

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

SPATIALISATION DES PROCESSUS GLACIELS DANS LE BASSIN VERSANT
DE LA RIVIÈRE L'ACADIE, MONTÉRÉGIE : UNE APPROCHE
HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR :
VALÉRIE PLANTE LÉVESQUE

OCTOBRE 2017

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal 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 Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

C'est avec ce mémoire de maîtrise que s'achève mon parcours au département de géographie de l'Université du Québec à Montréal. Après un baccalauréat fort enrichissant où j'ai découvert une science me permettant d'avoir un regard différent sur les espaces humains et physiques qui m'entourent, mon cheminement au deuxième cycle m'a permis d'approfondir mes connaissances dans ce domaine. Depuis, ma fascination pour les processus hivernaux et nordiques n'a fait que croître et j'espère qu'elle atteindra de nouveaux sommets avec la poursuite de mes études en sciences de l'eau dans les prochaines années.

Ce chemin parcouru n'aurait pas été le même sans l'appui et l'encadrement de mon directeur Étienne Boucher qui m'a accueilli dans son équipe dès le premier cycle. Merci, Étienne, pour ta présence et ton soutien, mais aussi pour la confiance et l'autonomie que tu m'as accordée. Je désire aussi souligner l'apport de Jérôme Charbonneau-Gosselin et Gabriel Plante qui sont venus à l'occasion me divertir lors de la collecte de données sur le terrain ainsi que le soutien constant de mon ami Marc-Antoine Persent tout au long du projet. L'apport financier du Fonds de recherche québécois en nature et technologie doit aussi être mentionné, car il m'a permis de me concentrer uniquement sur mes études sans avoir de fardeau financier.

Finalement, j'aimerais souligner l'apport incommensurable de Guillaume Proulx dans le projet. En plus de participer activement aux collectes de données sur le terrain et à la révision du texte, sa présence quotidienne à mes côtés a fait de lui un allié hors pair dans les moments de doute. Nos discussions m'ont réconforté et ont permis de raffiner la recherche en me donnant confiance en mes moyens. Merci d'être là et de m'avoir donné la force de mener un tel projet à bout.

AVANT-PROPOS

Le présent mémoire est composé de trois chapitres, dont le troisième contient un article soumis à la Revue des sciences de l'eau.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
AVANT-PROPOS	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
RÉSUMÉ	xi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I.....	5
1.1 Les processus glaciels : un paramètre fondamental de la dynamique fluviale.....	5
1.2 Empreinte des processus glaciels sur la morphologie du lit	8
1.2.1 Formation de berges glacielles	8
1.2.2 Incision du chenal.....	11
1.2.3 Modification du plan de la rivière	15
1.2.4 Empreintes glacielles sur les plaines inondables.....	17
1.2.5 Transformation de la végétation riveraine.....	18
1.3 Empreinte des processus glaciels sur la morphologie de la rivière.....	20
1.3.1 Seuils et conditions particulières	22
CHAPITRE II	25
2.1 Problématique et objectifs de recherche.....	25
2.2 Région à l'étude	25
2.2.1 La rivière l'Acadie et son bassin versant.....	25
2.2.2 Division en secteurs homogènes	27
2.3 Méthodologie	28
2.3.1 Approche hydrogéomorphologique.....	28

2.3.2	Analyse de la fréquence des événements glaciels	33
CHAPITRE III.....		37
3.1	Introduction.....	38
3.1.1	Site à l'étude	40
3.2	Matériel et méthodes.....	41
3.2.1	Approche hydrogéomorphologique	41
3.2.2	Fréquence des événements glaciels	44
3.3	Résultats.....	45
3.3.1	Caractéristiques du bassin versant	45
3.3.2	Morphométrie du chenal	47
3.3.3	Classification des berges.....	50
3.3.4	Occurrences glacielles	52
3.4	Discussion.....	56
3.4.1	Les berges comme signature du régime d'embâcles de glace	57
3.4.2	Évolution longitudinale du régime d'embâcles de glace.....	59
3.5	Conclusion	64
CONCLUSION		65
BIBLIOGRAPHIE		69

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1	Inondation à la suite d'un embâcle de glace sur la rivière l'Acadie (Berthiaume, 2014).....	1
Figure 1.1	Le modèle cristal de Allard (2010).....	6
Figure 1.2	Interactions entre les paramètres qui affectent le type de glace et les processus glaciels traduit de Turcotte et Morse (2013).....	7
Figure 1.3	Impacts de divers processus glaciels sur le transport sédimentaire selon (a) une échelle temporelle et (b) une échelle spatiale tiré de Turcotte et Morse (2013).....	8
Figure 1.4	Illustration des phénomènes (a) sapement du pied de la berge et (b) du décrochement des berges (Ettema, 2002 : 210 et 213).....	10
Figure 1.5	Illustration des morphologies de berges issues du régime glacial (a) berges à 2 niveaux (Boucher <i>et al.</i> , 2012 : 552) et (b) bechevnick (Hamelin, 1969 : 210)	11
Figure 1.6	Illustrations de (a) l'évolution de la déformation transversale du lit en présence d'un barrage suspendu et formation d'une fosse (Sui <i>et al.</i> , 2000) et (b) surcreusement du chenal dans le sens de l'écoulement causé par un embâcle de glace (Ettema et Kempema, 2012)	13
Figure 1.7	Évolution d'un talweg sous un couvert de glace (Zabilansky <i>et al.</i> , 2002).....	14
Figure 1.8	Illustration (a) de l'avulsion et (b) du ravinement glacial (Smith et Pearce, 2002).....	15
Figure 1.9	Évolution d'un chenal à méandres en présence d'un couvert de glace (Zabilansky <i>et al.</i> , 2002).....	16
Figure 1.10	Cicatrices sur un arbre riverain de la rivière l'Acadie causée l'impact du couvert de glace à l'hiver 2017	19
Figure 1.11	Conceptualisation des débits requis pour un élargissement des rivières avec activités glacielles (Best <i>et al.</i> , 2003)	23
Figure 1.12	Morceaux de glaces laissés à la suite d'un embâcle faisant pression sur la rive convexe d'un méandre à l'hiver 2017	23
Figure 2.1	Division de la rivière l'Acadie par secteurs homogènes	27
Figure 2.2	Localisation des sites échantillonnés.....	34

Figure 2.3	Illustration (a) de la hauteur des cicatrices enregistrées, (b) du décompte des cicatrices glacielles et (c) du calcul des cernes de croissance annuelle	35
Figure 3.1	Division de la rivière l'Acadie par secteurs homogènes.....	41
Figure 3.2	Aires drainées et réseau hydrographique par secteurs homogènes du bassin versant de la rivière l'Acadie	46
Figure 3.3	Caractérisation du chenal selon divers indicateurs morphométriques...	49
Figure 3.4	Dendrogramme représentant les différents groupes de berges homogènes caractérisés.....	50
Figure 3.5	Cartographie des types de berges et de la présence de cicatrices glacielles de la portion aval du secteur 4 et du secteur 5.....	51
Figure 3.6	Proportion des groupes de berges pour chaque secteur homogène, tels qu'identifiés par le dendrogramme	52
Figure 3.7	Diagramme à moustache illustrant la hauteur des cicatrices par rapport au niveau plein bord pour chaque secteur	5
Figure 3.8	Comparaison entre la hauteur absolue des cicatrices glacielles (en mètres) et les cotes de crues du PDCC. La ligne pointillée représente la séparation entre les secteurs 4 et 5 et les nombres en gras la fréquence des événements observés sur le terrain, par sites.	56
Figure 3.9	Morphotypes de berges résultant du classement par dendrogramme (a) berges d'érosion fluviale, (b) berges glacielle –érosion modérée, (c) berges glacielles –érosion forte et (d) berges stables ou en accrétion.....	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Indicateurs utilisés pour la caractérisation du bassin versant.....	29
Tableau 2.2	Indicateurs utilisés pour la caractérisation du chenal.....	30
Tableau 2.3	Indicateurs utilisés pour la caractérisation géomorphologique des berges.....	31
Tableau 3.1	Indicateurs géomorphologiques et écologiques utilisés pour caractériser des berges.....	43
Tableau 3.2	Caractérisation du bassin versant par secteurs cumulés.....	46
Tableau 3.3	Recension des événements embâcles dans les archives documentaires	53

RÉSUMÉ

Les processus glaciels sont un paramètre fondamental de la dynamique des rivières. Ceux-ci affectent notamment la morphologie du lit et du chenal des cours d'eau, dont la rivière l'Acadie. S'écoulant du sud au nord sur 84 km, la rivière l'Acadie est un affluent de la rivière Richelieu située en Montérégie, au Québec. Celle-ci présente des problèmes récurrents d'inondations hivernales ayant de lourds impacts sur les milieux habités des villes de Chambly et Carignan. La recherche présentée ici a pour objectif d'acquérir des connaissances sur le régime d'embâcles de glace par leur spatialisation au sein du bassin versant de la rivière l'Acadie. Suivant une approche hydrogéomorphologique, une caractérisation des propriétés du bassin versant, de la rivière puis des berges de la rivière l'Acadie a été effectuée afin de spatialiser l'activité glacielle le long de celle-ci. Par la suite, la fréquence des événements d'embâcles de glace aux endroits ciblés a été établie à l'aide des cernes d'arbres et des archives documentaires pour comprendre la synergie entre les phénomènes d'embâcles et les autres processus se déroulant sur la rivière. Les résultats ont démontré comment la morphométrie et l'hydrographie du bassin versant, l'omniprésence de l'agriculture et des infrastructures civiles ainsi que l'héritage de la dernière glaciation quaternaire favorisent l'activité glacielle sur la rivière. De plus, l'étude des berges et des impacts glaciels a permis de localiser, différencier et expliquer les processus d'embâcles dominant les trois secteurs situés en aval de la rivière. En somme, il a été possible d'évaluer la signature du régime glacial sur les berges et de comprendre l'évolution longitudinale de l'activité glacielle le long de cette rivière.

Mots clés :

Régime glacial, Hydrogéomorphologie, Embâcles de glace, Risques naturels

INTRODUCTION

Au Québec, on estime qu'environ le tiers des inondations est causé par les glaces de rivières et que les dommages qu'elles causent sont généralement plus importants que celles en eaux libres, notamment car elles entraînent une montée des eaux plus importantes (Beltaos, 2014 ; Turcotte, 2016). Celles-ci affectent plusieurs sphères de la société, dont les infrastructures publiques, le transport hivernal, les industries et les populations des quartiers riverains, mais aussi le milieu naturel et les écosystèmes riverains (Beltaos et Burrell, 2015 ; Morse et Hicks, 2005 ; Richard *et al.*, 2015). Les embâcles de glace sont une composante naturelle de la dynamique glacielle qui influence la géomorphologie fluviale, l'écoulement du cours d'eau et le transport des sédiments (Allard, 2010). Toutefois, lorsqu'ils se déroulent en zones habitées, on les qualifie de risques naturels puisque leurs conséquences deviennent sociales (Hétu, 2001).



Figure 0.1 Inondation à la suite d'un embâcle de glace sur la rivière l'Acadie (Berthiaume, 2014)

Bien que de plus en plus d'études canadiennes considèrent la glace comme un élément important dans le régime hydrique, cela ne semble pas se répercuter dans les politiques de sécurité publique québécoise ou dans les organismes de bassins versants (Beltaos et Burrell, 2015 ; Buffin-Bélanger et Bergeron, 2011 ; Demers *et al.*, 2014, Morse et Hicks, 2005). À titre d'exemple, dans leur *Rapport final de la caractérisation de la rivière l'Acadie*, le Comité de concertation de valorisation du bassin de la rivière Richelieu (COVABAR) ne fait aucunement mention de la dynamique glacielle de la rivière en attribuant uniquement l'érosion des berges aux crues printanières et aux fortes pluies d'automne (Drouin *et al.*, 2009). Le même phénomène est observable du côté du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), alors que l'on ne considère que les données hydrauliques afin de générer les cartes de zones inondables qui sont intégrées au schéma d'aménagement des municipalités (Boutet *et al.*, 2004).

La rivière l'Acadie, située en Montérégie, est soumise à un régime d'embâcles causant d'importantes inondations, dont une majeure en 2014 causée par un embâcle de 1500 mètres (Godin *et al.*, 1974 ; Québec, 2016 ; TVA Nouvelles, 2014). Cette rivière a d'ailleurs déjà fait l'objet de travaux préventifs d'affaiblissement du couvert de glace afin de limiter l'impact de ces inondations sur les municipalités avoisinantes (Duchaine, 2016). Ainsi, l'amélioration de la compréhension des processus fluviaux et glaciels de la rivière l'Acadie serait une contribution sociale importante. En effet, si les données et analyses générées sont récupérées par les autorités locales, elles pourraient favoriser la mise en place de mesures de prévention des inondations hivernales par les municipalités responsables (Québec et al., 2014). Outre l'économie de temps et d'argent qu'engendre la prévention des risques naturels, cette dernière contribue positivement à la société (Bailly, 2004 ; Dauphiné et Provitolo, 2013). C'est d'ailleurs en ce sens qu'Hétu (2001) affirmait qu'informer les populations des risques les entourant permet d'augmenter leur conscience territoriale et, ultimement, leur désir de cohabitation avec la nature.

La spatialisation des activités glacielles est particulièrement intéressante pour une rivière comme l'Acadie où les risques associés au couvert glacial et la présence d'embâcle sont connus, mais dont la localisation n'a jamais été analysée. Dans le cadre de cette étude, l'évolution longitudinale de l'activité glacielle de l'amont vers aval sera couplée avec des données provenant de l'étude des cernes d'arbres pour mieux décrire le régime glacial du cours d'eau. Ces nouvelles connaissances permettront d'évaluer l'ampleur du régime d'embâcle dans la portion du bassin versant plus urbanisée située en aval et de mieux renseigner les autorités locales et la population.

CHAPITRE I

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Les processus glaciels : un paramètre fondamental de la dynamique fluviale

Dans un article fondamental pour la géomorphologie fluviale, Wolman et Miller (1960) affirment que la plus grande partie des modifications géomorphologiques des chenaux alluviaux se font grâce à des événements de magnitude modérée et de fréquence élevée. Wolman et Gerson (1968) raffinent cette théorie en ajoutant que les propriétés physiques du territoire sont aussi un facteur influençant les changements dans la morphologie des rivières.

Toutefois, il n'est pas certain que ces règles s'appliquent au milieu nordique. En effet, l'apparition d'un couvert glacial sur les rivières étant une propriété physique du territoire, il est intéressant de se pencher sur l'incidence que celui-ci peut avoir sur certaines rivières. Bien qu'au Canada la présence persistante d'un couvert de glace hivernal soit répertoriée sur près de 90 % des 60 000 km de littoraux maritimes et lacustres, de nombreux modèles conceptuels en hydrogéomorphologie ne prennent pas en compte l'englacement des rivières (Landry et Mercier, 1992). C'est d'ailleurs le cas de l'un des modèles les plus utilisés en hydrogéomorphologie, la Trinité de Leeder, qui met en relation la structure des écoulements, le transport des sédiments et la forme du lit (Allard, 2010). Le modèle cristal (Figure 1.1) est plus adapté aux régions nordiques puisqu'il intègre la dynamique glacielle, que l'on définit par la cristallisation, le transport et la morphologie glacielle, à la dynamique fluviale de Leeder (Allard, 2010). Le modèle présente les relations déjà établies dans la littérature scientifique par des flèches pleines ; les relations qui demeurent à approfondir sont en pointillé.

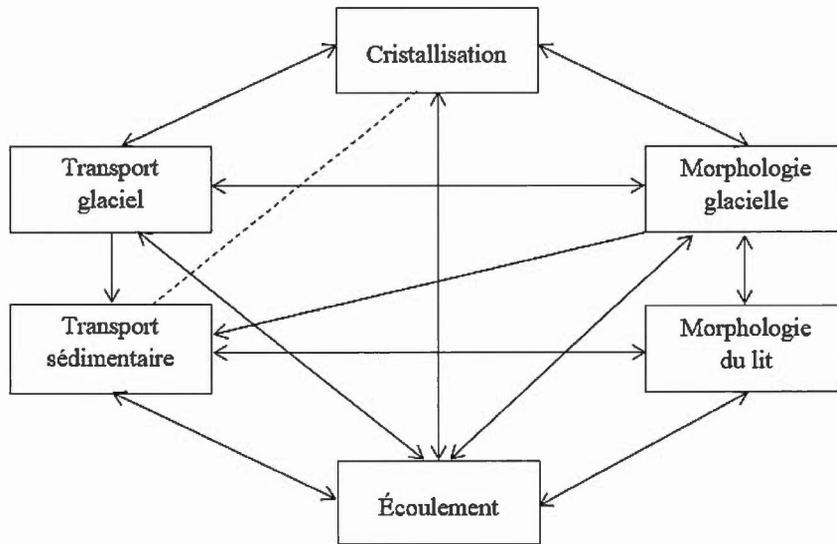


Figure 1.1 Le modèle cristal de Allard (2010)

Le modèle cristal, bien qu'utile dans une perspective hydrogéomorphologique, laisse volontairement de côté des paramètres invariables qui viennent influencer les six paramètres illustrés. Le modèle conceptuel de Turcotte et Morse (2013) ajoute ainsi une dimension importante à la conceptualisation de la dynamique fluviale des rivières par la présence du climat et de l'histoire géologique (Figure 1.2). Dans celui-ci, le régime hydrologique correspond au transport et à l'écoulement tandis que les processus glaciaires se résument à la glace d'ancrage, la présence d'un couvert de glace stable, les barrages suspendus et les embâcles de glace et ce, à différentes échelles temporelles et spatiales (Turcotte *et al.*, 2011).

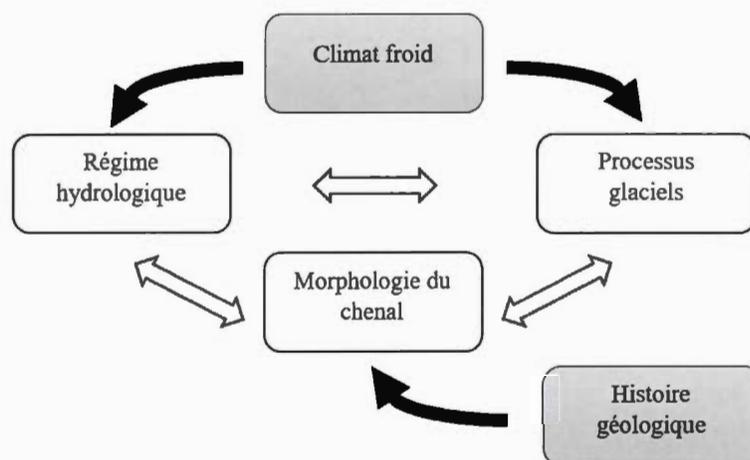


Figure 1.2 Interactions entre les paramètres qui affectent le type de glace et les processus glaciels selon Turcotte et Morse (2013)

Ainsi, ces modèles parviennent à conceptualiser l'impact de la glace sur un milieu fluvial, mais sans s'attarder aux échelles temporelles et spatiales auxquelles ces interactions ont lieu. Cette diversité des échelles est très importante lorsqu'on cherche à comprendre si un processus est durable ou ponctuel au sein d'un milieu (Figure 1.3). Alors que les processus glaciels s'étendent de l'échelle microscopique (la cristallisation du frasil), à celui du tronçon fluvial (élargissement du chenal), voire du bassin versant (zones de formation et de prédisposition aux embâcles), les réponses des divers éléments du cycle hydrologique varient elles aussi considérablement (Turcotte et Morse, 2013). Tandis que certains processus viennent modifier la morphologie de sites le long d'une rivière, d'autres sont plus structurants pour la rivière en entier et perdurent dans le temps.

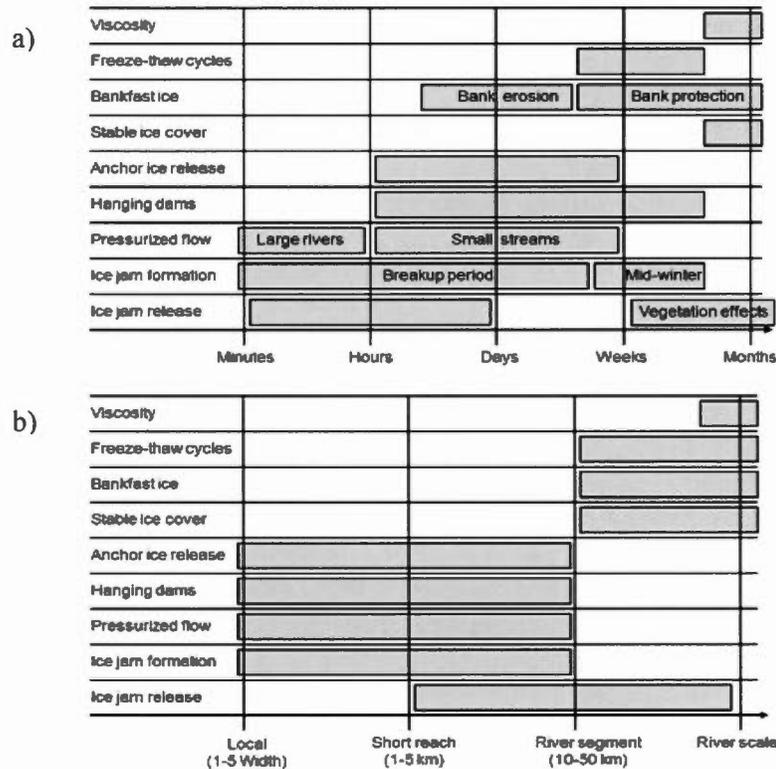


Figure 1.3 Impacts de divers processus glaciels sur le transport sédimentaire selon (a) une échelle temporelle et (b) une échelle spatiale tiré de Turcotte et Morse (2013)

1.2 Empreinte des processus glaciels sur la morphologie du lit

1.2.1 Formation de berges glacielles

L'empreinte géomorphologique du régime glaciaire, c'est-à-dire la somme des processus glaciels se déroulant au sein d'une rivière, le plus reconnu et documenté est l'action érosive du couvert de glace sur les berges (Allard, 2010 ; Bird, 1967 ; Beltaos, 1995 ; Boucher *et al.*, 2009 ; Ettema, 2002 ; Hamelin, 1969 ; Michel, 1972 ; Morin *et al.*, 2015 ; Prowse et Culp, 2003 ; Smith, 1979 ; Turcotte *et al.*, 2011 ; Uunila, 1997). Cette érosion peut se produire à plusieurs niveaux sur le talus et être

causée par différents processus glaciels. Ainsi, un sapement du pied des berges (Figure 1.4) est souvent attribuable à l'action des vagues sous le couvert de glace, à la concentration de l'écoulement sous le couvert qui augmente sa capacité érosive ou directement au mouvement du couvert le long de la berge (Ettema, 2002 ; Prowse et Culp, 2003). Les décrochements d'une portion de la berge sont quant à eux causés par la déstabilisation qu'entraîne la disparition du couvert de glace ayant fait pression sur la berge durant l'hiver (Ettema, 2002 ; Morin, 2015).

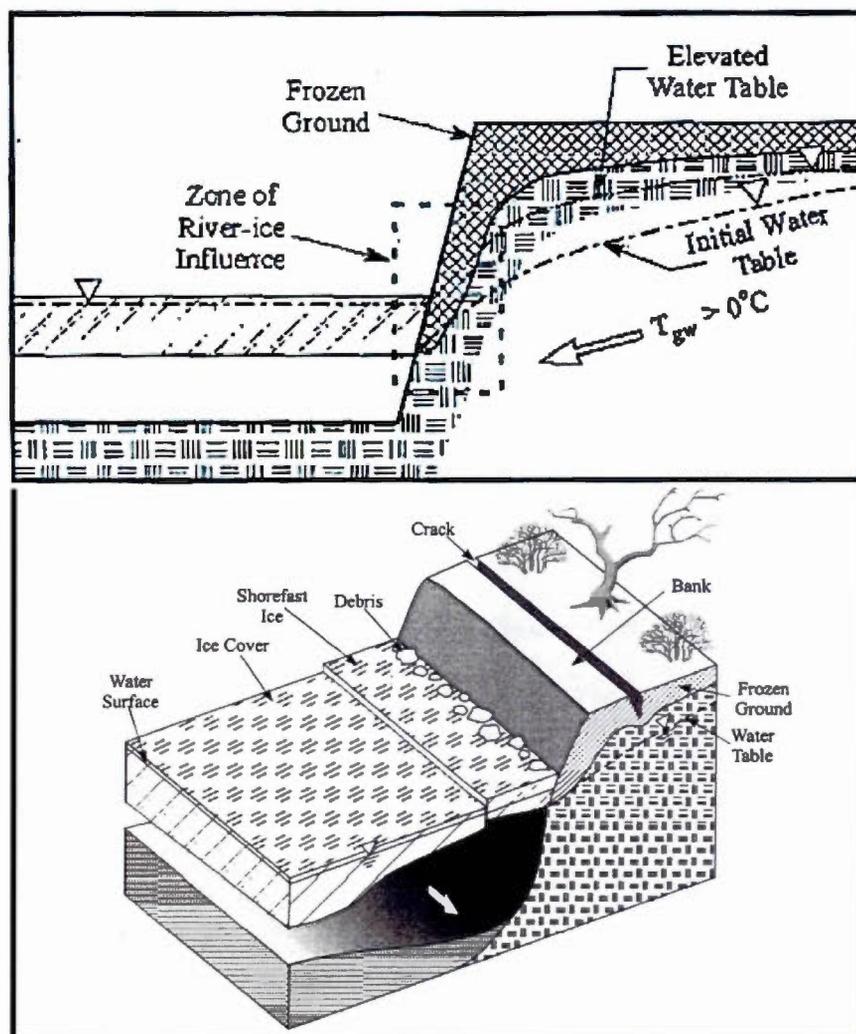


Figure 1.4 Illustration des phénomènes (a) du sapement du pied de la berge et (b) du décrochement des berges (Ettema, 2002 : 210 et 213)

Par ailleurs, certains modelés de berges ne sont présents que dans les milieux où l'on retrouve des embâcles récurrents. C'est le cas des berges à deux niveaux documentés par Boucher, Bégin et Arsenault (2009) et des bechevnick de Hamelin (1969) tous deux illustrées sur la figure 1.5

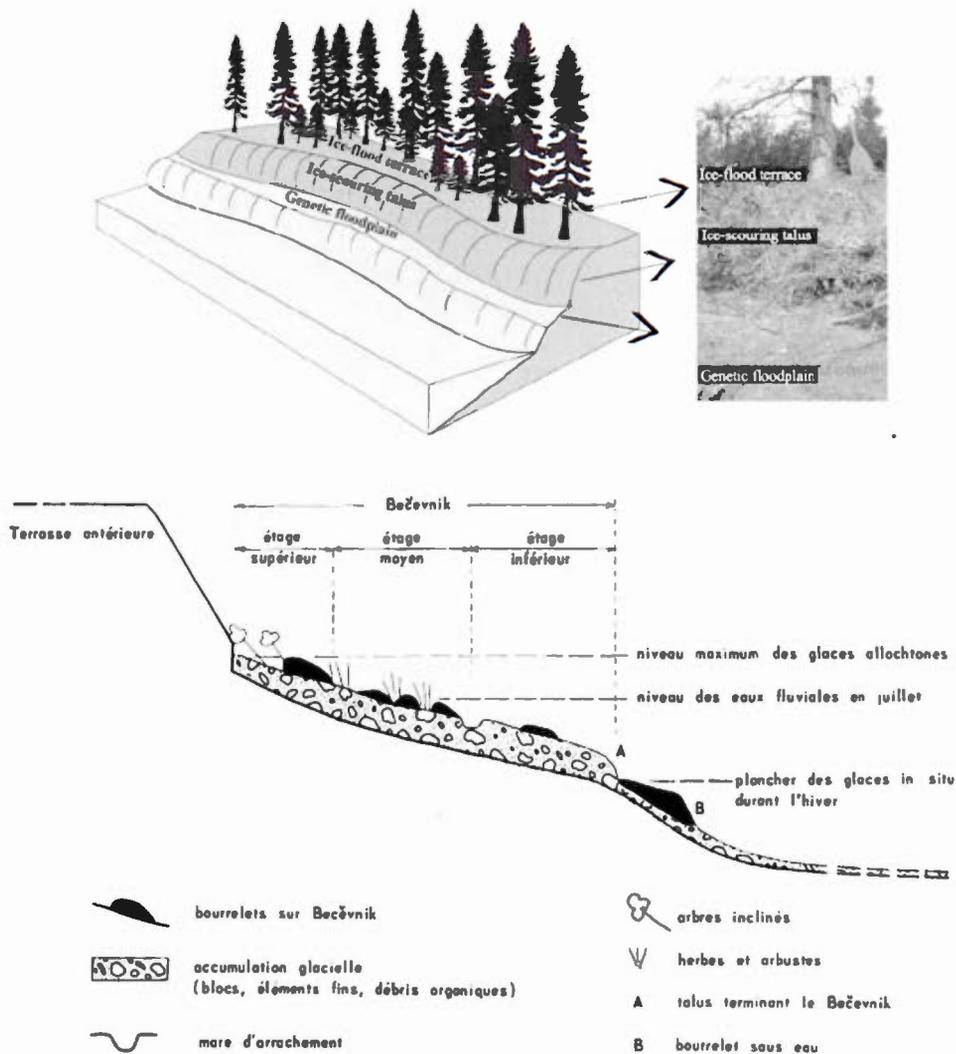


Figure 1.5 Illustration des morphologies de berges issues de processus glaciels (a) berge à deux niveaux (Boucher *et al.*, 2012 : 552) et (b) bechevnick (Hamelin, 1969 : 210)

Les berges à deux niveaux sont le résultat de la combinaison de processus glaciels et fluviaux dans un même environnement. Le premier niveau représente la plaine alluviale générée par l'écoulement en eau libre, alors que le second est le résultat du niveau d'eau atteint lors des inondations causées par les embâcles de glace (Morin, 2015). Le talus de ce type de berges porte des signes d'érosion causés par le transport des glaces formant l'embâcle (Boucher *et al.*, 2009). Pour leur part, les bechevnicks ont été observés sur des rivières nordiques au Québec et en Sibérie, et sont reconnaissables tant d'après leur géomorphologie que leur écologie (Hamelin, 1969). Ces dernières représentent des berges où une partie de la plaine alluviale anormalement élargie par le transport des glaces est recouverte de sédiments déposés lors du retrait du couvert de glace, ainsi que des bourrelets caractéristiques qui démontrent les différents niveaux atteints par la glace (Ettema, 2002). On y observe également un granuloclasement inverse typique en raison des poussées glacielles, c'est-à-dire une distribution des sédiments grossiers de manière distale par rapport au lit mineur.

1.2.2 Incision du chenal

Une autre forme d'empreinte glacielle, moins visible que les précédentes, car elle se déroule verticalement, est la déformation du lit qui peut prendre diverses formes telles que les fosses à frasil et le surcreusement du talweg ou même du chenal en entier (Allard *et al.*, 2011, Best *et al.*, 2005, Ettema et Kempema, 2012, Sui *et al.*, 2000). La présence d'un couvert de glace et l'accroissement de la capacité d'érosion qui en découlent peuvent expliquer un tel processus (Zabilansky *et al.*, 2002). La formation

d'embâcles de frazil à la formation et à la dislocation du couvert de glace peut aussi causer une incision du chenal (Zabilansky *et al.*, 2002).

Les fosses à frazil se retrouvent principalement dans les secteurs sinueux des rivières et sont le résultat d'une érosion accrue à la suite d'une concentration de l'écoulement sous les barrages suspendus (Allard *et al.*, 2011). Dans ce cas, la déformation du lit et le couvert de glace se renforcent l'un et l'autre, car tous les deux ont un impact sur les conditions hydrauliques de la rivière (Sui *et al.*, 2000). Ces fosses peuvent causer une déformation du profil en long de la rivière (Figure 1.6) aussi bien que la section transversale des tronçons. Un phénomène similaire se produit également dans les embâcles de dislocation, alors que des zones d'érosion peuvent se produire lors des événements et parfois modifier le lit de façon permanente (Neill, 1976 ; Smith et Pearce, 2002).

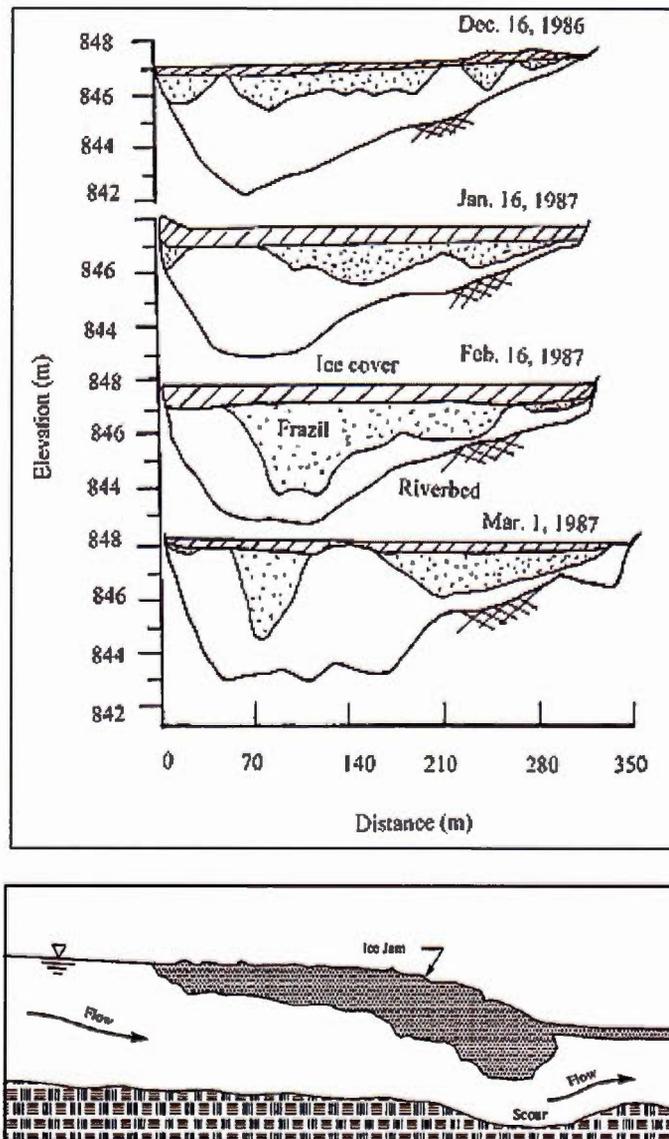


Figure 1.6 Illustrations de (a) l'évolution de la déformation transversale du lit en présence d'un barrage suspendu et formation d'une fosse (Sui et al., 2000) et (b) surcreusement du chenal dans le sens de l'écoulement causé par un embâcle de glace (Ettema et Kempema, 2012)

D'autres formes de surcreusement du chenal peuvent aussi apparaître dans les rivières soumises à des processus glaciels. En effet, lors de la cristallisation du frasil celui-ci a

tendance à s'ancrer au fond du chenal et à y former une couche de glace (Allard *et al.*, 2010). Lorsque l'écoulement est assez important, cette glace de fond peut se décrocher et ainsi emporter avec elle une portion du matériel formant le lit de la rivière (Best *et al.*, 2005).

Le talweg, c'est-à-dire la ligne formée par l'ensemble des points les plus profonds du chenal, est parfois affecté de manière plus importante que le reste de son environnement (Ettema, 2002). La concentration de l'écoulement sous le couvert augmente la puissance effective du cours d'eau, au niveau du talweg. Ainsi, dans un chenal en tresses ou qui comporte des obstacles (Figure 1.7), l'écoulement se concentre dans un seul sous-chenal et peut mener à une unification du talweg et augmenter sa sinuosité (Zabilansky *et al.*, 2002).

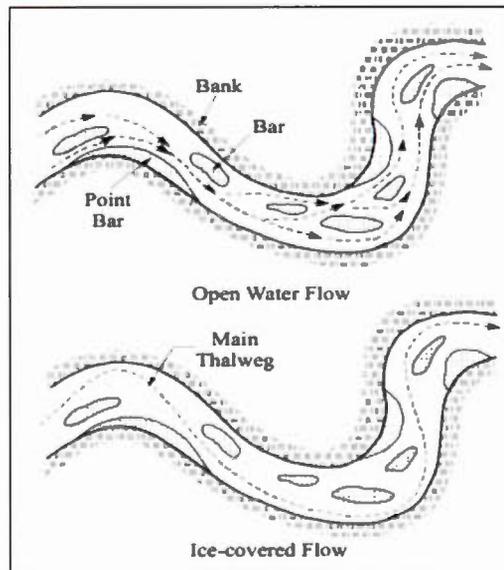


Figure 1.7 Évolution d'un talweg sous un couvert de glace (Zabilansky *et al.*, 2002).

1.2.3 Modification du plan de la rivière

L'observation en plan de la morphologie de la rivière peut aussi nous éclairer sur les modifications induites par divers processus glaciels. Le plus spectaculaire de ces impacts en plan, l'avulsion, se déroule dans les secteurs à méandres lors d'un événement d'embâcle de glace et peut transformer de façon permanente l'allure d'un chenal (Smith et Pearce, 2002). Comme le montre la figure 1.8, une avulsion peut mener à un élargissement temporaire des sous-chenaux et ultimement à l'abandon du méandre (Zabilansky *et al.*, 2002). Une autre conséquence possible de l'obstruction du chenal par la glace est la réorientation de l'écoulement en dehors du chenal, ce qui cause un ravinement aux abords des zones inondées lorsque cette eau réintègre le chenal principal (Smith et Pearce, 22002). Ce ravinement peut se dérouler indépendamment ou simultanément à l'avulsion.

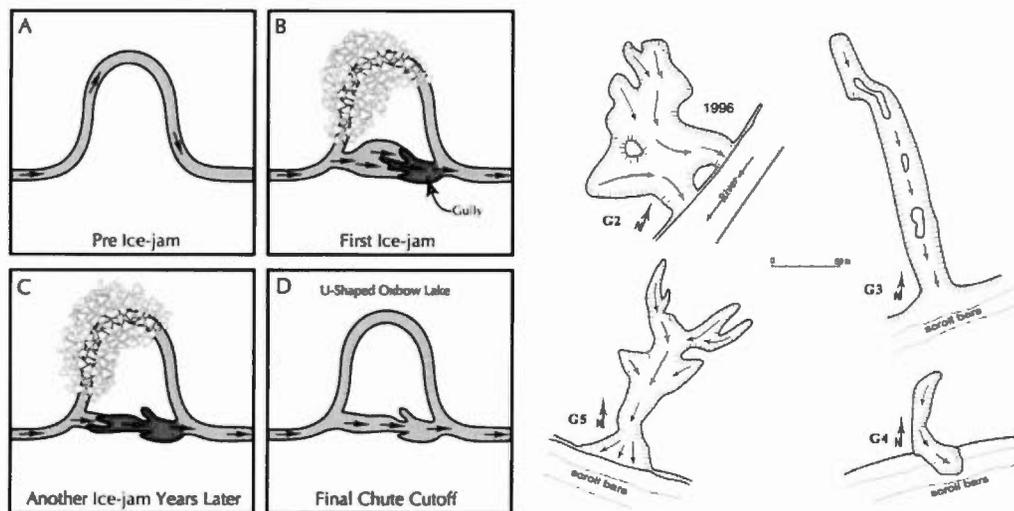


Figure 1.8 Illustration (a) de l'avulsion et (b) du ravinement glacial (Smith et Pearce, 2002)

Cette multiplication des chenaux peut entraîner la formation d'un chenal anastomosé dans des secteurs auparavant à méandres en raison de la baisse des apports

sédimentaires et de la hausse du niveau de l'eau lors des épisodes d'embâcle de glace (Hicks, 1993).

Une autre avenue possible pour les rivières avec un couvert glaciaire assez important pour réorienter l'écoulement et limiter la quantité de sédiments transportés est la réduction de l'amplitude des méandres (Ettema et Kempema, 2012). Cet ajustement de la rivière s'accompagne généralement d'une migration des méandres dans le sens de l'écoulement et, à long terme, favorise leur linéarisation (Zabilansky *et al.*, 2002). Toutefois, si le chenal est très large et peu friable, le résultat de la hausse du niveau de l'eau pourrait augmenter la sinuosité du méandre au lieu de l'éroder en ajoutant du matériel meuble sur les rives concaves (Ettema, 2002).

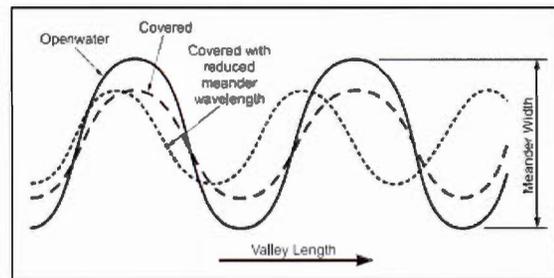


Figure 1.9 Évolution d'un chenal à méandres en présence d'un couvert de glace (Zabilansky *et al.*, 2002)

La hausse du volume d'eau en amont d'un embâcle entraîne elle aussi certains changements à la morphologie des chenaux comme l'érosion ou la disparition des îles (Hicks, 1993). Ce phénomène peut se produire même en l'absence d'embâcles, par exemple, lorsque le couvert de glace exerce une pression sur les rives des îles et que son retrait les déstabilise.

1.2.4 Empreintes glacielles sur les plaines inondables

Certaines autres formes mineures, mais typiques au transport de glace peuvent faire leur apparition sur les plaines inondables des rivières (Hamelin, 1969). Il est possible de recenser le passage des glaces dans un milieu en regardant les microformes d'érosion et de dénudation, comme le polissage, les stries, les cupules réniformes, les gouttières et les cuvettes présentent sur les berges (Hamelin, 1969, MacKay et MacKay, 1977).

Des formes d'accumulation sont aussi présentes lorsque les berges le permettent, c'est-à-dire lorsqu'elles présentent une pente faible ou un élargissement comme dans le cas des bechevnick et des berges à deux niveaux. Les pavages de blocs sont les formes d'accumulation les plus fréquemment observées (Dionne, 1992 ; Ettema, 2002 ; Mackay et Mackay, 1977 ; Prowse et Culp, 2003 ; Uunila, 1997). Elles prennent place lorsque les blocs, généralement transportés vers l'aval à l'intérieur du couvert de glace, sont déposés sur les berges de façon parallèle à la rivière (Dionne, 1992). La pérennité des formes d'accumulation dépend de l'enfoncement des blocs et de leur taille, mais les pavages de blocs sont les formes les plus stables (MacKay et MacKay, 1977).

Une autre trace laissée par le couvert de glace sur les plaines inondables est l'accrétion de sédiments au sommet des berges (Bird, 1967 ; Prowse et Culp, 2003). Contrairement aux autres formes présentées, celles-ci sont le résultat des inondations causées par les embâcles de glace (Prowse et Culp, 2003). Ces accrétions de sédiments peuvent être retrouvées très loin du lit de la rivière selon l'ampleur de l'inondation, tandis que la taille des formes varie selon la durée (Hamelin, 1969).

1.2.5 Transformation de la végétation riveraine

En plus des nombreuses incidences géomorphologiques, le régime glaciaire affecte aussi grandement l'écologie des berges (Lind *et al.*, 2014 ; Prowse et Culp, 2003). Bien que la présence d'un couvert de glace puisse ralentir la photosynthèse et ainsi affecter la physiologie de la végétation et mettre en péril les algues, les bryophytes et les macrophytes immergés, les transformations physiques de la végétation riveraine sont les indicateurs le plus étudiés pour déterminer la présence et la magnitude des événements glaciaires sur une rivière (Lind *et al.*, 2014). Parmi les processus documentés, on retrouve les impacts sur les végétaux, le transport des débris végétaux et l'évolution des peuplements riverains (Uunila, 1997).

Lors d'embâcles de glace ou d'importantes crues avec transport glaciaire, le couvert de glace se retrouve surélevé par rapport au niveau plein bord de la rivière et peut entrer en contact avec la végétation riveraine (Boucher *et al.*, 2009 ; Lind *et al.*, 2014 ; Prowse et Culp, 2003 ; Smith et Pearce, 2002 ; Tardif et Bergeron, 1997 ; Taylor *et al.*, 2008 ; Uunila, 1997). Les glaces en mouvement étant plus denses que les arbres sur lesquels elles se heurtent, il arrive que des lésions se forment sur les arbres. Les arbres touchés forment une cicatrice sur leur tronc à l'emplacement où le cambium, le tissu reproductif situé au pourtour de la tige, est atteint. Toutefois, pour certains individus plus jeunes ou moins résistants l'impact peut mener à une fracture du tronc et ultimement à la mort. Les différents niveaux atteints localement par le couvert de glace sont ainsi enregistrés par la végétation arborescente à chaque événement (Hamelin, 1969 ; Smith et Reynolds, 1983).



Figure 1.10 Cicatrices sur un arbre riverain de la rivière l'Acadie causées par l'impact du couvert de glace à l'hiver 2017

L'arrachement de la végétation ou l'exhumation des racines de la végétation arbustive et arborescente sont d'autres manifestations possibles du passage du couvert de glace (Hamelin, 1969 ; Lind *et al.*, 2014 ; Prowse et Culp, 2003). Ce phénomène peut aussi être causé par l'effondrement des berges déstabilisées par le retrait de la glace (Ettema, 2002 ; Ettema et Kempema, 2012 ; Zabilansky *et al.*, 2012). Parfois, c'est le gel de la végétation riveraine à l'intérieur des couverts de glace qui cause leur dénudation lorsque les blocs sont emportés dans le courant au moment de la fonte (Zabilansky *et al.*, 2002).

Les débris végétaux constitués de tiges d'arbres et d'arbustes arrachés sont pris en charge par le couvert glaciaire qui les transporte vers l'aval (MacKay et MacKay, 1977). Lors de la fonte, des amoncellements de débris végétaux font ainsi leur apparition sur les rives érodées, un peu à la manière des pavages de blocs (Hamelin, 1969). Cet important transport de débris végétaux dans la rivière augmente considérablement les risques d'embâcles de bois (Boivin *et al.*, 2015).

La succession naturelle des peuplements riverains et les espèces qu'on y retrouve sont également modifiées par la présence d'un couvert de glace dans son milieu (Uunila, 1997). Dans les zones de forte activité glacielle, il est plutôt rare d'observer des arbres matures au pied des berges et presque impossible d'en trouver dans les chenaux (Lind *et al.*, 2014). Cette situation s'explique par les nombreux impacts physiques mentionnés précédemment que vivent les individus riverains en cas d'érosion et d'inondation (Prowse et Culp, 2003). Les individus arborescents les moins résistants peuvent geler, être arrachés ou recouverts par le matériel transporté par les glaces (Turcotte *et al.*, 2011 ; Uunila, 1997). Certaines espèces, comme les aulnes rugueux et les saules à feuilles plates réussissent toutefois à s'implanter le long des cours d'eau boréaux, car elles sont plus résistantes à la submersion, l'abrasion et la sédimentation (Boucher *et al.*, 2009).

1.3 Empreinte des processus glaciels sur la morphologie de la rivière

Plusieurs des formes ci-haut mentionnées ont été rapportées de manière anecdotique dans les cours d'eau nordiques comme les cuvettes d'arrachement sur les rivières albertaines (Smith et Pearce, 2002), les ruisselets et les sapements sur la rivière Liard dans les Territoires du Nord-Ouest (Prowse et Culp, 2003) ou encore les fosses à frasil de la rivière Mitis (Allard *et al.*, 2011). Par conséquent, il demeure difficile de spatialiser leur occurrence et de bien saisir dans quel contexte hydrogéomorphologique ces dernières ont été formées et entretenues. De plus, l'addition de toutes les incidences ponctuelles à l'échelle du site n'est pas suffisante pour que l'on détermine où l'impact des processus glaciels est le plus structurant. En effet, ces événements doivent être localisés selon des gradients le long des cours d'eau ou selon une chronologie temporelle pluriannuelle afin d'avoir un portrait plus juste de leurs impacts (Boucher *et al.*, 2012).

La première étude traitant de la récurrence des événements glaciels, réalisée par D. G. Smith (1979) et portant sur 24 rivières albertaines, évoque que l'élargissement anormal du chenal là où se déroule l'activité glacielle entraîne une période de retour plus longue pour les crues de niveau plein bord. Dès la publication de l'article, certains auteurs ont témoigné leur scepticisme, dont Kellerharls et Church (1980) qui contesteront le caractère permanent de l'impact des glaces sur la morphologie des chenaux. Cette idée de volatilité des formes créées par la glace sur les rivières avait également été défendue auparavant par Birds (1967) et Neill (1976), affirmant que l'action érosive des glaces flottantes était négligeable.

À l'heure actuelle, peu d'études se sont intéressées aux impacts du régime glacial à de larges échelles, principalement parce que la fréquence et l'intensité historique des embâcles sont peu documentées dans les régions nordiques. Pourtant, il semble logique que des événements d'une telle magnitude se déroulant parfois annuellement soient structurants dans certains secteurs (McNamara, 2012). Le sens de la relation entre la morphologie du chenal et les événements d'embâcles de glace n'est cependant pas toujours clair. Certaines morphologies, dont les transitions de styles fluviaux et les secteurs à méandres, semblent être des endroits propices à la formation d'embâcle (Michel, 1972 ; Smith et Pearce, 2002). Il semble toutefois que les embâcles de glace aient un impact sur ces milieux puisqu'on les tient responsables du remodelage de certains chenaux par la création d'avulsions qui participent à la linéarisation des chenaux (Ettema et Kempema, 2012). Un phénomène d'apparition d'un chenal anastomosé sur la rivière Mackenzie a aussi été attribué à la présence de glace et à la hausse du niveau d'eau se déroulant généralement lors d'événements d'embâcles (Hicks, 1993).

1.3.1 Seuils et conditions particulières

Pour que l’empreinte glacielle soit permanente et supplante l’action géomorphologique de l’écoulement en eau libre, l’activité glacielle doit rencontrer certains seuils ou certaines conditions particulières. Hamelin (1969) estimait que pour que le glacier ait un impact durable sur le paysage fluvial, la rivière devait avoir des prédispositions structurales. Par cela, il entendait que :

Une vallée, toute récente, sans encaissement, ou une gorge profonde à paroi verticale ne permet évidemment pas le remodelage des rivages. Il faut donc des prédispositions structurales ou un type d’évolution du relief pour que certains traits glaciels puissent s’inscrire. Ainsi, sur les rivages en faible pente, l’influence glacielle peut s’exercer sur des distances de près de deux cents mètres ; en ce cas, l’action glacielle est plus que ponctuelle, elle devient aréolaire (Hamelin, 1968 : 208).

Plus récemment, Best *et al.* (2005) ont observé que l’élargissement du chenal de la rivière Kuparuk augmentait sensiblement à partir d’un certain débit correspondant à une aire de drainage spécifique (Figure 1.11). Ces derniers ont attribué la situation à la transition entre une glace ancrée en profondeur qui éroderait le fond du chenal à un couvert flottant procédant davantage à une érosion latérale des berges (Best *et al.*, 2005). Les changements dans le type de glace à l’échelle de la rivière sont en effet un phénomène documenté et attribuable à la morphologie du lit, la morphologie du chenal, la grosseur du chenal et le régime climatique (Turcotte et Morse, 2013).

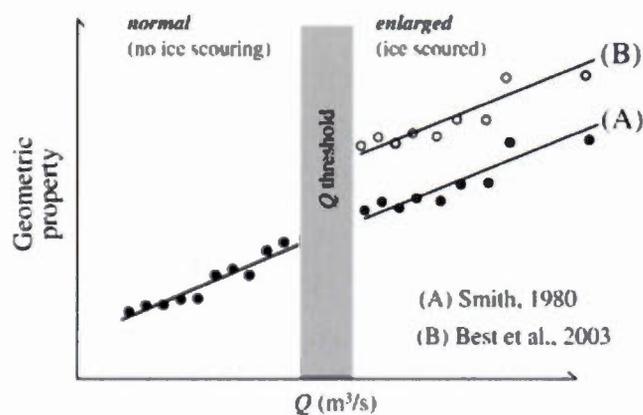


Figure 1.11 Conceptualisation des débits requis pour un élargissement des rivières avec activité glacielle (Best *et al.*, 2003)

De leur côté, Boucher *et al.* (2009) expliquent l'élargissement du chenal de la rivière Nécopastic causé par l'érosion à la fréquence des embâcles. En effet, sur cette rivière, l'observation de berges anormalement érodées sur de longs tronçons n'est évidente que lorsque la fréquence des embâcles est supérieure à un événement par cinq ans (Boucher *et al.*, 2009).



Figure 1.12 Morceaux de glaces laissés à la suite d'un embâcle faisant pression sur la rive convexe d'un méandre à l'hiver 2017

Depuis ces deux études, d'autres recherches se sont intéressées à ce phénomène dont Taylor *et al.* (2008) ainsi que Morin *et al.* (2015). Ces études portant sur le régime spatio-temporel d'embâcles de glace ont observé une augmentation de la fréquence des embâcles vers l'aval, tandis que Morin (2015) constate que cette augmentation correspond également à un chenal large et peu profond puis à une omniprésence d'obstructions ou de constrictions amenant une diminution de la largeur du chenal. Bien avant celles-ci, Laszoffy (1972) notait lui aussi une hausse du nombre d'embâcles dans le sens de l'écoulement sur plusieurs rivières hongroises et l'attribuait à l'augmentation du débit et du nombre de tributaires se jetant dans les cours d'eau principaux.

CHAPITRE II

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

2.1 Problématique et objectifs de recherche

La gestion des risques naturels est un aspect très important de l'aménagement du territoire au Québec. Pourtant, les zones inondables du sud du Québec sont généralement très habitées à cause de notre mode de peuplement axé sur les cours d'eau et leurs attraits. Alors que les inondations sont les catastrophes naturelles les plus fréquentes au Québec, le tiers d'entre elles ont lieu l'hiver et sont associées à des effets de glace. Pourtant, très peu d'accent est mis en recherche pour comprendre les processus qui gouvernent ces inondations hivernales (Beltaos, 2014 ; Québec, 2016).

La présente recherche a pour objectif d'acquérir des connaissances sur les processus glaciels par leur spatialisation au sein du bassin versant de la rivière l'Acadie en Montérégie. Suivant une approche hydrogéomorphologique, une caractérisation des propriétés du bassin versant, du chenal puis des berges de la rivière l'Acadie a été effectuée afin de localiser l'activité glacielle et déterminer les facteurs la prédisposant. Par la suite, la fréquence des événements d'embâcles de glace aux endroits ciblés a été établie à l'aide du dénombrement des cicatrices visibles sur les arbres selon leur âge pour comprendre la relation entre le régime d'embâcles de glace et les autres processus se déroulant sur la rivière.

2.2 Région à l'étude

2.2.1 La rivière l'Acadie et son bassin versant

La source de la rivière l'Acadie se trouve tout près de la frontière avec l'État de New York dans le Canton de Hemmingford. Cette dernière se jette dans la rivière

Richelieu dans la municipalité de Carignan en aval du bassin de Chambly après un parcours de 84 km.

Le bassin versant de la rivière l'Acadie est un sous-bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu qui couvre un territoire de 555 km². Elle traverse quatre Municipalités régionales de comté (MRC), soit les Jardins-de-Napierville, le Haut-Richelieu, Roussillon et la Vallée-du-Richelieu, ainsi que l'agglomération de Longueuil (Drouin *et al.*, 2009). Situé dans la région géologique des basses terres du Saint-Laurent, le territoire fut marqué par les dernières glaciations quaternaires et l'épisode de la Mer de Champlain comme en témoignent les sols composés principalement d'argiles, de sables et de graviers (Landry *et al.*, 1992). Alors que le relief généralement plat s'étend de 9 à 80 mètres au-dessus du niveau de la mer, le mont Saint-Bruno, issu de la chaîne des Montérégiennes, s'inscrit au paysage avec 210 mètres d'altitude (*Ibid*, 1992). L'activité principale de ce bassin versant au climat continental modéré subhumide est l'agriculture (COVABAR, 2015).

L'occupation du territoire a débuté par des peuplements autochtones américains il y a quelques dizaines de milliers d'années, les derniers occupants étant d'origine iroquoise (Nourry, 2002). Deux fronts pionniers de colonisation ont ensuite largement marqué le territoire : d'abord les seigneuries françaises au XVII^e siècle, puis les cantons des loyalistes américains ayant fui la Guerre d'indépendance des États-Unis au XVIII^e siècle plus au sud (*Ibid*, 2002). Aujourd'hui, alors que plus de 70 % du territoire a une vocation agricole, on remarque quelques activités industrielles et des constructions résidentielles en hausse dans le secteur Chambly-Carignan (Drouin *et al.*, 2009).

2.2.2 Division en secteurs homogènes

Afin de faciliter la caractérisation du bassin versant de la rivière l'Acadie et les processus glaciels s'y déroulant, la rivière a été divisée morphologiquement en cinq secteurs homogènes de l'amont vers l'aval (Figure 2.1). Le secteur 1 se situe à proximité de la frontière américaine et est d'une longueur de 10,8 km dans une zone de forêts et de tourbières. Le chenal y est rectiligne et étroit. Le secteur 2 faisant 18,5 km se trouve dans une zone fortement agricole et aménagée ce qui explique la forme rectiligne du chenal creusé mécaniquement et sa largeur constante. Le secteur 3 traverse de petites zones urbaines, bien qu'il soit majoritairement agricole, et s'étend sur 18,4 km. Par la suite, la rivière s'élargit graduellement sur les 30,9 km du secteur 4 où l'on observe de nombreux méandres. Le secteur 5 d'une longueur de 5,5 km se distingue par son allure rectiligne. Située à la confluence avec la rivière Richelieu, il s'agit du secteur le plus résidentiel de la rivière l'Acadie.



Figure 2.1 Division de la rivière l'Acadie par secteurs homogènes

2.3 Méthodologie

2.3.1 Approche hydrogéomorphologique

Les objectifs de cette recherche découlent de l'approche hydrogéomorphologique. Celle-ci met en lumière les relations entre les processus fluviaux et la forme des rivières suivant une pluralité d'échelles allant des sections transversales du chenal au bassin versant (Malavoi et Bravard, 2010). Ainsi, par l'étude des formes de la rivière, il est possible d'identifier, de reconnaître et de comprendre ces processus (Morin, 2015). Dans les régions nordiques, cette approche permet de distinguer les modelés découlant de l'érosion, de la sédimentation, de la stabilité ou encore des processus glaciels (Demers *et al.*, 2014). Suivant cette logique, les formes présentes à l'échelle du bassin versant, du chenal et des berges de la rivière l'Acadie ont été étudiées lors de campagnes de terrain à l'été 2016, mais également par l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) généré par le logiciel *ArcGis*®.

Caractérisation du bassin versant par SIG

Le bassin versant de la rivière l'Acadie a été caractérisé à l'aide d'analyse spatiale dans *ArcGis*®. Les indicateurs qui ont été retenus pour cette caractérisation sont les aires drainées et le réseau hydrographique, l'occupation du territoire et le drainage agricole, la nature des dépôts, l'orographie ainsi que la morphométrie du bassin. Différentes couches provenant d'organismes gouvernementaux québécois, canadiens et américains ont été traitées à l'aide d'outils d'analyse spatiale afin d'obtenir des données pour tout le bassin versant (Figure 2.1). Les secteurs homogènes préalablement établis sont un élément important de cette analyse puisque c'est à partir de ceux-ci que les données extraites ont été classées.

Tableau 2.1 Indicateurs utilisés pour la caractérisation du bassin versant

Intrants	Couches originales	Traitement	Données extraites
Réseau hydrographique du Canada	<i>reseau_hydro_fil</i> (RHN, 2004)	Transformation de <i>dem_acad</i> en courbes topographiques avec la fonction <i>Contour</i> (<i>contour_acad</i>)	Carte des aires drainées par secteur du bassin versant de l'Acadie
Limite du bassin versant de la rivière L'Acadie	<i>bv_acad</i> (CEHQ, 2014)	Création d'un MNT hydrologiquement juste à partir <i>reseau_hydro_fil</i> , <i>contour_acad</i> et <i>bv_acad</i> (<i>mnt_acad</i>) avec la fonction <i>Topo to raster</i> de <i>3D analyst</i>	
Modèle numérique de terrain	<i>dem_acad</i> (USGS, 2014)	Création d'une couche contenant les aires drainées par secteur avec la fonction <i>Bassin (aires_dr)</i>	
Occupation du sol	<i>occup_sol</i> (AAC, 2010)	Transformation de la couche matricielle en polygone avec la fonction <i>Raster to polygon</i>	Classement en % du type d'occupation du sol par secteurs
Type de sol	<i>depot_sol</i> (IRDA, 2006)	Croisement avec la couche <i>aires_dr</i>	
Modèle numérique de terrain	<i>dem_acad</i> (USGS, 2014)	Création d'une couche de pente à partir de <i>dem_acad</i> (<i>pente_acad</i>) Extraction des statistiques de <i>pente_acad</i> par secteur de <i>aires_dr</i> avec la fonction <i>Zonal Statistics as table</i>	Pente moyenne et maximale par secteur

Caractérisation morphométrique du chenal au moyen d'un SIG

Les données provenant du système d'information géographique ont également été mobilisées afin de caractériser la morphométrie du chenal de la rivière l'Acadie sur toute sa longueur. Le tableau 2.1 présente les quatre indicateurs ayant été générés pour réaliser la caractérisation. L'indice de sinuosité du chenal correspond à la longueur du talweg d'un tronçon donné sur la longueur entre les deux extrémités du tronçon (Malavoi et Bravard, 2010).

Tableau 2.2 Indicateurs utilisés pour la caractérisation du chenal

Indicateurs	Méthodologie	Source de la couche
Largeur du chenal et de la plaine alluviale (m)	Mesures au 500 m sur image satellite	
Encaissement	Largeur de plaine alluviale/largeur du chenal	Montréal, 2014 CMM, 2013
Sinuosité par tronçon	Calcul d'indices de sinuosité au 1000 m	
Altitude et pente du chenal	Profil en long selon les mesures au 500 m sur Lidar	Montréal, 2008 Montréal, 2011

Ces différents indicateurs ont été choisis, car ils sont souvent présentés dans la littérature comme facteurs pouvant favoriser l'activité glacielle ou augmenter son intensité (Beltaos, 1995 ; Allard, 2010 ; Morin, 2014). En effet, toute obstruction à l'écoulement, qu'il s'agisse d'un rétrécissement du chenal, d'une confluence, d'un pont, d'un barrage, d'un méandre ou encore d'une rupture de pente sont reconnus comme étant des facteurs aggravant la formation des embâcles à l'échelle locale (Hamelin, 1969 ; Laszloffy, 1972 ; Mackay et Mackay, 1973 ; Michel, 1972).

Caractérisation géomorphologique et écologique des berges

La caractérisation des berges sur le terrain s'est effectuée en descendant certains tronçons de la rivière à pied ou en canot selon le niveau de l'eau. Dans le secteur 1,

des tronçons totalisant 3,2 km ont été caractérisés, alors que pour les autres ils furent de 13,5 km (secteur 2), 10,3 km (secteur 3), 20,2 (secteur 4) et 5,3 km (secteur 5). Seule la rive gauche a été échantillonnée systématiquement, car on y retrouve une diversité de formes et d'écosystèmes représentatifs de l'ensemble des tronçons.

Au plan morphologique, les berges étaient divisées en trois sections : le pied (soit le niveau plein bord) le talus (soit la portion occasionnellement en contact avec l'eau) et le sommet (soit la limite de la plaine alluviale) (Lagacé, 2016). Chaque changement géomorphologique (érosion ou sédimentation) ou écologique (changement dans la végétation) d'une portion de la berge entraînait la prise d'un nouveau point GPS, une nouvelle entrée sur la feuille de collecte ainsi qu'une prise de photo. Les divers indicateurs retenus pour la caractérisation se retrouvent dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 Indicateurs utilisés pour la caractérisation géomorphologique des berges

Variabes	Indicateurs	Méthodologie
Géomorphologie	Accumulation	Absence ou présence
	Érosion	Absence ou présence
	Pente de la berge	<30 %, 30-60 %, >60 %
Écologie	Exhumation des racines	Absence ou présence
	Présence de cicatrices glacielles	0 %, ≤ 50 %, > 50 % des arbres impactés

Ces indicateurs ont été choisis, car ils sont répertoriés dans la littérature scientifique comme étant des indices de l'activité glacielle. En effet, la présence d'un couvert de glace affecte les berges par leur action érosive qui peut créer des formes riveraines particulières, engendrer des foyers d'érosion et rendre la pente plus abrupte (Bird, 1967 ; Beltaos, 1995 ; Boucher *et al.*, 2009 ; Ettema, 2002 ; Hamelin, 1969 ; Michel, 1972 ; Morin *et al.*, 2015 ; Smith, 1979 ; Turcotte *et al.*, 2011). Même chose du côté de la végétation riveraine où tant les embâcles que le transport glacielle peuvent entraîner diverses modifications comme un recul, des arrachements ou des cicatrices

(Lind *et al.*, 2014 ; Prowse et Culp, 2003 ; Smith et Pearce, 2002 ; Tardif et Bergeron, 1997 ; Taylor *et al.*, 2008 ; Uunila, 1997).

Ces indicateurs d'érosion et d'accumulation ont permis de réaliser un classement statistique des berges en fonction de leurs attributs. Ainsi, seule l'accumulation de sédiments au pied des berges a été retenue et transformée en 1, autrement la cote 0 a été attribuée. La même formule a été retenue pour l'exhumation des racines sur les berges et les talus, mais celle du sommet a été ignorée. En ce qui concerne les pentes des berges, celles de moins de 30 % ont été transformées en 1, celles entre 30 et 60 % en 2 puis celles de plus de 60 % en 3. Pour les cicatrices sur la végétation arborescente, lorsqu'aucune n'était présente, la berge obtenait la cote 0 (1 si moins de 50 %) des arbres en présentaient, puis 3 si l'on observait plus de 50 % d'arbres impactés sur les berges. Finalement, la présence de foyer d'érosion sur les berges a été catégorisée en 5 classes : 1 pour les berges sans érosion, 2 lors d'une érosion du pied de la berge, 3 en présence d'érosion du pied de berge et du talus, 4 dans les cas où seul le talus était érodé, puis 5 pour celles avec des traces d'érosion au talus et au sommet ou encore sur la berge en entier.

L'analyse statistique a par la suite été effectuée avec la version 1.0.136 du logiciel *R*. Les données ont d'abord été intégrées dans une matrice de dissimilarité, en calculant la distance euclidienne entre deux éléments avec la fonction *dist* de la librairie *cluster* de *R* (R core team, 2016). Le classement en grappes a été réalisé avec la méthode *complete*, de la fonction *hclust*. Un dendrogramme à partir duquel il nous a été possible d'identifier graphiquement les quatre types de berges a été généré. Ces différentes berges qui possèdent des attributs géoécologiques similaires ont été reportées sur *ArcGIS* afin de déterminer leur longueur respective pour chaque tronçon homogène.

2.3.2 Analyse de la fréquence des événements glaciels

La seconde portion de l'analyse sera effectuée à l'aide d'observations des cicatrices glacielles sur les arbres. Cette approche permet de compléter efficacement l'approche hydrogéomorphologique, car elle fournit une mesure indirecte de la fréquence et l'intensité du processus. La datation des cicatrices sur les arbres riverains est une méthode reconnue afin d'établir la fréquence des événements glaciels (Boucher, 2009 ; Morin, 2014). Lorsque la glace entre en contact avec la végétation riveraine lors d'une crue ou d'un embâcle, les arbres enregistrent non seulement le lieu de l'événement, mais également l'année de celui-ci dans son cerne annuel. La hauteur des crues glacielles et des embâcles peut être révélée par l'étude de la hauteur des cicatrices présentes sur les arbres riverains (Smith et Reynolds, 1983 ; Uunila, 1997). Bien que cette méthode ait tendance à surestimer la hauteur des crues, la mesure de la hauteur moyenne des cicatrices permet d'estimer le niveau atteint par les glaces lors des crues (Tardif et Bergeron, 1997 ; Ballesteros-Canovas *et al.*, 2015). Ainsi, en plus d'une recherche documentaire sur les inondations glacielles sur la rivière l'Acadie, une campagne de collecte de données sur le terrain s'est déroulée en octobre 2016 afin de localiser les occurrences glacielles et établir leur magnitude.

Inventaire des inondations hivernales historiques

Afin de connaître la fréquence de l'activité glacielle sur la rivière l'Acadie et de compléter nos observations à partir des arbres, une recherche documentaire a été effectuée afin de répertorier les inondations mentionnées dans les quotidiens nationaux, les archives des bibliothèques universitaires du Québec et dans la base de données *Eureka*. Pour chaque événement constaté, le lieu et la date des inondations hivernales ont été classés dans un tableau afin de les diviser par secteurs et de pouvoir en extraire la fréquence des événements.

Calcul de la magnitude des événements glaciels

En vertu des résultats de la localisation des activités glacielles, la collecte de données sur le terrain afin d'établir la magnitude des événements glaciels s'est effectuée de manière ciblée sur huit sites dans les secteurs 4 et 5 ainsi avec un site dans le secteur 3. Les arbres échantillonnés sont tous des feuillus de différentes espèces parmi lesquels on retrouve des *fraxinus americana*, des *populus deltoides*, des *ulmus americana*, des *tilia americana* ainsi que des *acer saccharum* et *saccharinum*

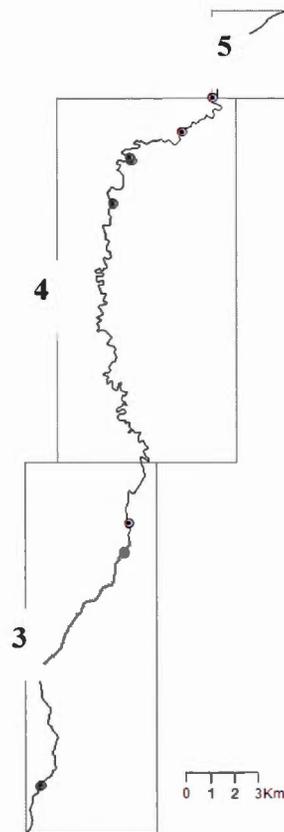


Figure 2.2 Localisation des sites échantillonnés

Pour déterminer la hauteur des crues glacielles et des embâcles de glace à chacun des sites, la hauteur maximale et minimale des cicatrices a été mesurée à l'aide d'une perche graduée à partir du niveau plein bord comme l'illustre la figure 2.3. Par la suite, ces mesures ont été rapportées en hauteur absolue à l'aide des altitudes extraites des couches LIDAR (Montérégie, 2008 ; Montérégie, 2011). La hauteur moyenne absolue par arbres et par sites ont été calculées et consignées dans un tableau afin de les comparer avec les données des Programmes de détermination des cotes de crue (PDCC) du CEHQ.



Figure 2.3 Illustration (a) de la hauteur des cicatrices enregistrées, (b) du décompte des cicatrices glacielles et (c) du calcul des cernes de croissance annuelle

En ce qui concerne la fréquence, la méthode a consisté à recenser le nombre de cicatrices sur chacun des arbres sur le terrain. Le dénombrement des cernes annuels de croissance sur chacune des carottes prélevées s'est fait après une numérisation à haute résolution (figure 2.3a). Ensuite, le calcul de la fréquence des événements glaciels a été établi par rapport à l'âge de l'échantillon dans le but d'obtenir un nombre d'événements par année. Les fréquences calculées par sites ont ensuite été transformées en moyenne par secteurs puis consignées dans un tableau afin de les comparer à celles obtenues par la recherche documentaire.

CHAPITRE III

Résumé de l'article :

S'écoulant du sud au nord sur 84 km, la rivière l'Acadie est un affluent de la rivière Richelieu située en Montérégie, au Québec. Celle-ci présente des problèmes récurrents d'inondations hivernales ayant de lourds impacts sur les milieux habités des villes de Chambly et Carignan. La recherche présentée ici a pour objectif d'acquérir des connaissances sur son régime d'embâcles de glace par leur spatialisation au sein du bassin versant de la rivière l'Acadie. Suivant une approche hydrogéomorphologique, une caractérisation des propriétés du bassin versant, de la rivière puis des berges de la rivière l'Acadie a été effectuée afin de spatialiser l'activité glacielle le long de celle-ci. Par la suite, la fréquence des événements d'embâcles de glace aux endroits ciblés a été établie à l'aide du dénombrement des cicatrices visibles et des archives documentaires pour comprendre la synergie entre les phénomènes glaciels et les autres processus se déroulant sur la rivière. Les résultats ont démontré comment la morphométrie et l'hydrographie du bassin versant, l'omniprésence de l'agriculture et des infrastructures civiles ainsi que l'héritage de la dernière glaciation quaternaire favorisent le régime d'embâcles de glace sur la rivière. De plus, l'étude des berges et des impacts glaciels a permis de localiser, différencier et expliquer les processus glaciels dominant les trois secteurs situés en aval de la rivière. En somme, il a été possible d'évaluer la signature des processus glaciels sur les berges et de comprendre l'évolution longitudinale de l'activité glacielle le long de certains secteurs de cette rivière.

Summary:

L'Acadie River is a 84 km long tributary of the Richelieu River. It flows northwards through the southwestern region of Montérégie in Quebec, Canada. The river is well known for its frequent winter floods that severely affect the nearby inhabited towns of

Chambly and Carignan. The main objective of this research is to gain knowledge on river ice dynamics based on their spatialization within L'Acadie River's watershed. The characterization of the watershed, channel, and river banks' properties and features is based on a hydrogeomorphological approach to spatialize river ice activities along the course of the river. The frequency of the ice jam events allows to get a better understanding of the relationship between river ice dynamics and other processes taking place on the river. We show that the geocological signature of river ice activity dominates the three downstream sectors of the l'Acadie River. The study emphasizes that watershed and hydrographical properties, the ubiquity of agriculture and public infrastructures, and the legacy of the Quaternary ice period in the area are all factors that contribute to support the ice scouring activity in the downstream section of the main channel.

3.1 Introduction

Au Québec, on estime qu'environ le tiers des inondations est causé par les glaces de rivières et que les dommages qu'elles causent sont généralement plus importants que celles en eaux libres, notamment car elles entraînent une montée des eaux plus importantes (Beltaos, 2014 ; Turcotte, 2016). Celles-ci affectent plusieurs secteurs de la société, dont les infrastructures publiques, le transport hivernal, les industries et les populations riveraines, mais aussi les écosystèmes (Beltaos et Burrell, 2015 ; Morse et Hicks, 2005 ; Richard *et al.*, 2015).

Bien que de nombreux modèles conceptuels en hydrogéomorphologie ne prennent pas en compte l'englacement des rivières, Turcotte et Morse (2013) considèrent les processus glaciels comme un paramètre central de la dynamique fluviale de milieux froids. Partant de ce constat, il est possible de décliner plusieurs empreintes des processus glaciels sur la morphologie du chenal telle que l'apparition de berges glacielles par l'action érosive des glaces (Bird, 1967 ; Beltaos, 1995 ; Boucher *et al.*, 2009 ; Ettema, 2002 ; Hamelin, 1969 ; Michel, 1972 ; Morin *et al.*, 2015 ; Prowse et

Culp, 2003 ; Smith, 1979 ; Turcotte *et al.*, 2011 ; Uunila, 1997), l'incision verticale du lit (Allard *et al.*, 2011, Best *et al.*, 2005, Ettema et Kempema, 2012, Sui *et al.*, 2000), la modification de la forme en plan de la rivière (Hicks, 1993 ; Smith et Pearce, 2002 ; Zabilansky *et al.*, 2002), la création de formes glacielles sur la plain inondable (Dionne, 1992 ; Hamelin, 1969 ; MacKay et MacKay, 1977 ; Prowse et Culp, 2003) et la transformation de la végétation riveraine (Boucher *et al.*, 2009 ; Lind *et al.*, 2014 ; Prowse et Culp, 2003 ; Smith et Pearce, 2002 ; Tardif et Bergeron, 1997 ; Taylor *et al.*, 2008 ; Uunila, 1997). À travers une approche misant sur la spatialisation de ces phénomènes glaciels, il devient possible d'évaluer les prédispositions territoriales à l'activité glacielle (De Munk et al., 2017, Hamelin, 1969) comme les seuils de débits (Best *et al.*, 2005) ou encore la fréquence des événements d'embâcles (Boucher *et al.*, 2009).

Située en Montérégie, la rivière l'Acadie connaît régulièrement des épisodes d'inondations hivernales générés par la formation d'embâcles de glace. Ces épisodes peuvent s'étendre sur des dizaines de kilomètres et nécessitent parfois des interventions préventives visant l'affaiblissement du couvert de glace (Beltaos, 1995 ; Duchaine, 2016). Dans le cadre de la présente étude, une spatialisation des processus glaciels suivant une approche hydrogéomorphologique a été effectuée à l'échelle de son bassin versant. Cette approche est particulièrement intéressante pour une rivière comme l'Acadie où les risques associés au couvert glacielle sont connus, mais dont la localisation n'a jamais été expliquée. De plus, l'évolution longitudinale de l'activité glacielle sera couplée avec une analyse de la fréquence des embâcles de glace en dénombrant le nombre de cicatrices visibles selon l'âge des arbres. Ces nouvelles connaissances permettront d'évaluer l'ampleur du régime d'embâcle dans la portion du bassin versant plus urbanisé située en aval et de mieux renseigner les autorités locales et la population.

3.1.1 Site à l'étude

La source de la rivière l'Acadie se trouve tout près de la frontière avec l'État de New York dans le Canton de Hemmingford. Cette dernière se jette dans la rivière Richelieu dans la municipalité de Carignan en aval du bassin de Chambly après un parcours de 84 km. Le bassin versant de la rivière l'Acadie est un sous-bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu qui couvre un territoire de 555 km². Situé dans la région géologique des basses terres du Saint-Laurent, le territoire est marqué par les dernières glaciations quaternaires et l'épisode de la Mer de Champlain comme en témoignent les sols composés principalement d'argiles, de sables et de graviers (Landry *et al.*, 1992). Alors que le relief généralement plat s'étend de 9 à 80 mètres au-dessus du niveau de la mer, le mont Saint-Bruno, issu de la chaîne des Montérégiennes, s'inscrit au paysage avec 210 mètres d'altitude (*Ibid*, 1992). La principale occupation du sol de ce bassin versant au climat continental modéré subhumide est l'agriculture (COVABAR, 2015).

Afin de faciliter la caractérisation du bassin versant de la rivière l'Acadie et les processus glaciels s'y déroulant, la rivière a été divisée morphologiquement en cinq secteurs homogènes de l'amont vers l'aval (Figure 3.1). Le secteur 1 se situe à proximité de la frontière américaine et est d'une longueur de 10,8 km dans une zone de forêts et de tourbières. Le chenal y est rectiligne et étroit. Le secteur 2 fait 18,5 km et se trouve dans une zone fortement agricole et aménagée ce qui explique la forme rectiligne du chenal creusé mécaniquement et sa largeur constante. Le secteur 3 traverse de petites zones urbaines, bien qu'il soit majoritairement agricole, et s'étend sur 18,4 km. Par la suite, la rivière s'élargit graduellement sur les 30,9 km du secteur 4 où l'on observe de nombreux méandres. Le secteur 5 d'une longueur de 5,5 km se distingue par son allure rectiligne. Située à la confluence avec la rivière Richelieu, il s'agit du secteur le plus résidentiel de la rivière l'Acadie.

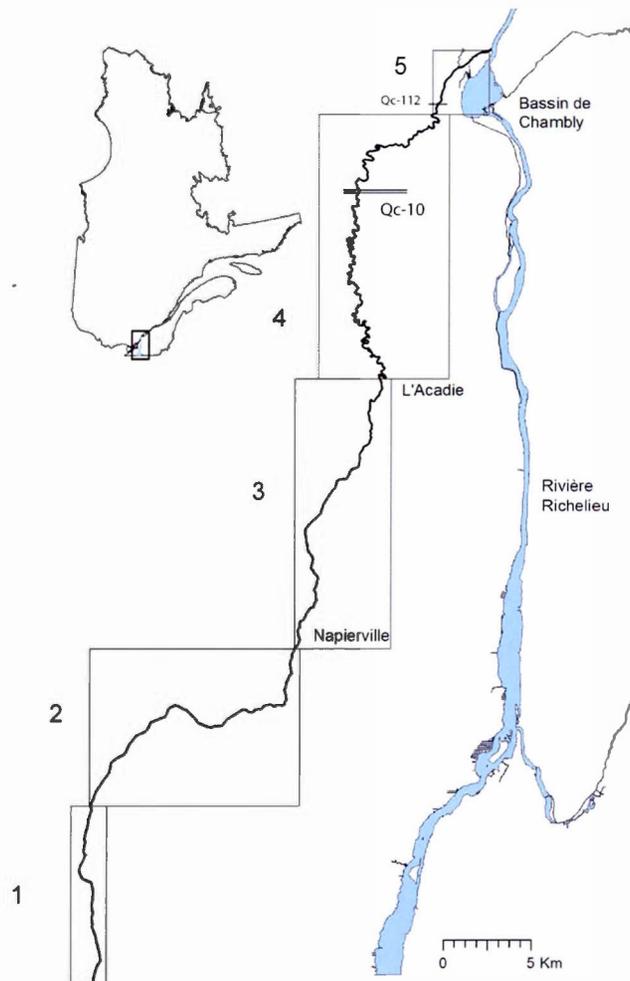


Figure 3.1 Division de la rivière l'Acadie par secteurs homogènes

3.2 Matériel et méthodes

3.2.1 Approche hydrogéomorphologique

L'approche hydrogéomorphologique met en lumière les relations entre les processus fluviaux et la forme des rivières suivant une pluralité d'échelles allant des sections transversales du chenal au bassin versant (Malavoi et Bravard, 2010). Ainsi, par

l'étude des formes de la rivière, il est possible d'identifier, de reconnaître et de comprendre ces processus (Morin *et al.*, 2015). Dans les régions nordiques, cette approche permet de distinguer les modelés d'érosion ou de sédimentation découlant de l'activité glacielle (Demers *et al.*, 2014). Suivant cette logique, les formes présentes et leur positionnement à l'échelle du bassin versant, du chenal et des berges de la rivière l'Acadie ont été étudiées lors de campagnes de terrain à l'été 2016.

La première partie des résultats a été générée grâce à l'utilisation du logiciel *ArcGis*®. Les indicateurs qui ont été retenus pour cette caractérisation sont la morphologie du bassin versant, les aires drainées, le réseau hydrographique, l'occupation du territoire, la nature des dépôts, ainsi que l'orographie. Différentes couches provenant d'organismes gouvernementaux québécois, canadiens et américains ont été traitées à l'aide d'outils d'analyse spatiale afin d'obtenir des données pour tout le bassin versant. Les secteurs homogènes préalablement établis sont un élément important de cette analyse puisque c'est à partir de ceux-ci que les données extraites ont été classées.

La morphométrie du chenal de la rivière l'Acadie à chaque 500 mètres a été également été déterminé par analyse spatiale. La largeur du chenal et de la plaine alluviale a été mesurée sur une image satellite. Les mesures d'encaissement représentent la largeur de la plaine alluviale divisée par la largeur du chenal. L'indice de sinuosité du chenal, correspondant à la longueur du talweg d'un tronçon donné sur la longueur entre les deux extrémités du tronçon, a aussi été extrait (Malavoi et Bravard, 2010). Finalement, l'altitude et la pente du chenal provenant d'un lidar ont permis la création d'un profil en long.

La caractérisation des berges sur le terrain s'est fait suivant deux variables principales : la géomorphologie et l'écologie. Dans le secteur 1, des tronçons totalisant 3,2 km ont été caractérisés, alors que pour les autres ils sont respectivement

de 13,5 km (2), 10,3 km (3), 20,2 km (4) et 5,3 km (5). Pour simplifier l'analyse, seules les berges de la rive gauche ont été divisées visuellement en trois sections : pied, talus et sommet. Chaque changement géomorphologique ou écologique d'une portion de la berge est documenté à l'aide (1) d'un point GPS, (2) d'une photo et (3) d'une description sur la feuille de collecte.

Cette caractérisation du terrain a permis l'identification de grands morphotypes à partir d'indicateurs qualitatifs simples soit la présence d'accumulation ou d'érosion, la pente de la berge, la présence de racines exhumées et la présence de cicatrices glacielles (Tableau 3.1). Une analyse statistique a été effectuée avec la version 1.0.136 du logiciel *R*. Les données ont été intégrées dans une matrice de dissimilarité, en calculant la distance euclidienne entre deux éléments avec la fonction *dist* de la librairie *cluster* de *R* (R core team, 2016). Le classement en grappes a été réalisé avec la méthode *complete*, de la fonction *hclust* (R core team, 2016). Un dendrogramme a été généré à partir duquel il a été possible d'identifier graphiquement les quatre types de berges. Les longueurs respectives des différentes berges possédant des attributs géomorphologiques et écologiques similaires ont été calculées.

Tableau 3.1 Indicateurs géomorphologiques et écologiques utilisés pour caractériser les berges

Variables	Indicateurs	Méthodologie
Géomorphologie	Accumulation	Absence (0) ou présence (1)
	Érosion	Absence (0) ou présence (1)
	Pente de la berge	<30 % (0), 30-60 % (1), >60 % (3)
Écologie	Exhumation des racines	Absence (0) ou présence (1)
	Présence de cicatrices glacielles	0 % (0), ≤50 % (1), > 50 % des arbres impactés (3)

3.2.2 Fréquence des événements glaciels

L'étude des cicatrices sur les arbres riverains est une méthode reconnue afin d'établir la fréquence des événements glaciels (Boucher, 2009 ; Morin *et al.*, 2015). Lorsque la glace entre en contact avec la végétation riveraine lors d'une crue ou d'un embâcle, les arbres enregistrent le choc dans leurs cernes annuels. La hauteur des crues glacielles et des embâcles peut elle aussi être révélée par l'étude de la hauteur des cicatrices présentes sur les arbres riverains (Smith et Reynolds, 1983 ; Uunila, 1997). Bien qu'il existe certaines imprécisions lorsque de tels indicateurs sont utilisés, ils permettent néanmoins d'estimer le niveau des glaces atteint lors des crues glacielles (Ballesteros-Canovas *et al.*, 2015 ; Tardif et Bergeron, 1997).

La collecte de données sur le terrain s'est effectuée en octobre 2016 sur huit sites des secteurs 4 et 5 et un site du secteur 3. Au total, 23 arbres ont été échantillonnés. Les cicatrices ont été dénombrées à même le tronc d'arbre et un échantillon a été prélevé à l'aide d'une sonde de Pressler. La hauteur maximale et minimale des cicatrices à chacun des sites ont été mesurées à l'aide d'une perche graduée à partir du sommet du talus. Ces mesures ont été rapportées en hauteur absolue à l'aide des altitudes extraites des couches LIDAR. La hauteur moyenne absolue par arbres et par sites ont été calculées afin de les comparer avec les données des Programmes de détermination des cotes de crue (PDCC) du CEHQ. La fréquence des événements glaciels a été estimée avec le nombre de cicatrices sur chacun des arbres sur le terrain divisé par l'âge total de l'arbre estimé lors du dénombrement des cernes d'arbres.

Finalement, une recherche documentaire a été effectuée pour répertorier les références aux inondations dans les quotidiens nationaux, les archives des bibliothèques universitaires du Québec et dans la base de données *Eureka*. Chaque événement identifié a été classé dans un tableau afin de les séparer par secteurs et de pouvoir en extraire la fréquence des événements par années (ev. /an).

3.3 Résultats

3.3.1 Caractéristiques du bassin versant

Le bassin versant de la rivière l'Acadie (Figure 3.2) a une aire totale de 554,74 km², un périmètre de 203,13 km et 99 % des altitudes se situent sous 100 m. Afin de mieux cerner les spécificités des différents secteurs, leur aire de drainage a été calculée (Figure 3.2). De plus, on constate que le réseau hydrographique contient de nombreux cours d'eau linéaires témoignant de la présence de drainage agricole dans tous les secteurs.

Secteur	Aire drainée (%)	Réseau hydrographique (%)
1	6,96	6,76
2	28,75	28,92
3	51,23	51,65
4	77,82	79,13
5	100,00	100,00

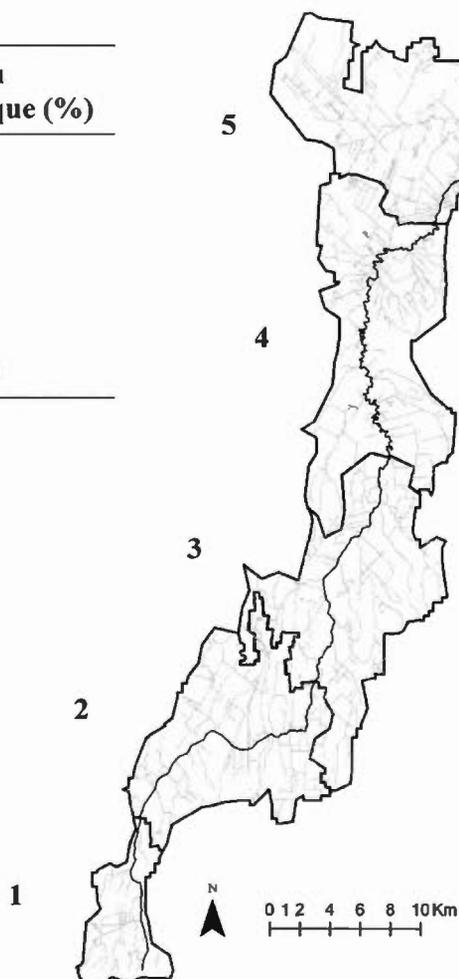


Figure 3.2 Aire drainée et réseau hydrographique par secteur homogène du bassin versant de la rivière l'Acadie

En ce qui concerne l'évolution des altitudes moyennes, le tableau 3.2 indique qu'elle se fait de manière décroissante vers l'exutoire. La dénivellation moyenne des secteurs ne suit pas la même tendance : elle diminue dans les secteurs 1, 2 et 3 avant de se stabiliser puis d'augmenter dans le secteur 5. Cette situation s'explique par la présence d'une colline montérégienne dans ce secteur. Les variations de ces deux indicateurs sont toutefois faibles : 33,25 m pour l'altitude moyenne et 0,85 % pour la pente moyenne.

Tableau 3.2 Caractérisation du bassin versant par secteurs cumulés

Variable	Indicateur	1	2	3	4	5
Altitude	Moyenne en m	77,44	62,89	57,24	48,24	44,19
Pente	Moyenne en %	1,45	0,79	0,60	0,61	0,76
Nature des dépôts en %	Alluvion récente	0,00	0,26	2,04	2,93	2,57
	Anthropique	0,45	0,18	0,48	4,70	9,54
	Fluviale	0,00	18,58	31,12	41,22	42,43
	Fluvio-glaciaire	2,36	1,86	2,95	2,09	1,63
	Marécage	12,35	2,99	2,09	1,38	1,23
	Marin	1,45	3,65	10,71	11,01	11,79
	Morainique	43,54	33,70	27,12	20,83	18,32
	Organique	9,23	25,04	15,36	10,17	7,97
	Résiduel	30,62	13,74	7,13	4,72	3,70
	Autres dépôts	0,00	0,00	0,99	0,94	0,81
Occupation du sol en %	Lieux habités	5,08	2,37	3,26	5,91	11,05
	Routes	2,45	2,14	2,25	3,26	4,75
	Forêts	72,25	33,28	22,28	20,99	19,62
	Terres cultivées	18,17	58,74	69,13	66,96	61,92
	Autres terres	2,04	3,47	3,08	2,87	2,04

La répartition des sols selon la nature des dépôts indique une forte présence de l'héritage quaternaire dans la région. Le secteur 1 est le seul présentant une majorité

de sols imperméables, les dépôts morainiques et résiduels représentent 74,16 % des sols. Alors qu'on y trouve la plus grande concentration de marécages, les alluvions récentes et les matériaux fluviatiles sont absents. L'apparition de dépôts fluviatiles se fait dans le secteur 2 où l'on constate aussi la plus grande part de matériel organique. Le secteur 3 poursuit globalement les tendances observées. Les dépôts d'origine marine y excèdent 10 % et restent à ce niveau dans les secteurs suivants. Dans le quatrième secteur, on note l'apparition de sols de nature anthropique, c'est-à-dire urbanisés, ainsi qu'une hausse des matériaux fluviatiles. Le secteur 5 est très similaire au secteur 4, mais il se distingue par une plus grande concentration de sols urbanisés. Les données sur l'occupation du sol révèlent que, dans l'ensemble, le bassin versant de la rivière l'Acadie est très peu habité et a une vocation surtout agricole. C'est en amont, dans le secteur 1 que l'on retrouve le plus de milieux non aménagés avec une majorité de forêts et peu d'agriculture en comparaison avec les autres secteurs. Dès le deuxième secteur, les terres cultivées prennent le dessus sur les milieux naturels, mais c'est dans le secteur 3 qu'elles atteignent leur plus forte densité. L'occupation du sol dans le secteur 4 demeure très semblable au précédent avec une hausse des secteurs résidentiels. Le dernier secteur compte la plus grande proportion de routes et de lieux habités lesquels couvrent plus de 15 % du territoire.

3.3.2 Morphométrie du chenal

Depuis l'amont vers l'aval, la rivière l'Acadie présente différentes caractéristiques morphométriques chenal (Figure 3.3). Le profil en long de la rivière présente une pente peu prononcée de 0,82 %. Le secteur 1 a la pente la plus prononcée avec 1,86 %, alors que les secteurs 2, 3 et 4, ne dépassent pas 1 % d'inclinaison avec respectivement 0,46 %, 0,92 % et 0,75 %. Deux ruptures sont toutefois visibles dans le secteur 2, soit à la transition avec le secteur 3 et à 22 km de l'exutoire. Le secteur 5 a une pente quasi nulle avec 0,02 %. La largeur du chenal au niveau plein bord augmente quant à elle de manière quasi linéaire vers l'aval dans les quatre premiers

secteurs, à l'exception d'un pic autour de la rupture de pente au milieu du secteur 2. Elle subit ensuite une hausse importante dans le secteur 5. Le ratio d'encaissement stable montre que la rivière n'est globalement pas très encaissée, sauf dans la portion amont du secteur 1. L'indice de sinuosité oscille pour sa part autour de 1 pour les secteurs 1, 2, 3 et 5 et indique leur caractère rectiligne. La situation est toutefois différente dans le secteur 4 où l'indice dépasse souvent 1,5 ce qui est plus typique d'un chenal à méandres.

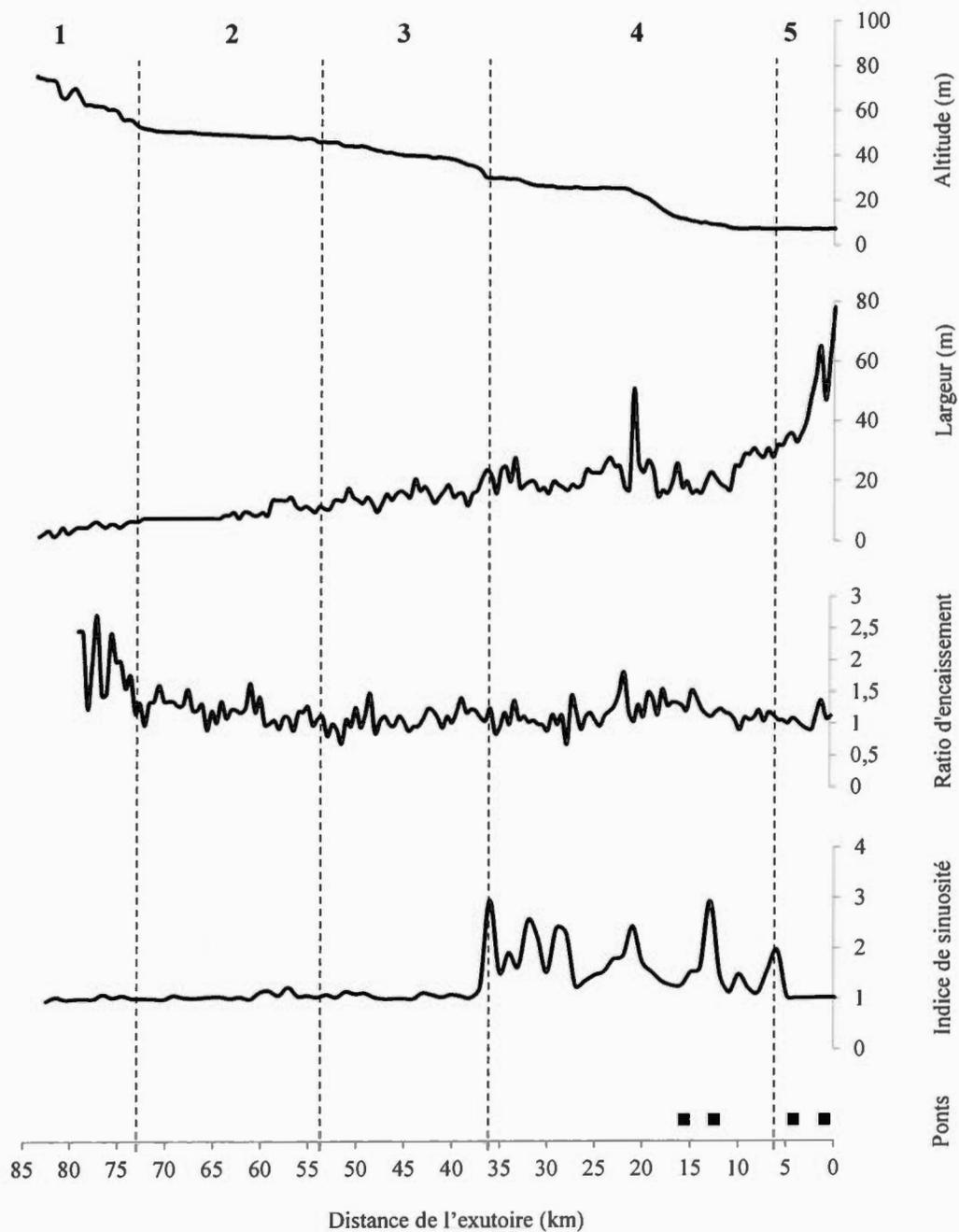


Figure 3.3 Caractérisation du chenal selon divers indicateurs morphométriques. Les lignes pointillées délimitent les différents secteurs à l'étude

3.3.3 Classification des berges

La caractérisation écologique et géomorphologique des berges sur le terrain a permis d'acquérir des données qualitatives et ordinales qui ont ensuite servi de base pour la classification des berges. Le dendrogramme (Figure 3.4) permet d'identifier quatre groupes de berges similaires contenant respectivement 51, 50, 10 et 109 observations. Les berges de type A présentent une pente entre 30 et 60 %, une exhumation des racines au talus et une érosion du talus. Les berges B regroupent les berges avec une pente supérieure à 60 %, une exhumation des racines au talus, une érosion du talus ou de l'entièreté de la berge ainsi que la présence de cicatrices sur plus de la moitié des arbres riverains. Le groupe C contient les berges avec une pente supérieure à 60 %, des cicatrices sur moins de 50 % des arbres et une érosion sur le pied et le talus des berges. Les berges n'ayant pas de traces d'érosion, d'exhumation ou de scarification se retrouvent quant à elles dans le groupe D.

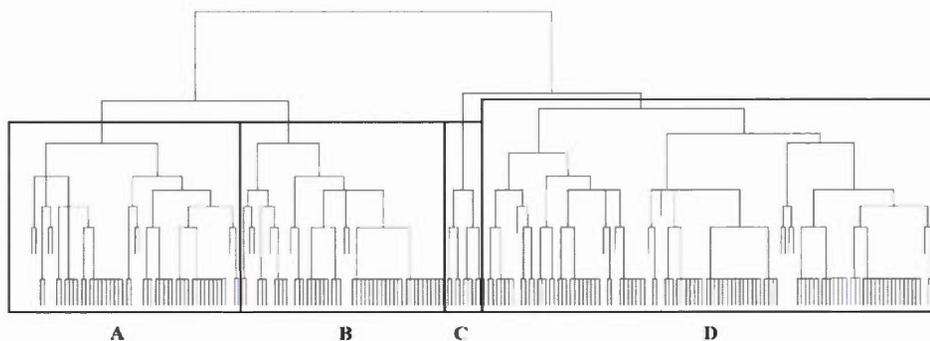


Figure 3.4 Dendrogramme représentant les différents groupes de berges homogènes caractérisés

Les groupes de berges résultant de la classification ont par la suite été cartographiés (Figure 3.5) afin de mesurer leur longueur. De plus, afin de mieux cerner le lien entre les types de berges et la présence de cicatrices glacielles sur la végétation riveraine,

cette information a été ajoutée sur la carte. Les berges ont été réparties dans chaque secteur selon leur longueur totale (Figure 3.5).

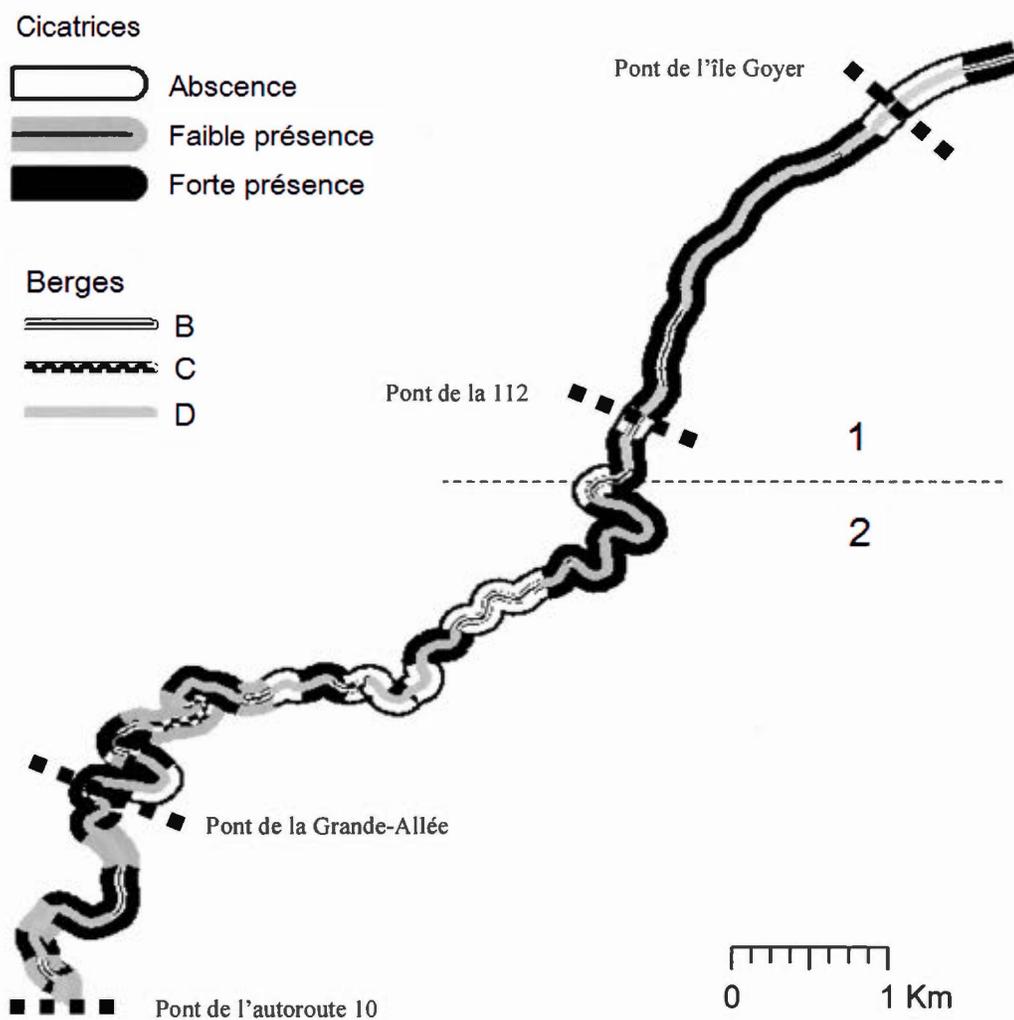


Figure 3.5 Cartographie des types de berges et de la présence de cicatrices glacielles de la portion aval du secteur 4 et du secteur 5.

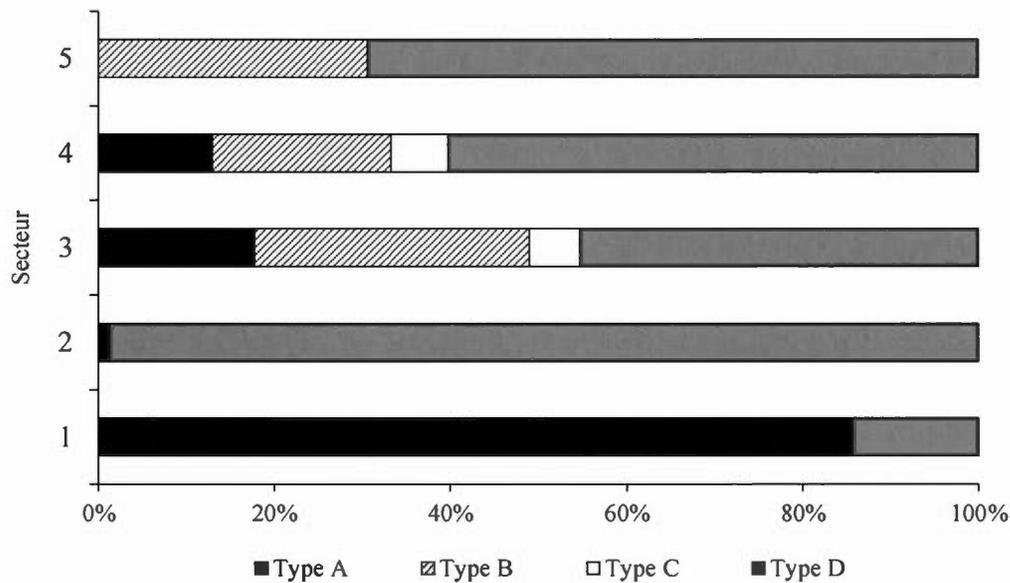


Figure 3.6 Proportion des groupes de berges pour chaque secteur, tels qu'identifiés par le dendrogramme

Alors que le secteur 1 comporte une part importante de berges de type A, soit 69,3 %, et le reste de type D, la situation est inversée dans le secteur 2 qui est composé à 98,9 % de berges du groupe D. Les secteurs 3 et 4 sont ceux ayant le plus de similarités avec la présence des quatre types de berges. Ainsi, bien que les berges du groupe C soient peu nombreuses en nombre absolu, elles représentent 5,7 et 6,5 % des secteurs 3 et 4. De plus, les berges de type B ne se trouvent que dans les trois secteurs situés en aval, elles représentent 31,3 %, 20,3 %, et 30,7 % pour les secteurs 3, 4 et 5.

3.3.4 Occurrences glacielles

Une quinzaine d'événements d'inondations hivernales ont été répertoriés dans les 80 dernières années sur la rivière l'Acadie (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 Recension des événements embâcles dans les archives documentaires

Secteur	Villes	Lieu	Années	Sources
3	L'Acadie	Village	1956	(Hudon, 2014)
4	Carignan Chambly	Pont de la Grande-Allée	1986, 1996, 2008, 2013, 2014, 2016, 2017	(Beaulieu, 2016) (Gagnon, 1997) (Gagnon, 1998) (SRC Montréal, 2008) (ICI.Radio-Canada.ca, 2013) (TVA Nouvelles, 2014) (TVA Nouvelles, 2017)
		Pont de l'autoroute 10		(Brouillet, 1936) (Gagnon, 1998) (ICI.Radio-Canada.ca, 2008) (La Presse, 1974) (Lachapelle, 1998) (Péloquin, 2008) (Simard, 2011) (St-Onge, 2013) (TVA Nouvelles, 2008) (TVA Nouvelles, 2013) (TVA Nouvelles, 2017)
5	Carignan	Pont de l'île Goyer	1936, 1974, 1993, 1998, 2008, 2011, 2013, 2017	

Selon la recherche documentaire, seulement les trois secteurs situés en aval (3, 4 et 5) ont connu des épisodes d'embâcles de glace. Certains événements répertoriés, soit ceux de 2008, 2013 et 2017 se sont déroulés simultanément dans les secteurs 4 et 5 à cause de la formation de deux embâcles. En ce qui concerne le secteur 3, une seule référence aux inondations hivernales a été trouvée, mais il y en aurait eu d'autres auparavant. Le maire de l'Acadie affirme également qu'à la suite de pressions de la part de citoyens et citoyennes, la rivière « a été creusée sur une longueur de 4 miles [6,4 km] près de sa source, ce qui a pour effet d'aggraver le débordement quand les eaux poussées par le courant arrivent à cet endroit (Hudon, 2014) ». Les embâcles de glace se déroulant dans le secteur 4 inondent dans les zones résidentielles situées en aval. Les embâcles rapportés s'étendent parfois sur de grandes distances ou se disloquent près du pont de l'autoroute 10 pour se reformer au pont de la Grande-Allée. Les ponts servent de point de repère pour la localisation d'embâcles, car ceux-

ci sont des points d'observation privilégiés. Selon les archives, le secteur 5 a une dynamique particulière. Les embâcles se forment près du pont de l'île Goyer et s'étendent sur plusieurs mètres, voire kilomètres, et entraînent des inondations dans le secteur en amont.

L'analyse des échantillons d'arbres prélevés dans les secteurs 3, 4 et 5 a permis d'établir la fréquence des événements par secteurs et de déterminer la hauteur moyenne des événements. Les fréquences d'embâcles (ev. / an) ont été calculées à partir des archives documentaires et des cicatrices glacielles. Le plus gros décalage entre les fréquences se situe dans le secteur 3, alors que celle extraite des archives est de 0,02 ev. / an et celle sur le terrain de 0,06 ev. / an. Les fréquences les plus élevées sont observables dans le secteur 4 avec des valeurs similaires avoisinant 0,23 ev. / an pour les archives et 0,27 pour les cicatrices. Le secteur 5 est le seul où les archives (0,10 ev. / an) révèlent une fréquence plus grande que les observations terrain (0,07 ev. / an).

La hauteur des cicatrices glacielles observées pour les trois secteurs a été représentée graphiquement (Figure 3.7). Les médianes des trois distributions (1,59 m, 1,64 m et 1,70 m) sont très similaires pour les trois secteurs alors qu'elles ne varient que de 11 cm. Le secteur 4 est celui avec les valeurs de hauteur les plus dispersées (2,32 m), la plus haute moyenne (1,83 m) la hauteur maximale la plus élevée (2,86 m). Le secteur 5 présente, quant à lui, une distribution plus regroupée.

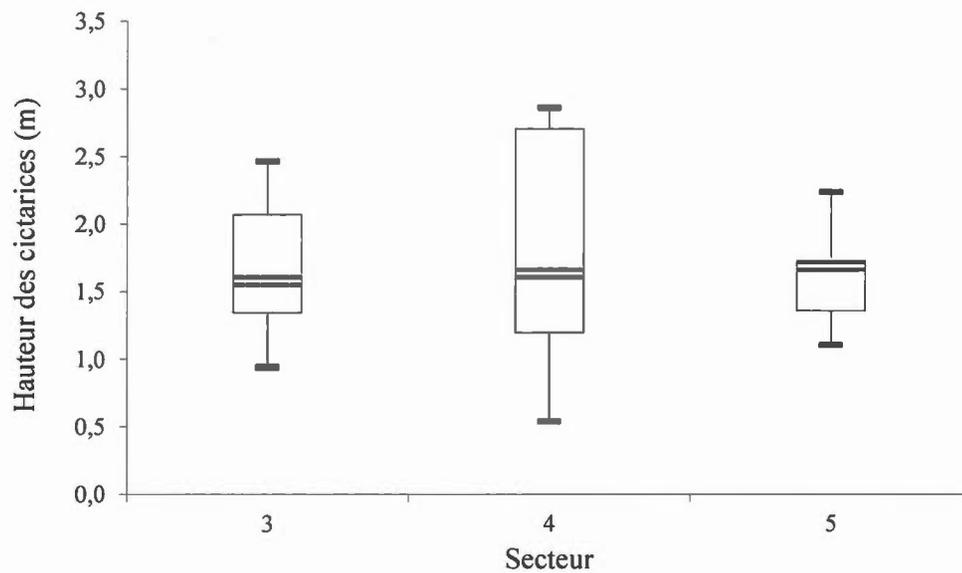


Figure 3.7 Diagramme à moustache illustrant la hauteur des cicatrices par rapport au niveau plein bord pour chaque secteur

Afin de comparer les cotes de crues du Programme de détermination des cotes de crues (PDCC) avec celles de cicatrices glacielles observées sur le terrain, des mesures de hauteur moyenne par sites ont été calculées. Les valeurs de hauteur absolue des cicatrices glacielles ont été classées par sites échantillonnés plutôt que par secteurs parce que les données du PDCC sont seulement disponibles dans le secteur 4 en aval de l'autoroute 10 et dans le secteur 5.

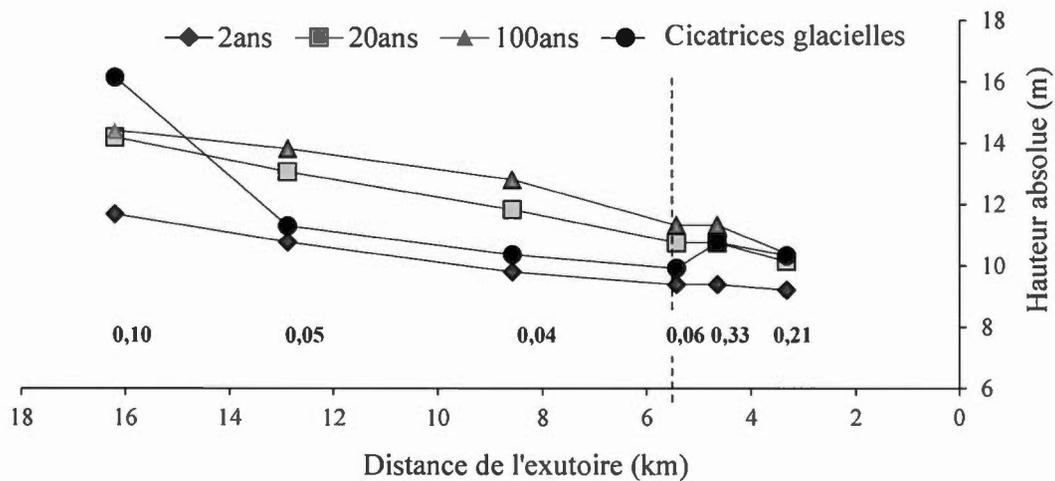


Figure 3.8 Comparaison entre la hauteur absolue des cicatrices glacielles (en mètres) et les cotes de crues du PDCC. La ligne pointillée représente la séparation entre les secteurs 4 et 5 et les nombres en gras illustrent la fréquence des événements observés sur le terrain par sites.

Les cicatrices glacielles observées sur le terrain sont toujours supérieures aux crues dont la période de retour est de 2 ans (Figure 3.8). Le site le plus en amont est celui dont la différence par rapport aux données du PDCC est la plus grande puisque la hauteur des cicatrices glacielles dépasse les cotes de crues de 100 ans. Les trois sites suivants sont plus près de la cote de crues de 2 ans. Dans les deux sites les plus près de l'exutoire situé dans le secteur 5, les valeurs de la hauteur dépassent largement celles du PDCC, alors que la hauteur observée atteint les niveaux attribuables aux crues de 20 et 100 ans.

3.4 Discussion

Cette étude vise à jeter un éclairage nouveau sur l'activité glacielle de la rivière l'Acadie, une rivière où, malgré de nombreuses inondations hivernales, bien peu d'information existe concernant la localisation, les impacts et la fréquence des

phénomènes glaciels. Au moyen d'une approche hydrogéomorphologique basée sur des mesures spatiales, morphométriques, géomorphologiques et historiques, il est possible de spatialiser l'activité glacielle au sein de la rivière l'Acadie afin de comprendre en quoi les différents morphotypes de berges qu'on y retrouve témoignent du régime d'embâcles, ainsi que d'établir l'évolution du régime selon un gradient longitudinal à l'échelle du bassin versant.

3.4.1 Les berges comme signature du régime d'embâcles de glace

La classification des berges réalisées dans la section 3.4.3 des résultats dévoile deux grandes catégories morphogéniques de berges : les groupes A, B et C qui présentent des traces d'érosion et le groupe D qui regroupe les berges stables ou en accumulation (Figure 3.9). L'étude de ces morphologies permet d'en apprendre davantage sur les processus à leur origine et maintenant ces berges en place.

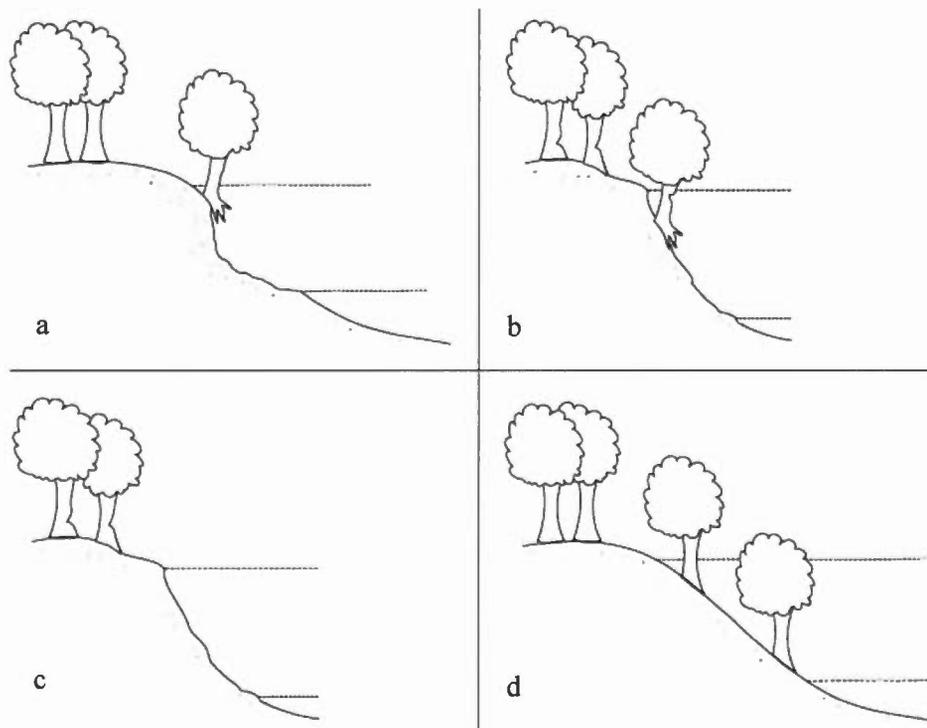


Figure 3.9 Morphotypes de berges résultant du classement par dendrogramme (a) berges d'érosion fluviale, (b) berges glacielles – érosion modérée, (c) berges glacielles – érosion forte et (d) berges stables ou en accrétion.

Les berges structurées par le régime fluvial ont été séparées de celles sculptées par celui glacial. La dynamique de mise en place et de maintien des berges du groupe A apparaît entrer dans cette première catégorie. Ces berges présentent une pente entre 30 et 60 %, une exhumation des racines au talus et une érosion du talus. Bien que ces berges arborent quelques traces d'érosion au talus, ces dernières semblent attribuables à l'action des crues en eau libre davantage qu'à celles des glaces, car la végétation n'affiche aucune trace d'abrasion glacielle. Dans le secteur 4, l'érosion du talus des berges A est plus prononcée, ce qui laisse croire que l'action des glaces y est plus présente qu'ailleurs sur la rivière sans toutefois surpasser l'importance de l'activité fluviale.

Le morphotype de berges B regroupe les berges ayant une pente supérieure à 60 %, une exhumation des racines au talus, une érosion du talus ou de l'entièreté de la berge ainsi que la présence de cicatrices sur plus de la moitié des arbres riverains. Ces dernières présentent des caractéristiques semblables aux berges glacielles à deux niveaux de Boucher *et al.* (2009), à savoir, une érosion du talus et une absence de végétation au talus, mais la présence de sédimentation récente au-dessus du talus d'érosion n'a pas été constatée. Le premier niveau représente la plaine alluviale générée par l'écoulement en eau libre, alors que le second est le résultat du niveau d'eau atteint lors des inondations causées par les embâcles de glace (Morin *et al.*, 2015). Le talus de ce type de berges porte des signes d'érosion causés par le transport des glaces formant l'embâcle ou lors de relâche. Dans d'autres rivières, comme la Nécopastic, dans le haut boréal québécois, une fréquence de 0,2 événement par année doit être atteinte pour la mise en place et l'entretien de ce type de berges par les

embâcles (Boucher *et al.*, 2009). D'après nos résultats, le secteur 4 atteint cette fréquence d'embâcles.

Les berges du groupe C sont celles où l'action érosive des glaces est la plus importante. Elles sont abruptes et arborent des traces d'érosion sur leurs pieds et talus, en plus de cicatrices sur moins de la moitié des arbres. Ces dernières ont peu de végétation arborescente au talus, ce qui explique l'absence d'exhumation des racines. Cette morphologie de berges est associée selon Ettema (2002) aux morceaux de glaces transportés à la suite de la dislocation des embâcles qui érodent latéralement les chenaux où l'écoulement est rapide.

Le groupe D regroupe les berges de pente moyenne ne portant aucune trace d'érosion ni de marques d'exhumation ou de scarification sur la végétation. Certaines berges présentant des traces d'accrétion sur leur pied peuvent être qualifiées de berges en accumulation, tandis que les autres sont plutôt stables. La présence d'un tel type de berges dans un secteur témoigne d'un apport en sédiments par la rivière. L'ensemble d'empreintes glacielles témoigne que cet apport n'est pas modifié de façon assez importante par le couvert de glace pour influencer la forme des berges.

3.4.2 Évolution longitudinale du régime d'embâcles de glace

En séparant la rivière l'Acadie en différents secteurs homogènes, il a été possible de localiser et qualifier l'activité glacielle selon un gradient longitudinal de l'amont vers l'aval. Ainsi, la spatialisation d'occurrence glacielle par la caractérisation géomorphologique et écologique des berges démontre une plus grande concentration d'activité glacielle en aval du secteur 3. Les différences marquées entre les régimes glaciels des divers secteurs à l'étude peuvent être expliquées par les caractéristiques morphométriques du bassin versant.

Le secteur 1, situé le plus en amont, avec la plus petite aire de drainage et le réseau hydrographique le moins développé, ne dispose pas d'une quantité de glace suffisante pour créer d'embâcles. La faible pente et le chenal rectiligne favorisent le transport des glaces en ne créant pas d'obstacles. Dans ce secteur, le sol composé principalement de tills et la présence de massifs forestiers et de marécages contribuent au ralentissement de l'écoulement et au faible apport de glace vers le chenal. Ceci pourrait expliquer l'absence d'empreintes glacielles géomorphologiques ou écologiques.

Le secteur 2 a pour sa part un chenal modifié mécaniquement qui présente une morphologie constante dans tout le secteur soit un relief plat, un encaissement constant, une allure rectiligne et une largeur uniforme. Traversant des terres cultivées, la quasi-totalité des berges du groupe D a les mêmes caractéristiques soit une pente moyenne, aucune trace d'érosion et aucune végétation au talus. Tout comme le secteur précédent, aucune observation ne permet de conclure à la présence de processus glaciels structurant le secteur.

Les données acquises lors de la classification des berges indiquent que le secteur 3 porte des traces du passage des glaces visible sur la végétation et la morphologie des berges. La présence de berges de type B et C confirme l'existence d'activités glacielles dans le secteur. Bien que différentes sources aient permis de découvrir que les inondations glacielles étaient fréquentes autrefois, les analyses des cicatrices visibles sur les arbres indiquent une fréquence d'événements glaciels assez faible. La dynamique glacielle indique que des événements d'embâcles de faibles amplitudes se produisent parfois, mais ces derniers ne sont pas assez importants pour atteindre ou scarifier la végétation. La modification et la concentration de l'écoulement en amont de ce secteur expliquent peut-être en partie cette réalité. Les crues sont peut-être ainsi capables de transporter les glaces à la suite de la dislocation du couvert, cependant en l'absence de prédispositions morphologiques particulières du chenal dans le secteur 3

les glaces sont évacuées vers l'aval sans générer d'embâcle, ni d'érosion majeure ou de dommage important à la végétation.

Le secteur 4 présente différentes caractéristiques augmentant la fréquence et l'intensité des embâcles et aggravant leurs impacts géomorphologiques. Parmi ces facteurs on retrouve : les méandres, les infrastructures civiles et la dynamique glacielle du secteur 3 en amont. En effet, c'est celui où le régime d'embâcles de glace est le plus dynamique. On y retrouve les cicatrices les plus hautes et le plus grand nombre d'arbres cicatrisés au sommet des berges. Les berges du secteur témoignent elles aussi de la dynamique glacielle, alors qu'on y trouve les types de berges B et C présentant des traces d'érosion glacielle. La fréquence élevée des embâcles dans le secteur s'explique notamment par le fait que la rivière s'incise et forme des méandres dans ses propres sédiments jusqu'à la rupture de pente qui concorde avec l'apparition dans le paysage des dépôts d'origine marine. Cette rupture de pente correspond à l'incision par la rivière d'une terrasse marine de la Mer de Champlain. Le ralentissement de l'écoulement causé par ce soudain aplatissement du relief favorise la formation de méandres de plus grandes amplitudes dans des dépôts argileux qui, de surcroît, s'érodent plus facilement directement ou indirectement à cause du mouvement des glaces. Les berges et les cicatrices glacielles sont d'ailleurs souvent présentes dans les berges concaves (Figure 3.7). Les ponts qui rétrécissent le chenal sont aussi souvent cités dans les autres sources recensées. La dynamique glacielle du secteur 3 en amont explique également l'importance du régime d'embâcles dans le secteur 4 puisque, une fois disloquée et pris en charge, la glace transportée ne rencontre pas d'obstacles avant d'atteindre soit les méandres, la terrasse marine, les ponts ou le couvert de glace de la rivière Richelieu fondant moins rapidement.

Dans le secteur 5, les activités glacielles connaissent une diminution de leur fréquence, mais représentent un plus grand risque à cause des municipalités qui s'y trouvent. À cet endroit, le chenal atteint sa plus grande largeur et redevient rectiligne

avant de se jeter dans la rivière Richelieu. La présence de quartiers résidentiels et de nombreuses routes cause une imperméabilisation des sols et un écoulement plus rapide à la fonte des neiges (Nourry, 2002). Les berges glacielles de type B se situent surtout en amont du pont de la route 112, tandis que le reste des berges de type D ne présentent pas de traces d'érosion glacielle, malgré que plus de la moitié des arbres au talus révèlent des cicatrices glacielles. Ainsi, les embâcles répertoriés et observés sur le terrain sont assez importants pour endommager la végétation, mais leur fréquence répertoriée n'est pas suffisante pour entretenir des berges glacielles, comme dans le secteur 4. Selon la recension des écrits, il semble que des embâcles s'y forment sur plusieurs centaines de mètres et entraînent des inondations dans le secteur 4.

La hauteur des cicatrices dans le secteur 5 témoigne d'embâcles de glace dont la fréquence et la hauteur dépassent celles prévues par le PDCC. Cette sous-estimation des périodes de retour des crues dans les zones inondables entraîne la construction de maisons et autres bâtiments à l'intérieur de l'espace de liberté des cours d'eau, c'est-à-dire « la somme de l'espace de mobilité, lié à la dynamique latérale des cours d'eau, et de l'espace d'inondabilité, lié à la récurrence de crues de différentes magnitudes dont le passage laisse des traces dans le paysage » (Biron *et al.*, 2013 : 5).

Comme la rivière l'Acadie se jette dans la rivière Richelieu qui dégèle moins rapidement, les glaces peuvent s'y accumuler et entraîner des inondations dans le secteur 5. Les nombreux tributaires naturels et aménagés présents dans tous les secteurs de la rivière l'Acadie jouent un rôle similaire puisque la glace générée par la dislocation hâtive de leur couvert n'arrive pas à s'écouler et peut aussi entraîner la formation d'embâcles. De plus, l'apport d'eau plus chaude par ces tributaires accélère la dislocation locale du couvert au sein de la rivière principale et la glace transportée pourrait se heurter au couvert toujours en place plus en aval (Turcotte *et al.*, 2011).

Évidemment, le régime hydrologique du bassin versant de la rivière l'Acadie a été fortement modifié par l'occupation humaine, laquelle remonte à plusieurs siècles (Nourry, 2002). L'omniprésence de l'agriculture rend toutefois les sols moins perméables que les forêts qu'ils remplacent. Ce faisant, elle accélère le ruissellement des eaux de surface et augmente l'intensité des pics de crues qui sont deux facteurs augmentant les risques d'inondations hivernales (Lind *et al.*, 2014). Le même phénomène se produit avec les milieux résidentiels et les routes dont la présence est croissante sur le territoire (Nourry, 2002). Les milieux ouverts comme les terres agricoles accroissent également la radiation solaire au sol, qui accélèrent à leur tour la fonte de la neige dans le bassin versant (Lind *et al.*, 2014). De plus, le drainage agricole très présent au sein du bassin versant s'ajoute à des travaux de linéarisation et de surcreusement du chenal qui augmentent anormalement le débit de la rivière et ainsi la capacité de mobilisation et le transport des glaces dans le secteur 3 et plus en aval. De nombreuses infrastructures sont présentes le long de la rivière, dont les ponts Goyer, de la Grande-Allée et de l'autoroute 10 dans le secteur 4. Elles influencent l'allure du chenal en créant un rétrécissement artificiel qui représente un obstacle pour la libre circulation des glaces.

Le contexte géomorphologique du bassin versant explique lui aussi pourquoi des empreintes glacielles sont présentes sur la rivière l'Acadie. Effectivement, les glaciations quaternaires ont mis en place la majorité du substrat de la région, ce qui explique la présence d'une couche de sédiments répartie de façon presque uniforme sur le territoire. Ce relief plat ralentit l'écoulement et favorise la sortie du lit sur de grandes portions de la rivière lors des événements d'embâcles tout en favorisant l'érosion glacielle des berges (Hamelin, 1969 ; Nourry, 2002). La morphologie du chenal est fortement influencée par ces dépôts quaternaires et les formes qui en résultent sont parmi les facteurs les plus documentés comme prédisposant un site aux embâcles de glace (Beltaos, 1995).

3.5 Conclusion

En somme, les résultats obtenus révèlent que la dynamique glacielle varie grandement d'un secteur à l'autre selon les caractéristiques du bassin versant et du chenal. Ils ont mis en lumière comment la morphométrie et l'hydrographie du bassin versant, l'omniprésence de l'agriculture et des infrastructures civiles ainsi que l'héritage de la dernière glaciation quaternaire favorisent l'activité glacielle sur la rivière. De plus, l'étude des berges et des impacts glaciels a permis de localiser, différencier et expliquer les processus glaciels dominant les trois secteurs situés en aval de la rivière.

Au final, il est apparu que le secteur 3 arbore encore à ce jour les marques d'un régime d'embâcles de glace dont la fréquence des événements a été diminuée par l'évolution du plan de la rivière. Les berges et leur végétation portent toutefois les marques du transport rapide d'une quantité importante de glaces vers l'aval à cause des modifications humaines du chenal. Des occurrences glacielles ont été observées sur une majorité des berges et de la végétation du secteur 4. En plus de présenter la morphologie propice à la création d'embâcles avec ses méandres serrés, une rupture de pente et des obstacles anthropiques à l'écoulement, ce secteur accueille la glace arrivant du secteur 3 amplifiée par le drainage et la fonte hâtive des terres agricoles. Le secteur 5 présente peu de marques du passage des glaces, mais sa proximité avec l'exutoire dans la rivière Richelieu et l'imperméabilité de ses terres en fait un lieu favorable aux embâcles de glace fréquents et de grandes ampleurs qui inondent les quartiers résidentiels situés en amont.

CONCLUSION

Située en Montérégie et traversant les villes de Napierville, Chambly et Carignan, cette rivière de 84,2 km tributaire du Richelieu est reconnue pour connaître régulièrement des épisodes d'inondations hivernales nécessitant des affaiblissements de son couvert de glace (Duchaine, 2016). Pourtant, à ce jour, aucune étude du régime d'embâcles de la rivière l'Acadie n'avait été effectuée. Pour cette raison, dans le cadre de la présente recherche, une spatialisation des processus glaciels suivant une approche hydrogéomorphologique a été effectuée à l'échelle de son bassin versant. Cette approche privilégiant l'étude des formes d'une rivière afin d'en connaître les processus dominants est particulièrement efficace lorsque couplée avec une analyse de la fréquence des cicatrices visibles selon l'âge des arbres pour décrire les processus glaciels se déroulant sur un cours d'eau (Boucher *et al.*, 2009 ; Morin, 2014). Ainsi, il a été possible d'évaluer la signature des processus glaciels sur les berges et de comprendre l'évolution longitudinale de l'activité glacielle le long de cette rivière.

Pour satisfaire les objectifs de cette étude, la rivière l'Acadie a été divisée cinq secteurs homogènes par photo-interprétation selon l'allure générale du chenal et du territoire traversé par ceux-ci. Par la suite, une collecte de données provenant de diverses sources gouvernementales a été effectuée en vue de construire un système d'information géographique permettant de caractériser le bassin versant de la rivière et son chenal. Cela a mené à extraire pour chacun des secteurs : leur aire de drainage, leur réseau hydrographique, leur pente et altitude moyenne, la nature des dépôts composant leur sol et l'affection de leur territoire. En ce qui concerne le chenal de la rivière, il a été possible de caractériser son profil en long, sa largeur, son ratio d'encaissement et son indice de sinuosité. Parallèlement, une campagne de terrain

s'est déroulée à l'été 2016 dans le but de classer les berges de la rivière selon leurs spécificités géomorphologiques, soit leur pente ainsi que leur foyer d'érosion et d'accrétion, et écologique, soit la présence d'exhumation de racines et de cicatrices glacielles sur la végétation. Finalement, à l'automne 2016, un dénombrement d'impacts, une prise de mesures de la hauteur des cicatrices glacielles et une collecte de carottes ont été réalisés sur 25 arbres répartis sur 9 sites dans les trois secteurs les plus en aval de la rivière afin d'établir la magnitude des embâcles dans ces secteurs.

Les résultats obtenus ont révélé que la dynamique glacielle varie grandement d'un secteur à l'autre selon les paramètres du bassin versant et du chenal. Des facteurs d'origines hydrographiques, anthropiques et géomorphologiques comme le réseau hydrographique, la nature des dépôts et l'occupation du sol paraissent générer des conditions prédisposant la rivière l'Acadie à un régime d'embâcles de glace structurant. Ainsi, il est possible de mettre en lumière comment la morphométrie et l'hydrographie du bassin versant, l'omniprésence de l'agriculture et des infrastructures civiles ainsi que l'héritage de la dernière glaciation quaternaire favorisent l'activité glacielle dans les secteurs 3, 4 et 5 en aval de la rivière. En outre, nous avons tenté de localiser et expliquer la dynamique glacielle selon les secteurs et d'établir les divers processus influençant son régime d'embâcles.

De ce fait, il est apparu que le secteur 3 arbore encore à ce jour les marques d'un régime d'embâcles de glace dont la fréquence des événements a été diminuée par l'évolution du plan de la rivière, mais qui continue d'affecter les berges et leur végétation à cause des modifications humaines du chenal favorisant le transport d'une quantité importante de glaces. Des occurrences glacielles ont été observées sur une majorité des berges et de la végétation du secteur 4 qui, en plus de présenter la morphologie parfaite pour générer des embâcles avec ses méandres, sa rupture de pente et ses obstacles anthropiques à l'écoulement, semble accueillir les crues glacielles arrivant du secteur 3 amplifiées par le drainage et la fonte hâtive des terres

agricoles. Le secteur 5 présente pour sa part peu de marques du passage des glaces, mais sa proximité avec l'exutoire dans la rivière Richelieu et l'imperméabilité de ses terres paraît induire des embâcles de glace fréquents et de grandes ampleurs qui inondent les quartiers résidentiels situés en amont.

Sommes toutes, notre recherche tente d'augmenter les connaissances de la dynamique glacielle d'un bassin versant peuplé en aval où des événements d'inondations hivernales sont fréquents et affectent plusieurs riverains. Un échantillonnage plus exhaustif des arbres impactés le long du chenal ou encore une datation des événements d'embâcles par dendrochronologie permettrait d'étoffer la recherche et confirmer l'hypothèse des événements plus anciens dans le secteur 3. Bien que l'importance de pratiquer des méthodes de gestion et d'aménagement du territoire qui tiennent compte des processus géomorphologiques des rivières en milieu tempéré froid ne soit plus à démontrer, il ressort de cette recherche la nécessité de spatialiser les divers processus favorisant l'activité glacielle et leurs conséquences. Ce faisant, il serait possible de mieux renseigner les populations riveraines et les décideurs territoriaux sur leur environnement et leur permettre de prendre de meilleures décisions plus respectueuses de la dynamique naturelle des rivières. Une approche hydrogéomorphologique est à privilégier dans le domaine des risques hydriques et devrait connaître un essor certain dans les prochaines années avec l'avènement du concept d'espace de liberté qui propose un aménagement plus respectueux de l'héritage géomorphologique des cours d'eau (Demers *et al.*, 2014).

BIBLIOGRAPHIE

- Allard, G. (2010). *Dynamique fluvio-glacielle, étude de cas d'une fosse-à-frazil, Rivière Mitis, Bas-Saint-Laurent*, mémoire de maîtrise non publié. Rimouski : Université du Québec à Rimouski, département de biologie, chimie et géographie.
- Allard, G., Buffin-Bélanger, T. et Bergeron, N. (2011). Analysis of frazil ice as a geomorphic agent in a frazil pool. *River Research and Applications*, 27, 9, 1136-1148. DOI : 10.1002/rra.1490
- Agriculture et agroalimentaire Canada (2010). *Utilisation des terres en 2010*. AAC, Ottawa, Canada.
- Bailly, A. S. (2004). La géographie des risques. Dans *Les concepts de la géographie humaine* (p. 241-247). Paris : Armand Colin.
- Ballesteros-Canovas. J. A. (2015). A review of flood records from tree rings. *Progress in Physical Geography*, 39, 6, 794–816. DOI : 10.1177/0309133315608758
- Beaulieu, A. (2016). Une crue de la rivière l'Acadie cause des inondations à Carignan, *Le Journal de Chambly*, 2 mars 2016, 4.
- Beltaos, S. (1995). *River ice jams*. Highlands Ranch : Water Resources Publications, LLC.
- Beltaos, S. et Burrell, B. C. (2015). Hydrotechnical advances in Canadian river ice science and engineering during the past 35 years. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42, 9, 583-591. DOI : 10.1139/cjce-2014-0540
- Beltaos, S. (2014). Comparing the impacts of regulation and climate on ice-jam flooding of the Peace-Athabasca Delta. *Cold Regions Science and Technology*, 108, 49-58. DOI : 10.1016/j.coldregions.2014.08.006
- Berthiaume, C. (2014). Des résidents craignent une 2e inondation. *Le Journal de Montréal*, 10 avril 2014, 11.
- Best H., Mcnamara, J. et Liberty, L. (2005). Association of Ice and River Determined Channel Morphology Using Ground-penetrating Radar in the Kuparuk River, Alaska. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 37, 2, 157-162. DOI : 10.1657/1523-0430(2005)037[0157:AOIARC]2.0.CO ; 2
- Bird, J. B. (1967). *The physiography of arctic Canada, with special reference to the area south of Parry Channel*. Baltimore : John Hopkins Press.

- Biron, P. et al. (2013). *Espace de liberté : un cadre de gestion intégrée pour la conservation des cours d'eau dans un contexte de changements climatiques*. Montréal : Ouranos.
- Boivin, M., Buffin-Bélanger, T. et Piégay, H. (2015). The raft of the Saint-Jean River, Gaspé (Québec, Canada): A dynamic feature trapping most of the wood transported from the catchment. *Geomorphology*, 231, 270-280. DOI : 10.1016/j.geomorph.2014.12.015
- Boucher, E., Bégin, Y. et Arseneault, D. (2009). Impacts of recurring ice jams on channel geometry and geomorphology in a small high-boreal watershed. *Geomorphology*, 108, 272-281. DOI : 10.1016/j.geomorph.2009.02.014
- Boucher, E., Bégin, Y., Arseneault, D. et Ouarda, T.B.M.J. (2012). Long-term and Large-scale River-ice Processes in Cold-region Watersheds. Dans M. Church, P.M. Biron et A.G. Roy (dirs.). *Gravel-bed Rivers : Processes, Tools, Environments*. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd, p. 546-554.
- Boutet, R., Francoeur, J. et Tremblay, K. (2004). *Programme de détermination des cotes de crues de récurrence de 20 ans et de 100 ans (PDCC)*. PDCC 16-003. Québec : Centre d'expertise hydrique du Québec, Service de la connaissance et de l'expertise hydrique.
- Brouillet, A. (1936). *L'acadie*. [Photographie]. Fonds Alphonse Brouillet (P006 : v-34). Société d'histoire de Chambly.
- Buffin-Bélanger, T. et Bergeron, N. E. (2011). Editorial: Advances in river ice science. *River Research and Applications*, 27, 9, 1073-1075. DOI : 10.1002/rra.1507
- Comité de concertation et de valorisation du bassin versant de la rivière Richelieu (COVABAR) (2015). *Plan directeur de l'eau — Portrait du bassin versant de la Rivière Richelieu et de la zone Saint-Laurent*. Belœil : COVABAR.
- Centre d'expertise hydrique du Québec (2014). *Bassin versant niveau 2*. 1 : 20 000. CEHQ, Québec, Canada.
- Dauphiné, A. et Provitolo, D. (2013). *Risques et catastrophes : observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Paris : Armand Colin.
- Demers, S., Olsen, T., Buffin-Bélanger, T., Marchand, J.-P., Biron, P. et Morneau, F. (2014). L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid : l'exemple de la rivière Matane (Québec). *Physio-géo*, 8, 67-88. DOI : 10.4000/physio-geo.3813

- Dionne, J.-C. (1992). Ice-push features. *The Canadian Geographer/Le Géographe canadien*, 36, 1, 86-91. DOI : 10.1111/j.1541-0064.1992.tb01122.x
- Drouin, E., Maurice, M.-P. et Clappier, S. (2009). *Rapport final de la caractérisation de la rivière l'Acadie*. Belœil : COVABAR.
- Duchaine, H. (2016). Des trous pour éviter les inondations. *Le Journal de Montréal*, 7 mars 2016. Récupéré de www.journaldemontreal.com/2016/03/07/des-trous-pour-eviter-les-inondations, Page consultée le 10 avril 2017.
- Ettema, R. (2002). Review of Alluvial-Channel Responses to river ice. *Journal of Cold Regions engineering*, 16, 4, 191-218. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-381X(2002)16:4(191)
- Ettema, R. et Kempema, E. W. (2012). River-ice effects on gravel-bed channels. Dans M. Church, P. Biron et A. Roy (dir.) *Gravel Bed Rivers: Processes, Tools, Environments*, Chichester: John Wiley & Sons, p. 525-540.
- Gagnon, M. (1997). Ça grogne à Chambly : Les inondés blâment plus la municipalité que le ciel. *La Presse*, 16 juillet 1997, A1.
- Gagnon, M. (1998). Les municipalités s'organisent. *La Presse*, 1 avril 1998, A 13.
- Godin, M. (1974). *Évaluation des dommages : cité de Chambly et ville de Carignan, Embâcle rivière l'Acadie*. Québec : Ministère des Ressources Naturelles, Direction générale des eaux.
- Hamelin, L.-E. (1969). Le glaciol de lakoutie, en Sibérie Nordique. *Cahiers de géographie du Québec*, 13, 29, 205-216. DOI : 10.7202/020864ar
- Héту, B. (2001). Une géomorphologie socialement utile : la question des risques naturels. Dans J.-L. Klein, S. Laurin, et C. Tardif (dir.), *Géographie et société : vers une géographie citoyenne*. Québec : Presses de l'Université du Québec, p. 61-89.
- Hicks, F. (1994). Ice as the geomorphologic agent in an anastamosing river system. Dans *Proceedings of the Workshop on Environmental Aspects of River Ice: Saskatoon, Saskatchewan, August 18-20, 1993*. National Hydrology Research Institute : Subcommittee on Hydraulics of Ice Covered, p. 3-19.
- Hudon, P.-H. (2014). Inondations de cinquante fermes à L'Acadie, *La Société d'histoire de la Seigneurie de Chambly*, [En ligne.] (http://www.societehistoirechambly.org/index.php?option=com_content&view=articl)

e&id=730:inondations-de-cinquante-fermes-a-lacadie&catid=41:clins-oeil-). Page consultée le 10 avril 2017.

ICI.Radio-Canada.ca (2013). Le niveau d'eau des rivières augment : risques d'inondations et d'embâcles. *Radio-Canada.ca*, 13 mars 2013, (ici.radio-canada.ca/nouvelle/604277/quebec-inondations-rivieres). Page consultée le 23 février 2017.

ICI.Radio-Canada.ca (2008). La région de Montréal secouée par les vents. *Radio-Canada.ca*, 10 janvier 2008, (ici.radio-canada.ca/nouvelle/380450/vent-inondation-degat). Page consultée le 23 février 2017.

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) (2006). *Banque de données sur les sols*. Polygones, 1 : 20 000. IRDA, Québec, Canada.

Kellerhals, R. et Church, M. (1980). Comment on "Effects of Channel Enlargement by River Ice Processes on Bankfull Discharge in Alberta, Canada" by D.G. Smith. *Water Resources Research*, 16, 6, 1131-1134. DOI : 10.1029/WR016i006p01131

Lachapelle, J. (1998). Les rivières commencent à retourner dans leur lit. *Le Devoir*, 30 mars 1998, A3.

Normand, G. (1974). *Dangereuses inondations*. La Presse, 6 avril 1974, A1.

Landry, B. et Mercier, M. (1992). *Notions de géologie*. Mont-Royal, Québec : Modulo.

Laszloffy, W. (1972). Expériences relatives au régime des glaces acquises en Hongrie. Dans *The role of ice and snow in hydrology*. Acte de colloque organisé par l'Unesco, the World Meteorological Organization, the International Association of Hydrological Sciences, and the Canadian National Committee for the International Hydrological Decade, à Banff, Canada, en septembre 1972 (p.451-482). Genève : Unesco-WMO-IAHS.

Lind, L., Nilsson, C., Polvi, L.E. et Weber, C. (2014). The role of ice dynamics in shaping vegetation in flowing waters. *Biological Reviews*, 89, 791-804. DOI: 10.1111/brv.12077

MacKay, J.R. et MacKay, D.K. (1977). The stability of ice-push features, Mackenzie River, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 14, 10, 2213-2225.

Malavoi, J.-R. et Bravard, J.-P. (2010). *Éléments d'hydrogéomorphologie fluviale*, ONEMA. (www.onema.fr/hydromorphologie-fluviale). Page consultée le 27 février 2017.

- McNamara, J. P. (2012). Is there a northern signature of on fluvial form? Dans M. Church, P.M. Biron et A.G. Roy (dirs.). *Gravel-bed Rivers: Processes, Tools, Environments*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, p. 541-545.
- Michel, B. (1972). Properties and processes of river and lake ice. Dans *The role of ice and snow in hydrology*. Acte de colloque organisé par l'Unesco, the World Meteorological Organization, the International Association of Hydrological Sciences, and the Canadian National Committee for the International Hydrological Decade, à Banff, Canada, en septembre 1972 (p.451-482). Genève : Unesco-WMO-IAHS.
- Morin, S. (2015). *La variabilité spatiale de formes glacielles résultant des embâcles de glace sur la rivière Mistassini (Québec) : un indicateur du régime glaciaire ?* Mémoire de maîtrise non publié. Montréal : Université du Québec à Montréal, Département de géographie.
- Morin, S., Boucher, E. et Buffin-Belanger, 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*, 77, 3, 2117-2138.
- Morse, B. et Hicks, F. (2005). Advances in river ice hydrology 1999-2003. *Hydrological Processes*, 19, 1, 247-263. DOI : 10.1002/hyp.5768
- Neill, C. R. (1976). Scour holes in a wandering Gravel river [Athabasca River, Canada]. *Proceedings of the 3rd Annual Conference of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, New-York, Symposium on Inland Waterways for Navigation, Flood Control, and Water Diversions, Fort. Collins, Colorado. (USA), 10-12 August 1976*. American Society of Civil Engineers, p. 1301-1317.
- Nourry, S. (2002). *Caractérisation des conditions naturelles et anthropiques du bassin versant l'Acadie et leurs impacts sur le régime hydrologique*. Mémoire de maîtrise non publié. Montréal : Université du Québec à Montréal, Département de géographie.
- Péloquin, T. (2008). Des sacs de sable pour stopper la crue. *La Presse*, 8 avril 2008, A9.
- Prowse, T. et Culp, J. (2003). Ice breakup: a neglected factor in river ecology. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30, 128-144. DOI : 10.1139/L02-040
- Québec. Service de l'analyse et des politiques (2014). *Politique québécoise de sécurité civile 2014-2024 : vers une société québécoise plus résiliente aux catastrophes*. Québec : Ministère de la Sécurité Publique.

- R Core Team (2016). R : A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna: Autriche.
- Réseau hydrographique national (2004). *Richelieu*. Filaments, 02oj001. RHN, Ottawa, Canada.
- Richard, M., Morse, B. et Daly, S. F. (2015). Modeling frazil ice growth in the St. Lawrence River. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42, 9, 592-608.
- Simard, V. (2011). Crues printanières : Les rivières Richelieu et L'Acadie sous surveillance. *La Presse*, 21 mars 2001, A9.
- Smith, D.G. (1979). Effects of Channel Enlargement by River Ice Processes on Bankfull Discharge in Alberta, Canada. *Water Resources Research*, 15, 2, 469-475. DOI : 10.1029/WR015i002p00469
- Smith, D.G. et Pearce, C.M. (2002). Ice jam-caused fluvial gullies and scour holes on northern river flood plains. *Geomorphology*, 42, 85-95. DOI : 10.1016/S0169-555X(01)00076-9
- Smith D.G. et Reynolds, D.M. (1983). Trees scars to determine the frequency and stage of high magnitude river ice drives and jams, Red Deer, Alberta. *Canadian Water Resources Journal*, 8, 3, 77-94. DOI : 10.4296/cwrj0803077
- SRC Montréal (2008). Un embâcle sur la rivière L'Acadie. *SRC Montréal*, 7 avril 2008.
- St-Onge, J. (2013). La rivière l'Acadie sous surveillance étroite. *TVA Nouvelles*, 14 janvier 2013. (tvanouvelles.ca/2013/01/14/la-riviere-lacadie-sous-surveillance-etroite). Page consultée le 23 février 2017.
- Sui, J., Wang, D. et Karney, B. W. (2000). Suspended sediment concentration and deformation of riverbed in a frazil jammed reach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27, 6, 1120-1129. DOI : 10.1139/100-038
- Tardif, J. et Bergeron, Y. (1992). Analyse écologique des peuplements de frêne noir (*Fraxinus nigra*) des rives du lac Duparquet, nord-ouest du Québec. *Canadian Journal of Botany*, 70, 11, 2294-2302. DOI : 10.1139/b92-285
- Taylor, S., Buffin-Bélanger, T. Hétu, B. et Arsénault, D. (2008). An Analysis of the Spatio-Temporal Dynamics of Ice Jams in a Small Eastern Canadian River Using Dendrochronology. Dans J. Piwowar (ed.), *Le sommet des Prairies*, Acte de colloque

organisé par l'Association canadienne des géographes, l'Association canadienne de cartographie, le Groupe canadien de recherche en géomorphologie et la Société canadienne de télédétection, à Régina, du 1er au 6 juin 2008 (p.305-308). Régina : ACG, ACC, GCRG et SCT. Récupéré le 13 octobre de http://uregina.ca/prairies/assets/PrairieSummit_Proceedings.pdf

- Turcotte, B. (2016). *Inondations et dommages causés par les glaces de rivière au Québec*. Colloque sur la sécurité civile et incendie 2016, Québec, Ministère de la Sécurité Publique.
- Turcotte, B. et Morse, B. (2013). A global river ice classification model. *Journal of Hydrology*, 507, 134-148. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2013.10.032
- Turcotte, B., Morse, B. Bergeron, N. E. et Roy, A.G. (2011). Sediment transport in ice-affected rivers. *Journal of Hydrology*, 409, 561-577. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2011.08.009
- TVA Nouvelles (2008). Les glaces font craindre une inondation. *TVA Nouvelles*, 8 avril 2014, (tvanouvelles.ca/2008/04/08/les-glaces-font-craindre-une-inondation). Page consultée le 23 février 2017
- TVA Nouvelles (2013) Embâcle et carambolages. *TVA Nouvelles*, 9 janvier 2013, (tvanouvelles.ca/2013/01/19/embacle-et-carambolages). Page consultée le 23 février 2017
- TVA Nouvelles (2014). La rivière L'Acadie commence à déborder. *TVA Nouvelles*, 5 avril 2014, (tvanouvelles.ca/2014/04/05/la-riviere-lacadie-commence-a-deborder). Page consultée le 23 février 2017.
- TVA Nouvelles (2017). *La rivière L'Acadie sort de son lit à Carignan*. *TVA Nouvelles*, 26 février 2017, (tvanouvelles.ca/2017/02/26/la-riviere-lacadie-sort-de-son-lit-a-carignan). Page consultée le 23 février 2017.
- Uunila, L.S. (1997). Effects of river ice on bank morphology and riparian vegetation along Peace River, Clayhurst to Fort Vermilion. Dans B.C. Burrell et S. Ismail (eds.). *9th Workshop on River Ice*, Acte de colloque organisé par le Canadian Geophysical Union, Hydrology Section (CGU-HS), Committee on River Ice Processes and the Environment, New Brunswick Power Corp. 24–26 Septembre 1997, Fredericton, N. B., (p.315-334). Fredericton, N.B. : CGU-HS.

- United State Geographic Survey (2014). *Digital Elevation Model*. Feuillet n45w074 et n46x074, 20140610, 1x3 arc-second, 1x1 ArcGrid. Department of the Interior, USGS, États-Unis.
- Wolman, M. G. et Gerson, R. (1978). Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology. *Earth Surface Processes*, 3, 2, 189-208. DOI : 10.1002/esp.3290030207
- Wolman, M. G. et Miller, J. P. (1960). Magnitude and Frequency of Forces in Geomorphic Processes. *The Journal of Geology*, 68, 1, 54-74. DOI : 10.1086/626637
- Zabilansky, L. J., Ettema, R., Wuebben, J., et Yankielun, N. (2002). *Survey of River Ice Influences on Channel Bathymetry Along the Fort Peck Reach of the Missouri River, Winter 1998-1999*. Omaha: US Army corps of Engineers, Engineer Research and Development Center.