as a volume per unit of area or length (m^3/ha, m^3/km), but it can also be quantified by the number of trunks per unit of area or length. To allow comparisons with

previous studies, cubic metres of wood per kilometre of river (m^3/km) and number of trunks per kilometre of river are the metrics used in this paper.

1.5.3 Quantification of historical wood recruitment in the river corridor

The volume of wood introduced to the river by floodplain erosion was estimated as the product of the eroded floodplain areas (eroded channel margins) for a given period and the standing wood volume on that floodplain. The eroded floodplain area was estimated from an overlay of the main channel positions between georeferenced aerial photos from 1963 and 2004. The ground resolution of the 2004 aerial orthophotos was 63 cm. The eroded areas considered were those that were more than 5 m wide; this avoids user georeferencing work and planimetric errors. Planimetric errors from aerial photo georeferencing were quantified using the root mean square error (RMSE) method, which gave an average value of 2.04 m. To evaluate the effect of the planimetric error in the estimation of eroded areas, the result was evaluated by examining the increase or decrease in area (in percent) when adding or subtracting the planimetric error on two axes of an ellipse having a range of areas similar to the range of areas measured in the Saint-Jean River corridor (Fig. 18). When adding the planimetric error, the change in area varied between 25% and 5% for areas smaller than 20 000 m² and between 4% and 0.52% for areas larger than 20,000 m². When subtracting the planimetric error, the change in areas varied between -22% and -5% for areas smaller than 20,000 m^2 and between 4% and -1.03% for areas larger than 20,000 m^2. Two logarithmic models were also built to describe the relationship between the proportions of change and absolute areas (Fig. 18). These models were used to determine the uncertainties (± values) of the eroded surfaces along the fluvial corridor between the 1963 and the 2004 aerial photos. In this study, all eroded surfaces are larger than 20,000 m^2, thus the error margin lies between 0.52% and 4%, which is very low. The eroded floodplain areas were computed for each 1-km segment of the river.

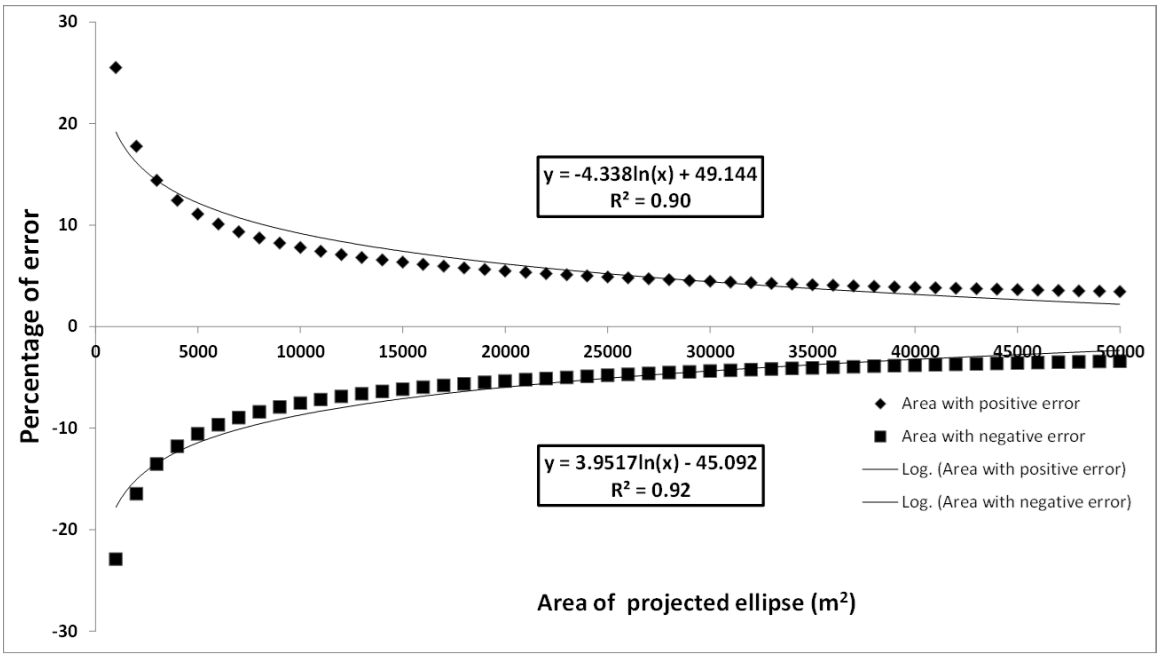


Figure 18. Model to estimate error during measurement of the eroded floodplain surface using projected ellipse forms.

The standing wood volume was estimated from 25 forest parcels along the river corridor that were evenly distributed over the upstream section, where riparian trees are mainly Abies balsamea and Tuya occidentalis, and the downstream section, where the dominant tree is Tuya occidentalis. Parcels were selected to represent the wide range of forest texture and composition found in the valley. Parcels covered an area of 15 m × 15 m in which tree diameter at breast height (DBH), tree height (TH), and tree species were documented. Wood volume per tree was estimated using DBH and TH, and wood volume per area was obtained by adding the wood volume per tree divided by the parcel area.

1.6 RESULTS

1.6.1 Raft dynamics through time

The five aerial photographs of the delta reveal the evolution of the raft as well as a series of avulsions that occurred between 1963 and 2013 (Fig. 19). In 1963, a raft can be observed on the north branch of the delta (Fig. 19, A1), while the central branch seems to have become the main channel within the delta (A2). In 1975, the central branch is clogged by an LWJ (B3), while the south branch has become the main channel (B4). Accumulation at the downstream end of the south channel begins in 1993 (C5), and the accumulation has grown to a length of 800 m by 2004 (D6). In 2004, the north and central channels are completely obstructed with rafts of ~800 and 400 m in length, respectively. In 2013, the three main channels (north, central, and south) are completely obstructed by rafts, and a new channel has formed since 2012 by redirecting flow to the southern part of the delta (E7). The south branch is still the largest channel in the delta, but it is now clogged by a raft 1.5 km in length. A total area of 140,079 m^2 had accumulated in the delta between 1963 and 2013.

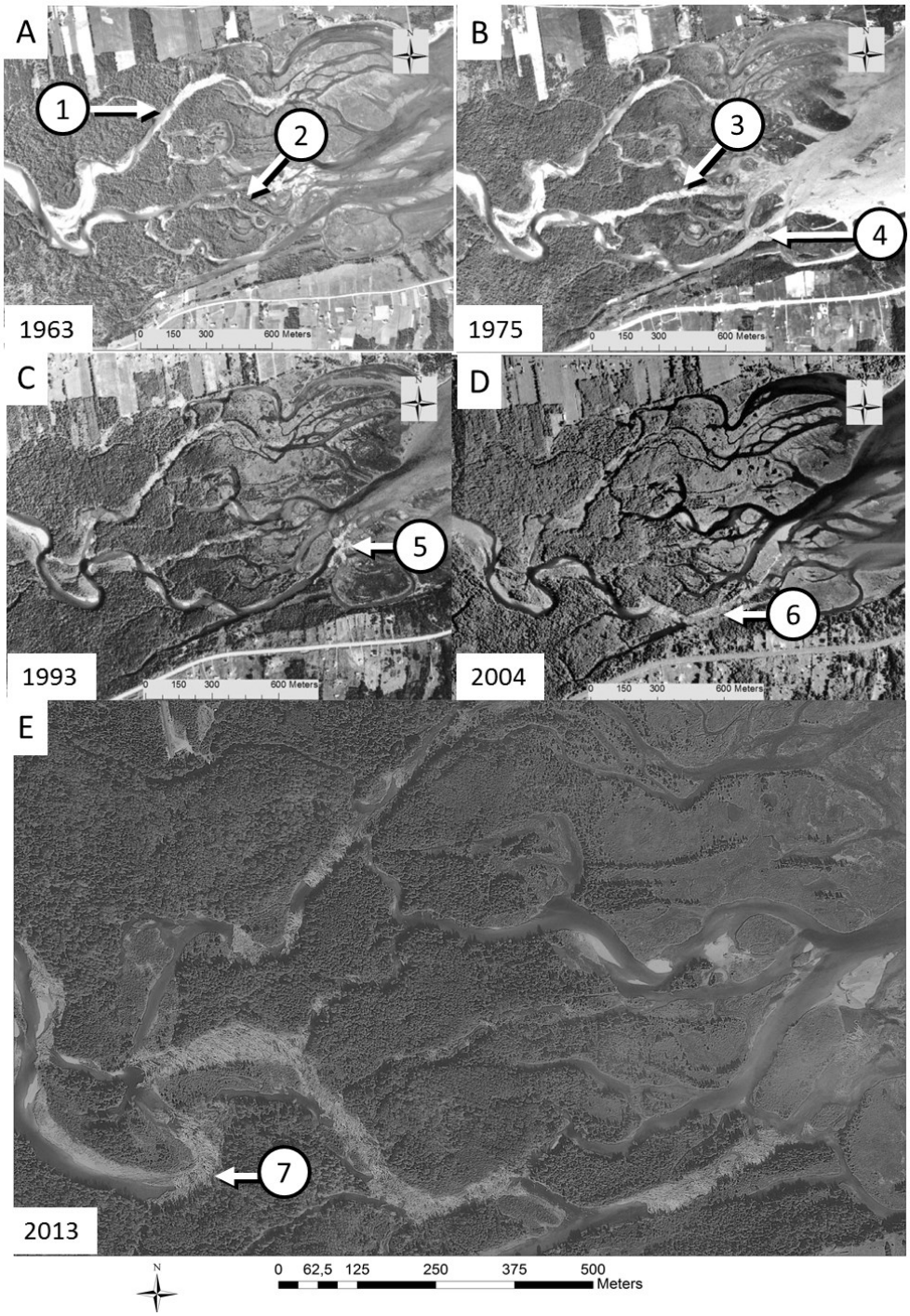


Figure 19. Aerial photographs from 1963, 1975, 1993, 2004, and 2013 are showing the evolution of large wood jams (LWJ) in three channels of the Saint-Jean River delta. See text for comments.

Fig. 20 illustrates the complex dynamics of wood accumulation in the delta since 1963. From the aerial photos taken between 1963 and 2013, we can estimate that more than 24,700 m^3 of wood had accumulated within the three main branches in the delta. This gives an average wood accumulation of 494 $m^{3/}$y. Landsat 7 and GeoEye imagery allows an estimation of the annual rate of wood accumulation in the south channel for the 2000–2013 period. Growth appears to be highly variable from one year to another, from 0 m^2 in 2007 to just over 10,000 m^2 in 2011. No clear trend in the annual accumulated surfaces is observed, and the average annual accumulation is slightly over 4000 m^2/y; this corresponds to a linear distance averaging nearly 100 m/y for 2000–2013 (using 50 m as the average width of the south channel). The largest annual accumulations were observed in 2004, 2009, and 2011, accounting for 18%, 16%, and 27% of the 2000–2013 total accumulation, respectively. The total area accumulated from 2000 to 2013 was nearly 52,000 m^2. Multiplied by the estimated thickness (1.68 m) and divided by the proportion of air-in-wood volume measurements (ρ_w), this area corresponds to an accumulated wood volume of 9196 m^3 over 13 years, or an average accumulation of just over 707 m^3/y. When compared to the 1963–2013 period, this suggests that the accumulation rate is increasing.

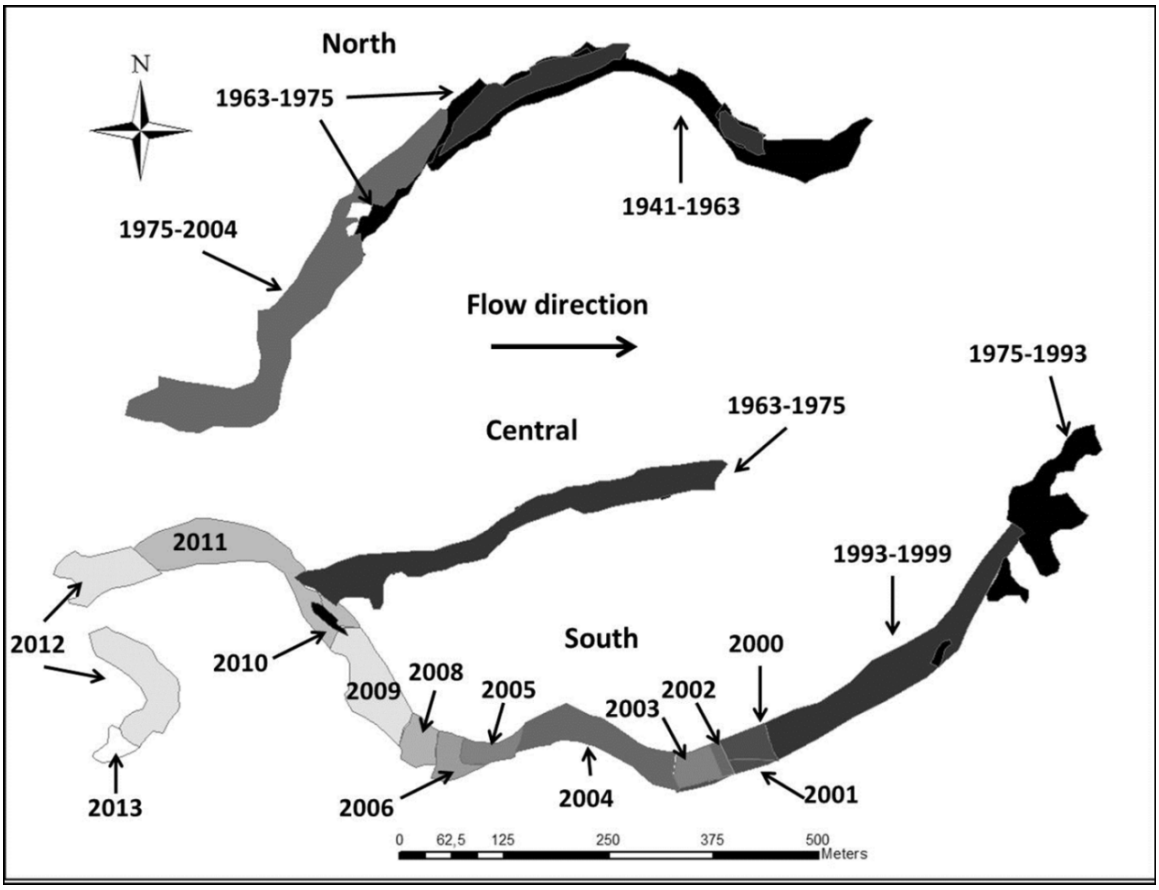


Figure 20. Drawing showing the evolution of the large wood jam (LWJ) surfaces in three channels of the Saint-Jean River delta between 1963 and 2013. The different tones of gray indicate year of formation in the raft.

Fig. 21A illustrates river discharge as well as the evolution of LW discharge from 2000 to 2013 determined using satellite image analysis; Fig. 21B shows a scatter plot of the relationship between the two. Maximum spring discharge was used here because no other flow discharge is available for the Saint-Jean River for that period, and wood discharge concerns the south channel only. Fig. 21B reveals a significant relationship between maximum spring discharge and wood discharge ($R^2 = 0.41$; $P < 0.01$). The figure also shows that the strongest spring discharges are not automatically linked to the highest wood discharges (e.g., 2005 and 2007) and that high wood discharges can occur at lower river discharges. Fig. 21C shows the daily discharge time series of the Saint-Jean River for the 1999–2013 period. The early discharge increase in March 2012 is associated with an

important ice breakup event. A video camera installed on the river bank revealed that the ice cover breakup was involved in moving large wood. Thus even though the flood discharge was relatively low for that year, the large wood discharge was seemingly related to the early ice breakup event. When the data from 2012 are not included, the relationship between wood discharge and river discharge becomes stronger ($R^2 = 0.77$; $y = 1.60x - 37.42$; $P < 0.01$).

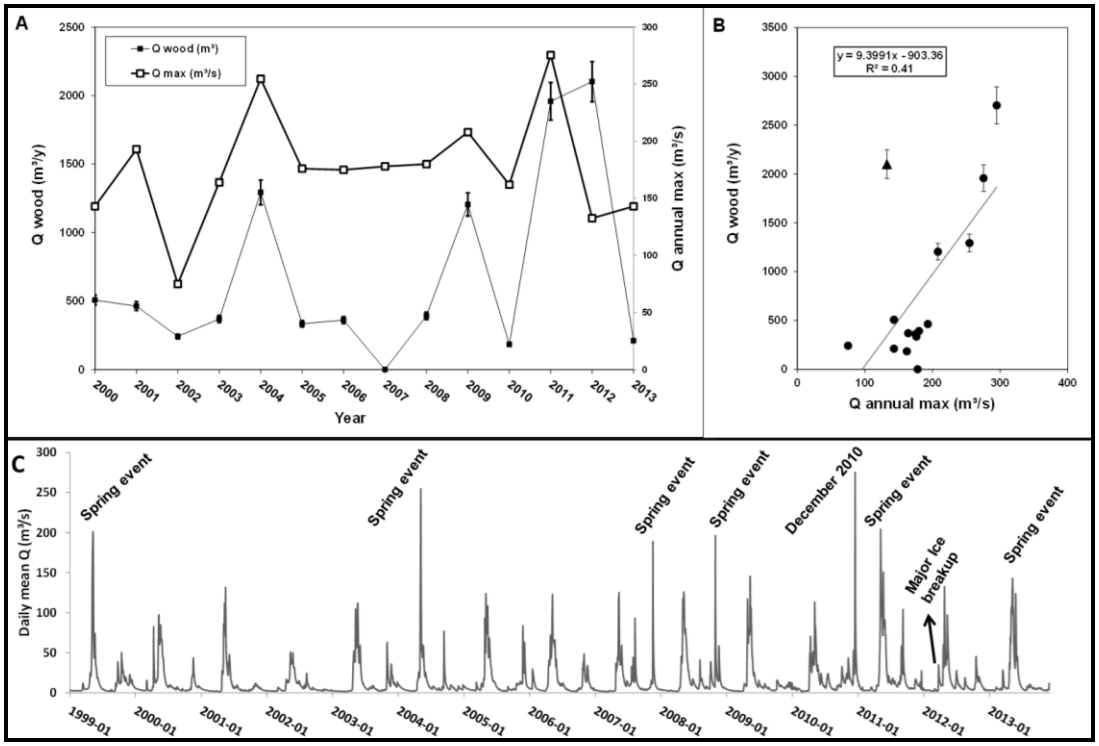


Figure 21. (A) Relationship between river discharge (Q max (m^3/s)) and LW discharge (Q wood (m^3)) in the Saint-Jean River over time; (B) the scatter plot of the flow. (Triangle symbol indicates an important ice breakup event in 2012); and (C) flood series between 1999 and 2013.

1.6.2 Large wood accumulation along the river profile

A total of 97 LWJ and 192 individual LW were measured in 2010 along 50 km of the study reach, giving a total wood volume of more than 5950 m^3 (Table 3). Although a larger number of LW was found along the river corridor, 87% of the total wood volume was

contained within LWJ. The median wood volumes were 15 m^3 and 0.7 m^3 for LWJ and LW, respectively. However, the variability is high, with the interquartile ranges (IQR) for LWJ and LW being 35.6 and 5.4 m^3, respectively; the median number of trunks for LWJ is 12 with an IQR of 22.5. Finally, 63% of trunks have roots, confirming that the wood originates largely from floodplain erosion.

Tableau 3. General characteristics of the large wood documented in the Saint-Jean River corridor (IQR=interquartile range)

	Jam				Individual logs			
N	97				192			
Total number of logs	5762				192			
Total wood volume (m^3)	5370				582			
	Median	IQR	Min	Max	Median	IQR	Min	Max
Number of logs	12	22.5	3	500	1	0	1	1
Length (m)	18.6	11.2	3.7	114.3	10.8	10.1	2.7	30
Width (m)	6.2	6.8	1.1	43.7	1.0	2.3	0.2	3.9
Height (m)	1.6	0.7	0.8	3.5	0.7	1.3	0.1	3.6
Air–wood volume (m^3)	202	487	3	5271	7	53	0	630
Wood volume (m^3)	14.8	35.6	0.3	385.9	0.7	5.4	0.0	63.7

The cumulative distributions of LW and wood volume along the study reach reveal that two sections accumulate most of the LW within the river corridor: section PK1-5, with 21%, and section PK30-53, with 71% of the total wood volume (Fig. 22A). The cumulative curves for the number of LWJ and LW follow a similar pattern, with roughly 23% and 70%

of the documented LW found in sections PK1-5 and PK30-55, respectively. However, the cumulative curves differ for LWJ and LW: <10% of the total LW volume is located in section PK1-5, while more than 90% is located in section PK30-55. The cumulative curves also reveal a strong accumulation zone in section PK30-33, where 30% of the total wood volume is located. Few notable accumulations are found between PK6 and PK30.

Most wood accumulations were found on bars and in abandoned channels, as shown by the cumulative distribution of total wood in relation to the surface areas of bars per kilometre along the study reach (Fig. 22B). The presence of bars is generally associated with wood accumulation (PK1-5; PK30-35). The section with the largest bar surface area per kilometre (PK30-35) has the largest accumulated wood volume within the study reach (30%). However, bar surface per kilometre does not correlate well with wood accumulation because some sections with large bar surfaces do not have substantial wood accumulation (e.g., PK20-25).

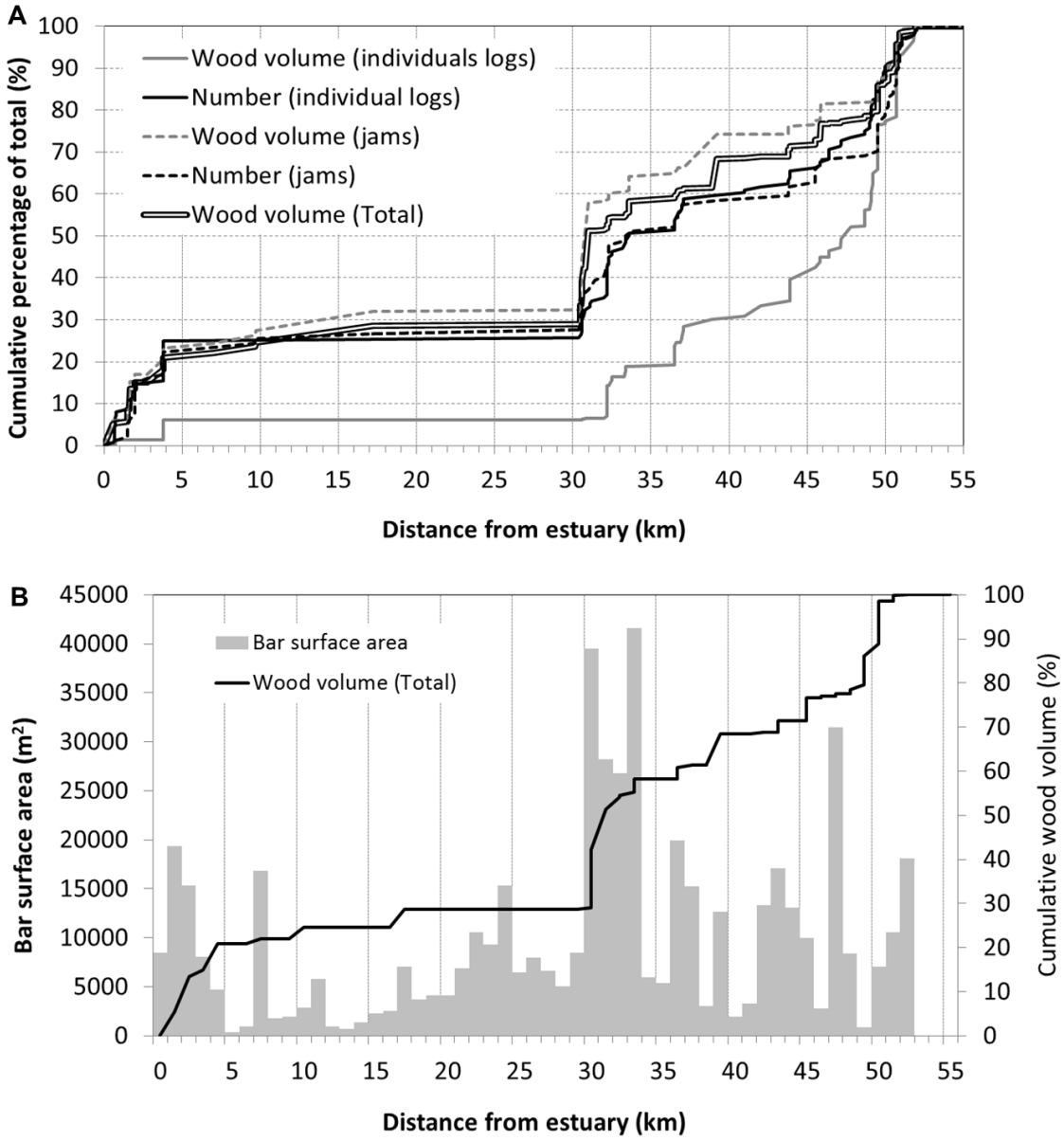


Figure 22. (A) Cumulative curves for the number and volume of large wood jams and individual trunks along the river corridor. (B) Longitudinal distribution of bar surface area per kilometre and cumulative curves for the volume of wood in transit along the Saint-Jean River corridor.

1.6.3 Large wood recruitment

This analysis examined the longitudinal distribution of eroded floodplain areas along the corridor of the Saint-Jean River for a 40-year period (Fig. 23). Between 1963 and 2004, only lateral migration and avulsion processes were observed. No landslide has been observed on the entire river corridor, and we assume that most wood recruitment results from these two dominant processes. Two sections showed strong floodplain erosion, with average eroded areas of 7600 and 14,500 m^2/km for sections PK1-10 and PK30-55, respectively; while the most highly eroded area was PK54 (54,700 m^2/km). Overall, a floodplain area of more than 482,000 m² (±5000 m²) was eroded over the 40-year period, 83% of which was in the upstream section.

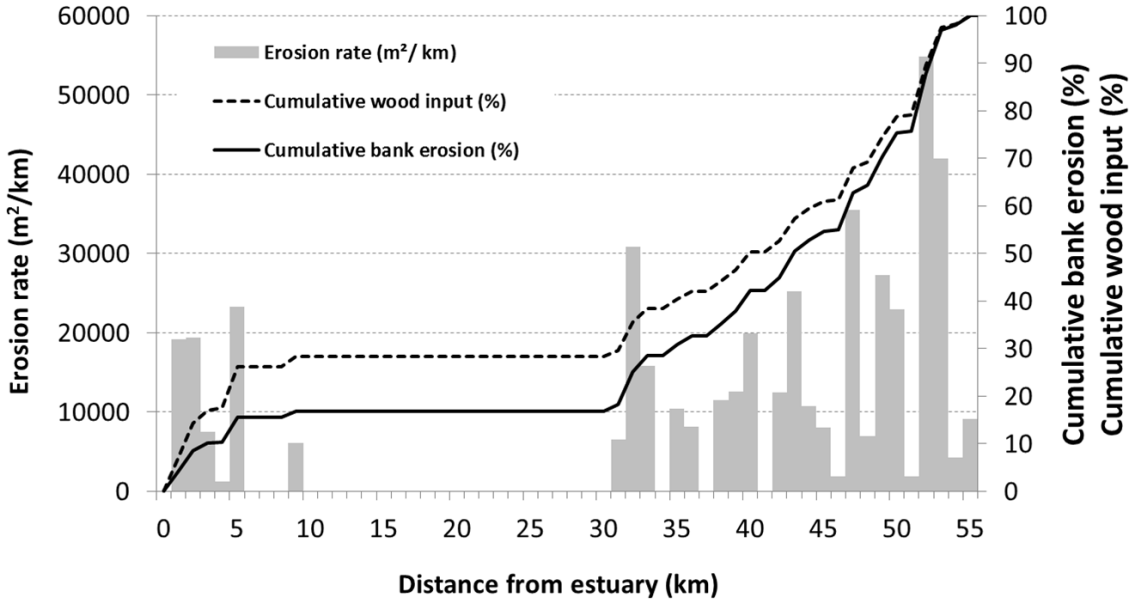


Figure 23. Longitudinal distribution of erosion rates (m^2/km) and cumulative curves (%) for the eroded surfaces and the wood volume input into the river system.

The average wood volumes recruited from eroded areas of the Saint-Jean River are 0.067 and 0.041 m^3/m^2 (standard error = 0.0078 and 0.0098 m^3/m^2) for the upstream and downstream sections, respectively (Fig. 23). Considering these volumes per eroded area and a riparian trunk density of 0.3 tree/m^2, nearly 27,000 m^3 (±400 m^3) of wood was introduced into the Saint-Jean River over the 40-year period (≈675 m^3/y).

1.7 DISCUSSION

1.7.1 Natural recovery

The documented raft formation since 1963 is impressive and raises questions on the origin of the raft. The formation of rafts in the Saint-Jean River has been documented for more than a century: a nineteenth century publication on exploration of the area indicates the presence of a raft in the Saint-Jean River delta in 1845 (Blaiklock, 1845). Thus the current raft formation does not seem to be an anomaly for that fluvial system. For most of the last two centuries, however, the Saint-Jean River—like most rivers along the Gaspé Peninsula—had been used extensively by wood industries to transport logs from the upstream part of the watershed toward the estuaries, where sawmills were located (Fortier, 2011). During most of the logging period on the Gaspé Peninsula (1850–1960), rivers were frequently dredged or partially linearized to minimize wood jams that hindered wood transport to the estuaries (Côté *et al*., 2008; Fortier, 2011). Thus we can assume that logging activities during most of the nineteenth and twentieth centuries limited raft development in the delta. We know that the logging activities in the region ended in the early 1960s (Fortier, 2011), and raft formations in the Saint-Jean River were already reported in 1963. Raft formation in the Saint-Jean River would then be part of a natural recovery of the river system following several decades of human intervention to maintain the capacity for wood transport thorough the delta channels.

Natural recovery toward a system with large wood jams is enhanced by the delta's characteristics. The surrounding mature forest promotes raft development, with trees in the delta floodplain reducing erosion and channel widening. In addition, the numerous small channels in the Saint-Jean delta decrease the capacity for wood transport and promote the accumulation and construction of wood jams. Finally, most riparian trees along the upstream part of the watershed are shorter than 30 m, which is smaller than the average width of the channel (60 m) in the last 60 km of the river corridor. This limits the development of LWJ in the watershed by facilitating wood transport until the delta, where the average channel width is <30 m and hence the transport of large wood pieces is hindered. All these characteristics contribute to natural jam formation in the delta, which begins with blockage by a key piece of large wood followed by the upstream accumulation of other LW from the watershed.

1.7.2 A great raft trapping most wood resulting from floodplain erosion

Wood recruitment processes over the last 40 years amassed for a volume of nearly 27,000 m^3 of wood, i.e., about 650 m^3 of wood per year. Two sections had the highest contributions to wood recruitment via bank erosion and avulsion (PK30-60 and PK0-10). These sections play a role in the temporary storage of wood in transit: wood is not evacuated directly to the delta as a large amount remains temporarily trapped on bars. For example, a volume of more than 5950 m^3 was measured during summer 2010. A high variability in wood production and wood storage within the two sections is observed: the section with the largest wood volume accumulation (PK30-35) is located at the downstream end of a long productive section (PK30-60), where bar surface areas are the highest per kilometre, and at the upstream end of a long nonproductive section (PK10-30), where very little large wood accumulates. The volume of wood on bars may fluctuate from year to year, but it can be assumed to represent the order of magnitude of active wood volume in transit annually.

Considering the estimated wood volume trapped in the delta from 1963 to 2013 (≈25,000 m^3), two important points are revealed by the quantification of the wood recruitment volume from 1963 to 2004 (≈27,000 m^3 ±400 m^3) and of the wood volume stored on the bars in 2010 (≈5950 m^3). First, the recruitment of large wood from lateral migration for the 40-year period can account for the volume of large wood in the delta and in transit. Second, the excess wood volume produced by lateral migration and avulsion represents a minimum estimation of the large wood trapped on the floodplain because of wood volume that has decomposed and large wood that exited the river system. Rafts are major trapping structures that provide good potential sites to monitor wood delivery from the catchment through time and allow estimations of LW residence time while in transit.

1.7.3 Factors controlling wood discharge and raft evolution

Knowing how the raft's area changed between 1963 and 2013 allows us to explore several issues of particular significance that will lead to a better understanding of LW dynamics. First, because most wood is trapped in the raft, the annual growth rate can be converted to wood discharge, thus the relationship between wood discharge and river discharge can be explored. We see in Fig. 21 that there were never two consecutive years of high wood discharge even if river discharge had been high for the same two consecutive years (e.g., 2004 and 2005). This observation supports the suggestion by Moulin and Piégay (2004) that a production period must occur before large quantities of wood can be transported through the river, even if discharge is adequate (i.e., a second large peak discharge will not transport as much wood as the first). Possibly, a period of time is necessary for in situ alteration and remobilization to allow wood transport. Trees that arrived in the river by lateral migration possess large roots and often large amounts of mineral materials that reduce their mobility. The LW is likely trapped in river areas with particular configurations; these areas may fill up and temporarily block the river channel, causing a temporary diversion until the channel is again modified. The result is that delays between production and export downstream may occur.

Although a significant relationship was found between wood and river discharges, the analyses also suggest that careful consideration must be given to determine which flow parameter to use to explain the annual wood discharge for the Saint-Jean River. Maximum spring discharge was used because it was the only parameter available and because it represents the highest discharge of the year in rivers of the Gaspé Peninsula. Although peak river discharge has been shown to explain most wood discharge (Piégay, 2003; Fremier *et al*., 2010), other parameters could also be important, e.g., flood duration, maximum fall discharge, and the number of geomorphological effective floods in a year. Winter conditions may also play a determinant role in the large wood dynamics in rivers (Keller and Swanson, 1979). We observed ice scars on trees along the river corridor, suggesting the occurrence of ice jams. For example, 2011 had a flood of 300 m^3/s but a lower volume of wood than 2012, which had a flood of 145 m^3/s. The different wood amounts in the delta can be explained by two factors: (i) the 2011 flood resulted in a major production of wood available for the next flood, and (ii) the unusual ice breakup in spring 2012 (triangle on Fig. 21B). The ice breakup on 24 April 2012 was usual as it was late in the winter season following a harsh winter that promoted thick and extensive ice cover in the watershed. The massive and extended fragmentation of the ice cover was triggered by an important heat wave (22.4 and 24.1°C) combined with significant liquid precipitation (33.9 and 26.6 mm) on the 23th and 24th of April, respectively. Ice cover formation and ice breakup may play an important role in the mobilization of large wood at lower discharges. This role has yet to be investigated for northern rivers.

Concerning the formation of rafts in the delta, we observed that river flow is altered when accumulations are too dense. Raft formation in the delta is dynamic and can be massive, but it is a natural process. Petropavlovsky (2013) proposed that the raft does not trap all LW; the analyses in that paper showed that the raft *breathes,* with natural additions and releases of LW during flood events. In this delta, LW that completely obstruct the flow can cause derivation of the main channel by avulsion, meander cutoff, and construction of a new secondary channel (Gurnell *et al*., 2002; Phillips, 2012; Gurnell, 2013; Wohl and Beckman, 2014). Spatial shifts in the course of river channels—avulsions—are common in

many deltas and coastal plain alluvial rivers (Phillips, 2012). It is difficult to predict the occurrence and trajectory of an avulsion (Hooke, 2004), but the analysis of aerial images permitted us to identify avulsions that have occurred since 1963 in the Saint-Jean River delta. Three avulsions have occurred since the formation of rafts in the delta, which represents an avulsion every 16 years. This is similar to the findings of Keller and Swanson (1979), who observed a period of 15 years between the formation of an LWJ and an avulsion of the channel. Therefore, it is not necessary to intervene because risk is moderated: the delta adapts to channel obstructions that generate avulsions. This action undoubtedly constitutes a key ecological mechanism leading to habitat diversification in the delta and self-regulation of LW dynamics.

1.8 CONCLUSION

The systematic removal of LW in rivers is not always the best solution that river managers have to maintain a river's good health. The presence of wood is often beneficial for biodiversity, bank stabilization, and flood mitigation; but negative perceptions of LW often lead to its removal. We must therefore deepen our knowledge of LW with multiscale and multitemporal approaches to understand the issues before acting. The raft of the Saint-Jean River on the Gaspé Peninsula represents an exceptional amount of wood for modern times—unusual, but natural—as shown by the presence of raft in 1845. Wood accumulation began in 1963, but raft size has been observed to strongly fluctuate on shorter time scales.

The river is characterized by complex large wood dynamics that promote the formation of large wood jams in the delta. Our results show that almost all of the LW is produced by natural lateral migration and by river morphology (e.g., cutoff meanders). Tree density in the riparian zone is very high, with mature forest in the erosion area. For LW accumulated in the river corridor, two zones (upstream and downstream) trap all LW, the mobility of which can vary strongly from one year to the next. Thus, a great quantity of wood is always potentially available for transit to the delta.

The estimation of wood discharge from river discharge is not a simple relationship in cold rivers due to wood transport during ice breakup. Variable cycles in the production and transport of wood in the upstream section as well as the river's ice dynamics further complicate relationships. The case of the Saint-Jean River is an exceptional study site to apply and develop a LW budget similar to those done by Benda and Sias (2003) and Schenk *et al*. (2014). Further research continues on the Saint-Jean River with the aim of better quantifying (i) the annual variability of the wood in transit, (ii) the mobility of specific wood accumulations along the river corridor, and (iii) a large wood budget at the watershed scale in cold rivers.

1.9 ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support was provided by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC-CRSNG), Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT), Société de Gestion des Rivières de Gaspé (SGRG), Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF), Ville de Gaspé, Fondation du Saumon du Grand Gaspé, and Faune Québec. We thank the fluvial group at UQAR for their excellent assistance during fieldwork. We also thank the reviewers and Richard A. Marston (Editor) for their time and effort devoted to improving previous version of this manuscript and Laure Devine for English revision.

CHAPITRE 2
MOBILITÉ INTERANNUELLE (2010-2013) DES BOIS MORTS DANS UN CORRIDOR FLUVIAL EXPOSÉ À UNE CRUE DE RÉCURRENCE 50-ANS ET A LA DYNAMIQUE DES GLACES DE RIVIÈRE

2.1 RESUME EN FRANÇAIS DU DEUXIEME ARTICLE

Les rivières semi-alluviales de la Gaspésie, Québec, sont susceptibles de produire et de transporter de grandes quantités de bois mort (BM). Les taux élevés d'érosion latérale, due à des flux d'énergie élevés et des berges non-cohésives, sont les principaux processus conduisant au recrutement de bois en rivière, qui à son tour entraine des processus complexes d'accumulation de bois et de réentraînement dans le chenal actif. Le delta de la rivière Saint-Jean (SJR) a accumulé d'importants flux de bois annuels depuis les années 1960 qui a abouti à un embâcle (raft) de bois ayant plus de 3 km de longueur en 2014. Pour documenter la cinétique des bois en rivière sur le corridor principal de la rivière Saint-Jean, 4 suivis annuels ont été réalisés entre 2010-2013 pour localiser et décrire plus de 1000 embâcles de bois (EBM) et 2000 bois morts individuels) le long d'un tronçon de rivière de 60 km de long. Les conditions géomorphologiques locales qui contrôlent la mobilité de bois et les dépôts ont également été documentées. Les analyses de caméra vidéo a permis d'examiner les taux de transport à partir de trois événements hydrométéorologiques pour deux sections spécifiques de la rivière. Des photos aéroportées et des caméras vidéo et photo ont été utilisées pour estimer le volume de bois mis en place par les processus d'érosion latérale et pour caractériser les variables géomorphologiques. Les résultats indiquent que le recrutement de bois mort entre 2010 et 2013 représente 57% de la production totale du volume des BM pour la période 2004 et 2013. Les volumes de bois

déposés le long du corridor fluvial de 60 km sont 4 fois plus élevés en 2013 qu'en 2010. L'augmentation des quantités de bois se produit principalement dans les sections alluviales en amont de la rivière alors que la diminution est observée dans la section semi-alluviale. Les observations suggèrent que la crue de faible récurrence de l'année 2010 a produit et transporté de grandes quantités de BM, disponibles pour les crues subséquentes. Les accumulations de BM se poursuivent après cet évènement, jusqu'au moment où une crue similaire ou une débâcle de glace surviennent afin de réintroduire ces BM accumulés dans le corridor de la rivière. Les analyses vidéo permettent de comparer les spécificités pour le transport de BM durant une crue avec glace et une crue en eau-libre (sans-glace). Il est proposé que le transport de BM lors des crues avec embâcles de glace transporte une plus grande quantité de bois, mais ne contribue pas aux taux de recrutement de BM élevés.

Ce deuxième article, intitulé « *Interannual kinetics (2010-2013) of large wood in a river corridor exposed to a 50-year flood event and fluvial ice dynamics*», provient de mes travaux de doctorat sur la rivière Saint-Jean en Gaspésie. J'ai effectué l'ensemble de la prise de mesures sur le terrain durant plus de quatre années. J'ai déposé les demandes de subventions, effectué et supervisé les travaux de terrain, effectué les analyses, la production des figures et la rédaction de la production scientifique. Je suis le premier auteur et mes deux directeurs m'ont encadré pour la réalisation de cet article. Il fut accepté avec modifications mineures (intégrées dans cette version) le 22 février 2016 dans le numéro spécial *Wood in World Rivers 3* dans la revue internationale *Geomorphology*. Cet article a été présenté en différentes parties aux conférences internationales suivantes: (1) *Third International Conference Wood in World Rivers (WWR3)* à Padova, Italie à l'été 2015 et à (2) *RHQ 2013: La recherche hydrologique au Québec dans un contexte de changements climatiques* à l' ENAP, Québec au printemps 2013.

Dans l'organisation globale de la thèse, cet article présente la dynamique du BM (entrée, mobilité et sortie) à une échelle interannuelle (2010-2013) sur l'ensemble du corridor fluvial de la RSJ. Le suivi effectué sur quatre années a permis de déterminer le rôle des évènements hydroclimatiques extrêmes sur la production, l'accumulation dans un

corridor fluvial et les sorties de bois en lien avec ces crues. Le rôle de la glace fluviale sur la dynamique du bois mort est aussi présenté et montre que la dynamique glacielle a une influence sur les volumes de bois transportés durant une crue avec débâcle mécanique. Ces données interannuelles permettent d'intégrer la variabilité interannuelle de la dynamique des bois dans nos analyses du bilan ligneux depuis les années 1960 qui sont présentées dans le chapitre 3.

2.2 INTERANNUAL KINETICS (2010-2013) OF LARGE WOOD IN A RIVER CORRIDOR EXPOSED TO A LOW RECURRENCE-FLOOD AND TO FLUVIAL ICE DYNAMICS

2.2.1 Résumé en Anglais

Semi-alluvial rivers of the Gaspé Peninsula, Québec, are prone to produce and transport vast quantities of large wood (LW). The high rate of lateral erosion owing to high energy flows and noncohesive banks is the main process leading to the recruitment of large wood, which in turn initiates complex patterns of wood accumulation and reentrainment within the active channel. The delta of the Saint-Jean River (SJR) has accumulated large annual wood fluxes since 1960 that culminated in a wood raft of more than 3-km in length in 2014. To document the kinetics of large wood on the main channel of SJR, four annual surveys were carried out from 2010 to 2013 to locate and describe more than 1000 large wood jams (LWJ) and 2000 large wood individuals (LWI) along a 60-km river section. Airborne and ground photo/video images were used to estimate the wood volume introduced by lateral erosion and to identify local geomorphic conditions that control wood mobility and deposits. Video camera analysis allowed the examination of transport rates from three hydrometeorological events for specific river sections. Results indicate that the volume of LW recruited between 2010 and 2013 represents 57% of the total LW production over the 2004–2013 period. Volumes of wood deposited along the 60-km section were four times higher in 2013 than in 2010. Increases in wood amount occurred mainly in upper alluvial sections of the river, whereas decreases were observed in the semi-alluvial middle sections. Observations suggest that the 50-year flood event of 2010 produced large amounts of LW that were only partly exported out of the basin so that a significant amount was still available for subsequent floods. Large wood storage continued after this flood until a similar flood or an ice-breakup event could remobilize these LW accumulations into the river corridor. Ice-jam floods transport large amounts of wood during events with fairly low flow but do not contribute significantly to recruitment rates (ca. 10 to 30% early). It is fairly probable that the wood export peak observed in 2012 at

the river mouth, where no flood occurred and which is similar to the 1-in 10-year flood of 2010, is mainly linked to such ice-break events that occurred in March 2012.

2.3 INTRODUCTION

The characteristics and functions of large wood (LW) in rivers have been examined since the late 1970s in the Pacific Northwest region of the USA (e.g., Keller and Tally, 1979; Bilby and Likens, 1980), and similar studies have now been conducted in many regions and countries, including Japan (Seo et al., 2008), the eastern USA (Moulin et al., 2011), northern Canada (Kramer and Wohl, 2014), Chile (Ulloa et al., 2015), and Europe (Wyżga and Zawiejska, 2005; Ruiz-Villanueva et al., 2014; Lucía et al. 2015). A wide range of research topics have been explored, from the abundance and environmental services provided by LW at the scale of river reaches to wood budget analyses at the watershed scale (Gurnell et al., 2002; Hassan et al., 2005). Studies have also focused on topics linked to management issues (Bilby and Ward, 1991; McHenry et al., 1998; Gomi et al., 2001; Dahlstrom et al., 2005) or river restoration (Kail and Hering, 2005; Palmer et al., 2005; Kail et al., 2007). Large wood are currently perceived as an essential part of the river ecosystem and of channel morphology in forested watersheds (Gurnell et al., 2002; Montgomery et al., 2003; Hassan et al., 2005). In most cases, LW are beneficial and necessary for aquatic ecosystems (Keller and Swanson, 1979; Gregory et al., 2003; Beckman and Wohl, 2014), and rivers with LW have been show to have a higher biodiversity than those without (Thévenet et al., 1998; Nakamura et al., 2012).

Our understanding of the LW budget at the watershed scale is hindered by a lack of knowledge related to the kinetics of LW at the river-reach scale. The first challenge lies in the measurements of LW dynamics within long river corridors to determine the drivers controlling wood input, storage, and output, and to describe wood characteristics (Wohl and Jaeger, 2009). Since the early 2000s, new methods have emerged to analyze and quantify LW dynamics using aerial and satellite images (Marcus et al., 2002; Marcus et al., 2003;

Atha, 2014), LIDAR (Kasprak et al., 2011; Tonon et al., 2014), or tracking techniques (MacVicar et al., 2009; Ravazzolo et al. 2015).

Such studies are still rare on large rivers (rivers with widths larger than LW length) over corridors of several tens of kilometres, caused by field logistics and the time required for data collection (Schenk et al., 2014). Most studies on LW dynamics have been carried out in small watershed streams over the few last decades (see review in Seo et al., 2010), and improving our understanding of LW dynamics in larger rivers is clearly needed (Kasprak et al., 2011). A second challenge is, therefore, to perform such detailed wood studies in larger rivers.

A third challenge comes from the need for a better understanding of the interannual patterns of LW accumulation and reentrainment. Measurements made over multiple years in the field are rare because the acquisition of these data requires a substantial effort to make *in situ* measurements or a considerable investment of time and difficulty to analyse LW accumulations from aerial photos. Despite the construction of models and descriptions of active processes, accurate field measurements are needed to interpret volumes and spatial distributions of LW that would help to calibrate LW transport data equations and to test hypotheses on controlling factors (Benda and Sias, 2003; Hassan et al., 2005), particularly for long-term observations (Ruiz-Villanueva et al. 2015).

Studies addressing these challenges highlight the need for an interannual understanding of LW kinetics. Lassettre et al. (2008) performed temporal and spatial monitoring of LW recruitment along a 36-km corridor of the Ain River in France between 1945 and 2000. They observed three different patterns of recruitment according to the period analyzed with a change in the position of the different recruitment areas. These authors analyzed the distribution of LW from aerial imagery with 10-year intervals. The interannual dynamics were thus not addressed, but such data are important for understanding changes in the spatial distribution of LW given the large year-to-year variability in terms of production and storage in the river corridor.

Using decadal and annual intervals, Boivin et al. (2015) examined the accumulation of wood in a large raft of the Saint-Jean River and concluded that the link between flow discharges and wood volumes was complex and that a time lag existed between production and exports at the scale of a river system. Because of the complex relationships among production, retention in the river corridor, and transport of LW in annual and pluri-annual dynamics, knowledge of the interannual dynamics becomes crucial to understanding the lag and to discriminating among controlling factors.

Studies focussing on wood transport have shown that LW dynamics vary as a function of flood sequences (Moulin and Piégay, 2004; MacVicar and Piégay, 2012; Schenk et al., 2014). Results confirm that wood transport can be correlated with peak flood magnitude, as was tested by Moulin and Piégay (2004) and modelled by Marcus et al. (2011); but the relationship appears to be highly nonlinear (MacVicar and Piégay, 2012; Boivin et al., 2015). Recently, Schenk et al. (2014) used active radio frequency identification (RFID) and metal tags installed on LW to track their movements during flood events. They monitored the distance travelled by 209 LW during a flood event and observed an average travelling distance of 13.3 km in three days, indicating that the entire distance that a tagged LW moves in one year may occur during one event (Schenk et al., 2014). The temporal variation of LW transport/kinetics is caused by the variation of LW volume recruitment, the intensity of episodic flood events, and the lag effects from previous flood events (Martin and Benda, 2001; Nakamura and Swanson, 2003; Moulin and Piégay, 2004). The lag effect and the influence of previous flood events are complex but poorly described aspects of LW kinetics (Fremier et al., 2010). Considering the high annual variability, interannual monitoring of LW is essential when examining the controlling factors of LW kinetics and also when preparing a detailed wood budget analysis.

A last challenge relates to LW dynamics in cold-region rivers (Wohl, 2013). Only a few studies on the LW dynamics have been carried out in streams where ice cover occurs for most of the winter period and where ice jams are likely to take place (Kramer and Wohl, 2014; Boivin et al., 2015). Recent data show that the relationship between discharge (Q)

and wood volume transport is weak in rivers in cold environments (Boivin et al., 2015). The relationship is complex because the ice cover and the type of flood modify the storage and delivery of LW.

The LW kinetics emerge as a key component when determining a LW budget at multiscale and multitemporal levels. This study aims (i) to examine the interannual changes in LW recruitment and storage volumes and wood characteristics; (ii) to document the annual mobility and transport dynamics of LW; and (iii) to identify the geomorphic features that control them. To achieve these objectives, we performed a systematic survey of LW in a 60 km river reach for four years (2010–2013) combined with the examination of video sequences allowing an estimation of LW fluxes. Because the river is located in a cold environment where ice cover occurs, a special focus was put on the role of river ice on the transport of LW.

2.4 STUDY SITE

The Saint-Jean River (SJR) is located in the eastern part of the Gaspé Peninsula (Québec, Canada; Fig. 24). The SJR is a natural dynamic semi-alluvial gravel-bed river with three specific fluvial styles. Meander reaches are found in the upstream (kilometric point [PK] 30-60) and downstream (PK0-10) sections, where the valley is wide enough to form an alluvial plain. In these sections, river width varies from 50 to 70 m with lateral migration and avulsion being the dominant fluvial processes. In the middle section, the river is relatively straight with alternating riffles and pools; bedrock and rock outcrops constrain river flow (PK10-30). Finally, an anastomosed style is found within the delta, where fine sediments are available for deposition during frequent overbank flows and wood rafts generate significant avulsions (PK0). In this section, the river divides into several channels with average widths varying from 20 to 40 m. Three types of spatial divisions were used to describe and group the results: (i) a morphological segmentation (sections), (ii) a systematic segmentation every 10 km (reaches), and (iii) a high-resolution

segmentation every kilometre (PK). As a result, the river is divided into four sections and six reaches of 10 km: (i) the upstream section (PK30-60) that encompasses reaches 4, 5, and 6; (ii) the middle section (PK10-30) that encompasses reaches 2 and 3; (iii) the downstream section (PK0-10) made up of reach 1; and finally, (iv) the delta section at the mouth of the river (PK0, at the upstream limit of the delta). The position of the delta (PK0) did not change during the study as channels migration did not occur in the delta.

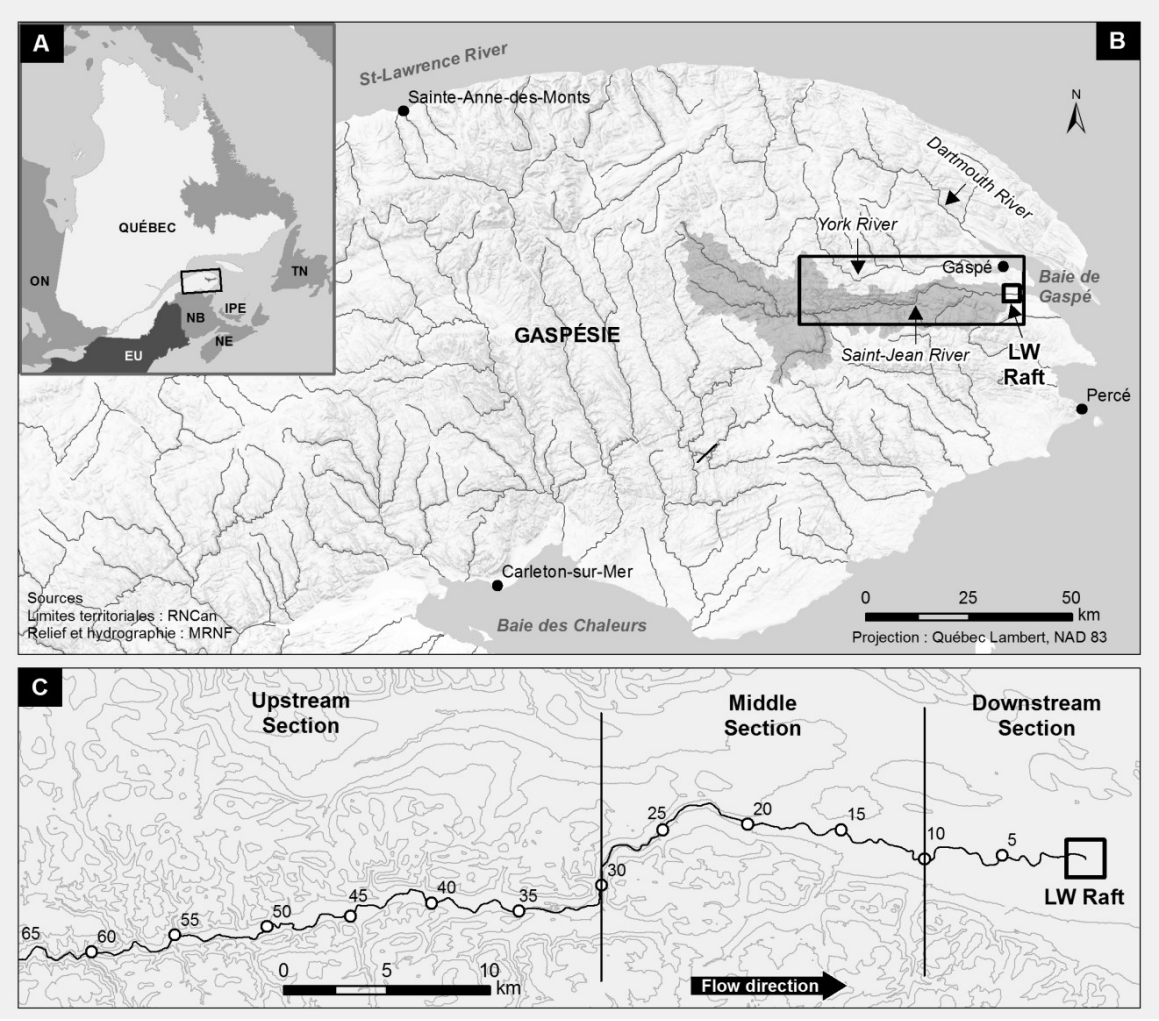


Figure 24. (A) Map showing the location of the Saint-Jean River in Québec, Canada. (B) Location of the Saint-Jean River on the Gaspé Peninsula. (C) Detailed map showing the studied river corridor with distances from the river mouth (in km).

The SJR is located in a cold-temperate climate where the hydrometeorological conditions are influenced by the relief of the Appalachian Mountains and the presence of the Gulf of St. Lawrence. The river drains an area of 1130 km², with an approximate main stream length of 130 km and an average annual flow of 30 m³/s. The pluvionival hydrologic regime is fed by high snow contribution (annual mean snowfall = 371.8 cm) that melts from April to June and mean annual rainfall of 779.2 mm (Environment Canada, 2014), with intense events that occur generally in fall. Strong annual spring floods are characteristic of this river. The average annual temperature is 3.1°C, but it falls to -8.8°C for the cold season (December to April). Snowfall for December and rainfall for April are respectively 363 cm and 148 mm (Environment Canada, 2014). Ice cover is present for most of the winter season on the studied reach of the SJR, making it prone to ice jams and ice breakup events. In a river with ice dynamics, ice jams and breakup events are the most important risks (causing, e.g., increasing water levels, erosion, and floods; Ashton, 1986). They can occur throughout the winter (Beltaos, 2007); but are most common in spring when snow melts and temperature rises.

The SJR offers ideal conditions to examine LW dynamics at the watershed scale owing to the high recruitment of wood from the floodplain, the intense mobility patterns in the river corridor, and the exceptional retention capacity in the delta branches at the outlet (Fig. 25). Until the dismantling of the main raft in 2015, three massive rafts together blocked more than 3 km of channels in the SJR delta (Boivin et al., 2015). The river corridor is within a mature riverine forest, and a variety of LW accumulations occur in this inhabited natural watershed (Fig. 25).

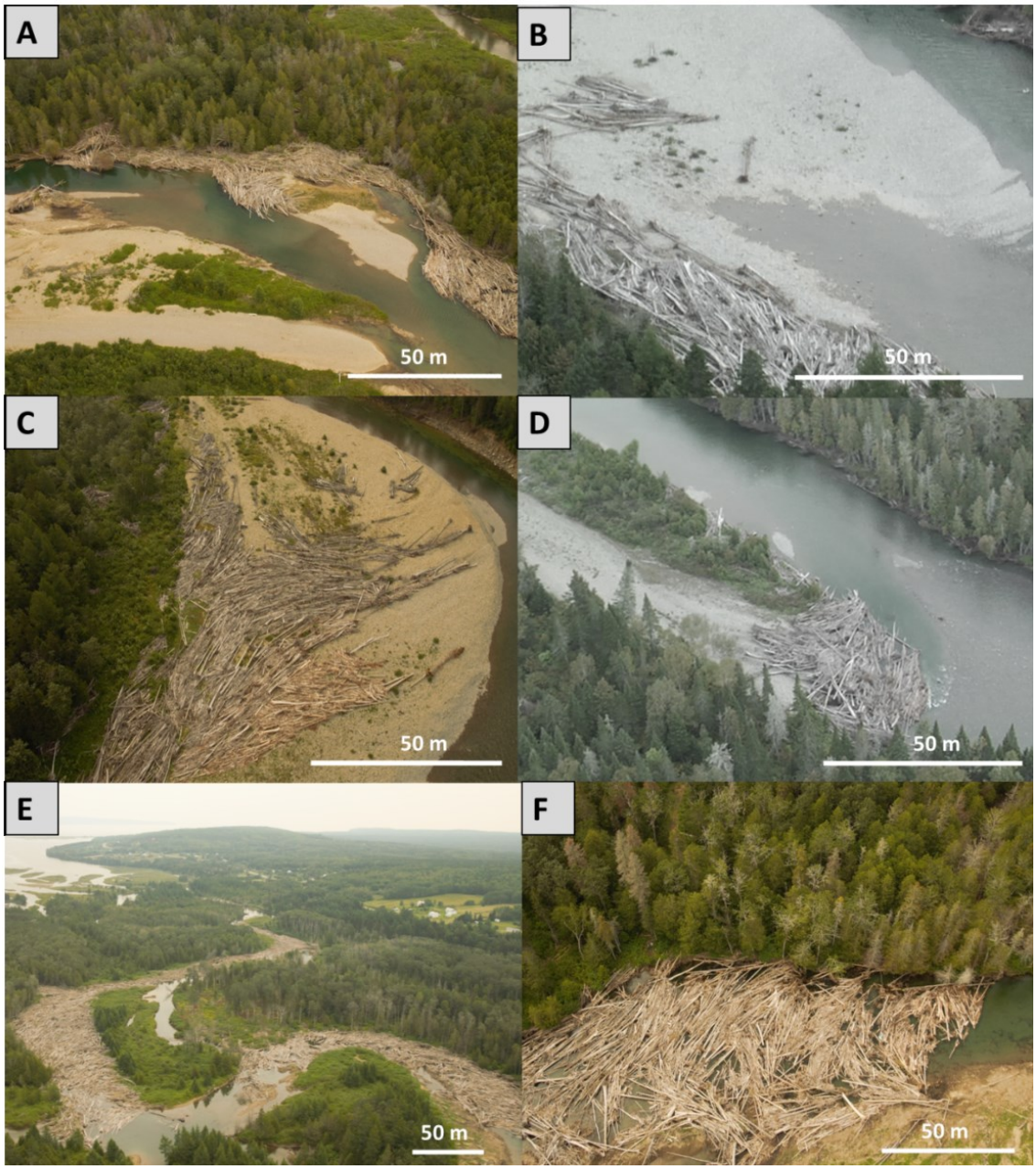


Figure 25. Large wood jam accumulations in the SJR corridor. (A) Meander jams, (B) secondary channel jams, (C) bank deposit jams, (D) bar apex jams, (E) oblique view of south channel raft, and (F) aerial view of large jam rafts in the upstream part of the SJR delta.

2.5 METHODOLOGY

This study focusses on LW kinetics determined from exhaustive annual measurements of wood volumes in the river corridor. Here, LW kinetics refer to the accumulation and mobility/reentrainment patterns that are obtained by comparing the annual volumes of LW estimated over a four-year period. The interannual changes in LW volumes and characteristics are examined in relation to hydrologic and local geomorphic controls.

2.5.1 Discharge series analysis

Discharge series for SJR are available for the 1995–2006 period. A longer time series (1945–2014) is available from two gauging stations on the York River, which is an adjacent watershed with similar length, area, topographic gradient, and estuary dynamics. A linear regression between York River (Q_{YR}) and SJR (Q_{SJR}) specific daily discharges (CEHQ, 2014) computed for the 1995–2006 period was used to estimate SJR discharges for the 2006–2014 period ($Q_{SJR} = Q_{YR*}(A_{SJR}/A_{YR})^{1.12}$; $R^2 = 0.92$). The time series of the estimated SJR discharge shows five spring flood events and one significant fall flood event over the study period (Fig. 26). Two events are worth noting: the flood of December 2010 and the mechanical ice-breakup of March 2012. The return period for the 2010 flood was estimated to be greater than 50 years using a Log III Pearson fit on the York River time series from one of the gauging station. The return period of the ice breakup event is more difficult to establish because no adequate times series on ice-breakup exists for the SJR. However, considering that we observed another similar event during the study period, we can estimate the return period to be on the order of approximately five years.

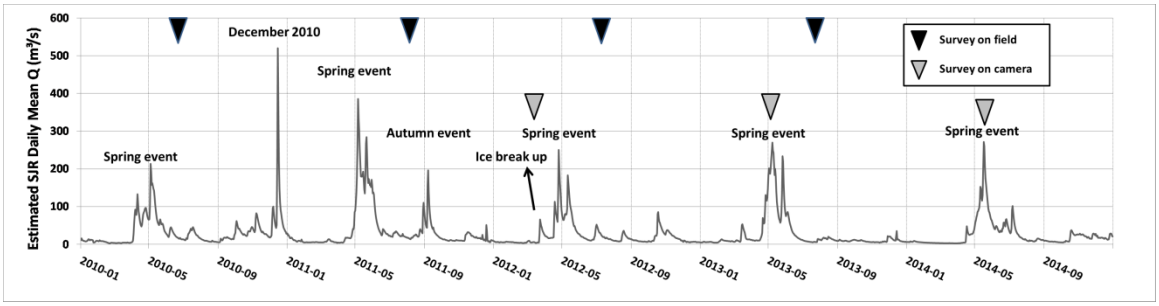


Figure 26. Time series of the estimated SJR discharge (QSJR) between January 2010 and December 2014. The four sampling periods (black triangles) and the three analyzed flood events (grey triangles) are indicated.

2.5.2 Wood censing and characteristics

Annual field campaigns were conducted from 2010 to 2013 to characterize all accumulations of LW within the 60 km river corridor. Large wood individuals (LWI) were distinguished from large wood jams (LWJ). The LWJ comprised more than three pieces of wood larger than 10 cm in diameter and longer than 1 m (Wohl et al., 2010), while LWI was made of fewer than three pieces of wood. The overall shape, position, volume, and number of trunks were systematically measured for each LWI and LWJ within the active width of the river. The LWI was considered as a cylinder and LWJ was considered as a simple rectangular volume (in m^3):

$$V_{aw} = L*W*H \quad (2.1)$$

where V_{aw} is the air–wood volume (m^3), L is the average length (m), W is the average width (m) and H is the average thickness (m) of the wood accumulation. The air–wood volume includes the wood and the air volume within the simple rectangular form.

The wood volume (V_w) was then calculated from:

$$V_w = V_{aw}*\rho_w / 100 \quad (2.2)$$

where ρ_w is the proportion of air in wood-volume measurements (LWJ porosity) representing a ratio of open volume to volume filled with wood (Monzyk et al., 1997;

Thévenet et al., 1998; Manner et al., 2007; Manners and Doyle, 2008). Thévenet et al. (1998) proposed a proportion of air-in-wood volume of 89.50% ± 0.91% from 53 LWI and 58 LWJ measurements on two rivers in France. This proportion factor was adopted after validation and regional calibration in the field that was done by measuring the porosity of LWJ in SJR and in other rivers of the Gaspé Peninsula (Boivin and Buffin-Bélanger, 2010). To evaluate uncertainties in the LW wood volume estimates, the methodology described in Boivin et al. (2015) was followed. The number of trunks was estimated by measuring all LW in a portion of the jam and was then projected for the total area of the LWJ.

2.5.3 Wood dynamics and local controlling factors

Wood recruitment

The volumes of LW recruited annually by the river were estimated from the interannual changes in LW volumes measured in the river corridor while the annual volume of LW trapped in the SJR delta was reported in Boivin et al. (2015). The sum of the volume variations in the river corridor and the volumes exported from the system to the delta constitute the best estimate of the volume of LW recruited annually by the river. To complement the estimates of wood recruitment, aerial photos and satellite images were used to determine annual wood volumes produced by lateral erosion from 2004 to 2013. The ground resolution for the 2004 aerial orthophotos and the 2013 GeoEye images were 0.63 and 0.50 m, respectively. The LW measurements produced by lateral migration were extracted using the difference of the active channel locations in 2004 and 2013. The difference between active channel locations allows the calculation of the floodplain area eroded between aerial surveys. Uncertainties in lateral erosion and avulsion estimates were evaluated following the methodology presented in Boivin et al. (2015). The area of the eroded plain multiplied by a volume of the riverine forest density gives an estimate of the volume of wood recruited by the river since 2004. The riverine forest density was measured at 25 sites located in areas of erosion throughout the river corridor. A quadrat of 15 m ×

15 m was sampled on each site to measure diameter at breast height (DBH), tree height, and species identification.

Wood kinetics

Wood kinetics were determined from the interannual variations of volumes stocked along reaches of the fluvial corridor. The accumulation and reentrainment patterns can be determined from positive and negative volume changes, respectively. Also, because the locations of each LWJ were documented using GPS data, it was possible to trace 91 LWJ over the four years and thus to examine changes in wood characteristics and volumes through time. For each pair of years, a sign was assigned when an increase (+) or a decrease (-) was observed. The sequence of three signs was used to analyze the trajectory of changes for the 91 LWJ. With three pairs of years, eight possible trajectories were possible. For example, (- - -) indicates that the LWJ underwent a decrease in LW volume between each year from 2010–2013.

Geomorphic features that include bar surfaces, channel widths, channel margins, and sinuosity index (by measuring the length of a channel reach and dividing this by the straight line distance along the fluvial corridor) were extracted manually and with the Transect tool box (ArcGIS) from the 2004 orthophoto and the 2013 GeoEye 1 satellite images. Estimated wood discharges from SJR determined from the 2004 aerial photos and the 2013 satellite images were similar: 21 and 13 m^3/s, respectively. Unit stream power (ω) was computed for the entire river corridor using the methodology proposed by Biron et al. (2013) and the following equation:

$$\omega = \frac{pgQS}{w} \qquad (2.3)$$

where p is water density, g is acceleration caused by gravity, Q is dominant flood discharge ($Q2_{years}$), S is channel slope, and w is channel width (Bagnold, 1966). Following Biron et al. (2013) and Vocal Ferencevic and Ashmore (2012), discharge was estimated using a regional relationship between drainage area and discharge. Active channel width

(e.g. low flow channel and unvegetated bars) was extracted from the GeoEye 1 images from visual appraisal of the vegetation line on the bars suggesting the absence of significant bed material motions. Moreover, we have observations showing almost all bars are already flooded at 60 $m^3.s^{-1}$ (Google Earth images of 2013) whereas *Q2* is 181 m^3. Slope was determined from a topographic map with 10 m resolution.

Wood fluxes

Wood fluxes were estimated from video sequences taken during flood events. Two video cameras located in the downstream part of the river corridor (PK3 and PK7) focussed on two reaches and recorded continuous video from December 2011 to June 2014 (Fig. 4). The wood volume transported during flood events was estimated from visual detection and manual measurements using the video images (MacVicar and Piégay, 2012). Three flood events were analyzed (Fig. 27): one mechanical ice-breakup event (March 2012 for 5 h, peak discharge 66 m^3/s) and two open-water flood events (May 2013 for 90 h, peak discharge 268 m^3/s; May 2014 for 65 h, peak discharge 282 m^3/s). Although their use could save considerable time, algorithms developed by Ali and Tougne (2009) and Lemaire et al. (2015) to automatically detect wood in the videos are inaccurate during a mechanical ice breakup flood event because of the presence of ice blocks. The method also requires further refinement for open-water events because of the nature of the environment. As a result, visual detection and manual measurements were performed.



Figure 27. Video camera set-up in SJR. (A) Video camera in situ, (B) view of the spring 2014 flood event, and (C) view of the March 2012 ice breakup event.

2.6 RESULTS

2.6.1 Interannual changes in large wood characters

Between 2010 and 2013, the numbers of LWJ and LWI increased significantly, by 264% and 120%, respectively (Fig. 28A and 28B), while the total number of trunks nearly doubled, from 11,716 to 21,962 (+73%). A general increase in LW volumes is observed during the four years of monitoring (Fig. 28C). Between 2010 and 2013, the number of large jams (> 100 m^3) increased by ~25% while that of very large jams (> 1000 m^3) increased by nearly 100% (Fig. 28A). The greatest increase in wood volume (LWJ and LWI combined) occurred between 2010 and 2011, with volumes increasing from 5952 m^3 to 9455 m^3 (+61%). For LWI, data showed a notable increase between 2010 and 2011 followed by a slow decrease until 2013 (Fig. 28D). The most striking changes occurred between 2010 and 2011, with an increase in all variables describing LW dynamics. For example, the number of LW accumulations increased by 207% for LWJ and 256% for LWI. After 2010, an increase in the LWJ occurred, while a marked decrease for LWI is observed. Finally, LWI represented only 2% of the total wood volume in SJR during the four-year survey. Because of the low volume of LWI in the SJR corridor, most results in the next sections focus on LWJ.

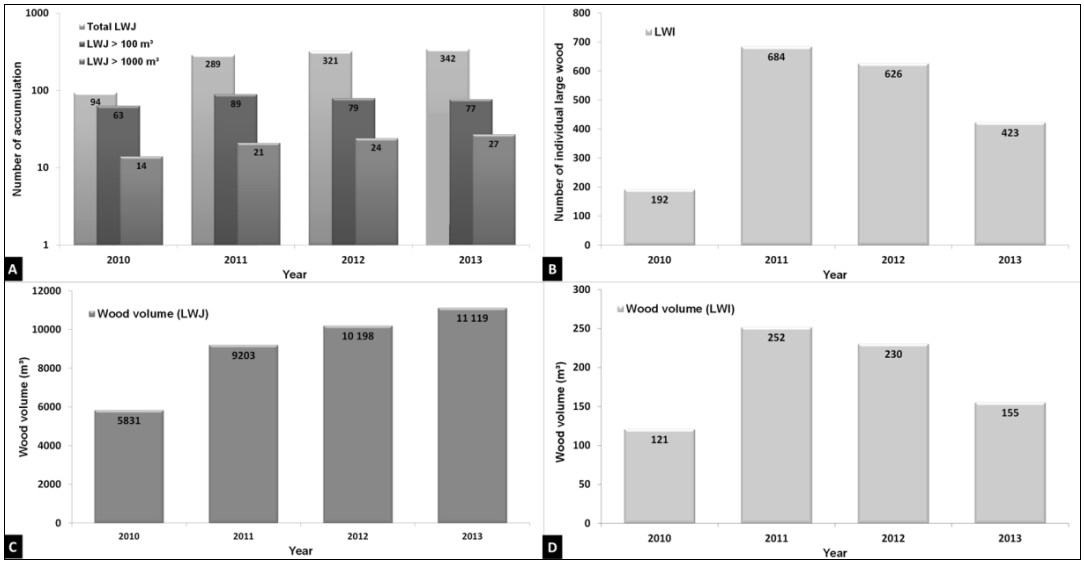


Figure 28. Variations in numbers of accumulations of total LWJ, LWJ > 100 m^3, and LWJ > 1000 m^3 (A); for individual wood pieces (B); and large wood volume for LWJ (C); and for LWI (D) between 2010 and 2013. (Note: LW volumes in 2010 were adapted from Boivin et al. (2015) so that LW volume could be analyzed at the same scale between years).

The LWJ characteristics have evolved over the years (Fig. 29). The values of LWJ width (Fig. 29A), height (Fig. 29B), and length (Fig. 29C) decreased significantly between 2010 and 2011–2012–2013 (width: $F_{anova} = 320.2$, p-value = < 0.01; height: $F_{anova} = 31.2$, p-value = <0.01; length: $F_{anova} = 3.1$, p-value = 0.027). Thus, the increasing numbers of LWJ accumulations over the years occurred at the same time as a decrease in average width, height, and length. The LWJ characteristics were more similar between 2012 and 2013 than between 2010, 2011, and 2012, suggesting stability in LWJ dynamics starting in 2012. A decrease in the average volume per LWJ ($F = 23.92$, p-value = < 0.01) (Fig. 29D) and a decrease in the number of logs/LWJ (Fig. 29E) between 2010 and 2011–2012–2013 ($F = 18.05$, p-value = < 0.01) were also observed. The LWJ mean positioning relative to the thalweg position (distance of each LWJ from the thalweg and dividing this by the river width) changed between 2010 and 2011 (Fig. 29F), with the distance of each LWJ from the thalweg increasing significantly ($F = 5.2$, p-value < 0.01) between 2010 and 2011. The

LWJ accumulations were thus higher on bar accumulations and farther away from the channel centre after 2010.

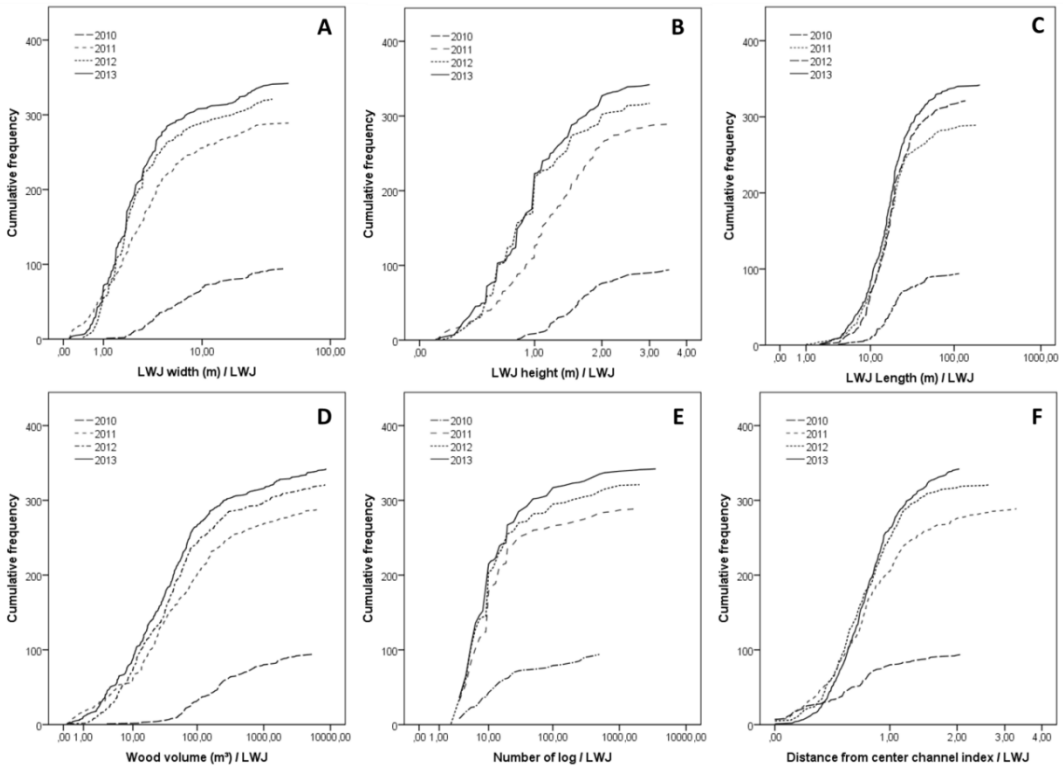


Figure 29. Characteristics of LWJ: width (A), height (B), length (C), wood volume (D), number of logs (E), and distance from the channel centre (F) between 2010 and 2013.

Trajectories of changes (positive or negative) in the volume and in the number of trunks were computed for 91 LWJ that had the same location during the three study periods. Volume trajectory changes revealed that most of the 91 LWJ (~82%) increased over at least two years (- + +; + - +; + + -, or + + +; Fig. 30A). The most frequent mode (~36%) suggested a volume increase between 2010 and 2011, a reduction in size between 2011 and 2012, and an increase between 2012 and 2013 (+ - +) (Fig 30A). The second category in importance (~29%) is a continuous increase throughout the three years of monitoring (+ + +). While most of the 91 LWJ grew in volume, it is worth noting that within the context of general accumulation, a sizeable number of these 91 LWJ showed opposite trends in comparison with all LWJ in SJR. Trajectories of changes in numbers of

LW (Fig. 30B) showed that most of the 91 LWJ monitored had increased in the numbers of LW (56%). The second most frequent mode (25%) was an increase in LW between 2010 and 2011, a decrease between 2011 and 2012, and another increase between 2012 and 2013. Finally, no decrease for all years was observed between 2010 and 2013. Thus, LWJ may decrease in volume, but not automatically decrease in terms of number of LW.

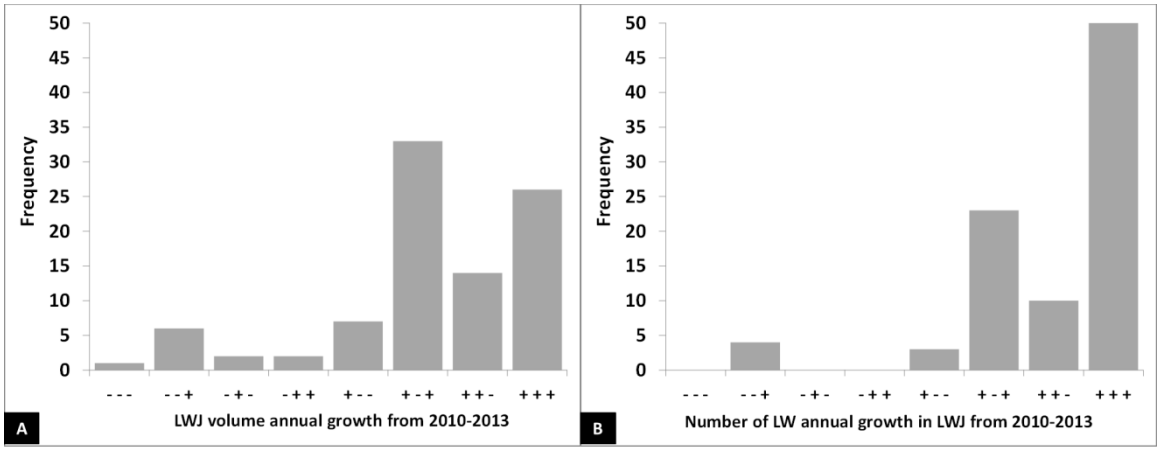


Figure 30. Frequency histogram for the sign sequences of volume changes (A) and the change in number of LW in LWJ (B) for 91 LWJ between 2010 and 2013.

2.6.2 Longitudinal patterns of large wood deposits

The cumulative distributions of wood volume along the study reach reveal that two sections accumulated most of the LWJ (Fig. 31A): sections PK1-5 and PK30-60, with 21% and 71% of the total wood volume, respectively (Fig. 31B). The cumulative curves also revealed a strong accumulation zone at PK30-33, where 30% of the total wood volume was located. Few notable accumulations were found between PK6 and PK30. The monitoring of LWJ over four years in SJR showed a steady increase since 2010, with very large input between 2010 and 2011. Two sections showed strong increases: the downstream section between PK7 and PK10 and the upstream section between PK30 and PK35.

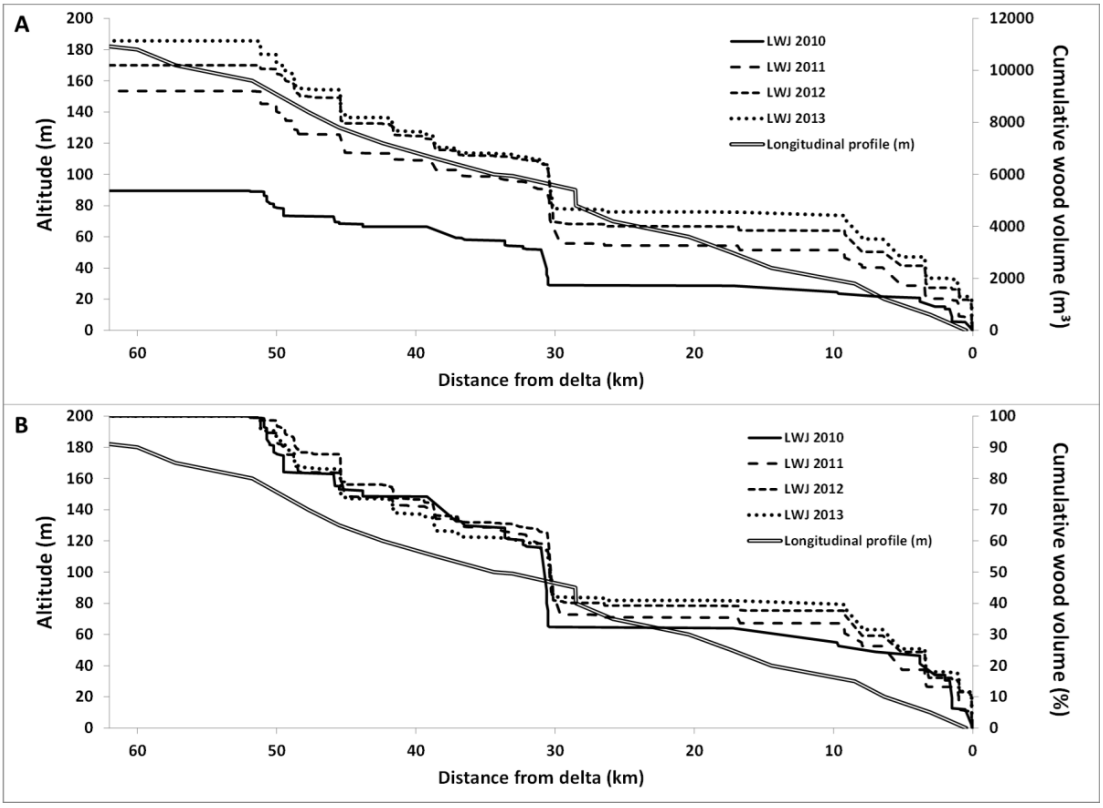


Figure 31. Cumulative wood volume (A: in m^3; B: in %) for 2010, 2011, 2012, and 2013 along the SJR corridor. The longitudinal profile (altitude, m) is also shown.

Figure 32 presents the longitudinal variability in volumes and numbers of LWJ per kilometre between 2010 and 2013; the upstream and downstream sections had the highest volumes variation during the four-year survey. The downstream section experienced the largest wood volume increase between 2010 and 2013, from 1403 to 4206 m^3/km. The highest variations in LWJ volumes and numbers occurred between PK0-10 and PK30-52 (Fig. 32A and B), but more notable between PK30 and 35. However, two important zones of accumulation emerged in the downstream section at PK0 and PK6 between 2010 and 2011 (Fig. 32B). Notable interannual variations took place in these same two sections, but the larger variations occurred between PK0-4 and PK30-34 (Fig. 32B). No significant variations occurred in the middle section: LWJ volumes and numbers were very low there

for all three yearly periods (Fig. 32). The number of LWJ between 2010 and 2013 generally increased except for PK3, PK17, PK43, PK50, and PK52, where a decrease was observed (Fig. 32B). However, greater variation appears in the interannual monitoring, with increases and decreases in the downstream and upstream sections (Fig. 32). Between 2011 and 2012, a long segment about 6 km (PK31 to PK37) had an important decrease in term of LW volume (Fig. 32A). This is the only year where a decrease in volume occurs over such a long distance in comparison to other years where decreases are observed only on 1 or 2 km of river. Generally, while the LWJ volume decreased in some sections of the river, an increase in terms of LWJ numbers was also observed (PK31, 33, 39); this may explain the significant changes in the characteristics (Fig. 29) of LW accumulations in SJR.

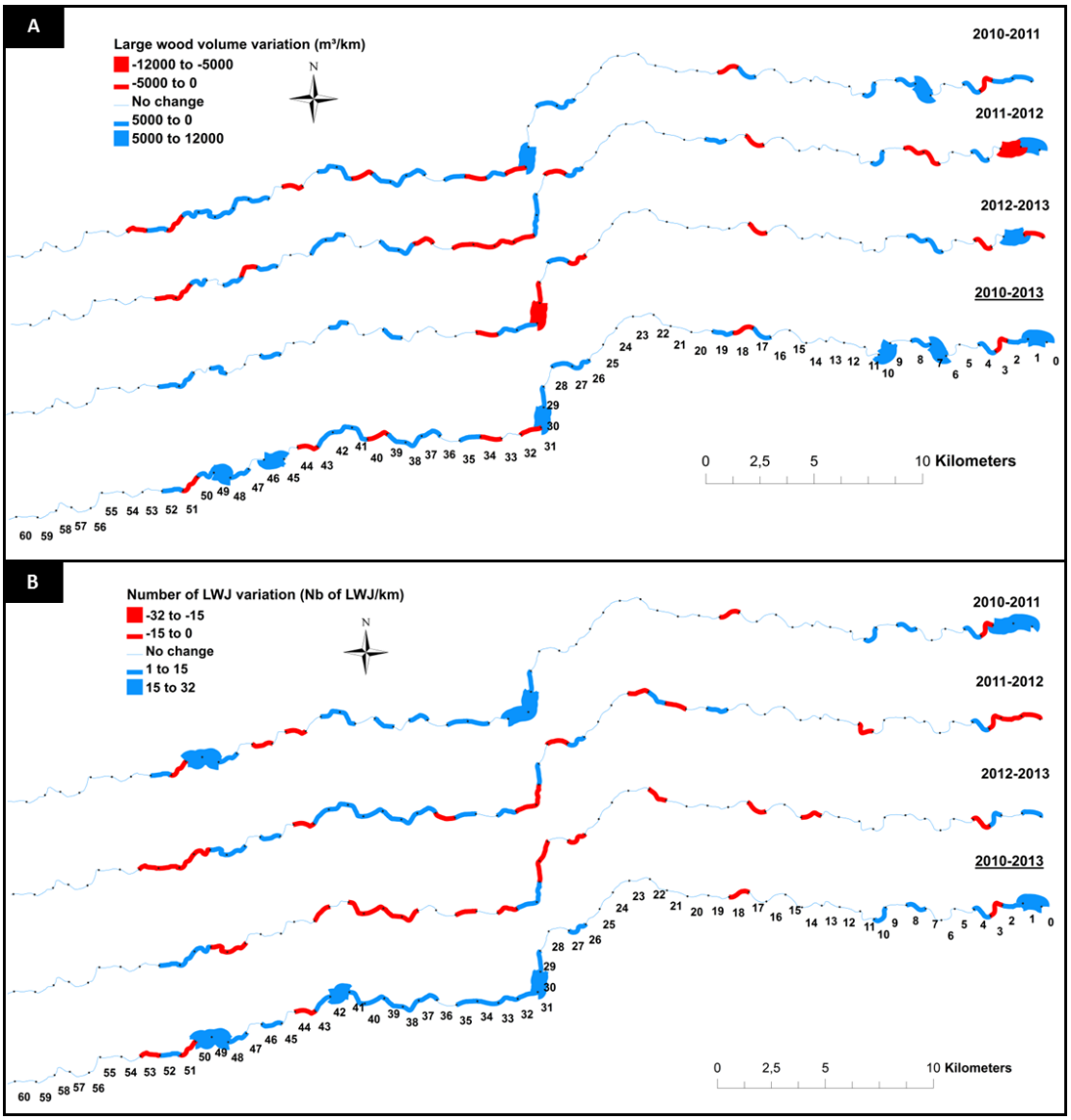


Figure 32. Spatiotemporal variability between each year of the survey (2010–2013) of (A) LWJ volume (m³) per kilometre and (B) number of LWJ per kilometre.

2.6.3 Temporal pattern of large wood input and output

Considering the volume stocked in the delta (reported in Boivin et al., 2015) and the volume accumulated in the river corridor between 2010 and 2011, a total wood volume of 9590 m³ (±145 m^3) was recruited between summer 2010 and fall 2013, with significant

variability from year to year (Table 4). Considering a riparian trunk density of 0.3 tree/m^2, more than 16,700 m^3 (±250 m^3) of LW were recruited by the SJR between 2004 and 2013 (≈1860 m^3/y), but more than half (57%) of this volume was introduced between 2010 and 2013 (≈9600 m^3) and almost one third (31%) in 2010-2011, the year of the 50-year flood event. Between 2011 and 2012, it is worth observing that the volume of LW exported to the delta is on the same order of magnitude as for the 2010-2011 period whereas the LW volume accumulated in the river corridor is three times smaller. Because the LW sampling was performed once a year, these values do not allow to discriminate the contribution of individual flood events within the annual contribution. For the 2011-2012 period, for example, three open water flood events having more than 150 m^3/s and one ice breakup event (Fig. 26) occurred. Together, these four flood events explain the significant recruitment value occurring for that period. In regards to the peak discharges, however, it remains challenging to explain why the LW volume exported to the delta for the 2011-2012 period is as high as for the 50-year flood event period (2010-2011); this will be further examined below.

Tableau 4. LW volume (m^3) recruitment (LW exported to the SJR delta and LW accumulated in the fluvial corridor) during the four years of monitoring (2010–2013) and the reference period (2004–2013) determined using aerial photography.

Analysis period	LW exported (SJR delta)[a]	LW accumulated in fluvial corridor	LW recruitment estimation (LW exported + LW accumulated)
2010-2011	1960	3503	5463 (±82)
2011-2012	2101	973	3074 (±46)
2012-2013	210	846	1056 (±16)
2010-2013	**4271**	**5322**	**9593 (±144)**
2004-2013	**6747**	**N/A**	**16700 (±250)**

[a] Data from Boivin *et al.*, 2015

2.6.4 Factors controlling changes in wood volume in the reach

Flood events controlling large wood delivery

Analysis of hydrometeorological events shows that the flood of 2010 represents an exceptional event (50-year flood), compared to the floods of 2011 (1 in 5 years), 2012 (1 in 1 year) and 2013-2014 (1 in 2 years). Most of the LW recruitment occurred during the large flood of December 2010, which resulted in an increase of more than 57% in LW recruitment to the SJR corridor for the 2010–2013 period. As observed previously, the 2011-2012 period presents a spring flood that is low in terms of frequency (1 year) but it has been an important year in term of downstream wood delivery. Figure 10A presents the relationship between maximum spring discharge and LW volume transported to the SJR delta and shows as the period 2011-2012 carried a similar LW volume than the period 2010-2011 in which the flood of December 2010 (50-year flood) occurred. The spring floods of 2013 and 2014 have carried much lower volumes to the delta. The 2014 data are incomplete, so it is impossible to determine exactly the number of LW transported; but no LW was exported from the system, and all LW transported remained stored on retention sites in the downstream section of SJR between PK7 and PK0.

An intense and fast mechanical ice-breakup (less than 5 hours) occurred in early spring of 2012 and a vast amount of wood was observed to be transported by the ice. Could the ice dynamics explain the high LW export to the delta for the period 2011-2012?

The only way to ascertain the contribution of an ice breakup event to LW export is to compare the LW dynamics at the scale of the flood events. The videos from the in situ camera were used to document the LW transport rates in three flood events (Figure 26). Figure 33 shows the LW transport rate per minute for the investigated flood events. The highest transport rate per minute was observed during the mechanical ice-breakup in March 2012 (Fig. 33B and 33D): peaks exceeding 15 LW per minute were documented with a relatively small flow discharge of 60 m^3/s. In comparison, LW transport peaks did not exceed 1.4 LW per minute during the 250 m^3/s open-water flood in May 2013 (Fig. 33C)

and 10 LW per minute during the 280 m^3/s open-water flood in May 2014 (Fig. 33D). The maximum number of LWI transported per minute during a flood with ice breakup was much higher than a flood without ice, even though the average daily flow discharge was lower (Fig. 33D). In terms of total number of LW that were visually observed, the ice breakup in March 2012 carried 745 LW in five hours (537 during the first hours of the ice-breakup events). Calculating the total number of LW for the open water flood event is more speculative because of the impossibility of counting them at night and because of the length of the event that forced us to compute the transport rates only for 10 min/h for the flood events of 2013 and 2014 that lasted more than 70 and 90 hours, respectively. However, the average values of transport rates clearly suggest that the ice breakup event promotes significant transport of LW at discharges that are much lower than open water flood events. In terms of LW recruitment by lateral migration, visual detection on the in situ camera shows that the proportion of new LW (LW with roots, branches, and bark) transported during these events are 5% for the ice breakup and 15% for the open-water flood. The ice breakup seems to recruit a lower number of LW by lateral erosion compared to an open water event.

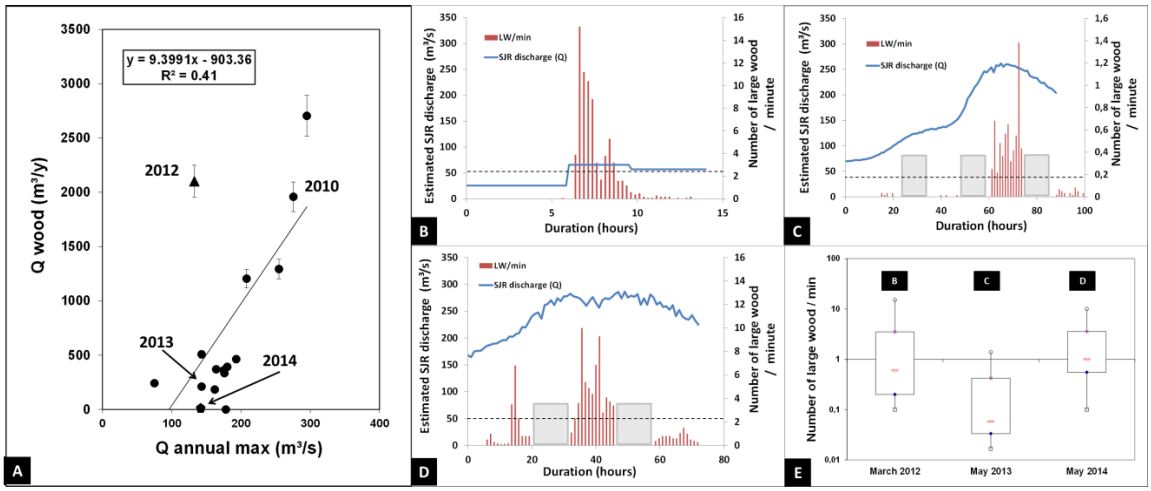


Figure 33. (A) Scatter plot of the flow and LW volumes exported to the SJR delta for the period 1999-2014 (adapted from Boivin et al., 2015). Number of large wood transported per minute during three flood events: (B) mechanical ice breakup event in March 2012, (C) open-water flood event in May 2013, and (D) open-water flood event in May 2014. (E) Boxplot presenting number of LW transported per minute for the three events. Note: axis for number of LW per minute in B is 10 times smaller than for (A) and (C); grey rectangles represent missing data during night because of darkness and dashed lines represent the average values of transport rates at the event scale; (triangle symbol in (A) indicates an important ice-breakup event in 2012).

Geomorphic characteristics of the reach in terms of trapping efficiency

Figure 34 shows the longitudinal distribution of LW volumes per kilometre measured in 2013 (A) in relation to averaged unit stream power per km (B), erosion rates per km (C), and bar surfaces per km (D) for the 60 km of the SJR corridor. Most wood accumulations are found where bars and/or abandoned channels are located. Three sections can be defined by the longitudinal distribution of geomorphic features and LW accumulation. The downstream section (PK0-10) presents high LWJ volumes and low values of unit stream power and erosion rates. The middle section (PK10-30) presents small LWJ volumes, negligible erosion rates and bar surfaces, and large unit stream power. Finally, the upstream section (PK30-60) is by far the most dynamic portion of the SJR corridor, with high LWJ volumes, erosion rates, and bar surfaces and a low unit stream power. In the downstream section (PK0-10), the small erosion rates and the LW volumes accumulated suggest that

wood is recruited in the upstream sections. Wood volume increased by 199% between 2010 and 2013 in this section. For the middle section (PK10-30), the morphological dynamics are similar from year to year, with no significant bar surfaces or erosion rates documented over the 2004–2013 period. This section allows efficient wood transit, with no accumulation or production of LW in the river. For the upstream sections, the volumes of wood have changed since 2010 and erosion rates are higher, particularly in PK30-50. This upstream section plays a key role in the temporary storage of wood in transit, and a large amount remains temporarily stored on bars. This is the area where LW recruitment and storage occur before transiting toward the downstream section and ultimately the delta.

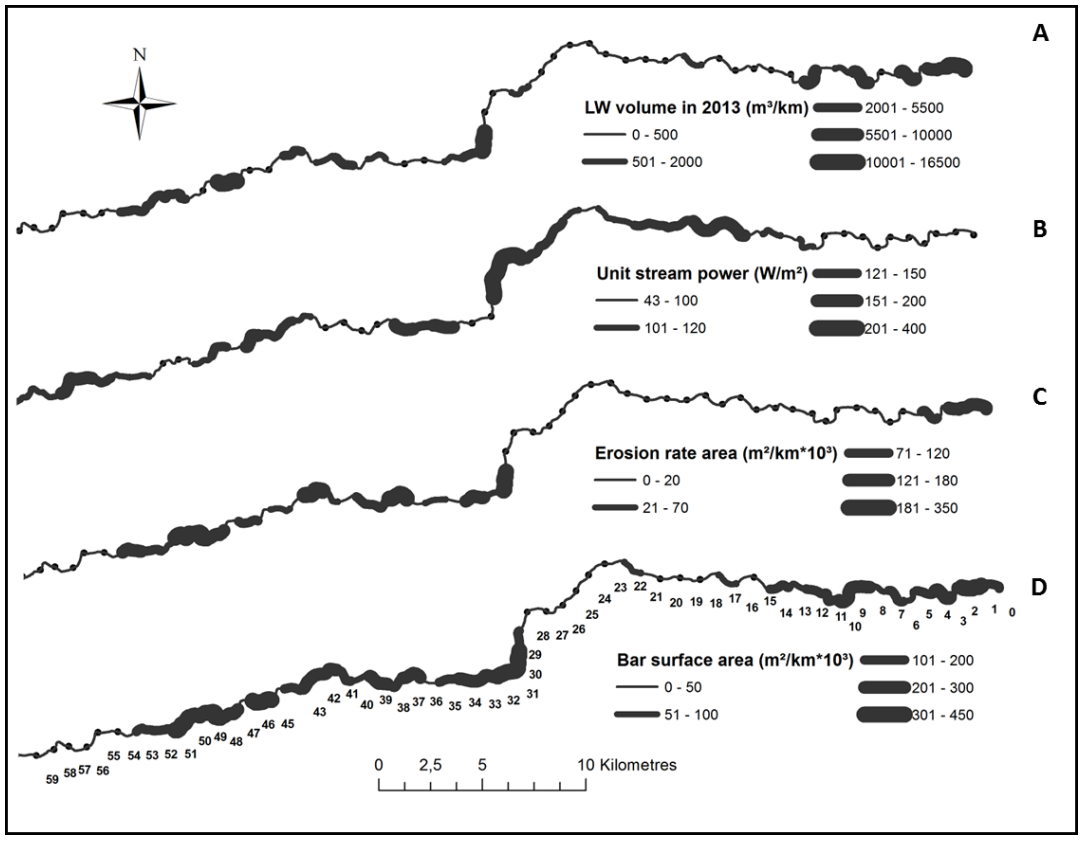


Figure 34. LWJ volume in 2013 (A) in relation to geomorphological features: unit stream power in 2013 (B), erosion rate per year between 2004 and 2013 (C), and bar surface area in 2013 (D) along the 60 km river reach of SJR.

Figure 35 show the relationships between sinuosity (A), erosion rate (B), unit stream power (C), bar surface area (D) and LW volumes in 2013. The metrics are calculated for each PK and are averaged over segments of 10 km except for sinuosity, which is measured for the 10 km segments. The exponential correlation between sinuosity and LW volumes is not significant when all sections are considered (Fig. 35A); however, when the semi-alluvial part (PK10-30) is removed, the relationship is highly significant and positive ($R = 0.99$, p-value = < 0.01). Reaches 2 and 3 (PK10-30) are part of the middle section, where banks are composed of rock outcrops and Quaternary deposits. In terms of recruitment, the exponential correlation between LW volume and erosion rate is positive and significant ($R = 0.90$, p-value = < 0.05; Fig. 35B). In general, greater wood accumulations occur where high erosion rates are present, although LW volumes are high in reach 1 (PK0-10) despite decreased erosion. This reach is characterized by accumulation rather than production: LW volumes are positively and significantly related to the bar surface area (m^2) per kilometre ($R = 0{,}84$ to 0.92, p-value = < 0.05). The correlation suggests a rapid increase of LW volume when bar surfaces increase in a reach which is also reflected into larger LW density per m^2 of bar surfaces as bar surfaces increase (Fig 35D). Large wood volumes are negatively and significantly related to unit stream power ($R = 0.88$, p-value = < 0.05; Fig 35C). Smaller values of unit stream power promote the accumulation of LW. A natural geomorphic change occurs downstream from reach 4 resulting in a bottle-neck effect favoring the establishment of important LW accumulations.

Figures 12E and F relate the LW volume variations between 2010 and 2013 with the average erosion rates and bar surfaces for the six delimited reaches. The figures show an increase in LW volume variation with erosion rates (Fig. 35E) and with bar surface areas (Fig 35F). It is worth noticing that the low LW volume variations for reaches 2 and 3 are related to very low erosion rates but significant bar surface areas. This suggests that interannual LW kinetics at the reach scale is explained by active erosion and by high bar surfaces but that bar surfaces are not sufficient to explain interannual LW kinetics. Reach 1

presents a different signature in that a significant volume variation is observed while an average erosion rate is measured. Reach 1 is located near the delta where large amounts of LW accumulate, especially in 2010-2011 after the 50-year flood event, which may explain this discrepancy. Figure 35G presents the changes in LW density over the four years for reaches 1, 4 and 5, the three reaches with the highest LW volumes and bar surface areas. The LW density increases steadily for reaches 1 and 5 over the four years, but it caps for reach 4 from 2011 onward. Reach 4 is the only reach where significant reentrainment occurred significantly between 2011 and 2012 (Fig. 32).

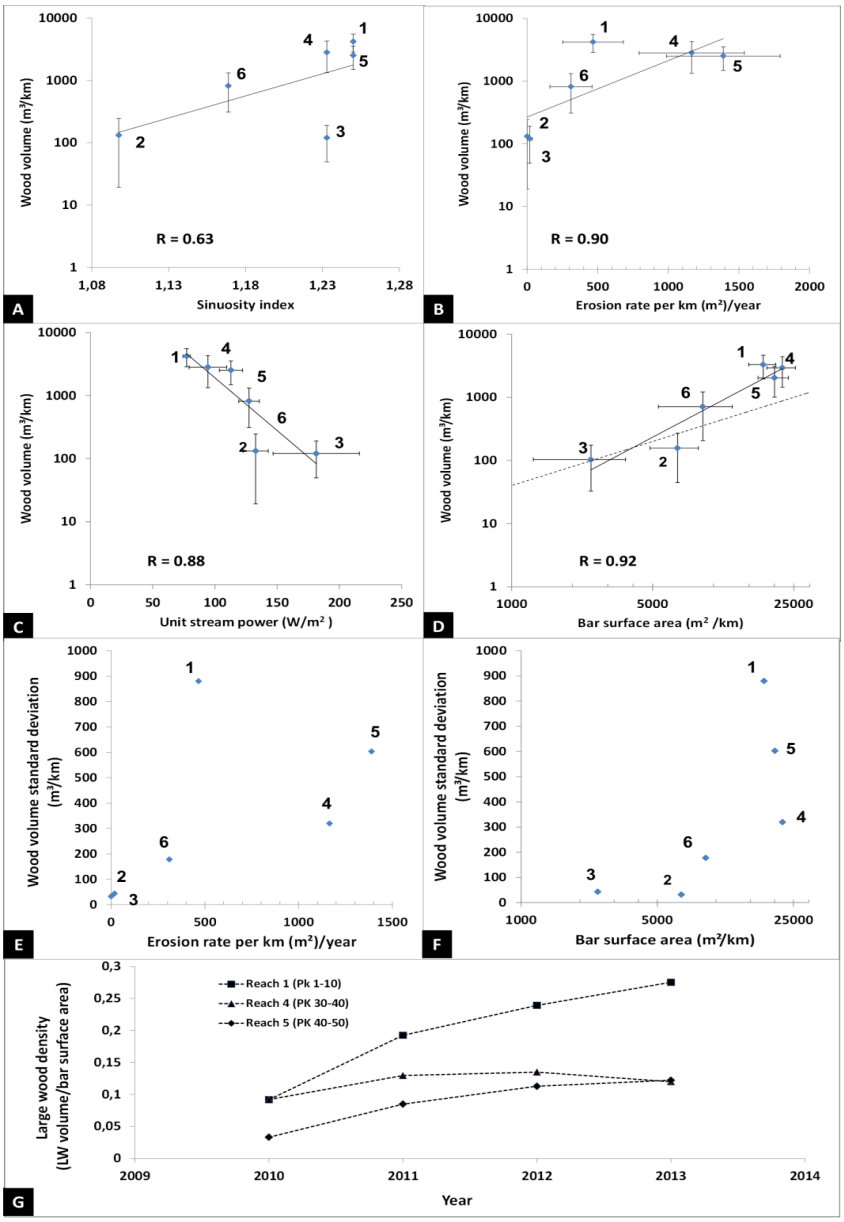


Figure 35. Geomorphological relationship between sinuosity (A), erosion rate (B and E), unit stream power (C), and bar surface area (D and F) on LWJ dynamics for the six 10 km reaches (indicated by numbers) of the SJR fluvial corridor: 1 = 0-10 km, 2 = 10-20 km, 3 = 20-30 km, 4 = 30-40 km, 5 = 40-50 km, 6 = 50-60 km. (G) LW density over the four years for reaches with the highest LW volumes and bar surface areas. Error bars represent the 95% confidence interval for each river reach, the dashed line in (D) represents a homogeneous LW density by bar surface area with a ratio of 1 m^3 per 25 m^2 and E and F represents the LW volume standard deviation between the four-year surveys.

2.7 DISCUSSION

The aim of this study was to shed light on elements challenging our understanding of LW dynamics along a channel course of 60 km. The results highlight the main role of event-based and geomorphic factors in controlling the interannual kinetics of LW in SJR and the role of fluvial ice on LW transport dynamics.

2.7.1 Event-based controls of interannual LW kinetics

Wood recruitment was dominated by lateral migration and avulsion processes between 2004 and 2013. No landslide was observed over the entire river corridor, and we thus assume that the majority of LW recruitment resulted from these two dominant processes. Mean annual erosion rates for the 2004–2013 period were seven times larger than those for 1963–2004 reported by Boivin et al. (2015). Overall, a floodplain area of more than 482,000 m² (±5000 m²) was eroded between 1963 and 2004 whereas more than 302,000 m² (±3130 m²) were eroded in 2004–2013, 86% of which was situated in the upstream section. The increased erosion rates for the last decade is caused by large floods since 2004, but particularly the 50-year flood of December 2010. A large input of LW occurred in the upstream section along with strong floodplain erosion after the large flood of December 2010. The number of LWJ increased by 207% and the individual LW increased by 256% after this intense but short flood (1–2 days). Golladay et al. (2007) noted that the characteristics of flood events, particularly extreme events, have a strong influence on the recruitment and dynamics of LW in rivers The hydrometerological analysis showed that the number of heavy rainfall events and the intensity of these events have been increasing since the 1980s, marked by an increase of extreme events in the last decade (Bernatchez et al., 2008) and influencing the number of critical discharge events generating more erosion.

Increased erosion generates a larger amount of LW recruited to and accumulated in the river system. For example, 1860 m^3/y of LW was recruited by SJR between 2004 and

2013, but more than 3200 m^3/y was recruited for the 2010–2013 period. The LW recruitment from the eroded alluvial plain between 2010 and 2013 represents 57% of the total LW volume produced between 2004 and 2013, and the December 2010 event was responsible for nearly 33% of all wood recruitment between 2004 and 2013. The contribution to the 2004–2013 recruitment was much lower from other periods, e.g., 18% for 2011–2012 and 6% for 2012–2013. Wood recruitment is highly variable over time, and this annual variability of LW recruitment is supported by an analysis by Lienkaemper and Swanson (1987), who observed high annual variations of LW recruitment (0 to 18 LW piece recruits annually) over nine years of monitoring. In addition, Golladay et al. (2007) observed that recruitment was higher during two major floods and highly variable (even between the two major floods) from one year to another during 10 years of monitoring. This marked interannual variability in LW recruitment appears to be largely influenced by the type and intensity of the event.

The results suggest that a vast amount of LW was deposited relatively high on bars and farther away from the talweg following the low-recurrence 2010 flood event. A similar flood would be necessary to remobilize that large wood. In a cold environment, however, another type of flood event can mobilise these LW: ice jams and breakup. Figure 36 illustrates how an ice jam generates an increase in water level that can remobilise LW accumulations located on the higher parts of bars. For the same return period, water levels associated with floods caused by ice jams are greater than those associated with open-water flood (Prowse and Beltaos, 2002) because of the roughness effect of the ice. As a result, very high water level can occur during an ice jam or during an ice breakup event releasing a flood wave analogous to a dam-break wave (Wuebben and Gagnon, 1995) promoting the mobilisation of LW. Although it is not possible to clearly discriminate between an annual mobility and a flood-event mobility, the high rates of remobilisation in 2011-2012 revealed by the sign sequences analyses (Fig. 30) and LW volume variation as well as the high transport rates during the 2012 ice-breakup event support this conclusion.

The important contribution of an ice-breakup event on LW dynamics is supported by the visual LW transport estimates and the LW accumulations documented in the delta. The ice breakup in March 2012 carried large amount of wood in five hours at a discharge that is much smaller than the documented open water flood events. During the first hour (rising limb of the ice breakup), a mean rate of 10 LW/min was observed, with a peak of 15 LWI/ min during a ten-minute sequence when the mean flood discharge was 66 m³/s, and an average transport rate of 2.4 LWI/min for the five hours. For comparison, the average transport rates during the two open water events were 0.16 and 2.3 LWI/min for the May 2013 flood (Q_{SJR} = 164 m³/s) and the May 2014 flood (Q_{SJR} = 244 m³/s), respectively. These open water flood transport rate estimates are consistent with values of 1.8, 1.7, and 2.3 LW/min reported by MacVicar and Piégay (2012) on the Ain River (discharges > 550 m^3/s). This suggests that transport rates are similar for an ice-breakup event and an open-water flood event but at a much smaller discharge. The 2012 ice-breakup event occurred in the year where the second-highest volume of wood was measured in the Saint-Jean delta for 1963–2013. For that year, the spring discharge was relatively low and thus it can be fairly possible that the vast amount of wood transported to the delta is the result of the high mobilisation rates owing to the ice break-up event.

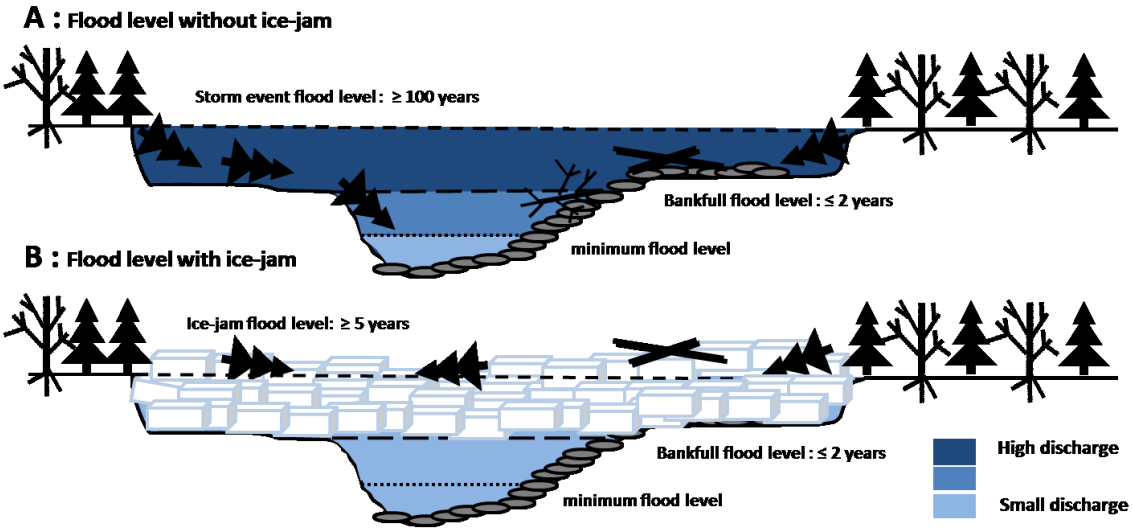


Figure 36. Conceptual model on processes of transport of LW with ice break-up and without ice break-up.

The ice jam event can influence LW transport rates by increasing water level and LW remobilisation. However, river ice jam and breakup are not systematically linked to high lateral erosion rates, and thus the LW recruitment from the floodplain can be limited. Hence, significant differences between LW recruitment and LW fluxes associated with the ice jam and open-water flood events can occur. Figure 37 proposes a conceptual model to highlight the main differences between the two types of event. The LW flux may be the same or lower, but the peak of LW transport will occur over a much shorter time and with a higher intensity for the mechanical ice breakup. In terms of LW recruitment, preliminary analyses show that ice-breakup events produce less new wood for the system compared to floods without ice, but they can transport more LW within a shorter period. The lower input of LW by ice jam and ice-breakup events is because event duration is usually shorter and causes less erosion than floods without ice. Furthermore, ice-jam floods are likely to break smaller trees and only scar the more mature ones (Shroder Jr., 1980; Lagadec et al., 2015). Concerning LW accumulations, ice jams and ice breakup could contribute to restructuring LWJ in the affected section by destroying some of the less stable ones and supplying wood

to the downstream section. The impacts of ice dynamics on the characteristics of LWJ and LWI remain largely unexplored and require future research.

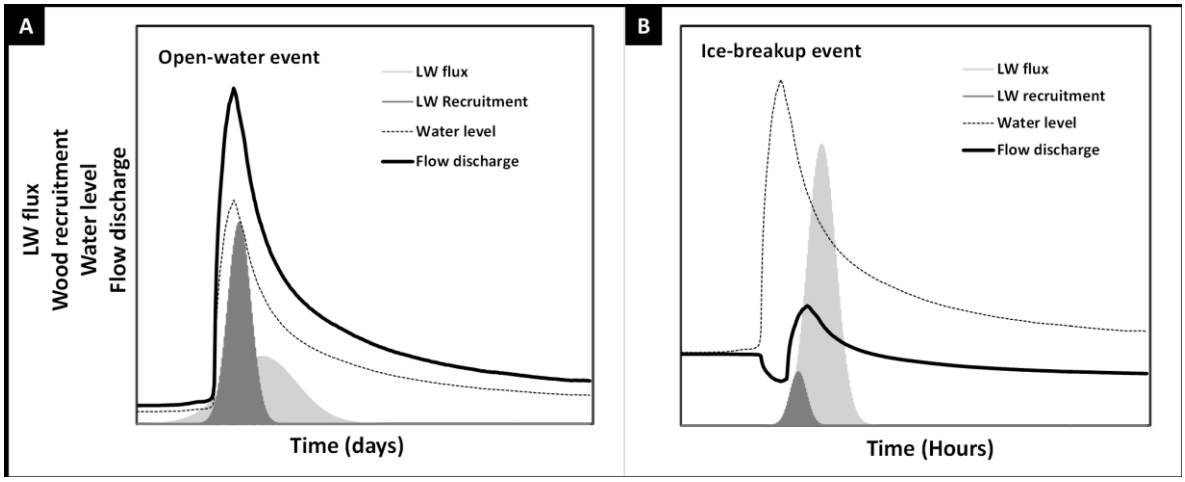


Figure 37. Conceptual model of LW dynamics during an open-water event (A) and an ice breakup event (B). The light grey areas represent LW flux, the dark grey areas represent LW recruitment, the solid lines show flow magnitude, and the dashed lines show water level. Note: Time scale is in days for an open-water event (A) and time scale is in hours for an ice-breakup event (B).

2.7.2 Longitudinal geomorphic processes controlling LW transfers

Large wood longitudinal distribution in SJR—a river that is wider than the height of the riparian vegetation—is partially controlled by flow conditions, sediment dynamics, and morphology. Bar surface areas, unit stream powers, and erosion rates are highly correlated to the volumes of LW deposited along the main channel. However, the specific role of each variable is difficult to ascertain because of the strong correlations between geomorphic variables. The strong relationships observed between geomorphic variables and LW show that bar surface area is an important variable for estimating the potential LW volume in a reach. The roughness caused by bar surfaces increases the probability of observing a large volume of LW in a river corridor.

Unit stream power is also a good indicator of the presence or absence of LW. When unit stream power is high, fewer bar surfaces—so less roughness—are present and less LW is found in these areas because of greater LW mobility. Finally, sinuosity seems to influence LW volumes in a river corridor. The LW volumes were higher where the sinuosity index increased above 1.18 (except for semi-alluvial reach 3 where the sinuosity is controlled by the lithology of the river-bed and channel margins). The relationships observed here are supported by previous studies that also documented negative correlations between LW accumulations and unit stream power (Wyżga and Zawiejska, 2005; Wohl and Goode, 2008; Iroumé et al., 2015). Recently, Ruiz-Villanueva et al. (2015) showed that preferential sites for LW accumulation are largely influenced by channel roughness, channel patterns, and flood magnitude.

Finally, strong relationships between the proximity of the LW recruitment zone and LW wood accumulation are observed in single-thread rivers (Lassettre et al., 2008) and in braided rivers (Piégay and Landon, 1997; Bertoldi et al., 2013). In SJR, the vast majority of LW accumulations were found in the upstream and downstream sections, which have similar geomorphic features. However, the highest LW volume per kilometre was observed in the downstream end of the upstream section (PK30): 30% of the total wood volume was located between PK30 and PK33. This is the same area where the highest bar surface areas and erosion rates and the lowest unit stream power are found associated with the strong effect of valley morphology and channel pattern. The volumes of LW are generally high in areas where erosion rates are higher, as observed by Welber et al. (2013). The areas with high erosion rates produce more wood and sediments promoting the establishment of large bar and proximal storage areas for new LW produced by erosion. The only exception is reach 1 where erosion rates are low. This is a significant accumulation area for the SJR in terms of LW and sediment accumulation explained by low slopes and low unit stream power, creating preferential areas of accumulations for LW. The results also show that the LW density increases with bar surfaces and also the trapping efficiency of this section. Among years, similar spatial distribution patterns were observed, with two major accumulation areas: one downstream in the pre-delta area and one in the upstream section.

With a major event like the flood of 2010, the volume of LW increased significantly, adding LW that would be available for transport in subsequent floods. Thus the LW volume stored in the fluvial corridor increased and LW export out of the system decreased caused by the new large retention zone after a low-recurrence flood.

Our analysis of the interannual LW volume variation along the river corridor indicates that the downstream section showed an increased volume of accumulated LW while accumulation was more variable in the upstream section. The section with erosion had a higher variability of LW accumulated on bars and in the active channel, which explains the strong relationship between erosion rates and volumes accumulated in these reaches owing to the proximity of LW sources. However, the trajectories of changes from the 91 LWJ show some variability in the input and output of LW volumes. Most LWJ showed an increase for at least two years, and a large proportion increased in volume for three years of the study. In terms of numbers, the proportion of LWJ that showed an increase for all years is higher, suggesting a contribution of LWI each year. Overall in the fluvial corridor, we observed that transit areas and accumulation zones remain the same over time, regardless of hydroclimatic events. Consequently, an increase in the number of LW and notable changes in LW characteristics take place at these locations. The spatial patterns of volume changes also suggest that a major flood produces a large amount of LWI and that subsequent floods reentrain them toward LWJ already in the river corridor. This is supported by the increasing volume of LW and the increasing number of LWJ from 2011 to 2013 while the number of LWI decreased.

2.8 CONCLUSION

This study highlights the complexity of LW dynamics in cold-region rivers with low-recurrence floods. The four years of monitoring allowed the identification of interannual LW kinetics that are strongly influenced by storm and ice-flood events. The LW dynamics are influenced by flow discharge, LW flux, sediment flux (morphology), and ice discharge. During the study period, the two highest-intensity events (December 2010 and March 2012)

apparently were responsible for most of the LW kinetics in the SJR corridor between 2010 and 2013. After the 2010 flood, two new accumulation areas appeared in the downstream section that greatly restricted LW transit to the SJR delta (output of the system). The LW in transit seemed to accumulate upstream from the delta in these new areas. The four years of monitoring showed that the interannual volume of LW transported is highly variable depending on the availability of LW in the fluvial corridor and the type of flood. The influence of ice-breakup is important in LW transport because a flood by ice-breakup can move more wood from a bar's surface and the floodplain. The major increase between 2010 and 2011 and the relative stability thereafter seem to indicate that LW can be trapped in a river system for a relatively long time. These analyses show the important influence that low-recurrence events (with and without ice cover) can have on LW volume variability in a LW budget approach. The importance of ice conditions and ice-breakup has also been demonstrated and must be considered for LW flux and LW mobility in cold-environment rivers. Our study has contributed to our understanding of the LW budget approach based on repeated field measurements, a census wood volume input and output at the reach scale, and an assessment of wood kinetics within the reach (e.g., deposited and reentrained yearly), and it has related LW dynamics to local geomorphic controls.

Understanding interannual LW dynamics and the influence of geomorphic features increases our ability to apply a LW budget approach to integrate interannual variability and the effects of different hydrometeorological events. In a context where managers have a negative perception of LW, large wood accumulations are generally considered as a problem. This study, paired with a previous paper (Boivin et al., 2015) and with future research on LW budget approach, should provide resource managers and policymakers with options to better understand LW dynamics at the watershed scale. Furthermore, data reported here will be of particular interest to researchers attempting to validate models of LW dynamics and to develop long-term simulations of LW dynamics in rivers at the corridor and watershed scales.

2.9 ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support was provided by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC-CRSNG), Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT), Société de Gestion des Rivières de Gaspé (SGRG), Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF), Ville de Gaspé, Fondation du Saumon du Grand Gaspé, and Faune Québec. We thank the fluvial group at UQAR for their excellent assistance during fieldwork. We also thank the two anonymous reviewers, Lorenzo Picco (Editor of this special issue), and Richard A. Marston (Editor) for comments that improved a previous version of this manuscript and Laure Devine for English revision.

CHAPITRE 3
ESTIMATION À MULTIPLES ÉCHELLES SPATIO-TEMPORELLES DE BILAN LIGNEUX DE L'INTER DÉCENNAL À L'INTERANNUEL DANS UN SYSTÈME FLUVIAL TEMPÉRÉ-FROID

3.1 RESUME EN FRANÇAIS DU TROISIEME ARTICLE

Le bois mort est une composante importante des rivières dans monde, en particulier dans les bassins versants et les plaines inondables boisées. L'objectif de cet article est de quantifier chaque composante (entrée, accumulée et sortie) d'un budget ligneux à l'échelle de sections de rivière et de bassin versant sur différentes échelles temporelles (par exemple, période de 50 ans, le cycle interannuel…). Un budget ligneux est quantifié en mesurant le volume d'entrée, accumulé et sorti d'une section de rivière à une autre et évacué du bassin versant dans un corridor fluvial en utilisant les embâcles uniques dans la rivière Saint-Jean afin de fermer le bilan ligneux. Les embâcles de la rivière Saint-Jean sont des structures naturelles d'accumulation de bois provenant du bassin versant et il s'agit d'un site exceptionnel pour quantifier le bois mort exporté depuis 1963. La dynamique de la rivière Saint-Jean indique que les événements extrêmes survenus (telles les grandes inondations de 2004 et 2010 avec une période de retour de 50 ans) modifient l'équilibre des bois morts dans un système fluvial. Par la suite, les données montrent une certaine stabilité dans les dynamiques de bois mort en rivière. Nous avons également observé une augmentation de la dynamique fluviale depuis 2004 conduisant à une plus grande production de bois par la migration de la rivière et par une augmentation dans les volumes en bois accumulés dans le corridor fluvial démontrant que le système n'est pas en équilibre actuellement. L'analyse de la trajectoire historique montre que la dynamique fluviale et du bois mort tendent à

retrouver une dynamique naturelle suite à des pressions humaines passées et à l'adaptation de changements hydroclimatiques suivant une trajectoire ecohydromorphological spécifique.

Ce troisième article, intitulé « *Estimation of watershed and river corridor large wood budgets at inter-decadal to inter-annual scales in a cold-temperate fluvial system.*», provient de mes travaux de doctorat sur la rivière Saint-Jean en Gaspésie. J'ai effectué l'ensemble de la prise de mesures sur le terrain durant plus de quatre années. J'ai déposé les demandes de subventions, effectué et supervisé les travaux de terrain, effectué les analyses, la production des figures et la rédaction de la production scientifique. Je suis le premier auteur et mes deux directeurs m'ont encadré pour la réalisation de cet article. Il sera soumis d'ici le 30 mars 2016 dans un numéro spécial sur la dynamique des rivières à lit graveleux (Special Issue: *Gravel Bed Rivers 8)* dans la revue internationnale *Earth Surface Processes and Landforms (ESPL)*. Cet article a été présenté à la conférence internationale *Gravel Bed Rivers 8 (GBR8: Gravel Bed Rivers and Disaster* à Kyoto/Takayama, Japon en septembre 2015.

Dans l'organisation globale de la thèse, cet article présente l'application et la validation d'une analyse par bilan ligneux en lien avec les changements écohydromorphologiques survenus dans la RSJ depuis les cinquante dernières années. Cette validation d'un bilan ligneux, à l'aide de données historiques et de suivis *in situ* interannuels (Chapitre 2), est à notre connaissance une des premières études à valider un modèle conceptuel de bilan ligneux à multiples échelles spatiales et temporelles. Ce chapitre montre que la RSJ tend à produire plus de BM depuis le début des années 2000 que durant la période 1963-2004.

3.2 ESTIMATION OF WATERSHED AND RIVER CORRIDOR LARGE WOOD BUDGETS AT INTER-DECADAL TO INTER-ANNUAL SCALES IN A COLD-TEMPERATE FLUVIAL SYSTEM

3.2.1 Résumé en Anglais

Large woods (LW) are ubiquitous features in world rivers of forested watersheds and floodplains. The purpose of our study is to quantify each component (input, accumulated and output) of a LW budget at the reach and watershed scale considering different time periods (e.g, 50-year period, interannual cycle). The LW budget is quantified by measuring volume of LW input, of LW accumulated, and of LW output from one sub-reach to another and evacuated from the watershed in a river corridor by using the unusual, but natural wood raft of the Saint-Jean River. The Saint-Jean River Raft is a natural trapping structure that provides good potential sites to monitor LW wood export from the catchment through time. The dynamics of the SJR indicates that extreme events significantly modify the balance of LW in a river system over the studied period and that there is some stability in large wood dynamics following their occurrences. We have also observed an increase in fluvial dynamics since 2004 leading to larger recruitment of LW and increasing LW volume trapped in the river corridor demonstrating the system is not in equilibrium in terms of wood budgeting but is recovering to previous human pressures and adjusting to hydroclimatic change following a specific ecohydromorphological trajectory.

Key words: large wood in river; large wood budget; ecohydromorphology trajectory; watershed scale; wood transport.

3.3 INTRODUCTION

Large woods (LW) are a ubiquitous feature in world rivers of forested watershed and floodplains. They are an active component of floodplain dynamics (Wohl, 2013; Collins et al., 2012), fluvial styles (Keller and Swanson, 1979; Hickin, 1984; Piégay, 1993; Piégay and Marston, 1998; Sear *et al.*, 2010), fluvial habitats (Carlson *et al.*, 1990; Thévenet *et al.*, 1998; Mossop and Bradford, 2004; Floyd *et al.*, 2009; Langford *et al.*, 2012), and fluvial hazard (Piégay *et al.*, 2005; Lyn *et al.*, 2003; Ruiz-Villanueva *et al.*, 2014; Lucia *et al.*, 2015). The influence of individual pieces of LW or LW jams on fluvial dynamics, especially in smaller rivers, have been the focus of numerous studies, but since the early 2000s LW budgeting has been more and more applied to river reaches and river systems because it encompasses most LW dynamics (eg.: Benda and Sias, 2003; Hassan et al., 2016).

Keller and Swanson (1979) were the first to frame the LW dynamics into different components of a wood budget and to document the high variability of processes that characterise LW dynamics. To date, most studies on the dynamics of LW in rivers have focused on a subset of LW dynamics, usually analyzing one or two components of a LW budget (see review by Hassan *et al.*, 2005). Marcus *et al.* (2011) showed the importance to quantify the components of LW budget and geomorphological settings on a large spatial and temporal scale because of the large variability of LW dynamics and river morphodynamics. Schenk *et al.* (2014) reach similar conclusions on the Roanoke River where large disturbances (fire and landslide for example) complicate the application of a LW budget that requires a wide temporal and spatial monitoring in order to incorporate this variability. The application of LW budget in a large river and at the scale of long corridor and/or watershed is a challenge but it represents a key element to better understand the dynamics of LW (Seo *et al.*, 2010).

The purpose of our study is to quantify all the components of a LW budget at the reach and watershed scales for different time periods (e.g., over 50-year period at a decadal scale, and over 4 years at an interannual scale). The LW budget is quantified by measuring volumes of LW input, of LW accumulated, and of LW output at the reach and watershed scales by using the unusual, but natural wood raft of the SJR (Boivin *et al.,* 2015) to close LW budget. Three questions motivated the research: i) what is the LW budget on SJR over the last 50 years and how does it evolves inter-annually? ii) what are the potential geomorphic and hydrological factors disrupting wood transfers within reaches and within a watershed to explain the difference between LW input and LW output/evacuated?; and finally iii) if LW budget is not at equilibrium at an inter-annual level, is it at a decadal one? To answer these questions, we relied on field measurements and aerial and satellite imagery to establish an LW budget and to analyse the evolution of the river dynamics at the basin scale between 1963 and 2013.

3.4 BACKGROUND ON LARGE WOOD BUDGETS

LW budgets allow to frame the component of the LW dynamics in an analogous way that a sediment budget encompasses most fluvial dynamics. The amount and configuration of LW in a river section are controlled by the balance between LW volumes entering and exiting the system (Keller and Swanson, 1979). The presence of a large amount of LW in a river generally results from an imbalance in the components of the LW budget and river dynamics. If the volume of LW recruited and transiting in the river system is higher than that annually evacuated, concentration of LW is generally high and an increase in these volumes will be constant over time (Montgomery *et al.*, 2003). The spatio-temporal variations in a LW budget can cause hydrogeomorphological upheavals comparable to changes in a sediment budget or discharge change in a river (Montgomery *et al.*, 2003).

LW budgets quantifications are relatively new in fluvial sciences (Benda and Sias, 2003; Wohl, 2011; Marcus *et al.*, 2011; Hassan *et al., 2016*). A LW budget generally considers the quantification of the input of LW in relation to the volume of LW

accumulated , the volume of LW in transit and the volume of LW exported from the catchment or the reach, over a given time period (Benda and Sias, 2003; Montgomery *et al.*, 2003; Schenk *et al.,* 2014). Benda and Sias (2003) were the first to apply a quantitative framework to analysis the mass balance of in-stream LW in a small watershed in Northwest Pacific, USA (132 km²), where tree height is greater than the width of the channel, limiting the LW mobility. Few study focuses on LW budget at the scale of larger watersheds with wider width, where LW mobility is greater than in the small streams and field data are scarce to test this framework across watershed (Benda and Sias, 2003; Seo *et al.*, 2010). Benda and Sias (2003) proposed a theoretical equation to predict volume of LW accumulated into a river reach:

$$\mathbf{\Delta Sc = [Li - Lo + Qi/\Delta x - Qo/\Delta x - D]\ \Delta t} \qquad \mathbf{(3.1)}$$

where ΔSc is the change in volume accumulated inside a river section (Δx), during a time interval (Δt). The change in the accumulated volume is considered to be caused by the recruitment of LW (Li); the loss of LW by accumulation on a floodplain during high flood events and deposited in abandoned jams (Lo); by fluvial transport of LW volume that enters (Qi) and exit (Qo) the fluvial reach per unit time (Δt); and finally, by the in situ LW decay (D) (Benda and Sias, 2003). Wohl (2011) adapted the wood balance equation from the equation of Benda and Sias (2003), to put forward that each variable has a different weight, depending on the environment of the study site. An adjustment of the equation is proposed to reflect the higher relative importance of variables in some sections according to river dynamics (highest importance for LW input by lateral migration and LW accumulated in confined sections compared to LW stocked in beaver dams are more important for unconfined sections, for example). Recently, Benda and Bigelow (2014) tested equation (1) with in situ data on LW recruitment, accumulation and transport in four rivers (drainage area < 30 km²) in California. More recently, Hassan et al. (2016) used equations from Benda and Sias (2013) to develop a reach-scale budget by a modelisation approach to study LW dynamics over a period of 100 years in two small watersheds (drainage area < 35 km²).

The application along long river corridors and/or watersheds and at the interannual scale remains a challenge and an important component of the dynamics of LW (Seo et al., 2010).

Because it relates to large wood dynamics, LW budget can be influenced by river discharge, LW fluxes, sediment load and morphology, and fluvial ice configuration and discharge (Figure 38). For example, sediment loads influence LW mobility and retention by promoting river morphologies such as concave eroded banks or large central bars in a river corridor. LW dynamics are also closely influenced by the occurrences of storm events (Golladay et al., 2007) and ice flood events (Boivin et al., accepted; Boivin et al., 2015). All discharges and flux are influenced by hydrometeorological characteristics and previous events in connection with the concepts of LW availability in a fluvial corridor. Two events close together in time do not have the same LW discharges (Moulin and Piégay, 2004; Boivin et al., 2015) as the availability of LW have been decreased by an earlier flood and total volume will be lower if the system was unable to recharge before the next hydrometeorological event. Finally, river ice processes greatly influence the different discharges in cold region rivers, especially on LW flux as shown by Boivin et al. (2015) and by Kramer and Wohl (2014) on the St-Jean River and the Slave River, respectively. In a cold environment, ice jam and ice breakup can mobilize LW easily. Ice jam and breakups can generate an increase in water levels and mobilize the accumulations of LW located in the higher parts of riverine environment. For the same return period, water levels associated with floods caused by an ice jam are greater than those associated with open water flood because of the roughness effect of the ice (Prowse and Beltaos, 2002). The type of hydro-meteorological event is therefore important, especially in cold regions, modifying the different river discharges.

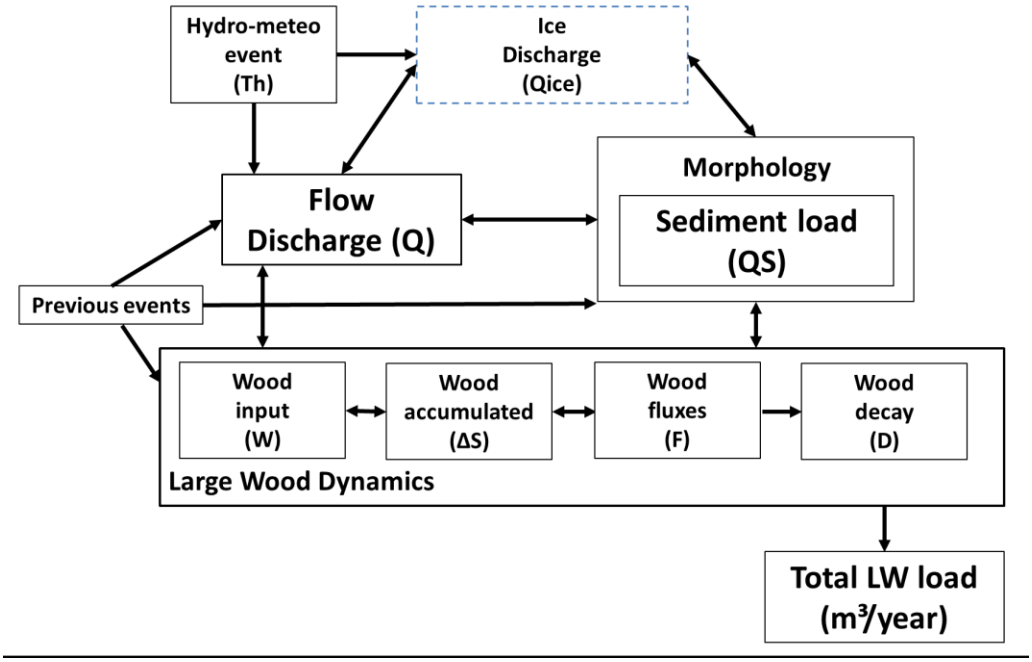


Figure 38. Components and interrelations of the large wood dynamics in rivers of cold regions framed into a wood budget approach.

The majority of studies relying on LW budget approach focused on short periods of a year or a few years (eg.: Marcus et al., 2011; Benda and Bigelow, 2014.). Recently, Hassan et al. (2016) developed a LW budget over a period of 100 years, using *in situ* data and modelling. However, no study has conducted an inter-annual monitoring over several consecutive years or considering 2 nested periods of times (e.g. inter-decades and inter-annual) to catch multi-scale factors controlling wood budget. Furthermore, knowledge on the dynamics and management of LW in Eastern Canada are still limited (Boivin *et al.*, accepted; Boivin *et al.*, 2015; Massé, 2014; Denis *et al.*, 2013; Floyd *et al.*, 2009 Pedlar *et al.*, 2002), and more particularly in boreal and cold regions (Wohl, 2013; Kramer and Wohl, 2014; Boivin *et al.*, 2015). It is believed that applying a LW budget at various times and spatial scales will shed light on any specificities on LW dynamics of these environments.

3.5 STUDY SITE

The Saint-Jean River is located in the eastern part of the Gaspé Peninsula in Québec, Canada, in the physiographic region of the Appalachian Mountains (Figure 39). Elevations range from 700 m in the headwaters to sea level, where the river flows into the Bay of Gaspé through a delta that is subject to daily tides. The climate of the Gaspé Peninsula is considered a boreal climate caused by the relief of the Appalachians Mountains and the presence of the Saint-Laurent gulf. It drains an area of 1130 km² and has an approximate length of 130 km, and an average annual flow of 30 m³/s. The maximum recorded flow occurred in 2010 and exceeded 270 m³/s in York River and 509 m³/s for the SJR estimation discharge (CEHQ, 2014). The pluvionival hydrologic regime is fed by the high snow contribution (annual mean snowfall = 371.8 cm) melting from April to June and mean annual rainfall of 779.2 mm (Environment Canada, 2014) with intense rainfall events that are occurring generally in fall. Strong, rapid and annual spring flooding is characteristic of this river. Average annual temperature in the SJR is 3.1°C, which falls to -8.8°C for the cold season ranging from December to April. Snowfall and rainfall, for December to April, are respectively of 363 cm and 148 mm (Environment Canada, 2014). Ice cover is present in all river systems where the climate is sufficiently cold, as is the case on the SJR. Ice jams are one of the most important risks for rivers (increasing water level, erosion, bridges, floods…) with ice dynamics and can form throughout the winter (Beltaos, 2007).

The SJR was chosen as the study site because of the presence of a major natural LW rafts in the river Delta (Figures 39C and 40) and for the opportunity to validate LW budget at the watershed scale. The SJR is a semi-alluvial gravel bed river, natural and dynamic with three distinct river styles. Meandering sections are found where the valley is wide enough to form an alluvial plain (Upstream and downstream section). This occurs in the upstream (kilometric point [PK] 60-30) and downstream (PK10-0) sections, where lateral migration and avulsion are the dominant fluvial processes. In these sections, river width varies between 50 and 70 m. In the middle section (Middle section), bedrock constrains river flows, so the river is relatively straight with alternating riffles and pools (PK30-10).

The upstream and middle sections have an average slope of 0.40% and the downstream section an average slope of 0.27%. Finally, the delta is largely of the anastomosed style with fine sediments deposited from regular overbank flow and rafts generating frequent avulsions. In this section, the river divides into several channels with an average width varying between 20 and 40 m.

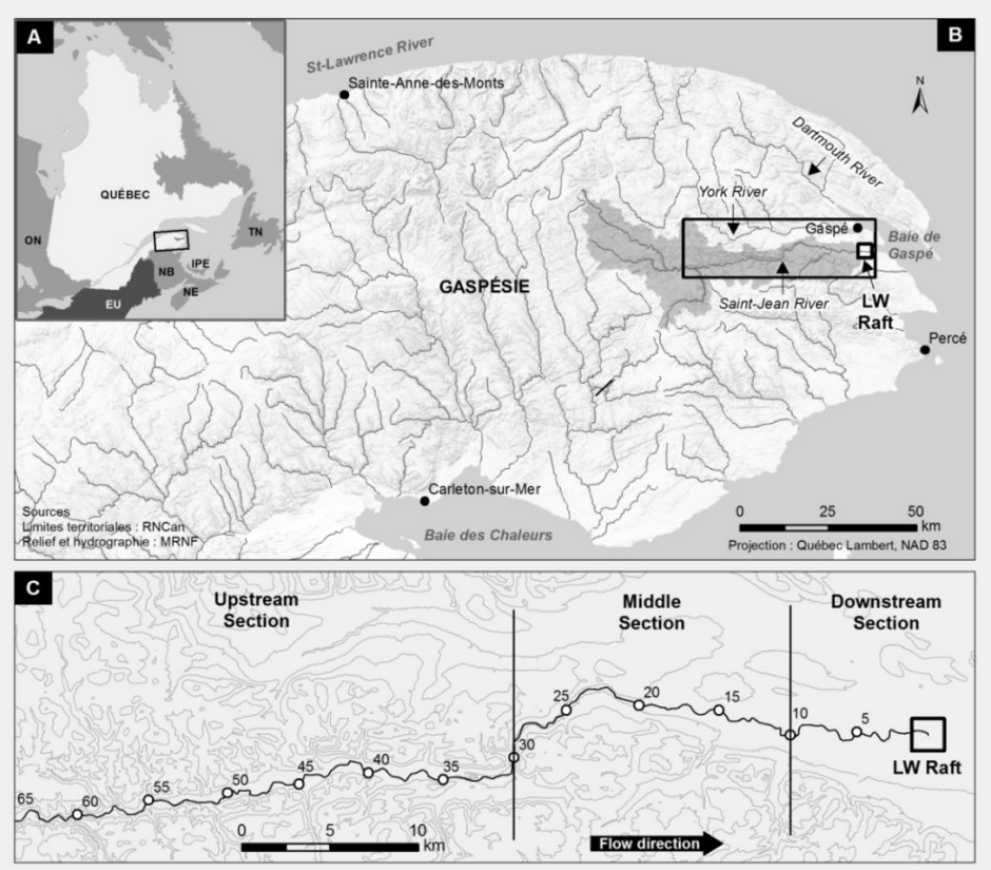


Figure 39. (A) Large-scale map showing the location of the Saint-Jean River in Québec, Canada. (B) Location of the Saint-Jean River on the Gaspé Peninsula. (C) Detailed map showing the studied river corridor with distance from the river mouth in kilometres (kilometric point: PK)

The delta of the SJR encompasses large wood *raft* building up since 1960, measuring more than 3 km in length and creating frequent avulsions (Boivin *et al.*, 2015). Until 2015, the *Raft* in the Saint-Jean River delta consists of three large rafts and several smaller jams. The raft in the southern channel covers nearly 2000 linear metres in January 2015 and

nearly 700 linear metres in the northern channel (always in 2016). The central channel raft covers nearly 300 linear metres, but it has been colonized by vegetation for more than 20 years. The rafts are spectacular: to our knowledge, there are none comparable in Québec and few if any elsewhere in the world. These *rafts* provide a unique opportunity to quantify a wood budget through time and to better understand the controlling factors. Recently, SJR managers have decided to dismantle the large raft in the south channel of SJR (Figure 40B). Using data from preliminary LW budget (Boivin and Buffin-Bélanger, 2010b), they opted for a complete dismantling due to the increase of LW flux in the last ten years (Boivin *et al.*, 2015). This intervention and analysis cost more than one million (Canadian dollars) to remove all the wood in this channel and put all of LW in an area situated in the middle of the SJR delta (Figure 40A and C). Finally, the SJR offers ideal conditions for examining the dynamics of LW across the watershed because of its natural side, a high recruitment rate from the alluvial plain, an important annual mobility in the river corridor and its exceptional storage capacity in the SJR delta since the 1960s.

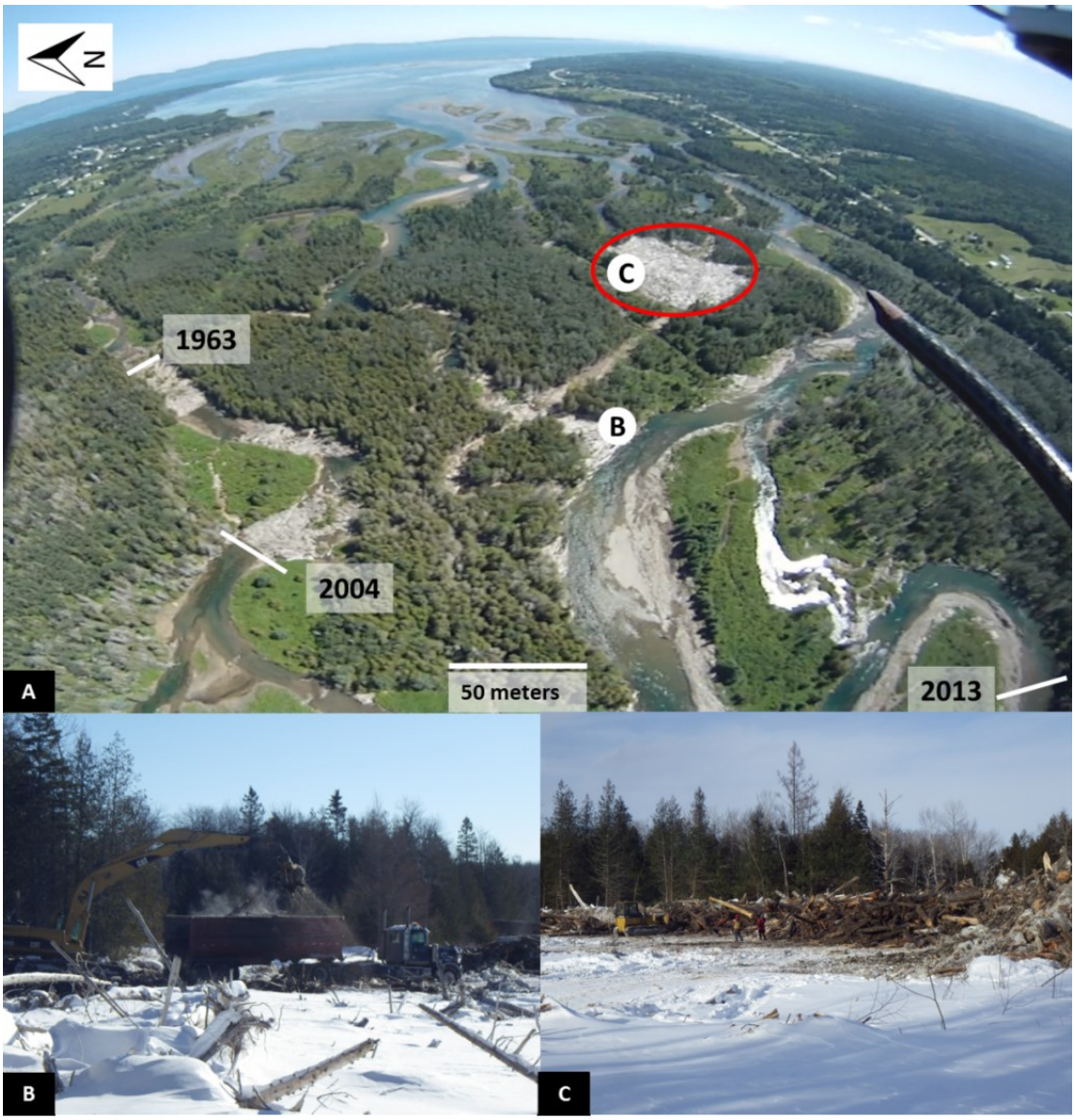


Figure 40. (A) Aerial photography (drone) of the Saint-Jean delta in July 2015, after dismantling of the main large raft in the south channel. (B) Photography during the dismantling in February 2015 and (C) Area of deposited LW from the raft in February 2015. (B) and (C) represent the position where the pictures were taken in (A). *The red circle represents the deposition area of the removed wood of the raft in winter 2015 and line represent limits of the raft in 1963, 2004 and 2013.

3.6 METHODOLOGY

This study focuses on the application of LW budget established from interannual measurements of wood volumes in the river corridor, from historical aerial photography for LW input and from satellite images for LW exported in SJR delta since 1963 and with field data to quantify LW accumulations in a long fluvial corridor (Figure 41). The different spatio-temporal LW budget and characteristics are examined in relation to hydrologic and geomorphic changes in the last 50 years. Here, the SJR *rafts* provide a natural opportunity to close a LW budget through time and thus to better understand the controlling factors of LW dynamics at the reach and watershed scale.

3.6.1 Definition of large wood budget components

The following equation is used to quantify the LW budget at the scale of the river system or the river reach (regardless of size) in m^3/year for a given period of time (flood, year, decade…):

$$\mathbf{W = F + D + \Delta S / \Delta t} \qquad \mathbf{(3.2)}$$

where, W represents large wood recruitment rates in m^3 for a given time period (Δt); F, the large wood fluxes evacuated by fluvial transport in m^3; D, the large wood decay rates within the river system in m^3; and ΔS, the large wood accumulated within the system in m^3, each of them for a given period of time (Δt). Each component of the large wood budget can be decomposed in various contributions as follows:

$$\mathbf{W = [V_{lm} + V_m + V_{mm} + V_t + V_b + V_h] / \Delta t} \qquad \mathbf{(3.3)}$$

where V represents volumes of LW recruited from lateral migration (Vlm), mortality of trees falling into the river (Vm), mass movements (Vmm), tributaries (Vt), beaver activities (Vb) and by human activities (Vh) for a period of time (Δt) in m^3;

$$\mathbf{F = [V_{ac} + V_{fp}]/\Delta t} \qquad \mathbf{(3.4)}$$

where V represents volume of LW from the active channels (Vac) or the floodplain (Vfb) that are exiting the river system via fluvial transport for a period of time (Δt);

$$\mathbf{D = [V_d + V_f + V_{fi}]/\Delta t} \qquad \mathbf{(3.5)}$$

where V represents volumes of LW depleted from the river system by decomposition in place (Vd) or by fragmentation/abrasion during flood (Vf) and during ice break-up (Vfi) (hence difficult to quantified in F) for a period of time (Δt); and finally;

$$\mathbf{\Delta S = [V_{ac} + V_{afp}]_{Y2} - [V_{ac} + V_{fp}]_{Y1}} \qquad \mathbf{(3.6)}$$

Where V represents volumes of LW within the active channels (Vac) and on the floodplain (Vfp) at two different moments, years Y1 and Y2 for this study. This budget changed through time according to the drivers controlling inputs and outputs. Amongst them, flood is the most important. It should be noted that in a situation where we consider a given length of river corridor less than the total length of the river - as is the case in this study - the upstream portion of the main stream is considered as a tributary of the corridor.

This LW budget equation was inspired from Benda and Sias (2003), but its form differs slightly from Benda and Sias (2003), Wohl (2011), and Marcus *et al.*(2011) because it uses more explicitly LW fluxes that can be expressed in m^3/year at the scale of a watershed. The fluxes can be expressed for decennial dynamics over a period of 50 years and for inter-annual dynamics over 4 years. The originality of this paper is to analyze the temporal evolution of a LW budget on different spatio-temporal scales and to analyze the evolution of the different components of a LW budget. While equation 3.1 was analogous to a sediment budget, equation 3.2 have more similarities to the application of a water budget aiming to identify the input rate of LW at a given location for a given period of time (m^3 per year) considering the processes occurring within a watershed. Finally, a new component is proposed in the equation of volumes exported and evacuated from the system, incorporating abrasion and fragmentation processes of LW by river ice dynamics (V_{fi}), but for now, we need more research to apply these processes in a LW budget equation.

3.6.2 Estimating large wood budget components for the Saint-Jean River.

LW budget equation 3.2 was applied in a 60 kilometers long fluvial corridor in SJR using a range of data to estimate the components for the LW budget. Table 5 summarizes key methodological issues as well as time periods that are considered for the LW budget. Some components of the equation 3.2 are not included in this application of LW budget due to the lack of available data (decay, abrasion by ice, LW in flood plain and natural mortality) or by the absence of these processes in the SJR (LW input from tributaries, from mass movements, from anthropic activities and LW input by beaver activities).

The study relies on four methodological approaches using multi-date aerial and satellite images from 1963 to 2013 and four annual in-situ surveys between 2010 and 2013 (Figure 41). Firstly, quantification of LW input (W) throughout the catchment was calculated from aerial photography (1963, 1993 and 2004) and satellite images (2013) to extract the eroded areas, identify mass movements and multiplied these surfaces eroded by a tree density living in riparian area measured on 25 sites located throughout the river corridor of 60 km. A quadrat of 15 meters by 15 meters was sampled on each site to measure the diameter breast height (DBH), the tree height and the identification of each species.

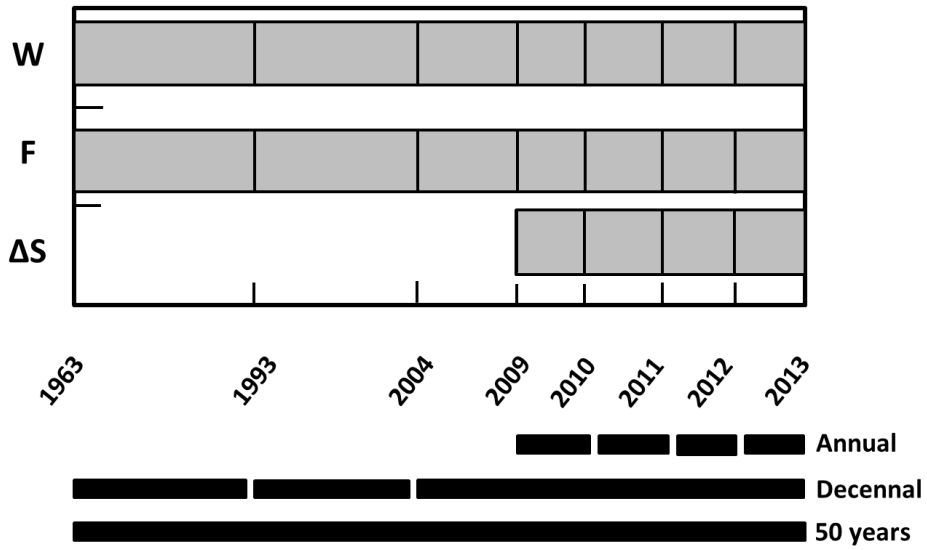


Figure 41. Definition of the temporal windows for which the components of the large wood budget can be quantified for the SRJ.

Secondly, all large wood accumulations (ΔS**)** were measured annually from 2010 to 2013 on the 60 km of river. Large wood individuals (LWI) were distinguished from large wood jams (LWJ). LWJ comprised more than three pieces of wood larger than 10 cm and longer than 1 m (Wohl *et al.*, 2010) while LWI was made of less than three pieces of wood. The overall shape, position, volume and number of trunks were systematically measured for each LWI and LWJ within the active width of the river. LWJ was considered as a simple rectangular volume (in m^3):

$$\mathbf{Vaw = L*W*H} \qquad \mathbf{(3.7)}$$

where V_{aw} is the air–wood volume (m^3), L is the average length (m), W is the average width (m) and H is the average thickness (m) of the wood accumulation. The air–wood volume includes both the wood and the air volume within the simple rectangular form.

The wood volume (V_w) was then calculated from:

$$\mathbf{Vw = Vaw*\rho w / 100} \qquad \mathbf{(3.8)}$$

where ρ_w is a proportion of air in wood volume measurements (LWJ porosity). Thévenet *et al.* (1998) proposed a proportion of air in wood volume of 89.50% ± 0.91% from measurements on two rivers in France. This proportion factor was adopted after validation and regional calibration on the field by measuring the porosity of LWJ on the SJR and in other rivers of the Gaspé Peninsula (Boivin and Buffin-Bélanger, 2010a). To evaluate uncertainties in the LW wood volume estimates, we used the methodology explained in Boivin *et al.* (2015). Number of trunks was estimated by measuring all LW in a portion of the jam and projected for the total area of the LWJ.

Finally, quantification of LW Fluxes (F) from the watershed since 1963 was measured using a spatio-temporal analysis of the evolution of the LW rafts in the SJR delta. The spatiotemporal evolution of rafts from 1963 to 2013 is from the planimetric analysis of aerial photos (1963–2004), Landsat 7 imagery (1999–2011), and GeoEye satellite images (2012–2013). Estimated surface areas were multiplied by an estimated average wood thickness of 1.68 m (standard error of 0.06 m) (Boivin *et al.*, 2015) and divided by the proportion of air-in-wood volume measurements proposed by Thévenet *et al.* (1998) and validated by Boivin *et al.* (2015) for being used in this regional context. The comparison of LW volume estimates during the dismantling in 2015 (9500 m^3) and our measures from aerial images of the same raft area are similar (9950 m^3), this indicates that our measurement method reflects the real LW volume evacuated from the SJR since 1963. At the reach and section scale, the change in LW accumulated (ΔS) between sections was quantified using the difference of LW volume during the four years survey. The SJR was divided into 4 geomorphological sections (Upstream (PK30-60), middle (PK10-30), downstream (PK0-10) and delta section) to analyse LW budget at the reach scale and the difference between the volumes of LW accumulated quantifies LW fluxes at the section scale (F). The accumulation and re-entrainment patterns can be determined from positive and negative volume changes, respectively. Also, because the locations of each accumulation are documented using GPS data, it was possible to compare the changes in wood volumes that occurred over the four years.

Tableau 5. Methodology for the quantification of each component of the large wood budget in the Saint-Jean River

Components of large wood budget		Methods	Sources of data	Errors estimation
W	**LW volumes recruitment**	Products of the eroded floodplain areas for a given period and the standing wood volume on that floodplain.	- Aerial photography[1, 2] - Field campaigns[2]	0.52% to 4%[1]
ΔS	**LW volumes accumulated**	Annual field campaigns were conducted from 2010 to 2013 to characterize all accumulations of LW within a 60 km long river corridor.	- *In situ* measurement [1, 2] -GPS positioning [1, 2] -Air-wood volume proportion factors[3]	almost nonexistent[1,3]
F	**LW volumes evacuated at the reach scale**	Difference between LW volume accumulated in active bed between inter-annual surveys	- In situ measurement [1, 2]	almost nonexistent[1]
	LW volumes evacuated at the catchment scale	LW raft volume estimation from aerial orthophotos and satellite images.	- *In situ* average thickness measurement[1] - Aerial photos and satellite images[1,2] -Air-wood volume[1,2]	2.98%

[1] Boivin *et al.*, 2015; [2]Boivin *et al.*, accepted; [3]Thévenet *et al.*, 1998

3.6.1 Drivers of changes in large wood budgets

The analysis of the LW budget and LW dynamics with a multi-scales view requires using approaches related to ecology and hydromorphology to incorporate all contributing drivers. The evolution in time of river adjustments can be measured by the concept of morphological trajectory (Brierley *et al.*, 2008; Dufour and Piégay, 2009). The morphological trajectory allows the analysis of morphological adjustments in relation to disturbances (climatic, anthropogenic, natural ...) occurring in a watershed during a given period of time and can also be used to identify the natural state of a river (Dufour and Piégay, 2009). The interrelations between LW in river and river dynamics are multiple and occur in two directions (Wohl, 2013): LW driving fluvial dynamics, and wood responding

to fluvial dynamics. A significant change in these two principal interrelations (short and long term) may occur in space and time and can modify the dynamics of LW in river and the LW dynamics may affect the evolution of fluvial forms and processes (Collins *et al.*, 2012). Rinaldi *et al.* (2013) and Philips (2016) proposed the term of eco-hydromorphology and biogeomorphology, respectively, to crystallize the integration of ecology/biology and hydromorphology in the study of interactions between landform and life. To examine the coevolution of geomorphic features and LW budgets, measures of bar surfaces, channel width, channel margins, sinuosity index, historical LW input (W) and historical LW evacuated from the catchment (F) were extracted manually and with Transect tool box (ArcGis) from the 1963 and 1993 aerial photos, from 2004 orthophoto and from the 2013 GeoEye 1 satellite images.

The evolution of discharges is also explored in relation with the ecohydrogeomorphological trajectory. Discharge series of the SJR are only available for the 1995-2006 period. However, a longer time series (1945-2014) is available from two gauging stations on the York River, an adjacent watershed with similar length, area, topographic gradient and estuary dynamics. A linear regression between the York River and SJR specific daily discharges (CEHQ, 2014) computed for the 1995-2006 period was used to estimate the SJR discharges for the 1963-2013 period ($Q_{SJR} = Q_{YR*}(A_{SJR}/A_{YR})^{1.12}$; $R^2 = 0.92$). It should be noted that estimated discharges prevailing on the SJR for the 1963, 1993, 2004 aerial photos and the 2013 satellite images were similar: 20 m^3/s, 9 m^3/s, 21 m^3/s and 13 m^3/s, respectively, so that extraction of bar surfaces and river widths are not stage dependent.

3.7 RESULTS

3.7.1 Decennial large wood budget at the watershed scale

Figure 42 presents the LW volume input (W) in the SJR from lateral erosion for a 30 years time window and two 10 years time windows. When considering the volumes produced, the production of wood is highly significant for the three periods: 17,600 m³ (± 265m³) between 1963 and 1993 (≈590 m³/year ±8.7m³), 6923m³ (± 104m³) between 1993 and 2004 (≈630 m³/year ±9.3m³), and over 16,700m³ (± 250m³) between 2004 and 2013 (≈1860 m³/year ± 28m³). Considering the volumes per eroded area and a riparian trunk density of 0.3 tree/m^2 (Boivin *et al*., 2015) more than 41,300 m^3 (±620 m^3) of wood were introduced into the SJR over the 50-year period (≈825 m^3/y). The LW volumes input per periods reveal, however, that there has been a significantly higher production in the last ten years than in the 30 years time window (1963-1993).

The two sections with higher erosion rates are located at the same PK, regardless of the period: between PK30-35 and PK47-50 (Figure 42). However, areas where LW inputs are highest are not identical from one period to another, which indicates the variation of LW sources across time. For example, during the period 1963-1993, the highest erosion rates are concentrated between PK30-40, while the highest rate for the period 1993-2013 is located between PK 40-45. Finally, the upstream section of about 15 kilometres participates in much of the LW input throughout the watershed, regardless of the analyse period. It is worth noting that the erosion rate for the period 2004-2013 is similar to the cumulative erosion rates of the period 1963-1993 and 1993-2004 for these reaches (PK30-50), even if the period of time covered is 4 times smaller. This is the area of production and storage of LW until its transit to the downstream section and ultimately to the delta of SJR.

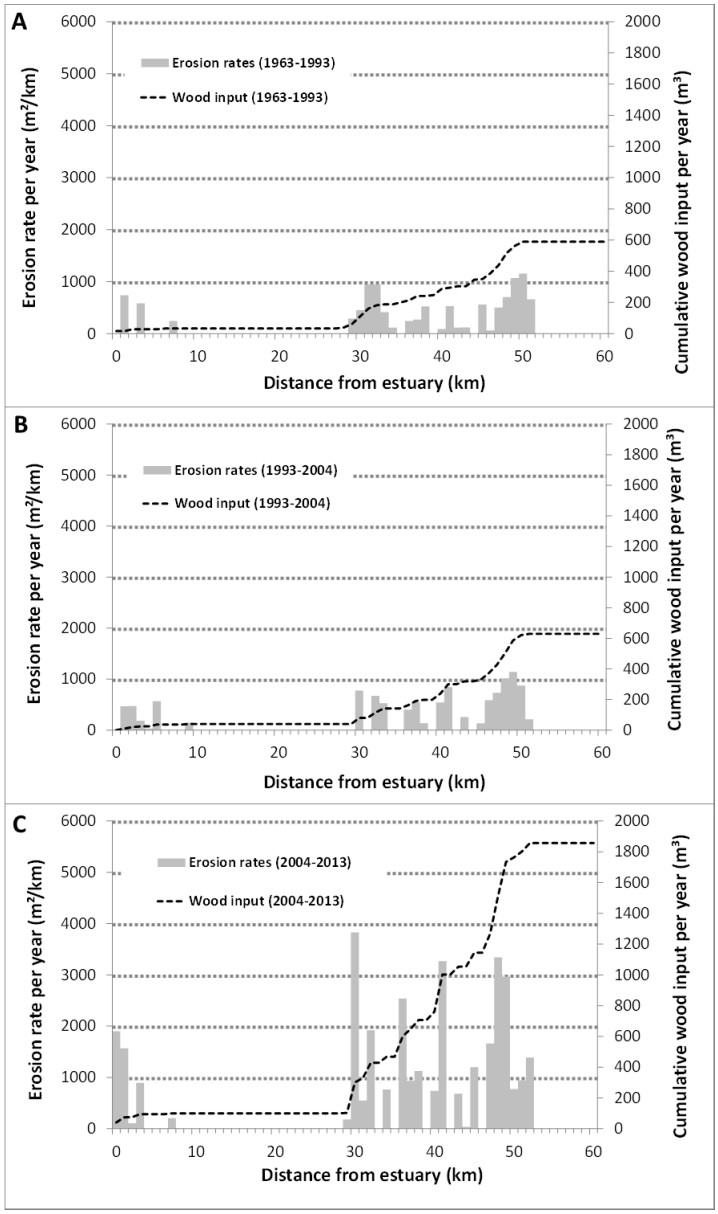


Figure 42. Large wood input by lateral erosion and erosion rates between 1963 and 1993 (A), between 1993 and 2004 (B) and between the period 2004 and 2013 (C).

Decennial and longtime application of a large wood budg*et al*lows observing that the LW dynamics change during a long period of time (Figure 43). In terms of LW volume exiting the watershed, the period between 2004 and 2013 exported more LW than all other periods since 1963. The average volume exported between 1963 and 2013 is ±560 m³ per

year; twice lower than the most recent period where LW exported is more than 884m³ per year (Figure 43). In terms of percentages, LW exported from the watershed varies from 83% of the LW input during the period 1993-2004 to 48% of the LW input between 2004 and 2013. The data show that LW retention is higher when the inputs are higher, despite the volume exported from the watershed. LW budget analysis for different periods shows variability in time. The 30-year period between 1963 and 1993 evacuated 58.8% of LW input in the river, while the period from 1993 to 2004 evacuated over 83% of LW input. For the most recent period from 2004 to 2013, 48% of LW input was evacuated from the watershed by fluvial transport. These data indicate a temporal variability in terms of river transport, but also in terms of retention of LW in a river system. The majority of periods evacuated about 50% of the inputs, while the period 1993-2004 has evacuated more than 80%, expressing a smaller retention in the system despite a similar volume in the input of LW for this period and the 50-year period. For a period of 50 years (1963-2013), 58% of LW input in the fluvial system was evacuated from the watershed by fluvial transport. These percentages of LW volumes output from the catchment indicate a high rate of mobility and rapid evacuation of LW in the SJR, but variable depending on the period studied. Due to the lack of *in-situ* data for LW accumulated in the river, the comparison between the LW volumes input and LW volumes evacuated show a retention rates between 105m³/year for the period 1993-2004 to 1253m³/per year for the most recent period (2004-2013). The average annual rate between 1963 and 2013 is about 344m³/per year in all the river system. The upstream sector mainly involved in the input of LW in the watershed of the SJR. Over the last fifty years, the upstream sector was involved in almost 94% of total input of LW by channel migration processes (lateral erosion and avulsion), 0.4% of the input for the middle section and 5.7% for the downstream section. Despite an increase in total input of LW, it is the same section that mainly contributes to the production of LW in this fluvial system.

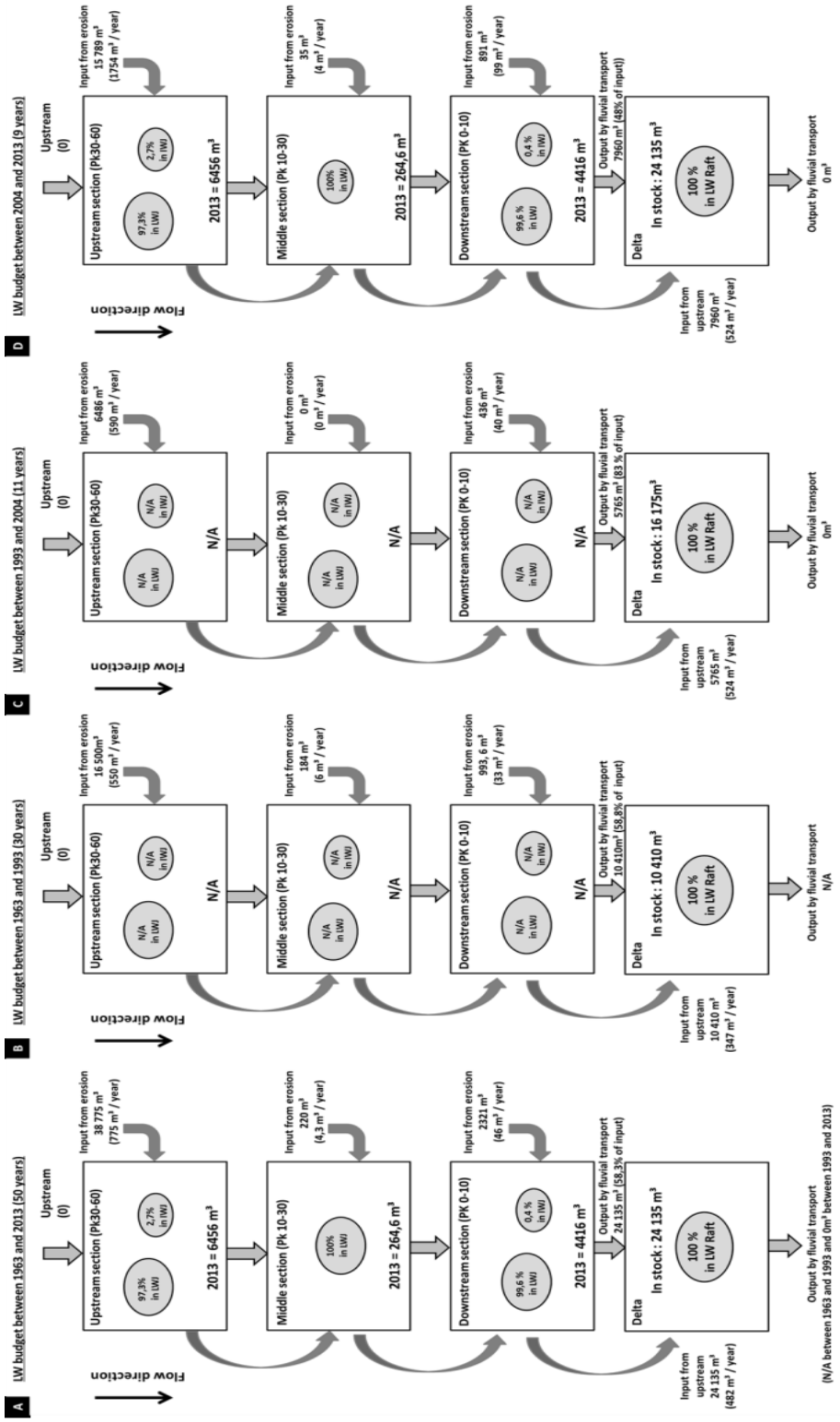


Figure 43. Large wood budget per year estimation at fluvial corridor scale between 1963 and 2013 (A), between 2010 and 2013 (B), between 1963 and 1993 (C); 1993 and 2004 (D) and between 2004 and 2013 (E).

The volume exported (F) from the watershed also varies in time. Figure 44A shows that the LW volumes produced annually are higher than the LW volumes exported from the system (except for 2000-2004 period). The period between 1963 and 1999 is similar in terms of LW input and LW exported at the watershed scale. The dynamic is different for the latest period where LW inputs are two times higher than the LW exported. Figure 44B shows the relations between LW output and LW input (at the section and watershed scale) between 1963 and 2013. The LW input are positively and significantly related to the volume of large wood output, regardless of scale. The relationship appears highly positive and significant (R^2 = 0.86, p-value= <0.05). The correlation suggests an increase of LW volume exported when LW input increases in a section or for the watershed. The relationship between LW volumes accumulated in the active channel and LW inputs or outputs is positive but, low and non-significant (Figures 44C and D). Finally, when LW volume inputs are high, mobility by fluvial transport and LW volumes exported from a river system (regardless of the scale) will be higher.

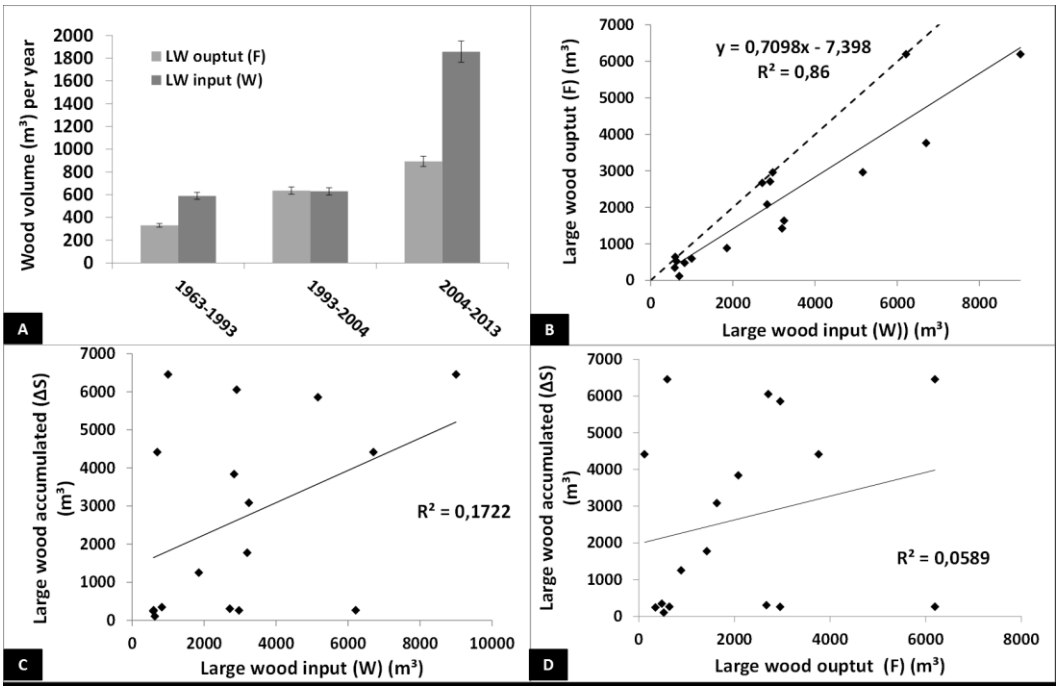


Figure 44. Relation between LW volume dynamics: (A) Between LW ouput and LW input during different periods of time; (B) between large wood output/evacuated and large wood input at the reach and watershed scale (*the dashed line represents the relationship X=Y); (C) between large wood accumulated and large wood input and; (D) large wood accumulated and large wood output/evacuated.

3.7.1 Inter-annual large wood budget at the river-reach and watershed scale

Figure 45 shows the evolution of LW volumes accumulated in the SJR system between 2010 and 2013 for the three different sections identified in the SJR and the delta and homogeneous in terms of wood accumulation. These data permit to establish a complete LW budget between 2010-2013 and to divide the river study in homogeneous sections to facilitate analysis and comparison. The distributions of LW volume along the study reach reveal two sections with most of the LWJ. LWJ monitoring of 4 years in SJR shows a steady increase since 2010, with a very large input between 2010 and 2011. Two sections present strong increase: the downstream section (PK0-10) and in the upstream section (PK30-60). The downstream section has increased by 199% of these wood volumes between 2010 and 2013. For the middle section (PK 10 to PK 29), the dynamic is the same

from year to year between 2010 and 2013. No significant accumulation and change was observed on this semi-alluvial part of the river between 2010 and 2013. In a LW budget, this is the transit area of wood, with no accumulation and lack of production of LW. For upstream section (PK30-60), the volumes of LW are evolving since 2010 particularly between PK 30-39 and 40-49 with increases of 30% and 269%, respectively. Considering the volumes accumulated in the river corridor between 2010 and 2013, LW volumes have significantly increased between 2010 and 2011 and have been relatively stable between 2011 and 2013. A total of 5950 m³ was accumulated in 2010, 9203 m³ in 2011, 10,200m³ in 2012 and over 11,000 m³ in 2013. This represents an average of 8977 m³ per year (standard deviation of 1800m³) for the four years survey in a sixty-kilometre fluvial corridor. Estimating volumes of LW accumulated over long periods is really needed to assess all components of LW budget. The data shows variability during a 4-year survey that must be considered in an approach by LW budget presented in the next section.

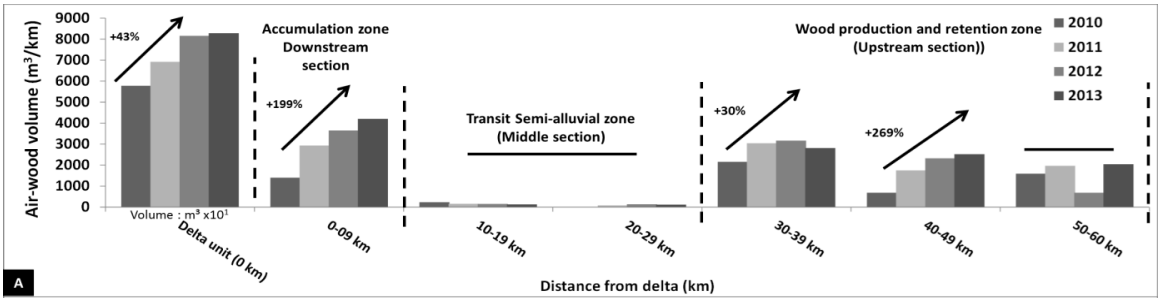


Figure 45. Wood volume variation between 2010 and 2013 in each reach section of the river

At the river-section scale, a LW budget quantifies the volumes output for each river section annually (Figure 46). For the period 2010-2013 in the upstream section (Figure 46A), a similar volume of LW was transported by fluvial transport that the volume accumulated in this section for the same period. This is 68.8% of LW inputs which were evacuated from this section during the period of 4 years. For the same period in the middle section, over 99.7% of input volumes (from erosion and from upstream section) were passed through by fluvial transport to the downstream section. Finally, the downstream section has stored nearly 44% of LW input and 56.1% of LW input in this section were

transported outside the watershed to the SJR delta. The comparison between LW input and accumulated and LW volumes output in different rivers section, for the period 2010-2013 shows that the upstream and downstream sections have exported by fluvial transport more than 40% and more than 33% of LW, respectively. The middle section has exported more than 95% of LW for the same period.

At the interannual scale, data show variability in the LW volume output for each river section (Figure 46). Between 2010-2011 and 2011-2012, a similarity in LW volumes output are observed in the three different sections. For the upstream section, almost 27% of LW was transported downstream between 2010 and 2011 and over 30% between 2011 and 2012. The LW volume output from the middle section by fluvial transport was more than 91% between 2010 and 2011 and 88% between 2011 and 2012. For the downstream section, similar volume was transported to the delta SJR between these same years of the LW budget (25.8% and 31.2%). The situation is, however, different for the period 2012-2013, as a significant decrease of LW output by fluvial transport is observed. The outputs from the upstream section drop to 8%, to 74% for the middle section and 2.3% for the downstream section. The proportion of LW in jams remains similar for the four years of measurement in a proportion of about 95% of LW in jams and less than 5% of LWI. The proportion of the LW evacuated from the watershed by fluvial transport in comparison to the volume of LW input is variable annually. For the period of 4 years, more than 39.5% of LW input by erosion has been evacuated outside the watershed. At the interannual scale, the percentage ranges of LW evacuated are from 29.9% between 2010-2011 to 67.7% between 2011 and 2012 and 11.3% between 2012 and 2013. Compared to decadal LW budget (Figure 45), the retention rate is higher in the last 4 years than over the period 1963-2010. At the section scale, the upstream and downstream sections accumulate more LW volumes than the volume of LW output by fluvial transport between 2010 and 2013. Without the middle section where the majority of LW are transported downstream, the upstream and downstream sections accumulate between 92% and 70% of LW input (Figure 46).

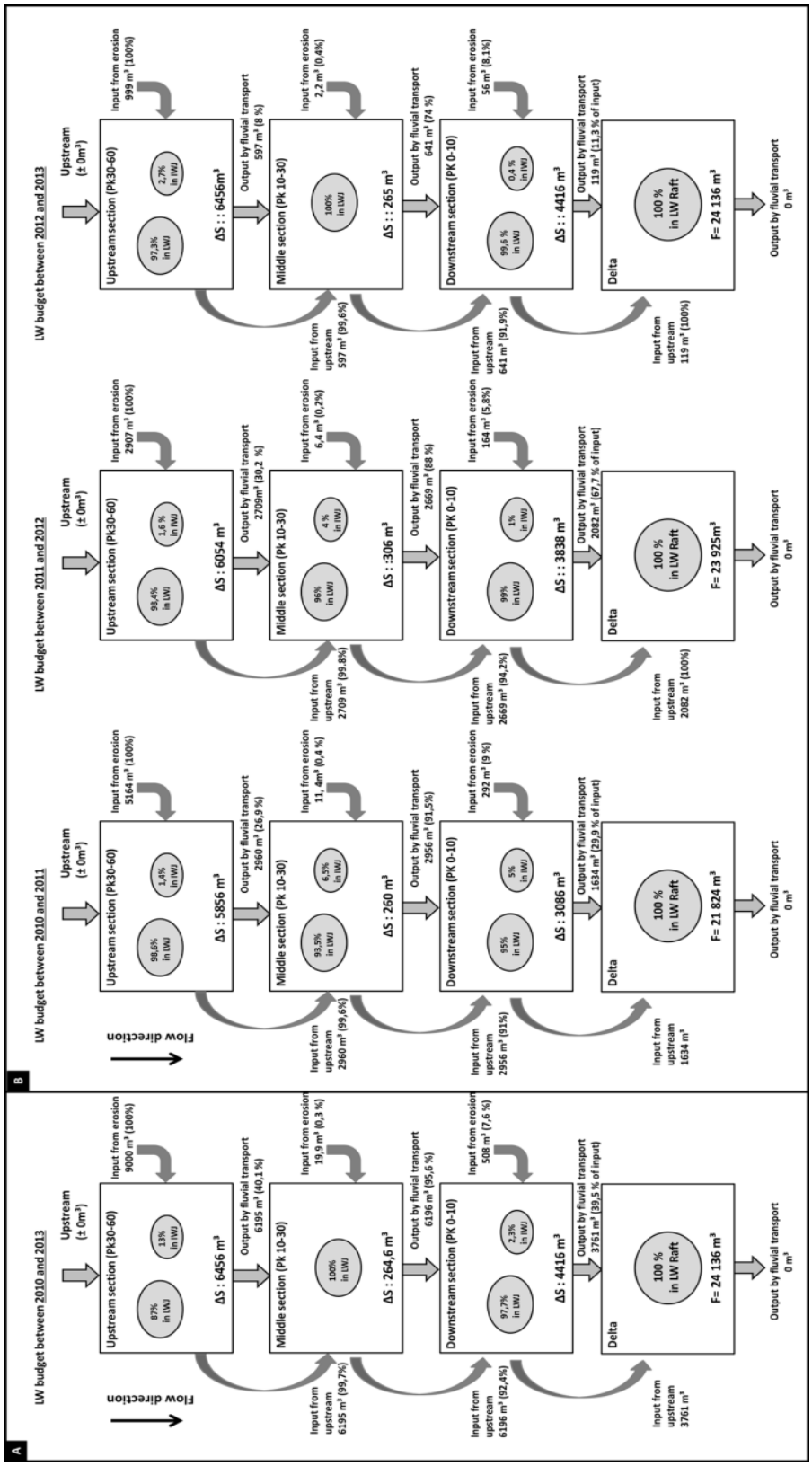


Figure 46. Interannual variation in the large wood budget at fluvial corridor scale between 2010-2013 (A) and annually between 2010-2011, 2011-2012 and 2012-2013 (B).

3.7.2 Drivers of changes in the components of the large wood budget

Figure 47 presents the evolution of the selected variables used to characterize the channel trajectory between 1963 and 2013. The figure reveals a noticeable change at the beginning of 2000 for all variables. For flow discharge, an increase in annual maximum flows is observed since 2004 as the majority of maximum flow rate is above the average of 1963 and 2013 (Figure 47A). A change in the sinuosity index is also observable over the years, especially in the downstream and upstream section where a general increase is observed since 1963 (Figure 47B). The bar surface areas are constantly increasing in the upstream and downstream, sections, but decreased for the middle section between 2004 and 2013 (Figure 47C). The bar areas increased by 63% in the upstream section between 1963 and 2013, thereby increasing the potential surface of LW accumulation in the river corridor due to the new roughness zone (Figure 47D). The width of the active channel is relatively similar between 1963 and 2013, with a low increase in between 2004 and 2013 (Figure 47D). Finally, erosion rates increase drastically for the period between 2004 and 2013 for the upstream and downstream section, but no significant changes in the middle section (Figure 47E). For all geomorphic features, changes in the morphological trajectory are concentrates in the upstream and downstream sections and the middle section has been stable for the last 50 years due to the presence of bedrock and rock outcrops constrain river dynamics.

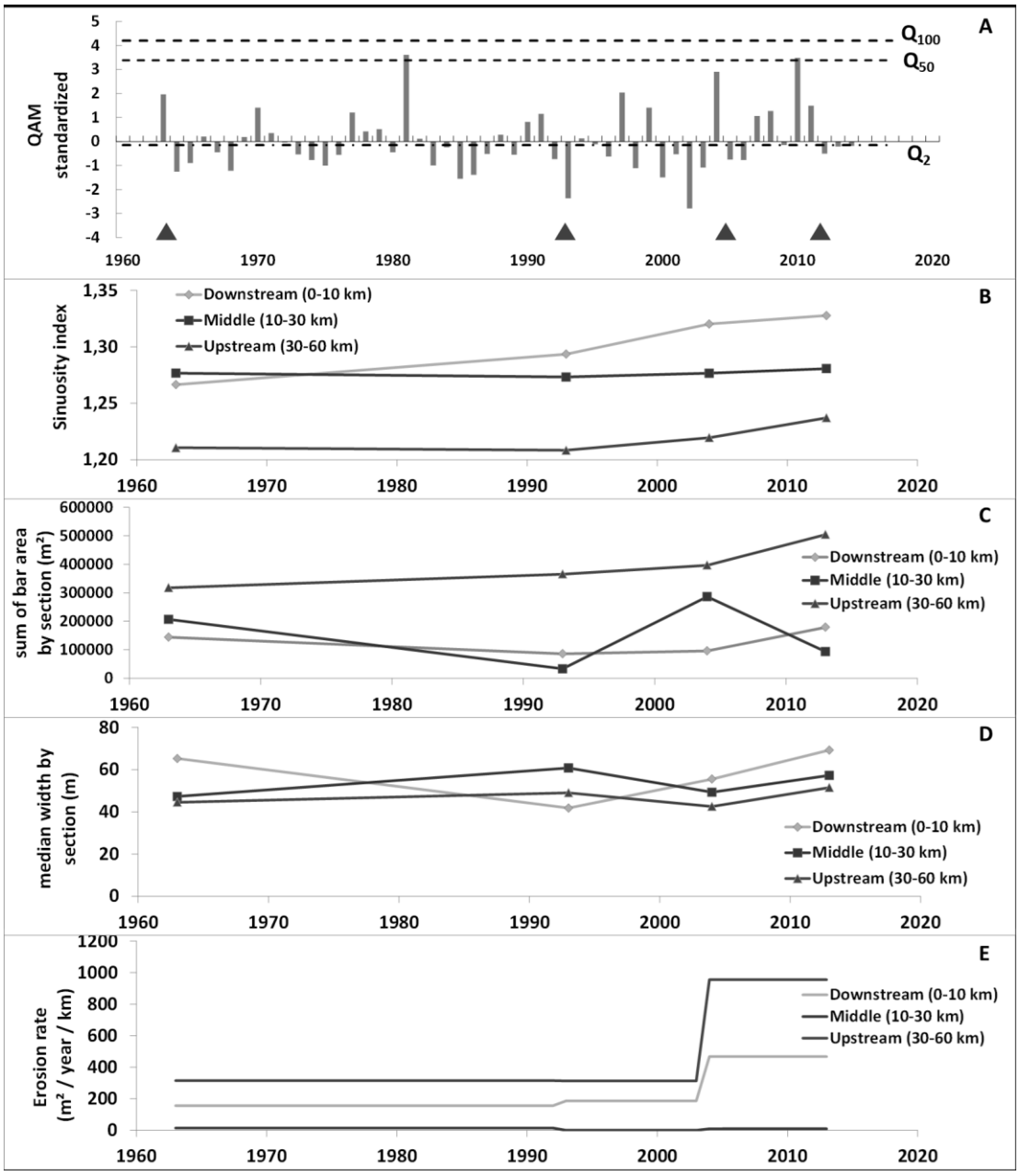


Figure 47. Eco-hydromorphological trajectory of Saint-Jean River over the period 1963-2013 for the three geomorphological unit's area. QAM: maximum annual discharge. (Triangles represent aerials photography use for analysis).

Figure 48 shows the change in LW dynamics and its potential drivers. The inputs of LW (Figure 48A) are associated with the channel migration dynamics (Figure 47E) and the LW input trajectory change after 2004. LW inputs are much higher in the upstream section, but also in the downstream section (but, lower). Analysis of LW volumes evacuated (Figure 48B) annually since 1999 (the beginning of the Landsat7 images used to analyse the evolution of the raft) show that the periods between 2010 and 2011 and between 2011 and 2012 are the years when export volumes of SJR exceed the average LW volume for the period 1999-2013. Only the years 2004 and 2007 were above average volume exported since 1999. The relationship between river discharge (Figure 47A) and LW discharge suggest a positive correlation related with flow discharge. The 4-year monitoring on LW accumulations in the river corridor show a steady increase in the volumes accumulated in the fluvial system for the upstream and downstream sections. A drastic increase between 2010 and 2011 is observed, with a smaller increase between 2011 and 2013 (Figure 48C).

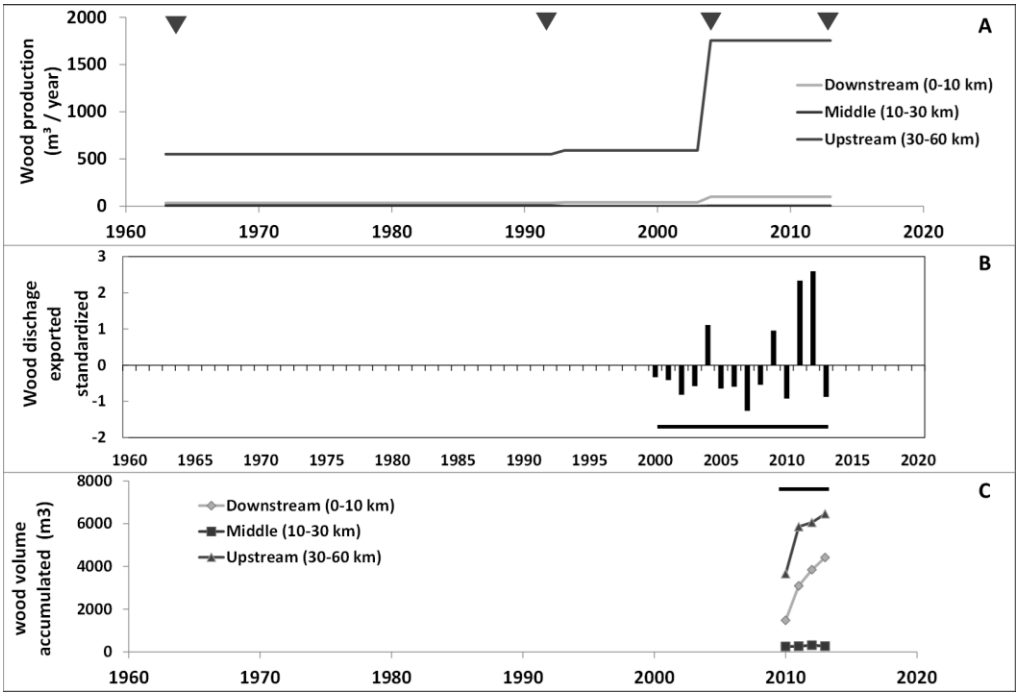


Figure 48. Large wood dynamics trajectory of Saint-Jean River over the period 1963-2013 for the three geomorphological unit's area. (Triangles represent aerials and satellites imagery use for analysis and black lines represent an annual survey).

3.8 DISCUSSION

3.8.1 Large wood budget: validation, learning and perspectives

In terms of LW budget validation, the SJR Raft is a natural trapping structure that provides a good potential site to monitor LW exported from the catchment through time. Despite a significant effort for the quantification of the LW budget for all time period, the only period for which all components could be measured and quantified was 2004-2013 (Table 6). The LW budget for that period results in an incredible small LW volume difference of only -220 m³ (1.3 % of the inputs) when considering the three major components of a LW budget. The small difference can be explained by the uncertainties of LW volume accumulations measured between 2010 and 2013 that can be divided in two types: the residual error in volume estimates and the LW volume which is deposited in the alluvial plain and not censed in this LW budget. However, it can be argued that the presence of mature forest on the riparian area limits the deposit of LW on the floodplain during flood events. For the application of LW budget at the decennial scale, uncertainty and the difficulty to apply a volume of LW accumulated is a challenge for periods with no validation and measurable data in the field or with aerial methods. This may explain the difficulty to close a LW budget and the use of estimated volume (from the volumes of W and F) for the period 1963-1993 and 1993-2004.

Tableau 6. Large wood budget estimation between 1963 and 2013. *LW volume estimations.

	1963-1993	1993-2004	2004-2013	1963-2013
W = LW input (m³) *(per year)*	**17678** *(589)*	**6923** *(629)*	**16716** *(1857)*	**41317** *(826)*
F = LW exported (m³) (out of the system in delta river) *(per year)*	**10410** *(347)*	**5765** *(524)*	**7960** *(884)*	**24135** *(483)*
ΔS = LW volume accumulated (m³) *(per year) = ΔS*	**7268*** *(242)*	**1158*** *(105)*	**8976** *(997)*	**17182** *(344)*
LW budget estimation (m³)	**N/a**	**N/a**	**-220**	**N/a**

In terms of mobility by fluvial transport, the proportion of the LW volume that will be exported out of the river per year was approximately 482m³/year (2% per year) of the total LW exported out of the river between 1963-2013. However, there is a large variation across periods analysed. Annually, for the period 1963-1993, 1.4% of LW has been exported from the system, 2.2% for 1993-2004, 21% was exported between 2004 and 2013 and between 0.8% and 8.7% was exported annually between 2010 and 2013. We observe strong relationship between LW input and LW output in the downstream and upstream sections due to the importance of LW input by lateral migration in the upstream section and due to the importance of fluvial transport of LW in the downstream section where the channel width is ≈5 times larger than the average tree height. The comparison between LW volumes inputs and LW exported are more important than those found in other rivers. At the scale of interannual monitoring, percentages of LW inputs versus LW evacuated by the catchment vary from 67.7% (2011-2012) to 11.3% (2012-2013) annually. The lowest result of 11.3% exported annually was higher than data from Schenk *et al.* (2014) on the Roanoke River where 2% of the LW was exported annually. Schenk *et al.* (2014) estimated a LW budget on a river corridor of 210 km on the Roanoke River in North Carolina (USA), where they were able to estimate the percentage of displacement of LW by different monitoring

techniques (RFID and aluminum tagged). This LW budget analysis shows that 5% of LW in the river corridor of 210 km is renewed annually by the various recruitment processes and 16% of LW moves annually (Schenk *et al.*, 2014), much lower than the dynamics in SJR. Wohl and Goode (2008) conducted an 11 years monitoring on five small streams in Colorado Mountains (drainage area between 9.2 km² to 32.3km²) and observed an annual mobility between 16% and 23%, more similar to the SJR in terms of mobility.

The 50-year floods in 2010 and in 2004 seem to have drastically changed the dynamics of LW in the SJR. In comparison, the 1981 flood (50-year Flood) does not seem to have changed the eco-morphological trajectory of the SJR, like the 2010 and the 2004 floods. However, annual data shows a great variability, which probably limits the effect of the flood of 1981 in the LW budget from 1963 to 1993. The floods of 2010 and 2004 caused severe erosion, producing a vast amount of LW in the system of the SJR, causing an imbalance in LW dynamics and different discharges. An extreme event (such the large flood of 2010) seems to alter the balance of LW in a river system. During these events, LW can be deposited on top of bar and at the limit of the bankfull channel and create a large area of LW retention. These woods are recognized in a LW budget, but only similar water level can mobilize LW deposited during a low recurrence flood. Since 2011-2012, the dynamics of LW seems to stabilize and probably much of the LW introduced in 2010 will remain in the river system for a long period of time, particularly in the downstream section. For example, lower erosion rate in the downstream section, combined with higher wood volume trapped since 2010 confirms the importance of the LW mobility by fluvial transport from the upper part of the watershed, but not enough to export outside the system in the presence of large retention bars surface upstream from the delta. The presence of this new storage zone of LW in the downstream part, few kilometres upstream of the delta confirm that less wood seems to pass to the SJR delta (output watershed system) since 2010-2011. Since 1963, the river system produces more LW than the rate of transport outside the river. However, at the inter-sections and watershed scale, mobility is important, but time-varying depending on the hydro-morphological conditions of the river during the period.

Looking forward to the application and validation of LW budget, monitoring over several years with measurement of LW accumulated is needed to understand the dynamics on multiple temporal scales. Historical estimation of LW volumes accumulated in the fluvial corridor is not easy and it remains a challenge to quantify each component of a LW budget. Our data show a relationship between the different components of a LW budget: when the LW volume input is high, LW volumes accumulated in fluvial system tends to increase too, as if the system with a certain maximum capacity to evacuate LW from the system fluvial (% of storage can be calculated when looking at the distance between x : y line and fitted line on figure 44B). Correlation between LW recruitment and export volumes seem promising to predict LW accumulated in a fluvial system, but more data in different environments would be needed to refine that relationship. The monitoring over the long term for LW accumulations in a long river corridor is rare and these data are essential to evaluate the LW mobility in the fluvial system and to estimate the residence time variability over several decades time. For analysis on long periods (50 years for example), it would be interesting to incorporate changes in tree growth to see if volumes of LW input changes significantly depending on the stage of maturity of the living trees.

3.8.2 Multi-temporal scale approach, a promising strategy to diagnose river equilibrium and associated large wood dynamics

The morphological trajectory of the Saint-Jean River suggests an increase in flood frequency and magnitude and in fluvial dynamics leading to larger input and output of LW and increasing LW volume accumulated in the river corridor since 2004 (Figure 49). Three major components in the watershed appear to have altered the natural dynamics of LW at the watershed scale: 1) the end of the log drives in the early 1960s (Fortier, 2011) by stopping the systematic cleaning of LW in river and return to a natural LW dynamics); 2) regional climate changes (Bertnachez et al., 2008; CEHQ, 2015) with three extreme events that have occurred since 1963, including two close events in 2004 and 2010 and; 3) an increase in river dynamics since 1963 (more erosion, more bars surface area...) (Boivin et

al., accepted). With a potential increase in extreme hydro-meteorological events due to climate change (CEHQ, 2015), it is expected that streams in Eastern Canada could produce and transport more LW volume in the next decade.

In the context where the majority of managers in the world have a negative perception of LW in river (Chin et al., 2008; Chin et al., 2014), multi-temporal scale approach considering jointly channel changes and LW delivery can help to predict and understand the dynamics of LW in river and the trajectory of change. The rafts of the SJR represents a classical example of negative perception. The managers have always supported the idea that the rafts were blocking the upstream and downstream migration of salmon and that thus the salmon population within the watershed was highly impacted. In 2009 and 2010, Wadham-Gagnon and Castilloux (2010) found more than 150 salmon (20% of the adult population) dead from injuries sustained by having to swim through the dense rafts. This event encouraged the managers to promote a negative perception about the Raft, albeit no mortality was observed after 2010 although the raft was still present. The result from the negative promotion was a significant decrease in the number of fishermen on the SJR. Following the negative promotion of the SJR rafts, managers carried out a vast dismantling operation to remove the large raft in the southern channel of SJR delta in February 2015 over a channel length of more than 1200 metres (Figure 40). Our results show a large variability in LW dynamics and lead to questions about this dismantling. Despite our recommendation about the conservation of the raft due to its potential positive effects on biotic and abiotic systems, managers of the river must also take in consideration public safety and economics benefits. In this current context, it may be the only way to remove jams in the delta even if the ecological question habitat remains. However, analysis of the eco-hydromorphological trajectory and dynamics encourages managers to work preventively to avoid the return of the raft and to limit the cost of the different interventions. Finally, an analysis by eco-hydromorphological trajectory can help river managers in the decision about LW in river and to make informed decisions about river managing with LW dynamics.

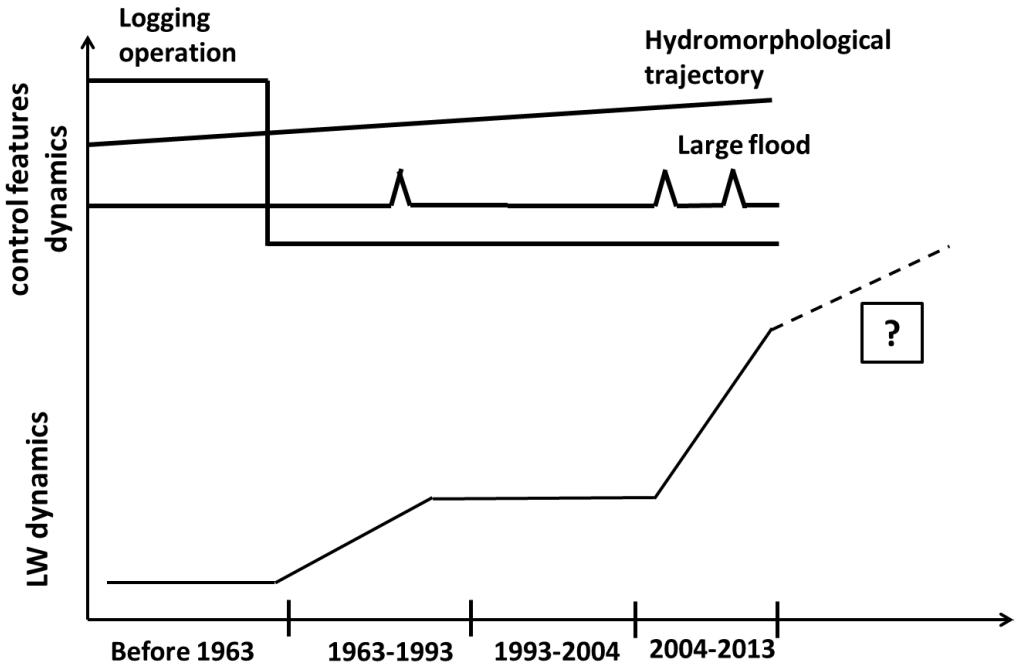


Figure 49. Large wood trajectory in the Saint-Jean River in the last 50 years (adapted from Dufour and Piégay, 2009)

3.9 CONCLUSION

The SJR Raft is a natural trapping structure that provides good potential sites to monitor LW export from the catchment through time. The results of this paper have shown the large variability in the LW budget dynamic during a 50-year period. At the decadal scale or interannual scale, the dynamics of large wood has periods when the LW input, storage and mobility differ according to the eco-hydro-morphological contexts. An extreme event seems to alter the balance of LW in a river system. Historical, changes in fluvial dynamics can change the dynamics of large wood in river. Results show that the eco-hydromorphological trajectory between 1963 and 2013 reveals a change in fluvial and large wood dynamics at the beginning of the year 2000. The morphological trajectory of the Saint-Jean River suggests an increase in fluvial dynamics due to a significant changes in hydrology leading to larger input and output of LW and increasing LW volume

accumulated in the river corridor since 2004. Three major components in the watershed appear to have altered the natural dynamics of LW at the watershed scale: 1) the end of the log drives in the early 1960s; 2) regional climate changes and extreme events; and 3) an increase of hydromorphological dynamics since 1963, but more important since early 2000. A combined approach using eco-hydromorphological trajectory can identify key variables (discharge, erosion rates, bar surface area, sinuosity, wood mobility and wood retention) necessary for understanding historical and future trajectory of LW dynamics and fluvial dynamics in gravel-bed river.

3.10 ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support was provided by Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC-CRSNG), Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT), Société de Gestion des Rivières de Gaspé (SGRG), Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF), Ville de Gaspé, Fondation du Saumon du Grand Gaspé, and Faune Québec. We thank the fluvial group at UQAR for their excellent assistance during fieldwork.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La dynamique des bois morts en rivière à différentes échelles spatiales et temporelles soulève plusieurs questions fondamentales et appliquées en termes de recherche et de gestion des cours d'eau. Au niveau régional, ces questions concernent la dynamique future des embâcles de bois majeurs dans le delta de la RSJ et de la dynamique du bois à l'échelle de son bassin versant. À l'échelle de la recherche internationale, ces questions concernent la variabilité interannuelle dans les taux de recrutement, d'accumulation, de transport et d'évacuation de BM à l'échelle du tronçon fluvial jusqu'à l'échelle du bassin versant, mais aussi sur la dynamique du BM dans les rivières de régions froides avec couvert de glace.

L'ensemble de cette thèse et les liens entre les trois articles apportent une contribution majeure à nos connaissances sur les trois principales composantes (*intrant, stocké et évacué)* du bois mort en rivière (Figure 50). Les trois chapitres de la thèse augmentent significativement nos connaissances sur le cas particulier des embâcles de la RSJ, mais aussi sur la dynamique du bois mort en rivière de régions froides par une approche de bilan ligneux à multiples échelles spatiales et temporelles. Ce projet de recherche s'est attardé à analyser la dynamique spatio-temporelle du fonctionnement des embâcles dans le delta de la RSJ, à quantifier les différentes composantes de la dynamique du bois mort à multiples échelles spatiales et temporelles et à identifier les facteurs clés influençant la dynamique du BM à ces différentes échelles (Figure 50). Finalement, cette thèse a permis de valider et de quantifier les différentes composantes d'un bilan ligneux en utilisant une structure naturelle (raft de la RSJ) d'accumulation des BM évacués d'un système fluvial pendant plus de 50 ans.

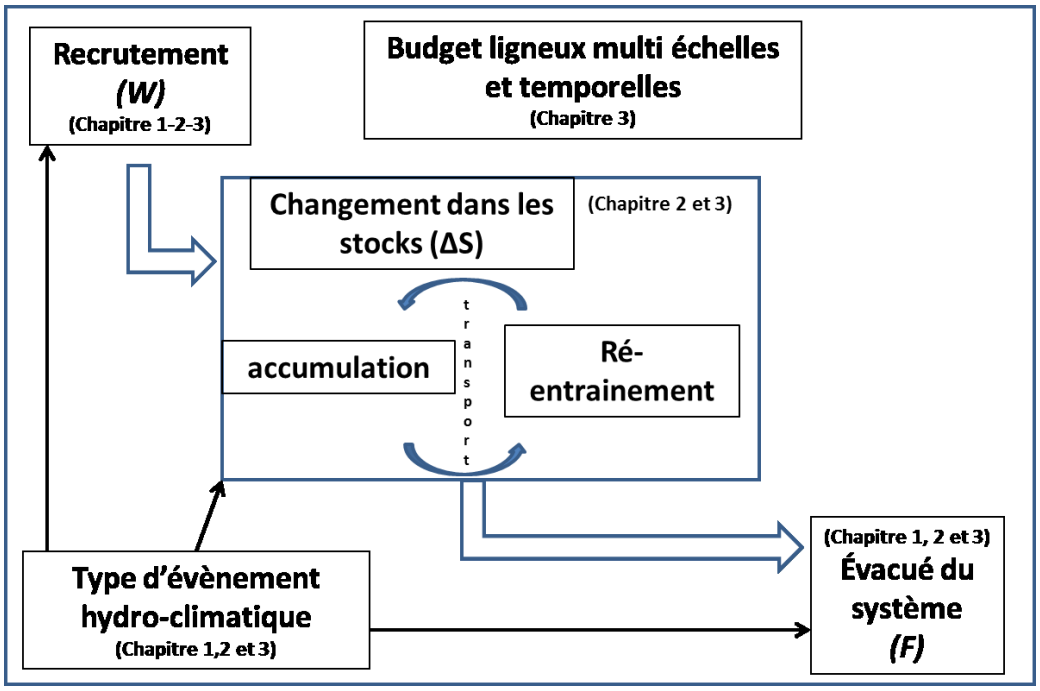


Figure 50. Les principales composantes de la dynamique du bois mort analysées dans cette thèse et les liens entre les différents chapitres.

La thèse avait pour but de répondre à trois objectifs spécifiques et les réponses ont été amenées dans les chapitres 1 à 3 respectivement:

1) Analyser l'historique, le fonctionnement et la dynamique temporelle des embâcles de bois majeurs dans le delta de la RSJ et à l'échelle du bassin versant. (Chapitre 1);

2) Analyser la variabilité spatio-temporelle du recrutement, des accumulations et des bois en transit à l'échelle d'un bassin versant et à l'échelle interannuelle afin d'identifier l'influence des évènements hydrométéorologiques de forte intensité (Chapitre 2);

3) Quantifier et valider un bilan ligneux à différentes échelles spatiales (Tronçon, corridor et bassin versant) et temporelles (50 ans, 10 ans et annuellement) afin d'identifier les relations entre la dynamique fluviale et la dynamique du bois mort (Chapitre 3).

Cette thèse constitue aussi une réponse aux trois défis de la recherche actuelle sur la dynamique du bois mort identifiée en introduction. Le premier défi concernait l'absence de données sur les moyennes et grandes rivières et sur les rivières de régions froides. Par la situation géographique et la taille du bassin versant de la RSJ, cette thèse a permis d'augmenter significativement nos connaissances sur la dynamique du bois mort dans un long corridor fluvial (60 km) à l'intérieur d'un grand bassin versant (1130 km²) et a montré les impacts potentiels des processus glaciels sur la mobilité et l'accumulation des bois en rivière. La seconde lacune se rapportait à la nécessité de calibrer et d'appliquer des analyses par bilan ligneux à différentes échelles spatiales et temporelles. Avec le chapitre 3, nous avons appliqué et validé un bilan ligneux à multiples échelles spatiales, en appuyant notre bilan par quatre années de terrain et de données historiques depuis plus de 50 ans. Finalement, le troisième défi était en lien avec la variabilité temporelle de la dynamique du bois mort. Les trois chapitres ont quantifié et montré la grande variabilité des composantes principales d'un bilan ligneux, autant à l'échelle de la crue qu'à l'échelle décennale. Par l'utilisation novatrice de caméra vidéo *in situ* dans le chapitre 2, il a été possible de quantifier trois évènements hydroclimatiques afin de mesurer les volumes de bois transportés selon les conditions hydrométéorologiques et ainsi quantifier pour la première fois, l'influence de la dynamique glacielle.

L'approche préconisée dans cette thèse est novatrice, combinant plus de quatre années de mesures *in situ* sur un corridor fluvial de 60 kilomètres de long et par l'analyse de documents historiques depuis la fin du 19e siècle. Mis à part les études de Boivin et Buffin-Bélanger (2010a) et plus récemment Kramer et Wohl (2014), aucune étude ne s'était attardée sur la dynamique du bois mort en rivière au Québec et pour les régions froides. Plus encore, il s'agit de la première étude à appliquer une analyse par bilan ligneux à l'échelle d'un bassin versant et à différentes échelles temporelles: interannuelle, décennal et sur plus de 50 ans.

Rappel des principales contributions de la thèse sur la dynamique du bois mort des régions froides

Jusqu'au moment de son démantèlement en 2015, l'embâcle de bois dans le delta de la rivière Saint-Jean était l'un des plus gros au monde connu à ce jour. À notre connaissance, il existe seulement deux autres exemples similaires dans le monde, mais avec une taille plus petite et ces accumulations ne bloquent pas complètement l'embouchure d'un cours d'eau. Le premier cas se trouve en Tasmanie où une accumulation de un kilomètre de long engendre des problématiques au niveau des agriculteurs locaux (Comm. Pers. Ian D. Rutherfurd, 2015) et le deuxième cas est un embâcle majeur sur la rivière Pilcomayo en Amérique du Sud (Martin-Vide *et al*., 2014). Cependant, les embâcles de la RSJ, qui se sont accumulés dans l'embouchure du bassin versant bloquent complètement l'embouchure de la RSJ et ont permis d'estimer la majorité des volumes de BM exportée par le système fluvial depuis les années 1960. Il n'existe aucun autre site d'étude similaire où il est possible d'utiliser la morphologie naturelle d'un cours d'eau afin de quantifier les volumes de bois exportés d'un bassin versant et sur une aussi longue période de temps. D'un point de vue opérationnel, les résultats de cette thèse ont orienté les gestionnaires de la RSJ dans les actions nécessaires à appliquer suite au démantèlement afin de s'assurer de la pérennité de ces actions, étant donné les coûts élevés associés à ce type d'intervention en rivière. Du côté de la recherche davantage fondamentale, les résultats de cette étude permettent de dégager quatre contributions majeures en ce qui a trait à la dynamique du bois mort en rivière de région froide. Les quatre principales contributions de cette thèse sont résumées ici.

C1. Les embâcles de bois majeurs dans le delta de la rivière Saint-Jean sont naturels et la présence de bois mort fait partie intégrante de la dynamique fluviale dans la RSJ (Chapitre 1).

Le *raft* de la rivière Saint-Jean sur la péninsule de Gaspé représente une quantité exceptionnelle et inhabituelle de bois morts pour les temps modernes où le nettoyage systématique des rivières est souvent la norme (Wohl, 2014). Les données historiques et

actuelles montrent que les embâcles de la RSJ sont naturels, comme le suggère la présence d'un embâcle de 800 mètres de long au 19e siècle (Blaiklock, 1845). L'absence d'embâcle entre la fin du 19e siècle et le milieu du 20e siècle est sans doute liée à la drave qui limitait les accumulations de bois dans le delta et le bassin versant de la RSJ. Les embâcles se sont reformés rapidement à partir du début des années 1960, coïncidant avec l'arrêt de la drave sur les rivières de Gaspé. Les accumulations dans le delta ont commencé en 1963, mais une grande fluctuation dans l'augmentation de ce *raft* a été observée depuis le début de sa formation. Les embâcles dans le delta de la Saint-Jean se sont reformés au fil des années et près de trois kilomètres de bois étaient recensés dans le delta à la fin de cette étude. La morphologie du delta avec des chenaux étroits et la dynamique du bois mort dans le bassin versant ont favorisé la mise en place d'embâcles majeurs et naturels dans le delta de la RSJ.

La rivière est caractérisée par une importante dynamique du bois mort qui favorise la formation d'embâcles inhabituels, mais naturels dans le delta et dans le bassin versant. Nos résultats montrent que la quasi-totalité des BM est produite par la migration latérale naturelle et par la morphologie de la rivière. La densité des arbres en bandes riveraines est très élevée, avec la présence de forêts matures dans les secteurs d'érosion, ce qui favorise un recrutement important de BM pour le système. Au niveau des accumulations de BM dans le corridor fluvial, deux zones (amont et aval) accumulent la majorité des BM et les résultats montrent une forte mobilité qui peut varier fortement d'une année à l'autre. Avec ces zones d'accumulations en constante augmentation, une grande quantité de BM est toujours potentiellement disponible dans le bassin versant pour le transport vers le delta. Avec ce chapitre, nous confirmons que le cas de la rivière Saint-Jean est un site d'étude exceptionnelle et unique afin d'appliquer et de valider un budget ligneux et de quantifier les différentes composantes et facteurs clés dans la dynamique du bois mort à l'échelle de bassin versant.

C2. Les évènements hydrométéorologiques extrêmes influencent la dynamique du bois mort (Chapitre 2 et 3)

L'Est-du-Québec et du Canada est propice aux évènements extrêmes, dus en grande partie aux tempêtes post-tropicales qui viennent souvent s'abattre sur cette partie du Canada. Les prévisions hydrométéorologiques prévoient une augmentation de ces évènements dans un contexte de changements climatiques, ce qui pourrait engendrer une plus grande production et mobilité des BM dans ces cours d'eau.

Dans la RSJ, la crue de décembre 2010 est un des exemples frappants des effets potentiels qu'une crue de faible récurrence peut avoir sur la dynamique du BM. L'augmentation du recrutement, des volumes stockés dans le corridor de la Saint-Jean et des volumes exportés dans le delta entre 2010 et 2011 n'a pas de comparable dans le suivi historique de 60 ans sur la dynamique du BM dans la Saint-Jean présentée dans le chapitre 1 et 3. L'évènement hydrométéorologique intense de décembre 2010 a engendré une crue majeure dans la région, ce qui a provoqué une migration latérale majeure et des avulsions dans les rivières de Gaspé. Avec ces taux d'érosion majeurs et les fortes densités en bande riveraine, une grande quantité de BM ont été introduits dans les cours d'eau de la région de Gaspé durant cet évènement. Les données de cette thèse ont permis de quantifier l'effet de cet évènement extrême sur la dynamique du bois mort à différentes échelles spatiales. Finalement, les analyses présentées au chapitre 2 ont montré que plusieurs facteurs clés liés à l'hydrogéomorphologie et la dynamique du bois mort restaient spatialement similaires malgré une crue extrême comme celle de 2010. La morphologie de la rivière influence et contrôle en partie les volumes de BM accumulés dans un corridor fluvial. Dans un contexte de changement climatique et de protection accrue des bandes riveraines, il est à prévoir qu'une plus grande quantité de bois morts fassent partie intégrante de la dynamique fluviale des cours d'eau de la Gaspésie. Avec une augmentation de la dynamique du bois en rivière, les gestionnaires de cours d'eau devront considérer cette dynamique dans la gestion et la prévention des risques dans les rivières de l'Est-du-Québec pour les prochaines décennies.

C3. La dynamique fluvio-glacielle a un impact majeur sur la distribution et le transport du bois en région froide (Chapitre 2)

L'estimation du transport de bois selon le débit de la rivière n'est pas une relation simple et linéaire, particulièrement dans les rivières de régions froides. La variabilité interannuelle dans les cycles de production et de transport du bois dans un bassin versant, ainsi que la dynamique de la glace complique encore davantage cette relation. La dynamique des glaces de rivière influence le transport et la mobilité interannuelle des BM dans les rivières de régions froides. Il s'agit d'une contribution majeure de cette thèse que de mettre en lumière et quantifier l'effet de la dynamique glacielle sur la dynamique du bois mort en rivière. Au niveau de la mobilité, les données de vidéo caméra ont permis de quantifier les volumes de bois transporté durant trois évènements hydroclimatiques contrastés (deux évènements en eau libre et un évènement avec débâcle mécanique de glace). Les résultats ont montré que le volume total de BM n'était pas automatiquement supérieur lors d'un évènement avec débâcles de glace, mais que l'intensité (nombre de BM par minute ou par heure) pouvait être jusqu'à dix fois supérieures durant un évènement avec débâcle glacielle, comparativement à un évènement hydroclimatique en eau libre. Au niveau de la distribution spatiale des BM dans un corridor fluvial, nos données montrent que la présence d'embâcles de glace peut déposer des BM à la limite du chenal et même au niveau de la plaine alluviale avec des débits très faibles. Les hauteurs d'eau atteinte durant un évènement d'embâcle de glace dépassent généralement le niveau plein bord et peuvent atteindre des niveaux d'eau atteints uniquement par une crue de récurrence 50 ou 100 ans. Ainsi, une quantité importante de BM peut être stockée dans un corridor fluvial sur de longues périodes de temps avant d'être remobilisée, soit par une crue extrême, soit par un évènement avec couverts de glace ou encore par la migration du chenal.

C4. Variabilité interannuelle et décennale importante des bilans ligneux selon les conditions écohydromorphologiques (Chapitre 3).

Une analyse par bilans ligneux et une analyse de la trajectoire écohydrophormologique sont des outils prometteurs pour la gestion et la compréhension de

la dynamique des BM en rivière. Le chapitre 3 a montré et quantifié la très grande variabilité d'un bilan ligneux à multiples échelles spatiales et temporelles. Autant à l'échelle interannuelle, qu'à l'échelle décennale, la dynamique du bois mort comporte des périodes où l'entrée de bois, le stockage et la mobilité diffèrent selon les contextes écohydromorphologiques. Le nombre d'évènements hydroclimatiques extrêmes dans la dernière décennie a engendré des changements significatifs au niveau de la géomorphologie et de la dynamique des bois en rivière. La production de bois par la migration latérale de la rivière a plus que triplé au cours des dix dernières années comparativement à la période de 1963 à 2004. Le volume de bois produits sur une période de 9 ans entre 2004 et 2013 est égal à toute la production de bois mort sur une période de 30 ans entre 1963 et 1993. Cette augmentation de production en bois, jumelé avec une augmentation de la quantité de sédiments dans le système fluvial a eu comme conséquence d'augmenter significativement la quantité de bois morts accumulée dans le corridor fluvial et d'augmenter le nombre de sites d'accumulation. Avec ce chapitre, nous avons présenté la trajectoire écohydromorphologique et le bilan ligneux de la RSJ sur une période de 50 ans, une première dans l'étude de la dynamique du bois mort à l'échelle mondiale. La trajectoire morphologique de la rivière Saint-Jean suggère une dynamique fluviale active en raison d'un changement significatif dans l'hydrologie conduisant à une plus grande production et mobilité des BM et par l'augmentation des volumes accumulés dans le corridor de la RSJ depuis 2004. L'analyse de terrain et de documents historiques montre trois changements majeurs qui ont marqué la dynamique fluviale et du bois dans la RSJ: 1) l'arrêt de la drave au début des années 1960 comme marqueur important dans le retour d'une dynamique naturelle du bois; 2) un changement significatif dans le climat régional de la péninsule gaspésienne et une augmentation de la récurrence des évènements extrêmes et; 3) une augmentation dans la dynamique hydrogéomorphologique de la RSJ depuis 1963. Ces trois facteurs clés ont modifié la dynamique fluviale et la dynamique du bois mort à l'échelle d'un bassin versant et un suivi serait pertinent afin de valider la trajectoire future dans cette rivière dynamique.

Limites de cette recherche

Les trois articles présentés dans cette thèse comportent des limites que nous devons prendre en considération pour l'application et la généralisation des résultats.

Premièrement, l'ensemble des analyses ont été conditionnées selon la disponibilité des images aériennes et satellites, ce qui engendre des analyses sur des intervalles de temps différents (30 ans, 10 ans et annuels). Il aurait été intéressant d'avoir accès à des photographies aériennes tous les 10 ans afin de quantifier plus précisément la variabilité interdécennale durant la période de 1963 à 1993.

Deuxièmement, au niveau de la quantification des volumes produits (W) par la migration latérale du cours d'eau, nous avons utilisé une méthode de mesure basée sur le DHB afin d'estimer les densités en bande riveraine. Le volume racinaire n'est pas inclus dans cette méthode et il serait pertinent d'inclure ce volume dans la production de bois par la migration d'un chenal. Par l'érosion, l'ensemble d'un arbre (racines et tronc) est apporté dans la rivière, mais la méthode de mesure par DHB considère uniquement le volume aérien. De plus, nous avons considéré le stade de maturité des forêts riveraines actuel dans nos calculs de densité en bande riveraine historique. Afin d'augmenter notre niveau de précision sur les volumes produits, il serait pertinent d'inclure la variabilité historique dans les densités en bande riveraine. Les forêts riveraines évoluent dans le temps (croissance, mortalité, coupes forestières….), ce qui peut engendrer des différences dans les densités en bande riveraine. Étant donné le statut de rivière à saumon de la RSJ, les changements de volumes sur une période de 50 ans sont minimes, mais l'intégration de ces changements en bande riveraine permettrait d'augmenter notre niveau de précision dans le recrutement des BM par l'érosion des berges.

Troisièmement, au niveau de la quantification des volumes accumulés (ΔS) dans le bassin versant, nous avons uniquement considéré les volumes de BM accumulés à l'intérieur du niveau plein bord (chenal actif). Étant donné le temps nécessaire à la mesure de l'ensemble des accumulations de bois mort sur soixante kilomètres de rivière, il était

impossible de mesurer les volumes de BM dans la plaine alluviale. Dans la RSJ, les volumes stockés dans la plaine alluviale semblent minimes, étant donné la présence de forêt mature en marge du chenal, limitant le transport du bois dans la plaine. Cependant, il serait pertinent d'inclure ces stocks dans de prochaine recherche afin d'augmenter le niveau de précision des analyses par bilan ligneux.

Finalement, au niveau de la mobilité des bois morts (F) durant les évènements de crues, il serait nécessaire de quantifier un plus grand nombre d'évènements afin de quantifier la variabilité dans les taux de transport. Cette étude a été limitée à l'analyse du transport du bois durant trois évènements de crue et a montré une grande variabilité entre ces évènements. Afin de raffiner ce type d'analyse, il serait nécessaire de quantifier plus d'évènements et sur de longues périodes de temps en continu. Une seconde limite en lien avec l'utilisation de caméras vidéo *in-situ* concerne l'absence de donnée durant la nuit. L'absence de donnée durant la nuit engendre une sous-estimation dans les volumes extraits par l'analyse vidéo, lorsqu'un évènement de crue survient à compter de la nuit. Une solution serait d'installer un système d'éclairage en bordure des cours d'eau, mais est difficilement applicable, couteuse et non socialement acceptable dans un contexte de rivière en milieu naturel. Finalement, la détection manuelle des BM sur les images peut être longue et fastidieuse, limitant le nombre d'évènements dans nos analyses. Les algorithmes développés actuellement en France ne sont pas encore totalement exportables à d'autres sites. L'amélioration de ces algorithmes est nécessaire afin d'optimiser la détection automatique des bois morts par imagerie et pour permettre l'application sur plusieurs sites situés dans des environnements diversifiés. La méthode par détection automatique est novatrice et a un très grand potentiel d'application pour la gestion des bois en rivière. Un autre problème lié à la détection automatique dans les rivières de régions froides est la présence d'évènement par débâcle de glace mécanique où la détection des bois est impossible étant donné le mélange de glace et bois mort qui empêche la détection automatique. Il s'agit de défis de taille pour les prochaines études utilisant cette méthode, mais nécessaire pour raffiner ce type d'analyse.

Originalité de la thèse

L'originalité de cette thèse se résume en trois points principaux. Premièrement, la rivière Saint-Jean possédait un des plus grands complexes d'embâcles de bois dans son embouchure et aucun autre cas comparable n'est connu à ce jour. Un des seuls cas connus et documentés remonte au milieu du 19e siècle sur la Red River, un affluent du Mississippi (Lyell, 1830; Triska, 1984). Le *Great Raft* de la Red River était un radeau de surface, bloquant entre 390 et 480 km du chenal principal (Triska, 1984) et son démantèlement a été réalisé sur plusieurs années entre 1839 et 1860 afin de permettre le transport maritime sur cette rivière. Autrement, peu de cas similaires ne sont connus aujourd'hui, mais devaient exister sur d'autres cours d'eau dans le monde, avant le *nettoyage* systématique des cours d'eau (Wohl, 2014). Avec cette thèse, nous avons quantifié et expliqué l'évolution temporelle et la dynamique de cet embâcle unique au monde.

Deuxièmement, la majorité des études sur les bilans ligneux ont été effectuées sur des petits cours d'eau (Benda et Sias, 2003) ou de courts tronçons et sur des échelles temporelles très courtes. D'autres études ont porté sur de plus grands corridors fluviaux et ont utilisé des barrages ou des retenues d'eau anthropique afin d'estimer des bilans ligneux (Moulin et Piégay, 2004; Seo *et al.*, 2010). Peu d'études ont eu lieu sur de longs tronçons de dizaines de kilomètres et dans de grandes rivières (Schenk *et al.*, 2014; Moulin *et al*., 2011) et encore moins en utilisant une structure naturelle d'accumulation de bois sur une période de plus de 50 ans, comme le delta de la Saint-Jean peut nous offrir avec ces accumulations annuelles de 1963 à 2014. Avec ce projet de recherche, nous avons pu établir un bilan ligneux à multiples échelles spatiales (tronçons de quelques kilomètres à un bassin versant de plus de 1100 km²) et multiples échelles temporelles (de l'annuelle à plus de 50 ans). Il s'agit d'une avancée majeure dans notre connaissance sur la variabilité à multiples échelles de la dynamique du bois mort en rivière.

Finalement, la méthodologie préconisée par une approche de quantification multi-source (terrain, photo aérienne, radar, etc.) a porté fruit. Le nombre d'années de suivi de quatre ans sur le terrain et le nombre de mois de prise de mesure *in situ* de plus de huit mois

constitue une base de données importante pour quantifier la dynamique spatio-temporelle du bois mort en rivière. Plus de 1000 EBM et plus de 2000 BMI ont été mesurés entre l'été 2010 et l'été 2013, sans compter les multiples terrains sporadiques afin de gérer les 30TO de données vidéo. Au niveau méthodologique, l'utilisation de caméra vidéo *in situ* et la quantification à l'aide de cet outil est novateur en science fluviale et cette thèse a permis un avancement considérable dans l'utilisation de cette nouvelle technologie appliquée en rivière. L'estimation de la marge d'erreur dans les mesures de volumes présentés dans l'introduction et dans le chapitre 1 est aussi novatrice et permet de valider les marges d'erreur dans l'estimation des volumes en BM. Ces analyses et résultats peuvent être transférables dans d'autres environnements.

Perspectives de recherche

Cette thèse a contribué à améliorer nos connaissances sur la dynamique du BM en rivières de régions froides et sur la variabilité interannuelle des différentes composantes d'un bilan ligneux. Malgré ces nouvelles connaissances sur les bilans ligneux à l'échelle des bassins versants, des questions restent en suspens et certaines caractéristiques de la dynamique du BM restent à documenter. Premièrement, le temps de résidence des BM dans un bassin versant, de son introduction jusqu'à sa sortie du système fluvial est peu connu et est essentiel afin de quantifier la vitesse de mobilité des BM à travers un long corridor fluvial. La provenance de chaque BM d'un système est aussi méconnue. Il serait judicieux de jumeler ces données avec le temps de résidence dans un système pour connaître la distance de transport, la mobilité et le temps requis pour effectuer un cycle complet de la dynamique du BM en rivière, de sa production jusqu'à sa sortie d'un système fluvial. Quel est le temps nécessaire pour le transport du BM et quelle est la distance de transport annuellement de ces BM à différentes échelles spatiales et temporelles? Quels sont les facteurs clés qui influencent sur ces temps de transit? Peut-on établir des patrons de mobilités et de temps de résidences selon les conditions hydrométéorologiques? Le temps de résidences et les taux de déplacement sont-ils similaires dans les rivières de régions froides et les rivières sans dynamique glacielle?

Deuxièmement, les résultats d'analyses par vidéo lors d'évènements hydrométéorologiques montrent une grande variabilité dans les volumes de BM transportés. Il serait nécessaire d'augmenter le nombre d'évènements analysé afin de bien comprendre les facteurs contrôlant les processus de transport et aussi la variabilité. Le traitement automatisé par un programme de détection automatique est souhaitable afin de diminuer le temps de traitement d'images vidéo et le développement d'algorithmes applicable sur différents sites d'étude est un défi de taille. Les développements récents réalisés par l'ENS-Lyon au niveau de la détection automatique sont encourageants et devraient mener à la création d'un logiciel permettant de traiter des milliers d'heures de vidéo de manière automatique et plus rapide (Comm. Per. Pierre Lemaire, 2015). Dans les défis futurs, quelle est l'influence de plusieurs crues successives sur les volumes de BM transportés?

Troisièmement, cette thèse a mis en lumière et quantifié les principaux liens entre la dynamique glacielle et la mobilité des bois en rivière durant un évènement de débâcle mécanique. Ce créneau est nouveau et quatre principaux liens restent à quantifier et à explorer: 1) Quels sont les effets des embâcles et des débâcles de glace sur le recrutement des BM?; 2) Est-ce que les glaces ont un effet sur la densité, la structure et sur la dynamique d'accumulation des bois dans un système fluvial de régions froides?; 3) Quelle est l'importance des embâcles/débâcles de glace sur la mobilisation et sur la distance de transport des bois en rivière versus les crues sans glace?; 4) Quel est l'effet de la glace sur la fragmentation et l'abrasion des BM durant leur transport par débâcle glacielle?.

Finalement, il serait nécessaire d'effectuer le même type d'analyse sur d'autres rivières afin de comprendre la dynamique des bois morts à une échelle régionale et même provinciale afin de permettre une plus grande généralisation de ces données. Est-ce que la rivière Saint-Jean est réellement différente des autres rivières ou bien la dynamique des BM (production, mobilité, accumulation et évacuation des stocks) est transférable aux autres rivières semi-alluviales de l'Est-du-Québec et ailleurs dans le monde ?

Cette thèse a initié la recherche sur les liens et relations de la glace avec la dynamique du BM. L'approche multiéchelles (temporelles et spatiale) a permis d'identifier et de

quantifier la grande variabilité au niveau de la dynamique du BM. Les liens entre la géomorphologie fluviale et le BM sont prometteurs pour expliquer la présence ou l'absence de BM dans un système. Finalement, cette thèse a validé et appliqué un bilan ligneux à multiples échelles spatiales et temporelles, une première à notre connaissance et les résultats de ce bilan ligneux montrent les possibilités d'utiliser cette méthode de quantifications dans l'estimation de la production du BM à l'échelle d'un bassin, au même titre qu'un bilan hydrique. Les connaissances acquises durant ce projet et les questions de recherche soulevées permettront d'améliorer nos méthodes de gestion et de compréhension générale de nos cours d'eau avec BM. Cette meilleure intégration de la dynamique du BM évitera le retrait systématique de tous les bois présents dans nos cours d'eau, comme cela s'est effectué en Europe et aux États-Unis pendant des décennies. Les projets de recherches sur la dynamique du BM en rivière dans l'Est-du-Canada sont récents et les problématiques en lien avec les BM en rivières augmentent depuis une dizaine d'années. Il s'agit d'un créneau de recherche novateur et important pour comprendre la dynamique des rivières à lit graveleux, influencé par la présence de BM. La poursuite des études sur la dynamique du BM en rivière et l'amélioration des approches par bilan ligneux permettront une meilleure intégration de la dynamique naturelle des BM dans la gestion des cours d'eau au Québec et ailleurs dans le monde.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abbe, T.B., Montgomery, D.R. 1996. Large woody debris, channel hydraulics, and habitat formation in large rivers. Regulated Rivers: Research and Management 12, 201–221.

Abbe, T.B., Montgomery, D.R. 2003. Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington. Geomorphology 51, 81–107.

Abbe, T.B., 2001. 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.

Alban, D.H., Pastor, J. 1993. Decomposition of aspen, spruce, and pine boles on two sites in Minnesota. Canadian Journal of Forest Research 23: 1744-1749.

Ali, I., Tougne, L. 2009. Unsupervised video analysis for counting of wood in river during floods, in Conference Proceedings of 5th International Symposium on Visual Computing, 578-586, Springer, Las Vegas, USA.

Arseneault, D., Boucher, E., BOUCHON, E. 2007. Asynchronous forest–stream coupling in a fire-prone boreal landscape: insights from woody debris. Journal of Ecology 95:789–801.

Ashton, G.D., (Ed). 1986. River and lake ice engineering. Colorado, Water Resources Publications.

Assani, A.A., Petit, F. 1995. Log-jam effects on bed-load mobility from experiments conducted in a small gravel-bed forest ditch. Catena 25, 117–126.

Atha, J.B. 2014. Identification of fluvial wood using google earth, River Research and Applications, 30, pages 857–864, doi: 10.1002/rra.2683.

Aubry, L., Assani, A., Biron, S., Gratton, D. 2013. Comparison of the hydromorphological evolution of the L'Assomption and Ouareau river channels (Quebec, Canada). River Research and Applications29 (8): 979-990.

Bagnold, R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics, dans: Thorne CR, MacArthur RC et Bradley JB, The Physics of Sediment Transport by Wind and Water. American Society of Civil Engineers, New York, 231–291.

Beckman, N.D., Wohl, E. 2014. Carbon storage in mountainous head-water streams: The role of old-growth forest and logjams, Water Resour. Res., 50, 2376–2393.

Beltaos, S. 1997. Onset of river ice breakup. Cold Regions Science and Technology 25: 183-196

Beltaos, S. 2007. River ice breakup processes: recent advances and future directions. Canadian Journal of Civil Engineering 34: 703–716. DOI: 10.1139/l06-021.

Bennacchio, V., Piégay, H., Buffin-Bélanger, T., Vaudor, L. (soumis). A new methodology for monitoring wood fluxes in rivers using a ground camera : potential and limits. Special Issue: Wood in World River III. Geomorphology.

Benda, L.,E., Bigelow, P. 2014. On the patterns and processes of wood in northern California streams. Geomorphology 209: 79–97. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.11.028.

Benda, L., E., Sias, J.C. 2003. A quantitative framework for evaluating the mass balance of in-stream organic debris. Forest Ecology and Management 172: 1–16. DOI: 10.1016/S0378-1127(01)00576-X.

Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S., Morissette, A. 2008. Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 256 pages.

Bertoldi, W., Gurnell, A.M., Welber, M. 2013. Wood recruitment and retention: The fate of eroded trees on a braided river explored using a combination of field and remotely-sensed data sources. Geomorphology 180–181, 146–155.

Bilby, R.E., Likens, G.E. 1980. Importance of organic matter debris in the structure of stream ecosystems. Ecology 61: 1107–1113.

Bilby, R.E., Ward, J.W. 1991. Characteristics and Function of Large Woody Debris in Streams Draining Old-Growth, Clear-Cut, and Second-Growth Forests in Southwestern Washington. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 48, 2499–2508. doi:10.1139/f91-291.

Bilby, R.E. 2003. Decomposition and nutrient dynamics of wood in streams and rivers, in GREGORY, S.V., K.L. BOYER, AND A.M. GURNELL, (Edts.), The ecology and management of wood in world rivers, American 665. Fisheries Society, Symposium 37, pp. 135-147.

Biron, P., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Chone, G., Cloutier, C.A., Ouellet, M.A., Demers, S., Olsen, T., Desjarlais, C., Eyquem, J. 2014. Freedom space for rivers: a sustainable approach to enhance river resilience. Environmental Management 54, 1056-1073. doi: 10.1007/s00267-014-0366-z.

Biron, P.M., Choné, G., Buffin-Bélanger, T., Demers, S., Olsen, T. 2013. Improvement of streams hydro-geomorphological assessment using LiDAR DEMs. Earth Surface Processes and Landforms 38, 1808-1821. Doi:10.1002/esp.3425.

Blaiklock, W.F. 1845. Carnet Y2, Canton de York. Bibliothèque et Archives nationales du Québec. E21,S60,SS3,PY2. Québec.

Boivin, M., Buffin-Bélanger, T. 2010a. Using a terrestrial LIDAR for monitoring of large woody debris jams in gravel-bed rivers. 7thGravel bed Rivers Conference, 5-10 September 2010, Tadoussac, Quebec, Canada (poster).

Boivin, M., Buffin-Bélanger, T. 2010b. Étude hydrogéomorphologique liée à la présence de bois morts dans le corridor fluvial de la rivière Saint-Jean, Gaspé. Rapport présenté à la Société de Gestion des Rivières de Gaspé inc. Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale. UQAR.

Boivin, M., Buffin-Bélanger, T., Piégay, H. 2015. The raft of the Saint-Jean River, Gaspé (Québec, Canada): A dynamic feature trapping most of the wood transported from the catchment. Geomorphology 231: 270–280. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.12.015.

Boivin, M., Buffin-Bélanger, T., Piégay H. accepted. Interannual kinetics (2010-2013) of large wood in a river corridor exposed to a low recurrence-flood and to fluvial ice dynamics. Geomorphology.

Brais, S., Pare, D., Lierman, C. 2006. Tree bole mineralization rates of four species of the Canadian eastern boreal forest: implications for nutrient dynamics following stand-replacing disturbances. Canadian Journal of Forest Research 36: 2331-2340.

Braudrick, C.A., Grant G.E. 2001, Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment, Geomorphology, volume 41, pp. 263-283.

Buffin-Bélanger, T., Biron, P., Larocque, M., Demers, S., Olsen, T., Chone, G., Ouellet, M.,A., Cloutier C.,A., Desjarlais, C., Eyquem, J. 2015. Freedom space for rivers: an economically viable river management concept in a changing climate. Geomorphology. DOI:10.1016/j.geomorph.2015.05.013.

Bujold, V. 2011. Embâcles de bois et migration du saumon l'atlantique dans la rivière Saint-Jean. Conférences - La faune « vedette » et l'aménagement forestier. Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles. 11 Juin 2011, Gaspésie, Québec.

Cadol, D., Wohl, E. 2011. Coarse sediment movement in the vicinity of a logjam in a neotropical gravel-bed stream. Geomorphology 128: 191–198.

Carlson, J.Y., Andrus, C.,W., Froehlich, H.,A. 1990. Woody debris, channel features, and macroinvertebrates of streams with logged and undisturbed riparian timber in northeastern Oregon, U.S.A. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 47: 1103–1111. DOI: 10.1139/f90-127.

Carmona, M.R., Armesto, J.J., Aravena, J.C., Perez, C.A. 2002. Coarse woody debris biomass in successional and primary temperate forests in Chiloe Island, Chile. Ecological Management 164:265–275

Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). 2015. Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec, 81 p.

Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). 2014. Répertoire des Barrages > Saint-Laurent-Sud-Est . Ministère du Développement durable, de l'Environnment et lutte contre les changements climatiques. (Accessed: 2014-12-11, Online Database, http://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages).

Chin, A., Daniels, M.,D., Urban, M.,A., Piégay, H., Gregory, K.,J., Bigler, W., Butt, A.,Z., Grable, J.,L., Gregory, S.,V., Lafrenz, M., Laurencio, L.,R., Wohl, E. 2008. Perceptions of wood in rivers and challenges for stream restoration in the United States. Environmental Management 41: 893 – 903. DOI: 10.1007/s00267-008-9075-9.

Chin, A., Laurencio, L.R., Daniels, M.D., Wohl, E., Urban, M.A., Boyer, K. L., Butt, A., Piegay, H., Gregory, K.J. 2014. The significance of perceptions and feedbacks for effectively managing wood in rivers. River Research and Applications 30: 98–111. doi: 10.1002/rra.2617.

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., Fetherston, K.L., Abbe, T.B. 2012. The floodplain large-wood cycle hypothesis: A mechanism for the physical and biotic structuring of temperate forested alluvial valleys in the North Pacific coastal ecoregion. Geomorphology 139-140: 460–470. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.11.011.

Comiti, F., Andreoli, A., Mao, L., Lenzi, M.A. 2008. Wood storage in three mountain streams of the Southern Andes and its hydro-morphological effects. Earth Surf Process Landf 33:244–262. doi:10.1002/esp.1541.

Côté, M., Théau, J., Langis, M-H., Fortin, S. 2008. Bilan forestier régional, basé sur les connaissances – Gaspésie – Les Îles. Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles. 227pp.

Dahlström, N., Jönsson, K., Nilsson, C. 2005. Long-term dynamics of large woody debris in a managed boreal forest stream. For. Ecol. Manage. 210, 363–373. doi:10.1016/j.foreco.2005.02.022.

Dallaire, André. 2009. Mortalité des saumons atlantiques (Salmo salar) dans la rivière Saint-Jean – Été 2009. Communication orale. Faculté de médecine vétérinaire. Université de Montréal.

Daniels, M.D. 2006. Distribution and dynamics of large wood debris and organic matter in a low-energy meandering stream. Geomorphology 77: 286-298

Demers, S., Olsen, T., Buffin-Bélanger, T., Marchand, J.P., Biron, P., Morneau, F. 2014. L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid: l'exemple de la rivière Matane (Québec). Physio-géo, 8, 67-88. doi: 10.4000/physio-geo.3813.

Denis, C., Massé, S., Buffin-Bélanger, T., 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.

Dufour, S., Piégay, H. 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural reference and focus on human benefits. River Research and Applications 25 (5): 568-581.

Dugdale, S.J., Bergeron N.E., St-Hilaire, A. 2015. Spatial distribution of thermal refuges analysed in relation to riverscape hydromorphology using airborne thermal infrared imagery. Remote Sensing of Environment 160: 43-55. DOI: 10.1016/j.rse.2014.12.021.

Durst, J.D., Ferguson, F. 2000. Large woody debris, an annotated bibliography, Compiled for the Region III Forest Practices Riparian Management Committee. Compiled for Alaska Dept. of Fish & Game, Habitat & Restoration Division.

Environment Canada, 2014. Climate Data Online, Government of Canada. (Accessed: 12-12- 2014, Online Database, http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada_ f.html).

Floyd, T.A., Macinnis, C., Taylor, B.R. 2009. Effects of artificial woody structures on Atlantic salmon habitat and populations in a Nova Scotia stream. River Resarch and Applications 25, 272-282. DOI: 10.1002/rra.1154.

Fortier, G. 2011. Les activités forestières à Gaspé (1700-1950). Recherche documentaire. Cégep de la Gaspésie et des Îles.

Fremier, A.K., Seo, J.II., Nakamura, F. 2010. Watershed controls on the export of large wood from stream corridors. Geomorphology 117, 33-43.

GENIVAR. 2011. Impact des embâcles de bois sur le profil d'écoulement et la montaison de saumons dans l'estuaire de la rivière Saint-Jean – Rapport du volet 3 – Impacts potentiels sur les infrastructures. Rapport de GENIVAR inc. à la Société de gestion des rivières de Gaspé inc. 17 p. et annexes.

Golladay, S.W., Battle, J.M., Palik, B.J. 2007. Large wood debris recruitment on differing riparian landforms along a gulf coastal plain (USA) stream: A comparison of large floods and average flows. River Research and Application 23, 391–405.

Gomi, T., Sidle, R., Bryant, M., Woodsmith, R. 2001. The characteristics of woody debris and sediment distribution in headwater streams, southeastern Alaska. Canadian Journal of Forest Research 31 1386–1399.

Gregory, S.V., Boyer, K.L., Gurnell, A.M., (Eds.). 2003. The Ecology and Management of Wood in World Rivers, Bethesda, Maryland, 2003.

Gurnell, A.M., 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., Gregory, S.V. 2002. Large wood and fluvial processes. Freshwater Biology 47: 601-619

Gurnell, A.M. 2013. Wood in Fluvial Systems. In: Shroder, J., Wohl, E. (Ed.), (Eds), Treatise in Geomorphology. Academin Press, Elsevier, San Diego, CA, Volume 9, Fluvial Geomorphology, Chapter 11, 163-188.

Harmon, M.E. 1982. Decomposition of standing dead trees in the southern Appalachian mountains. Oecologia 52: 214-215.

Harmon, M.E., Franklin, J.F., Swanson, F.J., Sollins, P., Gregory, S.V., Lattin, J.D., Anderson, N.H., Cline, S.P., Aumen, N.G., Sedell, J.R., Lienkaemper, G.W., Cromack, K., Cummins, K.W. 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. Advances in Ecological Research 15, 133–302.

Hassan, M.A., Hogan, D.L., Bird, S.A., May, C.L., Gomi, T., Campbell, D. 2005. Spatial and temporal dynamics of wood in headwater streams of the Pacific Northwest. Journal of the American Water Resources Association 2.

Hassan, M.A., Bird, S., Reid, D., Hogan, D. 2016. Simulated wood budgets in two mountain streams. Geomorphology 259: 119-133.

Hickin, E.J. 1984. Vegetation and river channel dynamics. Canadian Geographer 28, 110– 126.

Hogan, D. 1985. Stream channel morphology: comparison of logged and unlogged watersheds in the Queen Charlotte Islands. M.Sc. thesis. Department of Geography, University of British Columbia, Vancouver, Canada, pp.206.

Hogan, D.L. 1987. The influence of large organic debris on channel recovery in the Queen Charlotte Islands, British Columbia. Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, 165, 342–353.

Hooke, J.M. 2004. Cutoffs galore!: Occurrence and causes of multiple cutoffs on a meandering river. Geomorphology 61, 225-238.

Howson, T.J., Robson, B.J., Matthews, T.G., Mitchell, B.D. 2012. Size and quantity of woody debris affects fish assemblages in a sediment-disturbed lowland river. Ecological Engineering 40, 144-152.

Hyatt, T., Naiman, R. 2001. The residence time of large woody debris in the Queets River, Washington, USA. Ecological Applications 11: 191–202.

Iroumé, A., Andreoli, A., Comiti, F., Ulloa, H., Huber, A. 2010. Large wood abundance, distribution and mobilization in a third order Coastal mountain range river system, southern Chile. Forest Ecology and Management 260: 480-490

Iroumé, A., Mao, L., Andreoli, A., Ulloa, H., Ardiles, M.P. 2015. Large wood mobility processes in low-order Chilean river channels. Geomorphology 228, 681–693. doi:10.1016/j.geomorph.2014.10.025.

Jackson, K.J., Wohl, E. 2015. Instream wood loads in montane forest streams of the Colorado Front Range, Geomorphology 234, 161-170.

Kail, J., Hering, D. 2005. Using large wood to restore streams in Central Europe: potential use and likely effects., Landscape Ecology 20, 755-772.

Kail, J., Hering, D., Muhar, S., Gerhard, M., Preis, S. 2007. The use of large wood in stream restoration: experiences from 50 projects in Germany and Austria. Journal of Applied Ecology 44: 1145-1155.

Kasprak, A., Magilligan, F.J., Nislow, K.H., Snyder, N.P. 2012. A Lidar-derived evaluation of watershed-scale large woody debris sources and recruitment mechanisms: costal Maine, USA. River Research and Applications 28, 1462–1476.

Keller, E., Swanson, F. 1979. Effects of large organic material on channel form and fluvial processes. Earth Surface Processes 4: 361–380. DOI: 10.1002/esp.3290040406.

Keller, E.A., Tally, T. 1979. Effects of large organic debris on channel form and fluvial processes in the coastal redwood environment. In: Rhodes, D.D., Williams, G.P. (Eds.), Adjustments of the fluvial system,.. Annual Geomorphology Symposium, 10th, Binghampton, New York, Kendall Hunt Publications, Dubuque, Iowa; 169–198.

Keller, E.A., Macdonald, A., Tally, T., Merrit, N.J. 1985. Effect of large organic debris on channel morphology and sediment storage in selected tributaries of Redwood Creek. Geomorphic Processes and Aquatic Habitat in the Redwood Creek Drainage Basin: U. S. Geological Survey Professional Paper.

Kitchingman, A., Tonkin, Z., Ayres, R., Lyon, J., Stout, J., Rutherfurd, I., Wilson, P. 2015. Predicting natural instream woody-habitat loads across large river networks. Marine and freshwater Research. http://dx.doi.org/10.1071/MF15246.

Kramer, N., Wohl, E. 2014. Estimating fluvial wood discharge using time-lapse photography with varying sampling intervals. Earth Surf. Process. Landforms 39, 844–852. doi:10.1002/esp.3540.

Lachat, B. 1984. Stabilisation des berges de cours d'eau par la végétation. Un aspect du génie biologique. Energie und luft H9, Wasser.

Lagadec A., Boucher E., Germain, D. 2015. Spatiotemporal dynamics and hydro-climatic thresholds triggering river ice jams on the Mistassini River, Quebec. Hydrological Processes 29(23), 4880–4890.

Langford T., Langford J., Hawkins S.J. 2012. Conflicting effects of woody debris on stream fish populations: Implications for management. Freshwater Biology 57: 1096–1111. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2012.02766.x.

Lassettre, N.S., Piégay, H., Dufour, S., Rollet, A. 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., Naiman, R.J. 2007. Sources and dynamics of large logs in a temperate floodplain river. Ecological Applications 17(4), 1127–1141.

Le Lay, Y.-F., Piégay, H. 2007. Le bois mort dans les paysages fluviaux français : éléments pour une gestion renouvelée. L'Espace géographique 1 : 51-64

Le Lay, Y., Moulin, B. 2007. Les barrages face à la problématique des bois flottants: collecte, traitement et valorisation. La Houille Blanche 3, 96–103. DOI 10.1051/lhb:2007041.

Lemaire, P., Piégay, H., MacVicar, B., Vaudor, L., Mouquet-Noppe, C., Tougne, L. 2015.An automatic video monitoring system for the visual quantification of driftwood in large rivers. Third international conference on wood in World Rivers, Padova, Italy. July 6-10 2015.

Lienkaemper, G.W., Swanson, F.J. 1987. Dynamics of large woody debris in old-growth Douglas-fir forests. Can. J. Forest Res.17, 150–156.

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.

Lucía, A., Comiti, F., Borga, M., Cavalli, M., Marchi, L. 2015. Dynamics of large wood during a flash flood in two mountain catchments. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. 3, 1643–1680. doi:10.5194/nhessd-3-1643-2015.

Lyell, C.E. 1830. Principles of Geology. London: John Murray.

Lyn, D.A., Cooper, T., Yi, Y.K., Sinha, R., Rao, A.R. 2003. Debris Accumulation at Bridge Crossings: Laboratory and Field Studies. Joint Transportation Research Program 10, 2-59.

Macvicar, B., Piégay, H. 2012. Implementation and validation of video monitoring for wood budgeting in a wandering piedmont river, the Ain River (France). Earth Surf. Process. Landforms 37, 1272–1289. doi:10.1002/esp.3240.

MacVicar, B.J., Piégay, H., Henderson, A., Comiti, F., Oberlin, C., Pecorari, E. 2009. Quantifying the temporal dynamics of wood in large rivers: field trials of wood surveying, dating, tracking, and monitoring techniques. Earth Surf. Process. Landf. 34 (15), 2031–2046.

Manners, R.B., Doyle, M.W., Small, M.J. 2007. Structure and hydraulics of natural woody debris jams. Water Resources Research 43, W06432. doi 10.1029/2006WR004910.

Manners, R.B., Doyle, M.W. 2008. A mechanistic model of woody debris jam evolution and its application to wood-based restoration and management. River Res. Appl 24(8), 1104-1123.

Marcus, W.A., Marston, R. a., Colvard, C.R., Gray, R.D. 2002. Mapping the spatial and temporal distributions of woody debris in streams of the Greater Yellowstone Ecosystem, USA. Geomorphology 44, 323–335. doi:10.1016/S0169-555X(01)00181-7.

Marcus, W.A., Legleiter, C.J., Aspinall, R.J., Boardman, J.W., Crabtree, R.L. 2003. High spatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in mountain streams. Geomorphology 55, 363–380. doi:10.1016/S0169-555X(03)00150-8.

Marcus, W.A., Rasmussen, J., Fonstad, M. 2011. Response of the Fluvial Wood System to Fire and Floods in Northern Yellowstone, Annals of the Association of American Geographers 101: 1, 21 — 44. DOI:10.1080/00045608.2010.539154.

Martin, D.J., Benda, L.E. 2001. Patterns of Instream Wood Recruitment and Transport at the Watershed Scale. Transactions of the American Fisheries Society 130: 940–958. DOI: 10.1577/1548-8659(2001)130<0940:POIWRA>2.0.CO;2.

Martín-Vide, J.P., Amarilla, M., Zarate, F.J. 2014. Collapse of the Pilcomayo River. Geomorphology 205, 155-163. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.12.007.

Massé, S., Buffin-Bélanger, T. 2016. Influence of the hydrogeomorphological dynamics on large woody debris jams distribution. The Canadian Geographer.

Massé, S. 2014. 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. Université du Québec à Rimouski (UQAR). 191p.

May, C.L., Gresswell, R.E. 2004. Spatial and temporal patterns of debris-flow deposition in the Oregon Coast Range, USA. Geomorphology 57: 135-149.

McCall, E. 1988. The attack on the Great Raft. American Heritage of Invention and Technology. Winter, 10–16.

McHenry, M.L., Shott, E., Conrad, R.H., B.Grette, G. 1998. Changes in the quantity and characteristics of large woody debris in streams of the Olympic Peninsula, Washington, USA (1982–1993). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 55: 1395–1407.

Montgomery, D.R., Buffington, J.M., Smith, R., Schmidt, K., Pess, G. 1995. Pool spacing in forest channels. Water Resources Research 31, 1097–1105.

Montgomery, D.R., Collins, B.D., Abbe, T.B., Buffington, J.M. 2003. Geomorphic effects of wood in rivers. In: Gregory, S., Boyer, A. (Eds.), The Ecology and Management of Wood in World Rivers. American Fisheries Society Symposium 37, 1–10.

Montgomery, D.R., Piégay, H. 2003. Wood in rivers: interactions with channel morphology and processes. Geomorphology 51, 1 – 5.

Monzyk, F.R., Kelso, W.E., Rutherford, D.A. 1997. Characteristics of woody cover used by brown madtoms and pirate perch in coastal plain streams. Transactions of the American Fisheries Society 126, 665–675.

Morin, S., Boucher, E., Buffin-Bélanger, T. 2015. The spatial variability of ice-jam bank morphologies along the Mistassini River (Quebec, Canada): an indicator of the ice-jam regime? Natural Hazards DOI 10.1007/s11069-015-1693-y. (3):2117-2138

Mossop, B., Bradford, J.M. 2004. Importance of large woody debris for juvenile chinook salmon habitat in small boreal forest streams in the upper Yukon River basin, Canada. NRC Research Press 34, 1955–1966.

Moulin, B., Piégay, H. 2004. Characteristics and temporal variability of large wood stored in the reservoir of Génissiat (Rhône): Elements for river basin management. River Research and Applications 3, 140–173. doi:10.1002/rra.724.

Moulin, B. 2005. Variabilité spatiale et temporelle du bois mort dans le réseau hydrographique de l'Isère à l'amont de Grenoble. Thèse de l'Université Jean Monnet, Saint Étienne, 446 p.

Moulin, B., Schenk, E.R., Hupp, C.R. 2011. Distribution and characterization of in-channel large wood in relation to geomorphic patterns on a low-gradient river. Earth Surf. Process. Landforms 36, 1137–1151. doi:10.1002/esp.2135.

Murphy, M.L., Koski, K.V. 1989. Input and depletion of woody debris in Alaska streams and implications for streamside management. N Am J Fish Manag 9:427–436.

Naiman, R.J., Balian, E.V., Bartz, K.K., Bilby, R.E., and Latterell, J.J. 2002. Dead wood dynamics in stream ecosystems. In Proceedings of the Symposium on The Ecology and Management of Dead Wood in Western Forests. Edited by P.J. Shea, W.F. Laudenslayer, Jr., B. Valentine, C.P. Weatherspoon, and T.E. Lisle. USDA Forest Service, Pacifi c Southwest Research Station, Albany, California, General Technical Report PSW-GTR- 181. pp. 23-48.

Nakamura, F., Swanson, F.J. 1993. Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream in Western Oregon. Earth Surface Processes and Landforms 18: 43–61.

Nakamura, F., Swanson, F.J. 1994. Distribution of coarse woody debris in a mountain stream, western Cascade Range, Oregon. Can J For Res 24:2395–2403.

Nakamura, F., Swanson F.J. 2003. Dynamics of wood in rivers in the context of ecological disturbance, in The Ecology and Management of Wood in World Rivers, edited by S. V. Gregory, K. L. Boyer, and A. M. Gurnell, pp. 279 – 297, American Fisheries Society Symposium 37, Bethesda, Maryland, USA.

Nakamura, F., Fuke, N., Kubo, M. 2012. Contributions of large wood to the initial establishment and diversity of riparian vegetation in a bar-braided temperate river. Plant Ecology 213: 735-747.

Osei, N.A., Gurnell, A.M., Harvey, G.L. 2015. The role of large wood in retaining fine sediment, organic matter and plant propagules in a small, single-thread forest river. Geomorphology 235: 77-87.

Ott, R.A., Lee, M.A., Putman, W.E., Mason, O.K., Worum, G.T., Burns, D.N. 2001. Bank erosion and large woody debris recruitment along the Tanana River, interior Alaska. Project NP-01-R9 report written by the Alaska Department of Natural Resources, Division of Forestry and the Tanana Chiefs Conference, Inc., Forestry Program, Fairbanks, Alaska. Alaska Department of Environmental Conservation, Division of Air and Water Quality, Juneau, Alaska. 34pp.

Palmer, M.A., Bernhardt, E.S., Allan, J.D., Lake, P.S., Alexander, G., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahn, C.N., Follstad Shah, J., Galat, D.L., Gloss, S., Goodwin, P., Hart, D.D., Hassett, B., Jenkinson, R., Kondolf, G.M., Lave, R., Meyer, J.L., O'Donnell, T.K., Pagano, L., Sudduth, E. 2005. Standards for ecologically successful river restoration. Journal of Applied Ecology 42, 208–217.

Pedlar, J.H., Pearce, J.L., Venier, L.A., McKenney, D.W. 2002. Coarse woody debris in relation to disturbance and forest type in boreal Canada. Forest Ecology and Management 158: 189–194. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00711-8.

Petropavlovsky, V. 2013. Étude méthodologique de caractérisation des radeaux de bois flottés par imagerie (cas du Rhône à Génissiat et du delta de la Saint-Jean, Gaspésie). Mémoire de Maîtrise. Université Lyon III. France, pp. 79.

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., 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., Marston RA. 1998. Distribution of large woody debris along the outer bend of meanders in the Ain River,France. Phys. Geogr. 19, 318–340.

Piégay, H., Thévenet, A., Citterio, A. 1999. Input, storage and distribution of large woody debris along a mountain river continuum, the Drôme River, France. Catena 35:19–39.

Piégay, H. 2003. Dynamics of wood in large rivers. In: Gregory, S.V, (Ed.), Ecology and Management of Wood in World Rivers.. American Fisheries Society: Bethesda, Maryland, USA, 109–134.

Piégay, H., Le Lay, Y.F., Moulin, B. 2005. 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., Rambaud, D. (Eds.), Bois mort et à cavités. Une: clé pour des forêts vivantes. Lavoisier et Editions Tec & Doc: Paris, 193–202.

Piégay, H., Benacchio, V., Boivin, M., Lemaire, P., Macvicar, B., Moulin, B., Ruiz-Villanueva, V., Buffin-Bélanger, T., Michel, K., Stoffel, M., Tougne, L. 2015. Wood is good but it moves? Associated problems and research issues. Third International Conference Wood in World Rivers 3-2015. Padova, Italie. 6-10 Juillet 2015.

Powell, S.R., Daniels, L.D., Jones, T.A. 2009. Temporal dynamics of large woody debris in small streams of the Alberta foothills, Canada.Canadian Journal of Forest Research 39: 1159–1170.

Prowse, T.D., Marsh, P.1989. Thermal budget of river ice covers during breakup. Canadian Journal of Civil Engineering 16: 62-71.

Prowse, T.D., Beltaos, S. 2002. Climatic control of river-ice hydrology: A review. Hydrol. Process. 16, 805–822. doi:10.1002/hyp.369.

Ravazzolo, D., Picco, L., Mao, L., Lenzi, M.A. 2015. Tracking log displacement during floods in the Tagliamento River using RFID and GPS tracker devices. Geomorphology 228, 226–233. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.09.012.

Reid, I., Dunne, T. 1996. Rapid evaluation of sediment budgets, 164 pp., Dan H. Yaalon & S.M. Berkowicz Editors, Catena.

Rinaldi, M., Belletti, B., Van de Bund, W., Bertoldi, W., Gurnell, A., Buijse, T., Mosselman, E. 2013. Review on eco-hydromorphological methods. Restoring rivers for effective catchment management (Reform). Technical Report. 202p.

Rosso, R., Rulli, M.C., Bocchiola, D. 2007. Transient catchment hydrology after wildfires in a Mediterranean basin: Runoff, sediment and woody debris, Hydrology and Earth System Sciences 11 (1): 125-140, 2007.

Roy, André. 2012. Trente ans de géomorphologie fluviale au Québec: enjeux et perspectives d'avenir. 80ème Congrès de l'Acfas « colloque sur les Trente ans de géomorphologie fluviale au Québec », 11-12 mai 2012, Montréal.

Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J.M., Diez-Herrero, A., Eguibar, M.A., PardoIguzquiza, E. 2012. Reconstruction of a flash flood with large wood transport and its influence on hazard patterns in an ungauged mountain basin. Hydrological Processes 27 (24): 3424-3437. doi:10.1002/hyp.9433.

Ruiz-Villanueva, V., Díez-Herrero, A., Bodoque, J. M., Ballesteros, Cánovas, J. A., and Stoffel, M. 2013. Characterisation of flash floods in small ungauged mountain basins of Central Spain using an integrated approach, Catena, 110, 32–43.

Ruiz-Villanueva, V., Díez-Herrero, A., Ballesteros, J. A., Bodoque, J. M. 2014. Potential large woody debris recruitment due to landslides, bank erosion and floods in mountain basins: A quantitative estimation approach, River Ressources and Applications 30: 81–97.

Ruiz-Villanueva, V., Wyżga, B., Hajdukiewicz, H., Stoffel, M. 2015. Exploring large wood retention and deposition in contrasting river morphologies linking numerical modelling and field observations. Earth Surf. Process. Landforms n/a–n/a. doi:10.1002/esp.3832.

Saint-germain, M., Drapeau, P., HEBERT, C. 2004. Xylophagous insect species composition and patterns of substratum use on fire-killed black spruce in central Quebec. Canadian Journal of Forest Research 34: 677-685.

Schenk, E.R., Moulin, B., Hupp, C.R., Richter, J.M. 2014. Large wood budget and transport dynamics on a large river using radio telemetry. Earth Surface Processes and Landforms 39 (4), 487-498. DOI: 10.1002/esp.3463

Sear, D.A., Millington, C.E., Kitts, D.R., Jeffries, R. 2010. Logjam controls on channel floodplain interaction in wooded catchments and their role in the formation of multi-channel patterns. Geomorphology 116(3–4), 305–319.

Seo, J. Il, Nakamura, F., Nakano, D., Ichiyanagi, H., Chun, K.W. 2008. Factors controlling the fluvial export of large woody debris, and its contribution to organic carbon budgets at watershed scales. Water Resour. Res. 44, 1–13. doi:10.1029/2007WR006453.

Seo, J.I., Nakamura, F. 2009. Scale-dependent controls upon the fluvial export of large wood from river catchments. Earth Surface Processes and Landforms 34: 786–800. DOI: 10.1002/esp.1765.

Seo, J., Nakamura, F., Woo, C.K. 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. doi:10.1007/s11355-010-0106-3.

Shroder, Jr., J.F. 1980. Dendrogeomorphology: review and new technique of tree-ring dating. Progress in Physical Geography 4(2): 161-188.

Skalak, K., Pizzuto, J. 2010. The distribution and residence time of suspended sediment stored within the channel margins of a gravel-bed bedrock river. Earth Surface Processes and Landforms 35: 435–446.

Swanson, F.J., Lienkaemper, G.W., Sedell, J.R. 1976. History, physical effects, and management implications of large organic debris in western Oregon streams. U.S. For. Serv. Gen. Tech. Rep. PNW-56.

Swanson, M. 2003. Dry Creek bank erosion management plan. Report to the City of Roseville.

Tarasov, M.E., Birdsey, R.A. 2001. Decay rate and potential storage of coarse woody debris in the Leningrad region. Ecological Bulletins 49: 137-147.

Therrien, J. 1997. Guide technique sur le démantèlement d'embâcles. Fondation de la Faune du Québec. Ste-Foy. 55 p.

Thévenet, A., Citterio, A., Piégay, H. 1998. A new methodology for the assessment of large woody debris accumulations on highly modified rivers (Example of two French piedmont rivers). Regulated Rivers: Research & Management 14: 467–483.

Thévenet, A. 1998. Intérêt des débris ligneux grossiers pour les poissons dans les grands cours d'eau. Pour une prise en compte de la dimension écologique des débris ligneux grossiers dans la gestion des cours d'eau. Lyon : Université Lyon I, Thèse de doctorat en écologie, 100 p.

Tonon, A., Picco, L., Ravazzolo, D., Lenzi, M.A. 2014. Using a terrestrial laser scanner to detect wood characteristics in gravel-bed rivers. J. Agric. Eng. 45, 161. doi:10.4081/jae.2014.431.

Triska, F.J. 1984. Role of wood debris in modifying channel geomorphology and riparian areas of a large lowland river under pristine conditions: A historical case study. Verhandlung Internationale Vereinigung Limnologie 22: 1876–1892.

Ulloa, H., Iroumé, A., Picco, L., Korup, O., Lenzi, M.A., Mao, L., Ravazzolo, D. 2015. Massive biomass flushing despite modest channel response in the Rayas River following the 2008 eruption of Chaitén volcano, Chile. Geomorphology 250, 397–406. doi:10.1016/j.geomorph.2015.09.019.

Vocal Ferencevic, M.V., Ashmore P., 2012. Creating and evaluating digital elevation model-based stream-power map as a stream assessment tool. River Research and Applications 28, 1394-1416.

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

Waldner, P., Rickli, C., D., K., Usbeck, T., Schmocker, L., Sutter, F. (Eds.). 2007. Schwemmholz. Ereignisanalyse Hochwasser 2005 – Teil 1: Prozesse, Schäden und erste Einordnung (in German), Umwelt-Wissen (in German).

Warren, D.R., Kraft, C.E. 2008. Dynamics of Large Wood in an Eastern U.S. Mountain Stream. Forest Ecology and Management 256(4): 808-814.

Wohl, E., Goode, J.R. 2008. Wood dynamics in headwater streams of the Colorado Rocky Mountains. Water Resources Research 44: 1–14. doi:10.1029/2007WR006522.

Wohl, E., Jaeger, K. 2009. A conceptual model for the longitudinal distribution of wood in mountain streams. Earth Surface Processes and Landforms 34: 329 – 344. DOI: 10.1002/esp.1722.

Wohl, E., Cenderelli, D.A., Dwire, K.A., Ryan-Burkett, S.E., Young, M.K., Fausch, K.D. 2010. Large in-stream wood studies: a call for common metrics. Earth Surface Processes and Landforms 35: 618–625.

Wohl, E. 2011. What should these rivers look like? Historical range of variability and human impacts in the Colorado Front Range, USA. Earth Surface Processes and Landforms 36: 1378–1390. DOI: 10.1002/esp.2180

Wohl, E. 2013. Floodplains and wood. Earth-Science Reviews 123: 194–212. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.04.009.

Wohl, E. 2014. A Legacy of Absence: Wood Removal in U.S. Rivers. Progress in Physical Geography 38:637-663.

Wohl, E., Beckman, N. 2014. Controls on the longitudinal distribution of channel-spanning logjams in the Colorado Front Range, USA. River Research and Applications 30, 112-131.

Wohl, E. 2015. Bridging the Gaps: Wood Dynamics across time and space in diverse Rivers. Third international conference on wood in World Rivers, Padova, Italy. July 6-10 2015. [En ligne]. http://intra.tesaf.unipd.it/cms/wwr3/ConferenceSessions.asp.

Wuebben, J.L., Gagnon, J.J. 1995. Ice jam flooding on the Missouri River near Williston, North Dakota. C.R.R.E. Laboratory, US Army Corps of Engineers. 95: 19. 30p.

Wyżga, B., Zawiejska, J. 2005. Wood storage in a wide mountain river: case study of the Czarny Dunajec, Polish Carpathians. Earth Surf. Process. Landforms 30: 1475–1494. doi: 10.1002/esp.1204