

Université du Québec
Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

MODÈLE GÉOSPATIAL DE PRÉDISPOSITION DES RIVIÈRES AUX EMBÂCLES

Par

STÉPHANE DE MUNCK

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Examineur externe	Étienne Boucher Université du Québec à Montréal
Examineur interne	Thomas Buffin-Bélanger Université du Québec à Rimouski INRS Centre Eau Terre Environnement
Directrice de recherche	Monique Bernier INRS Centre Eau Terre Environnement



RÉSUMÉ

Les embâcles sont les événements les plus dramatiques provoqués par le dégel et l'accumulation rapide de glace. Lorsqu'une rupture dynamique du couvert de glace se produit dans une rivière, la glace mise en mouvement risque de se stopper là où les conditions morphologiques du chenal créent un obstacle naturel, c'est-à-dire lorsque le volume de glace se déplaçant excède la capacité de transport de la rivière (USACE, 1994). Les conséquences dévastatrices des inondations dues aux embâcles rendent leur étude primordiale afin de fournir une alerte rapide à ces populations, et permettre la mise en place de mesures de réduction d'embâcles (White, 2002). En cherchant à déterminer la combinaison de variables hydrologiques et morphologiques décrivant le mieux le processus d'embâcle, il est alors possible de caractériser le lieu et la fréquence de celui-ci (White, 2002).

De nombreuses études ont été menées dans cette direction, les scientifiques favorisant historiquement des approches empiriques et statistiques. Mais ces modèles restent limités car souvent restreints au site étudié et difficilement exportables ailleurs (White, 2002). Ainsi, cette étude vise à développer un modèle géospatial simplifié estimant la prédisposition d'une rivière aux embâcles, quelle que soit sa position géographique. La question n'est pas ici de déterminer quand le couvert de glace brisera mais bien de savoir où la glace en mouvement est susceptible de s'agglomérer.

Dans cette optique, un certain nombre de paramètres physiques ont été identifiés dans la littérature comme ayant un rôle majeur dans le processus de formation et de développement des embâcles : la présence d'îles, les rétrécissements du chenal, les fortes sinuosités, la présence de ponts, les confluences de rivières, et enfin les ruptures de pente. Ces six caractéristiques morphologiques du chenal ont ensuite été représentées spatialement, en deux dimensions, à l'aide des outils de l'interface SIG FRAZIL (Gauthier et al., 2008).

A partir de cette géospatialisation nous avons développé les trois indices suivants : l'indice de rétrécissement, l'indice de sinuosité et l'indice de rupture de pente. Nous avons attribué à chacun de ces trois indices des valeurs seuils afin de diviser leurs plages de valeurs en quatre parties : 0 allant à celle ayant le moins d'influence sur la formation d'un embâcle, et 3 allant à la celle en ayant le plus. Ces seuils ont été calculés à partir des données historiques d'embâcles collectées en partenariat avec le Ministère de la Sécurité Publique du Québec. À ce niveau, il nous est apparu impossible de déterminer les seuils de l'indice de rupture de pente, les valeurs

trouvées étant souvent trouvées égales à zéro. Cette particularité a découlé de l'utilisation de données altimétriques issues de la BDTQ, qui ne se sont pas avérées pertinentes pour une analyse fine de la pente des cours d'eau. Faute de pouvoir se procurer des données altimétriques plus précises, nous avons décidé de plus tenir compte de l'indice de rupture de pente pour la suite de l'étude.

En dernier lieu nous avons établi la pondération des deux indices restant, afin de rendre compte de leurs influences réciproques. Cela a été effectué en regardant, pour chaque embâcle répertorié, les paramètres morphologiques responsables de leur formation. Nous avons ainsi pu mettre en évidence que l'indice de rétrécissement possédait trois fois plus d'importance dans la pondération que l'indice de sinuosité. Afin de normaliser ces poids nous avons utilisé une méthode d'analyse hiérarchique multicritères développée par Saaty (1990). L'indice final de prédisposition des rivières aux embâcles a été obtenu en multipliant pour chaque tronçon de la rivière et pour chaque indice la valeur de la classe par son poids, puis en faisant la somme de ces deux valeurs pondérées (numérateur), divisée par la somme pondérée correspondant aux valeurs maximales possibles (dénominateur). Le résultat a été divisé afin d'obtenir un indice normalisé.

Cette méthodologie a été appliquée à trois rivières québécoises (Chaudière, Saint-François, et l'Assomption). Les cartes en résultant ont été validées grâce aux observations historiques d'embâcles déjà utilisées pour la pondération des indices. Au total 22 sites d'embâcles ont été classés comme ayant une prédisposition majeure, 9 comme ayant une prédisposition modérée et 16 comme ayant une prédisposition faible. Le taux d'erreurs positives général des trois rivières a été trouvé égal à 5.1 % (embâcle prédit à tort par le modèle), ce qui correspond à 94 segments sur 1813. Ce taux est légèrement inférieur pour la rivière Chaudière (4.5 %), ce qui est peut être dû à un nombre d'observations historiques d'embâcles plus élevé. À terme, ce modèle conceptuel pourrait devenir un entrant dans des modélisations qui tiendraient aussi en compte des conditions hydrologiques et météorologiques. Cependant un travail supplémentaire pourrait auparavant être accordé à son automatisation, ainsi qu'à une nouvelle calibration des seuils et des pondérations des indices, si possible à partir de données historiques différentes.

REMERCIEMENTS

Pour commencer j'aimerais remercier ma directrice Monique Bernier pour m'avoir confié ce projet, pour m'avoir soutenu et pour avoir veillé à ce que celui-ci se déroule dans les meilleures conditions.

Merci également à Yves Gauthier pour sa disponibilité, pour son intérêt et pour ses nombreux conseils pertinents qui ont été essentiels à l'avancement de ce projet. Merci à Jimmy Poulin, pour sa disponibilité et pour ses innombrables conseils sur ArcGIS,

Merci à Karem Chokmani pour m'avoir à plusieurs reprises accordé un peu de son temps et pour m'avoir guidé dans de nombreux aspects.

Je tiens également à remercier Serge Légaré, pour son encadrement durant quatre mois au Ministère de la Sécurité Publique du Québec, ainsi que Nicolas Gignac, conseiller en géomatique au Ministère de la Sécurité Publique du Québec, pour ses nombreux services, notamment la mise en commun de plusieurs fichiers de données,

Merci aux professeurs Thomas Buffin-Bélanger (UQAR) et Étienne Boucher (UQAM) pour le temps qu'ils ont consacré à la correction de mon mémoire,

Enfin, merci à tous ceux qui ont pu contribuer de près ou de loin au bon déroulement de ce projet de recherche. Merci aux membres du laboratoire de télédétection pour leur bonne humeur, et un grand merci à mes amis, que ce soit de France ou du Québec, pour le soutien qu'ils m'ont accordé à chaque fois que j'en ai eu besoin.



TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	III
REMERCIEMENTS	V
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES FIGURES	XI
1. INTRODUCTION	1
2. LES EMBÂCLES DE GLACE	5
2.1 Les processus glaciels	5
2.1.1 Mise en place du couvert de glace : glace de frasil, glace thermique et glace de rive	5
2.1.2 La débâcle	7
2.1.3 Les embâcles	8
2.2 Modèles de prévision des embâcles par cassure	12
2.2.1 Modèles empiriques	13
2.2.2 Modèles statistiques	16
2.2.3 Modèles utilisant l'intelligence artificielle	17
2.3 Les paramètres morphologiques	19
2.3.1 État des lieux des paramètres morphologiques	19
2.3.2 Problématique des rétrécissements	21
2.3.3 Problématique des îles	23
2.3.4 Problématique des ponts	23
2.3.5 Problématique de la sinuosité	25
2.3.6 Problématique des affluents	32
2.3.7 Problématique des changements de pente	34
3. MÉTHODOLOGIE	37
3.1 Approche méthodologique retenue	37
3.2 Sites d'étude	38
3.3 L'outil SIG du système FRAZIL	45
3.3.1 L'outil <i>Centerline</i>	46
3.3.2 L'outil <i>Reaches</i>	46
3.3.3 L'outil <i>Curvature and Sinuosity</i>	48
3.4 Données disponibles	49
3.4.1 Données RHN (Réseau Hydrographique National)	49
3.4.2 Données BNDT (Base Nationale de Données Topographiques)	49

3.4.3	Données numériques d'élévation et données territoriales des municipalités	51
3.4.4	Données de calibration et d'évaluation	51
4.	DEVELOPPEMENT DU MODELE	57
4.1	Choix des paramètres.....	57
4.2	Géospatialisation des paramètres.....	58
4.2.1	Segmentation de la rivière	58
4.2.2	Adaptation du tracé de la rivière	59
4.2.3	Indice de rétrécissement.....	62
4.2.4	Prise en compte de la sinuosité	63
4.2.5	Prise en compte de la pente	65
4.2.6	Tableaux récapitulatifs.....	67
4.3	Modèle conceptuel	68
4.3.1	Standardisation des valeurs des indices	68
4.3.2	Poids des indices.....	75
4.3.3	Indice de prédisposition aux embâcles (IJPI).....	77
4.3.4	Récapitulatif du modèle conceptuel	79
5.	APPLICATION DU MODÈLE	81
5.1	Retour sur l'indice de rétrécissement.....	81
5.2	Produits cartographiques.....	84
5.3	Analyse complète des résultats	88
5.4	Analyse des résultats à l'échelle locale.....	97
5.5	Discussion	101
6.	CONCLUSION	105
7.	RÉFÉRENCES	109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Modèle de Wuebben <i>et al.</i> , poids et valeurs seuils (Extrait de White, 2002)	15
Tableau 2.2	Modèle de Wuebben <i>et al.</i> , détail de calcul (Adapté de Wuebben <i>et al.</i> , 1995)	15
Tableau 2.3	Comparaison des résultats de prévision pour les différentes approches (White, 2002)	18
Tableau 2.4	Occurrence des embâcles avec des sinuosités et des pentes différentes (Adapté de Kalinin, 2008).....	20
Tableau 2.5	Changements de fréquence des embâcles sous l'impact de différents facteurs (Adapté de Kalinin, 2008)	20
Tableau 3.1	Récapitulatif des caractéristiques morphologiques des trois rivières à l'étude : Chaudière, Saint-François et l'Assomption (¹ Superficie totale, ² Superficie dans la partie québécoise uniquement).....	41
Tableau 3.2	Données hydroclimatiques, hydrologiques et morphologiques des trois rivières à l'étude.....	42
Tableau 3.3	Nombre d'observations historiques pour chaque rivière, précise et imprécise	56
Tableau 4.1	Nombre de segments de 250 mètres obtenus pour chaque rivière, mis en parallèle avec le nombres de kilomètres traités.....	59
Tableau 4.2	Résultats du test de Kruskal-Wallis appliqué à l'indice de rétrécissement, pour les trois types d'occurrences.....	71
Tableau 4.3	Résultats du test de Kruskal-Wallis appliqué à l'indice de sinuosité, pour les trois types d'occurrences	72
Tableau 4.4	Récapitulatif des valeurs seuils, des quartiles correspondant (A pour Annuel, R pour Régulier), et des K-Means pour les deux indices.....	74
Tableau 4.5	Fréquence des différents facteurs (%) pour les deux types d'occurrence (Sinuosité > 0.56 et Rétrécissement seul en absence des autres facteurs < 0.51)	76
Tableau 4.6	Échelle de comparaison de l'importance des indices les uns par rapport aux autres.....	76
Tableau 4.7	Importance relatives des indices et poids des indices (vecteur prioritaire).....	77
Tableau 5.1	Nombre de cas de ponts, de tributaires et d'îles en présence d'une prédisposition élevée (majeure ou modérée), ou d'un embâcle observé	83
Tableau 5.2	Classement de prédisposition (majeur, modéré ou faible) des embâcles répertoriés précis	88
Tableau 5.3	Détail des paramètres morphologiques rencontré en présence d'une prédisposition majeure ou modérée	89

Tableau 5.4	Taux d'erreurs positives (nombre de segments/nombre de segments total, et %) pour les trois rivières.....	89
Tableau 5.5	Contexte géomorphologique des erreurs positives et négatives.....	90
Tableau 5.6	Contexte géomorphologique des erreurs positives et négatives.....	91

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Inondation causée par un embâcle. Saint-Raymond, rivière Sainte-Anne (Source : MSP).....	1
Figure 1.2	Embâcle sur le fleuve Saint-Laurent à Montréal (Gravure par F. Méaulle, 1890, illustration libre de droits et gratuite pour une utilisation dans un contexte éducatif).....	2
Figure 1.3	Le risque, combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité (MSP, Concepts de base en sécurité civile, 2008)	4
Figure 2.1	Frasil en formation (Agence spatiale canadienne, février 2009).....	6
Figure 2.2	Exemple de glace de rive (Environnement Canada, Guide des glaces fluviales au Nouveau-Brunswick, 2011).....	7
Figure 2.3	Illustration de la composition des embâcles par congélation (Adapté de White, Ice Jams in the United States, 2006)	9
Figure 2.4	Illustration de la composition des embâcles par cassure (Adapté de White, Ice Jams in the United States, 2006).....	10
Figure 2.5	Évolution des forces d'écoulement et des forces de résistance au cours du temps (Beltaos, River Ice Breakup, 2007).....	11
Figure 2.6	Corrélation entre la période de gel initiale de la couche de glace et la périodicité des embâcles (White, 2002)	14
Figure 2.7	Classification des risques en fonction des deux fonctions discriminantes de Zachrisson (1990) (White, 2002)	17
Figure 2.8	Représentation d'un réseau neuronal (Massie <i>et al.</i> , 2002).....	18
Figure 2.9	Lit majeur (Wflood), et lit mineur (Wbkf) (Adapté de Boucher <i>et al.</i> , 2009).....	21
Figure 2.10	Blocage de la glace dû à un rétrécissement, naturel ou du fait de la présence de glace de bord (Extrait de Beltaos, River Ice Jams, 1995).....	22
Figure 2.11	Embâcle dans une section droite (Zufelt, 1988).....	22
Figure 2.12	Illustration de la problématique de l'emplacement d'un pont. Un pont placé au sommet d'un méandre possède moins d'impact sur le transport de la glace qu'un pont placé entre deux méandres successifs	24
Figure 2.13	Aménagement de la structure des piliers d'un pont pour abimer le couvert de glace (Source : MSP)	25
Figure 2.14	Illustration du coefficient de sinuosité (Interface de l'outil Curvature and Sinuosity, onglet aide de Frazil) (Gauthier <i>et al.</i> , 2008).....	26
Figure 2.15	Point d'inflexion dans un méandre (Bravard et Petit, 2000)	26
Figure 2.16	Evolution de la vitesse d'écoulement moyenne dans un méandre et profondeur sous le couvert de glace (en mètres) (Demers <i>et al.</i> , 2010).....	28
Figure 2.17	Vitesse longitudinale (en coloré), et courants secondaires (vecteurs) au sommet du méandre (Adapté de Demers <i>et al.</i> , 2010).....	29

Figure 2.18	Accumulation de glace de frasil au sommet du méandre (Adapté de Demers <i>et al.</i> , 2010)	30
Figure 2.19	Zones fonctionnelles des cours d'eau (Bourdon <i>et al.</i> , 2008, source originale Brierley et Fryirs, 2005)	30
Figure 2.20	Définition des styles de cours d'eau (Bourdon <i>et al.</i> , 2008, source originale Rosgen, 1995).....	31
Figure 2.21	Alternance de seuils (riffles) et de mouilles (pools) (Mount, 1995).....	32
Figure 2.22	Différentes formes de bassins versants (Adapté de Saint-Laurent <i>et al.</i> , 2001).....	33
Figure 2.23	Représentation schématique des séquences de lissage des grains le long des sections sédimentaires (Bergeron <i>et al.</i> , 2011)	34
Figure 2.24	Fonctions périodiques le long des liens sédimentaires (Adapté de Bergeron <i>et al.</i> , 2011)	35
Figure 3.1	Embâcle sur la rivière Chaudière, Lévis, 2009 (Source : MSP).....	39
Figure 3.2	Embâcle sur la rivière Coaticook, Dixville, 2010 (Source : MSP)	39
Figure 3.3	Embâcle sur la rivière du Loup, Saint-Côme-Linière, 2012 (Source : MSP)	40
Figure 3.4	Bassin versant des rivières Chaudière, Saint-François et l'Assomption, plans de situation à l'échelle continentale, provinciale et locale	41
Figure 3.5	Segmentation fluviale de la rivière Chaudière (Thibault, 2008)	43
Figure 3.6	Régions géologiques des bassins versants des rivières Chaudière, Saint-François et l'Assomption.....	44
Figure 3.7	Illustration de FRAZIL sous l'environnement ArcGIS	45
Figure 3.8	Principe d'extraction de la ligne médiane de l'outil <i>Centerline</i> de Frazil (Adapté de Gauthier <i>et al.</i> , 2008).....	46
Figure 3.9	Étapes de segmentation de la rivière à partir de l'outil <i>Reaches</i> (Adapté de Gauthier <i>et al.</i> , 2008).....	47
Figure 3.10	Représentation des trois largeurs différentes calculées par l'outil <i>Reaches</i> (Interface de l'outil <i>Reaches</i> , onglet aide de Frazil)	48
Figure 3.11	Découpage SNRC (Système National de Référence Cartographique du Canada) (Géogratix, Normes et spécifications)	50
Figure 3.12	Interface du logiciel interne du Ministère, sur lequel les données sur les événements d'embâcle ont été prélevées.....	52
Figure 3.13	Extrait d'un événement d'embâcle issu de la base de données du MSP. Cas de la rivière Chaudière à Saint-Lambert-de-Lauzon.....	53
Figure 3.14	Carte de localisation des accumulations de glace. Fichier joint à l'historique d'un événement d'embâcle. Base de données du MSP.....	54
Figure 3.15	Illustration de l'interface du logiciel SIG GEOLoc du Ministère de la Sécurité Publique	55
Figure 4.1	Choix du chenal principal le plus court lorsque l'île se situe au centre du chenal.....	60

Figure 4.2	Principe de l'ajustement de la largeur de la rivière principale en présence d'un affluent. La largeur du tronçon W_i est trouvée en soustrayant à la largeur de la rivière principale W la largeur minimale de l'affluent à l'embouche w .	61
Figure 4.3	Bassins versants de niveau 2 tels que définis par le CEHQ pour la rivière Chaudière.	62
Figure 4.4	Principe de l'algorithme de l'indice de rétrécissement.	63
Figure 4.5	Problème d'ajustement du coefficient de sinuosité à chaque tronçon. Du fait du calcul du coefficient de sinuosité basé sur les points d'inflexion, une polygone associée à une valeur de sinuosité recoupe plusieurs tronçons. Nous avons alors donné à chaque tronçon la valeur du coefficient de sinuosité se superposant à lui, et avons fait la moyenne pour les tronçons concernés par deux valeurs de sinuosité.	64
Figure 4.6	Profil en long de la rivière Chaudière de Saint-Georges à son embouchure. Les embâcles répertoriés sont indiqués par des flèches noires, les affluents par des carrés rouges.	66
Figure 4.7	Utilisation des outils SIG de FRAZIL pour extraire des paramètres géospatiaux des données initiales.	67
Figure 4.8	Création des indices finaux à partir des résultats de sortie de FRAZIL.	68
Figure 4.9	Diagramme de l'indice de rétrécissement (gauche), et de la sinuosité (droite).	69
Figure 4.10	Diagramme de la rupture de pente.	70
Figure 4.11	Indice de rétrécissement : choix des quatre classes en fonction des quartiles des deux types d'occurrence.	73
Figure 4.12	Indice de sinuosité : choix des quatre classes en fonction des quartiles des deux types d'occurrence.	73
Figure 4.13	Représentation schématique de la construction de l'indice final de prédisposition aux embâcles.	79
Figure 5.1	Illustration du bien-fondé de la prise en considération de 50 % de la largeur du chenal en présence d'un pont. Le modèle est réactif et détecte correctement la prédisposition des tronçons.	81
Figure 5.2	Illustration de l'effet d'un affluent moyennement large sur la prédisposition à l'embâcle (tronçon en rouge), et du bien-fondé de l'indice de rétrécissement sur le modèle.	82
Figure 5.3	Illustration du bien-fondé de l'indice de rétrécissement pour la prédisposition à l'embâcle (tronçon en rouge) lors de la présence d'une île.	82
Figure 5.4	Illustration d'une erreur positive (pas d'embâcle dans la base de données) due à une île.	83
Figure 5.5	Résultat cartographique du modèle de prédisposition des rivières aux embâcles, rivière Chaudière. Le cadre rouge délimite la zone d'étude de la Figure 5.17.	85
Figure 5.6	Résultat cartographique du modèle de prédisposition des rivières aux embâcles, rivière Saint-François. Le cadre rouge délimite la zone d'étude de la Figure 5.18.	86

Figure 5.7	Résultat cartographique du modèle de prédisposition des rivières aux embâcles, rivière l'Assomption. Le cadre rouge délimite la zone d'étude de la Figure 5.19	87
Figure 5.8	Image aérienne illustrant un résultat d'erreur négative non expliqué par les données géomorphologiques (point bleu, site 1). Ajout de deux résultats similaires, pour des embâcles classés imprécis (points rouges, sites 1 et 2). Beauceville, rivière Chaudière (Source : Google Map).....	92
Figure 5.9	Photographie des hauts fonds localisés au site 1 de la Figure 5.8. Beauceville, rivière Chaudière (Source : Google Map, septembre 2012)	93
Figure 5.10	Photographie des bancs de sable localisés au site 2 de la Figure 5.8. Beauceville, rivière Chaudière (Source : Google Map, septembre 2012)	93
Figure 5.11	Image aérienne localisant un résultat d'erreur négative non expliqué par les données géomorphologiques (point bleu). Site : Ile Boisée, Beauceville, rivière Chaudière (Source : Google Map).....	94
Figure 5.12	Photographie des hauts fonds (bancs de sable), au site de l'île Boisée. Beauceville, rivière Chaudière (Source : Google Map, septembre 2012)	94
Figure 5.13	Image aérienne localisant un résultat d'erreur négative non expliqué par les données géomorphologiques (point bleu). Site : Saint-Joseph-de-Beauce, rivière Chaudière (Source : Google Map).....	95
Figure 5.14	Photographie d'un banc de sable localisé à Saint-Joseph-de-Beauce, rivière Chaudière (Source : Google Map, août 2012)	95
Figure 5.15	Image aérienne localisant un résultat d'erreur négative non expliqué par les données géomorphologiques (point bleu). Site : Sainte-Marie, rivière Chaudière (Source : Google Map).....	96
Figure 5.16	Photographie du rétrécissement de la rivière Chaudière localisé à Sainte-Marie (Source : Google Map, août 2012)	96
Figure 5.17	Résultat cartographique du modèle de prédisposition des rivières aux embâcles, secteur de Beauceville et Notre-Dame-des-Pins, rivière Chaudière.....	98
Figure 5.18	Résultat cartographique du modèle de prédisposition des rivières aux embâcles, secteur de Richmond, rivière Saint-François	99
Figure 5.19	Résultat cartographique du modèle de prédisposition des rivières aux embâcles, secteur de Sainte-Mélanie, rivière l'Assomption	100

1. INTRODUCTION

Les embâcles sont le résultat de l'obstruction d'un cours d'eau par la glace, soit du fait du dégel soit du fait de l'accumulation rapide de glace fragmentée. Ils sont une cause importante d'inondations au Québec, au Canada, et plus globalement dans tous les milieux froids. On retrouve même cette problématique dans des milieux plus tempérés comme le Nouveau Mexique et l'Arizona, états du sud des États-Unis, du fait de la présence des Montagnes Rocheuses (USACE, 1994).

Les embâcles sont donc un enjeu crucial pour un nombre important de pays et pour des bassins de population considérables. Les inondations dues aux embâcles sont alors une source d'inquiétude majeure, car elles menacent la sécurité des populations riveraines et sont responsables des dommages matériels conséquents (Figure 1.1). En effet les inondations causées par les embâcles entraînent des dommages socio-économiques importants à travers la destruction de ponts (Environnement Canada, 2011), la détérioration d'installations hydroélectriques et la perturbation de la navigation fluviale. Ils affectent ainsi les voies d'eaux navigables majeures nord-américaines, et notamment les Grands Lacs (USACE, 1994).



Figure 1.1 Inondation causée par un embâcle. Saint-Raymond, rivière Sainte-Anne (Source : MSP)

Les premiers habitants du Québec se rendirent vite compte de cette particularité nouvelle pour eux. En effet, Paul de Maisonneuve, fondateur de la ville de Montréal en 1641, connu lors de son premier hiver une inondation qui vit l'eau monter jusqu'au seuil de la porte du Fort Ville-Marie (ancien nom de Montréal). Beaucoup plus tard lors de la grande inondation de 1866, l'eau monta à la hauteur record de 9.7 mètres au-dessus du niveau normal du fleuve (Figure 1.2). Des mesures de réduction d'embâcle et de protection des zones habitées furent donc prises dès les premières années de la présence française en Amérique du Nord (Grand Québec, s.d.).

Les conséquences dévastatrices des inondations dues aux embâcles rendent leur étude primordiale afin de fournir une alerte rapide à ces populations, et permettre la mise en place de mesures de réduction d'embâcles (White,202). En cherchant à déterminer la combinaison de variables hydrologiques et morphologiques décrivant le mieux le processus d'embâcle, il est alors possible de caractériser le lieu et la fréquence de celui-ci (White, 2002).

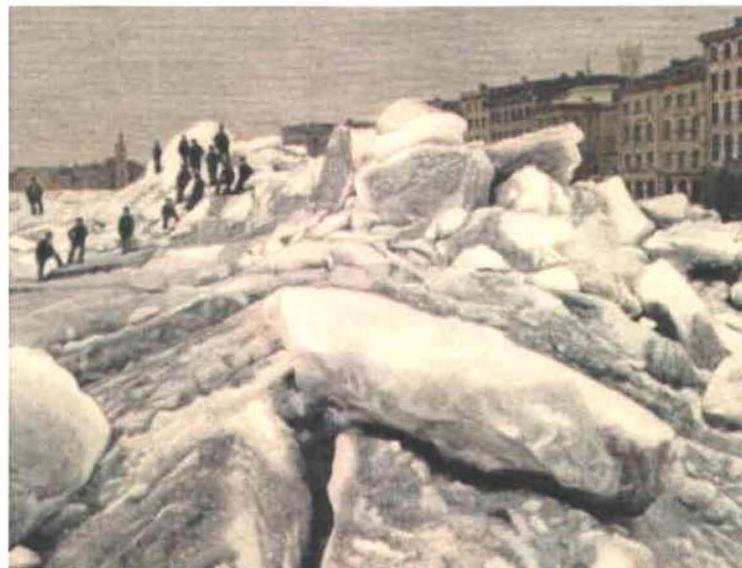


Figure 1.2 Embâcle sur le fleuve Saint-Laurent à Montréal (Gravure par F. Méaulle, 1890, illustration libre de droits et gratuite pour une utilisation dans un contexte éducatif)

Le processus physique complexe de formation des embâcles rend néanmoins difficile le développement de méthodes de prévisions fiables. De nombreuses études ont pourtant été menées dans cette direction, les scientifiques favorisant historiquement des approches empiriques et statistiques. Mais ces modèles restent limités car souvent restreints au site étudié et difficilement exportable ailleurs (White, 2002). Le manque d'analyses décrivant les processus

menant à la rupture du couvert de glace, à son transport, et à son encombrement empêche le développement d'un modèle général de prévision. Ce manque se traduit souvent par un choix arbitraire des variables, c'est pourquoi les modèles de prévision de la fréquence et de la localisation des embâcles se doivent d'être reliés à des variables facilement mesurables ou estimables (White, 2002).

Au Québec, différents intervenants gouvernementaux ou privés travaillent sur le développement de services permettant d'outiller les autorités locales sur la protection de la population et sur la minimisation des dommages matériels en cas d'inondation. Afin de maximiser l'efficacité d'un tel service, il est important qu'ils puissent fournir des prévisions et recommandations pertinentes pour les événements d'inondation causés par des embâcles de glace. Or, aucun outil ne permet actuellement d'effectuer efficacement des prévisions fiables et arrimées aux besoins opérationnels des intervenants locaux.

L'objectif de ce mémoire est de développer un modèle de prédisposition des embâcles à partir de la morphométrie en plan des cours d'eau, en se basant sur des variables communes et facilement accessibles. Ces variables intégreront une composante géospatiale. Elles représenteront spatialement certaines caractéristiques morphologiques du chenal, caractéristiques qui seront transformées en facteurs de risques d'embâcle. Ce modèle conceptuel a pour but de déterminer les zones soumises à de forts risques de présence d'un embâcle. La question n'est pas ici de déterminer quand le couvert de glace brisera mais bien de savoir où la glace en mouvement est susceptible de s'agglomérer. Une fois développée, cette approche pourra être valorisée dans d'autres pays aux prises avec ce genre de problématique. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur des outils SIG, et notamment le système FRAZIL (Gauthier *et al.*, 2008), qui s'intègre dans l'environnement ArcGIS (ESRI). La composante SIG du système FRAZIL a été conçue pour fournir quelques-unes des caractéristiques physiques du chenal de la rivière (ligne d'écoulement principale, largeur, sinuosité) (Gauthier *et al.*, 2008).

Le concept de risque implique que l'on soit en présence de deux éléments fondamentaux, l'aléa et la vulnérabilité. Un aléa constitue un phénomène ou un événement pouvant causer des atteintes ou des dommages (inondation, séisme, accident industriel, sécheresse, etc.). La vulnérabilité représente quant à elle une condition qui prédispose les éléments exposés à la manifestation d'un aléa (MSP, 2008) (Figure 1.3). Nous nous intéresserons dans la présente étude non pas au risque d'embâcle mais bien à l'embâcle pris comme un aléa, puisque nous ne prenons jamais en compte la présence des éléments anthropiques exposés à une vulnérabilité

potentielle. Les trois rivières qui ont été choisies comme sites d'études sont situées dans des régions habitées du bassin du fleuve Saint-Laurent : l'Assomption, Chaudière, Saint-François.

En effet, les données historiques d'embâcles qui ont été récoltées par le Ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP) proviennent des zones habitées, sans quoi l'embâcle n'aurait jamais été répertorié.

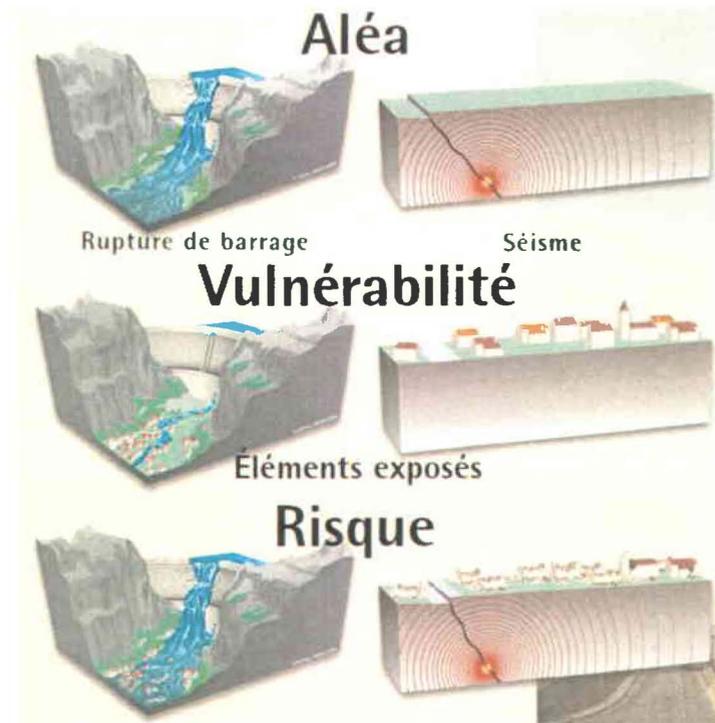


Figure 1.3 Le risque, combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité (MSP, Concepts de base en sécurité civile, 2008)

Avant de présenter notre approche méthodologique, nous dresserons un bilan des paramètres morphologiques impliqués dans la formation d'un embâcle de glace (chapitre 2). Dans le troisième chapitre, nous présenterons l'approche méthodologique, les données utilisées, ainsi que le SIG du système FRAZIL et la manière dont ce SIG est utilisé pour répondre à la problématique. Dans le quatrième chapitre, nous exposerons la conceptualisation du modèle. Enfin, nous confronterons au chapitre 5 nos prévisions aux données de calibration et d'évaluation récoltées sur le terrain à l'aide d'une collaboration étroite avec le Ministère de la Sécurité Publique du Québec.

2. LES EMBÂCLES DE GLACE

Nous allons dresser dans cette section un bilan non exhaustif mais le plus complet possible des études menées sur les embâcles de glace. Toutes les études que nous avons choisi de présenter n'ont pas forcément toutes eu une approche morphologique des embâcles. Par contre, elles permettent de mieux cerner le contexte global dans lequel notre étude se place. Ainsi nous nous intéresserons dans une première partie aux processus glaciels, de la mise en place du couvert de glace à la formation d'embâcles. Puis nous passerons en revue les modèles existants de prévisions des embâcles par cassure, et enfin dans un dernier point, le plus important en ce qui nous concerne, nous évoquerons la problématique des embâcles d'un point de vue morphologique.

2.1 Les processus glaciels

La plupart des rivières du Québec sont recouvertes de glaces pendant la majeure partie de l'hiver. Il est alors important de dissocier les processus de formation des trois types de glaces suivants : la glace de frasil, la glace thermique et la glace de rive. Celles-ci permettront ensuite de mieux comprendre les processus glaciels de déformation du couvert de glace intervenant lors de la débâcle.

2.1.1 Mise en place du couvert de glace : glace de frasil, glace thermique et glace de rive

La glace de frasil est constituée d'un ensemble de cristaux de glaces en forme d'aiguille, orientés de façon aléatoire. Ces derniers se forment dans les eaux ouvertes ayant un écoulement turbulent et extrêmement froides (USACE, 1994). Dans l'eau rapidement refroidie, les particules de frasil adhèrent les unes aux autres et remontent à la surface en formant des radeaux qui dérivent et s'agglomèrent à leur tour (Figure 2.1) (Environnement Canada, 2011).



Figure 2.1 Frasil en formation (Agence spatiale canadienne, février 2009)

Les nappes de glace thermique se forment dans les rivières ayant une faible vitesse d'écoulement. Des cristaux de glace se forment à la surface et se lient ensemble pour créer une mince feuille de glace. Une fois formée, la glace commence à s'accroître en profondeur (Environnement Canada, 2011). Ces cristaux, plus purs, c'est-à-dire sans bulles d'air, sont facilement identifiables lors des carottages effectués sur le terrain. Ce type de glace apparaît noir foncé, alors que le frasil, rempli de bulles d'air, apparaît comme une glace blanche.

La glace de rive est la première couverture à apparaître de manière latérale ou en marge des rives, lorsque la vitesse est faible et le lit peu profond. La glace de rive s'accroît verticalement et horizontalement vers le milieu du cours d'eau (Figure 2.2) (Environnement Canada, 2011).



Figure 2.2 Exemple de glace de rive (Environnement Canada, Guide des glaces fluviales au Nouveau-Brunswick, 2011)

2.1.2 La débâcle

La débâcle annuelle des glaces représente un évènement de courte durée, mais lourd de conséquences pour le régime d'écoulement des rivières septentrionales. Celle-ci peut causer des inondations importantes ayant des impacts importants sur les communautés riveraines, les infrastructures, la navigation et la production d'hydroélectricité (Beltaos, 2007, Canadian Journal of Civil Engineering).

La débâcle se produit lors d'un redoux faisant fondre la couverture de neige et affaiblissant la nappe de glace (Environnement Canada, 2011). Ce processus est souvent aggravé par les précipitations qui diminuent encore plus la force de résistance de la nappe de glace et augmentent le débit du cours d'eau ainsi que le niveau de l'eau.

Lorsque les forces exercées en aval deviennent supérieures aux forces de résistance de la glace, celle-ci se désintègre en morceaux qui vont se diriger vers l'aval du cours d'eau. La distance que va parcourir la glace dépend des conditions du débit, de la géométrie de la rivière et des conditions météorologiques. À mesure que la glace brisée poursuit son chemin vers l'aval, sa vitesse contribue davantage à son dégel. Celle-ci peut néanmoins se déposer à un endroit offrant une plus grande résistance; comme à un étranglement de canal, ou au bord d'une autre nappe de glace, plus résistante, donnant formation à un embâcle. Dans certains cas les températures très froides du milieu de l'hiver peuvent réapparaître. L'embâcle peut alors

geler et figer sur place (Environnement Canada, 2011). En revanche une fonte nivale lente provoque une augmentation graduelle du débit de la rivière et une détérioration graduelle de la nappe de glace, entraînant des pics de niveaux d'eau beaucoup moins élevées, et limitant les risques d'embâcles (Environnement Canada, 2011).

2.1.3 Les embâcles

Les embâcles sont les événements les plus dramatiques provoqués par la débâcle et l'accumulation rapide de la glace fluviale fragmentée (Environnement Canada, 2011). Ils provoquent souvent des augmentations soudaines et conséquentes du niveau de l'eau, entraînant de graves dommages causés par les inondations, dans certains cas supérieurs à ceux reliées aux inondations d'eau libre (Environnement Canada, 2011).

L'initiation d'un embâcle est gouvernée par de nombreux facteurs, incluant la morphologie du chenal, celle-ci étant très variable tout au long de la rivière. Il est ainsi commun de trouver des endroits où des cassures ont commencé, et d'autres où au contraire le couvert de glace hivernal est encore intact (Beltaos, 2008).

On distingue deux catégories principales d'embâcles : les embâcles par congélation (*freezeup ice jams*), et les embâcles par cassure (*breakup ice jams*) (White, 2002).

a. Les embâcles par congélation (freezeup ice jams)

Ils sont caractérisés par une température basse de l'air et de l'eau et un écoulement relativement constant, augmentant la production de frasil. Cette masse de frasil peut alors être assez dense pour entraver l'écoulement de l'eau (Figure 2.3). Comme ce type d'embâcle résulte le plus souvent d'un froid intense et donc d'une production de frasil en grande quantité, il est généralement plus facile à prédire que le deuxième type d'embâcle, par cassure, en se basant sur des paramètres comme la géométrie de la rivière, le nombre de jours de gel accumulés (Accumulated Freezing Degree-Day, AFDD), et la longueur des périodes de froid intense au début de l'hiver (White, 2002).

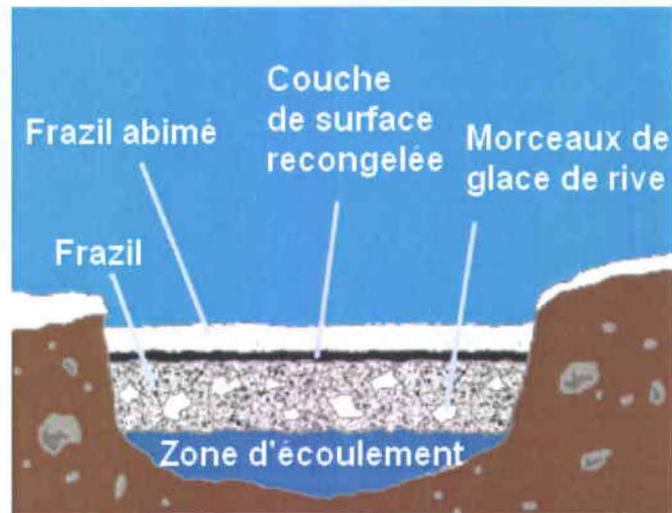


Figure 2.3 Illustration de la composition des embâcles par congélation (Adapté de White, Ice Jams in the United States, 2006)

b. Les embâcles par cassure (breakup ice jams)

Les embâcles par cassure, tout comme les embâcles par congélation, résultent d'une interaction complexe entre des processus hydrauliques, hydrologiques et météorologiques. Dans la plupart des pays, ces embâcles se produisent au moment du dégel (débâcle), ou durant une période de fortes précipitations. Les morceaux de glace sont transportés au fil de l'eau jusqu'à ce que la capacité de transport de la rivière soit insuffisante, formant une accumulation de glace bloquant l'écoulement de l'eau (Figure 2.4) (White, 2002). Dans des pays comme le Canada et les États-Unis, ces embâcles peuvent survenir à tout moment pendant l'hiver, parfois très tôt après la formation de la glace, au bénéfice d'une période de réchauffement (White, 2002).

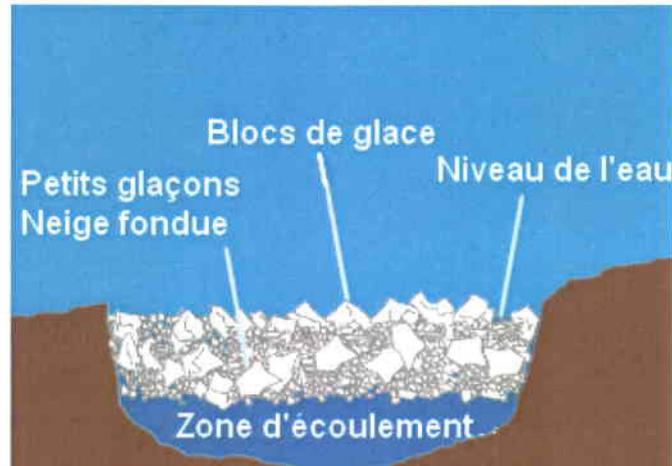


Figure 2.4 Illustration de la composition des embâcles par cassure (Adapté de White, *Ice Jams in the United States*, 2006)

On distingue deux types d'embâcles par cassure : thermiques et dynamiques (Prowse, 2007, source originale Gay and Prowse, 1993). En anglais le terme *premature* est utilisé pour les embâcles dynamiques, tandis que le terme *overmature* est employé pour les thermiques (en référence au réchauffement pré-embâcle). De ce fait, les embâcles dynamiques sont attendus plus tôt dans la saison que les embâcles thermiques.

Les embâcles thermiques se produisent après une période d'amincissement de la glace et de détérioration mécanique de ses propriétés physiques. Au contraire, les embâcles dynamiques sont caractérisés par un dégagement rapide et significatif de la glace avant que sa force mécanique ou son épaisseur n'ait été réduites. Le déplacement de cette glace épaisse et rugueuse entraîne une montée des eaux sans précédent, faisant de ce type d'embâcle un des plus dangereux pour les populations. Il est à noter que plus la fonte de la glace est rapide, plus la probabilité d'avoir un embâcle dynamique est grande (Prowse, 2007).

La désagrégation de la glace comprend une variété de processus et peut être décrite à travers les phases distinctes suivantes (Beltaos, 2007, *River Ice Breakup*) :

- pré-rupture (*pre-breakup*)
- initiation (*onset*)
- transport (*drive*)
- agglomération (*jamming*)
- lavage (*wash*)

Pour Shen *et al.* (2003), l'initiation d'un embâcle résulte de la réduction des forces d'entraînement et de l'augmentation des forces de résistance. Ces changements de forces sont tous deux gouvernés par la géométrie de la rivière. En effet une réduction de la pente du lit ou une augmentation de la surface mouillée, qui entraînent une réduction de la vitesse, réduiront du même fait les forces d'entraînement. D'un autre côté, la présence de méandres et d'îles va entraîner une plus grande force de résistance. Toujours d'après l'étude menée par Shen *et al.* (2003), l'initiation d'un embâcle est causée par la réduction de la pente du lit et de la vitesse d'écoulement au pied de l'embâcle. La largeur étroite du chenal à cet endroit et le méandre immédiatement en aval augmenteraient la probabilité de trouver un embâcle. Beltaos (2006) évoque ces deux mêmes critères lorsqu'il étudie la problématique du placement des ponts : la maximisation des forces d'écoulement et la minimisation des forces de résistance. Il en détaille les effets dans *River Ice Breakup* (2007), R étant les forces de résistances, et D les forces d'écoulement (Figure 2.5).

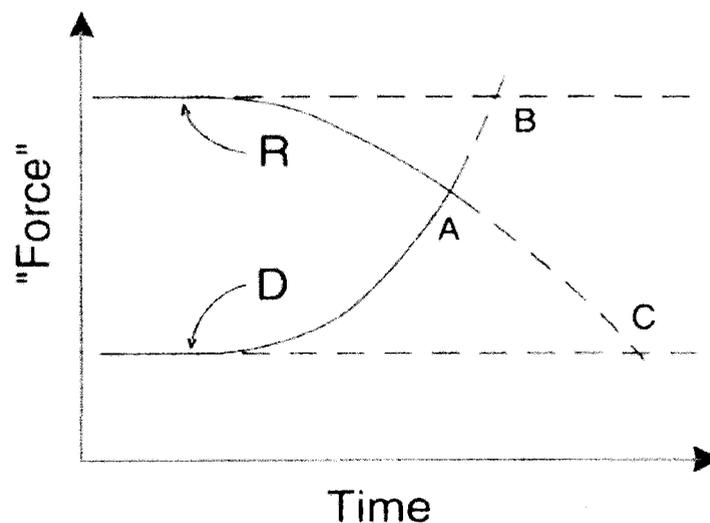


Figure 2.5 Évolution des forces d'écoulement et des forces de résistance au cours du temps (Beltaos, *River Ice Breakup*, 2007)

À l'origine, en présence d'un couvert de glace les forces de résistance sont supérieures aux forces d'écoulement ($R > D$). Au fur et à mesure que la période de pré-rupture avance, le point A est atteint et $D = R$. Peu après, le couvert de glace se disloque et se met en mouvement car les forces d'écoulement sont maintenant supérieures aux forces de résistance ($D > R$). Les embâcles se forment alors là où les fragments de glace sont arrêtés.

Cette situation peut également se produire même sans détérioration thermique du couvert de glace. Dans ce cas précis, les forces de résistance restent constantes et les forces de transport D augmentent jusqu'au point B. Un embâcle dynamique (*premature*) découle alors de cette situation. Les embâcles dynamiques sont souvent causés par des pluies importantes sur le couvert de neige au milieu de l'hiver. Si il n'y a que peu de précipitations et un réchauffement lent, ce sont les forces d'écoulement D qui restent constantes et les forces de résistance R qui décroissent jusqu'à atteindre le point C (Figure 2.5). Cela conduit à un embâcle par cassure de type thermique. Souvent, les embâcles thermiques sont précédés par une ouverture progressive de la glace, comme c'est le cas lorsque des affluents sont déjà en eau libre en aval, ou en présence de rapides lorsque les vitesses élevées entraînent une fonte plus rapide du couvert de glace.

Toujours selon Beltaos (River Ice Breakup, 2007), il existe deux types de forces d'écoulement agissant sur le couvert de glace, toutes deux dans le sens de la pente. La première provient simplement de la mécanique des fluides et de la force du courant, tandis que la deuxième provient du poids du couvert de glace lui-même, incluant le poids de l'eau. Ces forces provenant de l'écoulement et de la gravité sont proportionnelles à la largeur de la rivière. En revanche, les forces de résistance dérivent de la friction interne et de la cohésion au sein de l'embâcle, et augmentent avec l'épaisseur de l'embâcle. Elles ne dépendent donc pas de la largeur de la rivière (Beltaos, 1995).

2.2 Modèles de prévision des embâcles par cassure

Nous allons nous intéresser dans cette partie à une revue non exhaustive des modèles existants ayant pour but la prévision de la fréquence d'un embâcle par cassure à partir des conditions hydroclimatiques. Bien que ces modèles ne portent que sur la composante temporelle (et n'abordent pas la composante spatiale), cet aperçu des dernières avancées scientifiques en matière de prévisions d'occurrence d'embâcle nous permettra par la suite de mieux situer notre modèle. Pour cela, nous nous sommes principalement inspirés de l'article de White publié en 2002, *Review of prediction methods for breakup ice jams*. D'après White (2002), les modèles existant vont aujourd'hui du simple modèle empirique à d'autres plus complexes comme les modèles statistiques, ou encore ceux basés sur une intelligence artificielle (*neural network*).

2.2.1 Modèles empiriques

Ces modèles sont basés sur l'observation d'un phénomène physique, impliquant souvent une valeur seuil limite pour une variable donnée au-delà de laquelle un embâcle peut se produire ou non. D'autres modèles empiriques nécessitent le calcul d'indices où peuvent inclure une analyse statistique.

Les modèles avec valeur critique les plus simples incluent généralement une ou deux variables, alors que les plus complexes incluent une multitude de variables, d'indices, et de pondérations. Un exemple d'une méthode simple à une seule variable est donné par Shuliakovskii (1963), grâce à des données historiques d'embâcles sur la rivière Yenesei, en Russie (Figure 2.6). Shuliakovskii a observé une relation empirique claire entre la période de gel initiale de la couche de glace et la périodicité des embâcles (équation 1).

$$T_u = H_f > 300 \text{ cm et } T_l = H_f < 185 \text{ cm} \quad (1)$$

où T_u : valeur limite haute au-delà de laquelle les embâcles se produisent toujours
 T_l : valeur limite basse en-deçà de laquelle les embâcles ne se produisent jamais
 H_f : épaisseur maximum de glace atteinte durant la formation du couvert

Un tel modèle se veut d'être idéal car il est rare qu'une seule variable puisse prédire à elle seule la présence ou non d'un embâcle, d'où le développement de modèles comprenant plusieurs variables. Le principal inconvénient de ces modèles est que dans la plupart des cas, l'analyse statistique des données disponibles pour un lieu d'étude ne révèle généralement pas de différence majeure entre les valeurs qui ont pour résultat un embâcle et celles qui ne donnent rien.

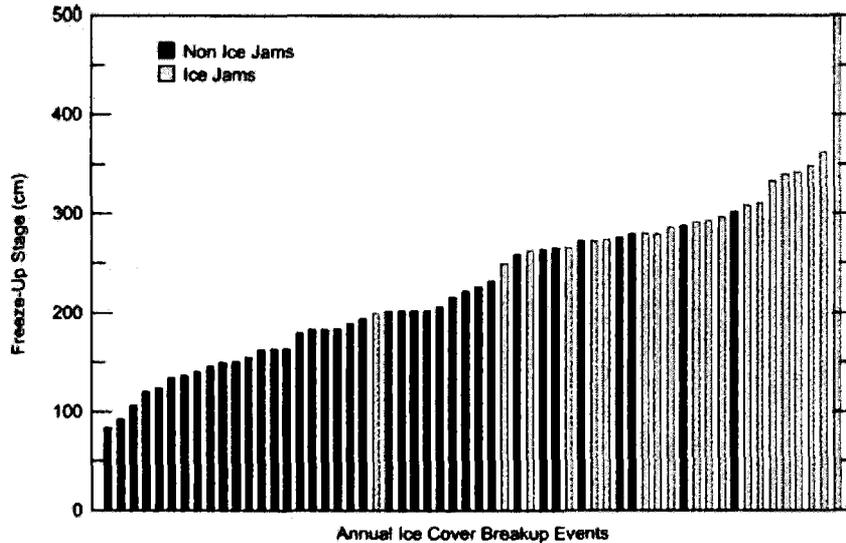


Figure 2.6 Corrélation entre la période de gel initiale de la couche de glace et la périodicité des embâcles (White, 2002)

D'après White (2002) les modèles multi-variables existants ont souvent tendance à surévaluer les erreurs positives (prévision à tort d'un embâcle). En effet il est préférable de diminuer les erreurs négatives (prévision manquante d'un embâcle), ces dernières entraînant généralement de plus graves conséquences (White, 2002). Cependant, un taux trop élevé de ces erreurs positives peut également présenter un danger pour les populations, celles-ci ne se sentant plus concernées par les alertes répétées et finalement inutiles. Toute la difficulté consiste donc à trouver un juste milieu entre les deux.

Malgré la rareté de modèles concluant, leur simplicité a incité les chercheurs à améliorer leurs performances en ajoutant des indices ou des paramètres en plus des variables. Par exemple, Wuebben *et al.* (1995) (White, 2002) ont développé un modèle de prévision pour la rivière Missouri, à partir de variables comme le niveau de l'eau, l'épaisseur de la glace et sa résistance au moment de la cassure, ou encore le niveau de l'eau du lac en aval de l'embâcle (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Modèle de Wuebben *et al.*, poids et valeurs seuils (Extrait de White, 2002)

Variable	Lower threshold	Upper threshold	Weight
AFDD _{max} (°C days)	927	1427	2
Q _{max} (m ³ /s)	<708 or >2548	850< and <1982	1
Julian day of AFDD _{max}	150	165	1
Julian day of Q _{max}	155	170	1
Julian day of AFDD _{max} - julian day of Q _{max}	<-8 or >10	-5< and <7	2
Lake Sakakawea stage (metres above mean sea level)	559.3	560.8	1
Total snowfall (cm)	50.8	101.6	2
Timing of snowfall	<12.7 cm after JD 90	>25.4 cm after JD 90 or >12.7 cm after JD 120	1

Dans ce modèle, un poids est assigné à chaque variable. Des poids négatifs (-) sont associés aux valeurs plus petites que la valeur limite inférieure, et des poids positifs (+) sont associés aux valeurs plus grandes que la valeur limite supérieure (Tableau 2.2). Les poids positifs et négatifs sont ensuite additionnés pour chaque variable ($\Sigma+$ et $\Sigma-$, Tableau 2.2), et la probabilité d'occurrence d'embâcle est donnée par le ratio des poids positifs divisés par les poids négatifs ($\Sigma\pm$, Tableau 2.2). Bien que les prévisions de ce modèle se soient révélées concluantes, celui-ci manque néanmoins, tout comme les autres modèles avec valeur critique, d'informations sur les risques d'erreurs.

Tableau 2.2 Modèle de Wuebben *et al.*, détail de calcul (Adapté de Wuebben *et al.*, 1995)

Year	Known jam	FDD (°F-days)	Calculated ice thickness (in.)	FDD _{max} (J.D.)	Q _{max} (J.D.)	Q _{max} -FDD _{max} (days)	Q _b (Kcfs)	Snow- fall (in.)	Snow timing*	Garrison stage (ft)	$\Sigma+$	$\Sigma-$	$\Sigma\pm$
1952	X	2750++†	31	178+	180+	2++	124.0-	25	E-	Low-	6	3	2.0
1960		2000	27	165	174	9	100.0	15--		1798.0-	1	4	0.25
1970		2030	27	182+	160	-22--	26.5	38	L+	1837.0	2	2	1.00
1971		2444	30	177+	166	-11--	58.0+	18--	L+	1842.0+	4	4	1.00
1972	X	2600++	31	160	167	7++	75.0	33		1844.0+	5	0	

2.2.2 Modèles statistiques

Selon White (2002), les modèles statistiques constituent une alternative aux modèles empiriques. Les scientifiques les ont utilisés en cherchant à résoudre les points faibles de ces derniers : le choix arbitraire des variables, la difficulté pour les transférer sur un autre site, une prédiction exagérée des embâcles. On compte trois types de modèles : les régressions linéaires multi-variables, les régressions logistiques, les analyses des fonctions discriminantes.

Ces dernières permettent de déterminer l'appartenance à une classe d'un résultat de sortie, sur la base de plusieurs combinaisons linéaires des données en entrée. Par exemple, Zachrisson (1990) (White, 2002) a considéré deux fonctions discriminantes, donnant sur trois résultats : risque faible, moyen et élevé (Figure 2.7). Il a utilisé les variables suivantes : la variation d'écoulement 5 jours avant la rupture (ΔQ_5), l'index de la température de l'air T_i (dates où l'ATDD atteint 40°C°), les précipitations totales de l'hiver (P_w), et les précipitations du mois d'avril (P_a). Les deux fonctions discriminantes incluent alors toutes deux les quatre variables (équations 2 et 3).

$$X = 0.01 (-527.2 - 0.54\Delta Q_5 + 9.33T_i + 2.93P_w - 5.98 P_a) \quad (2)$$

$$Y = 0.01 (129.34 - 0.35\Delta Q_5 - 9.02T_i + 1.09P_w + 4.20 P_a) \quad (3)$$

Comme le montre la Figure 2.7, les limites non linéaires permettent alors de réduire les taux d'erreur négative et d'erreur positive. Elles peuvent être estimées visuellement, ou bien à partir d'une autre méthode statistique.

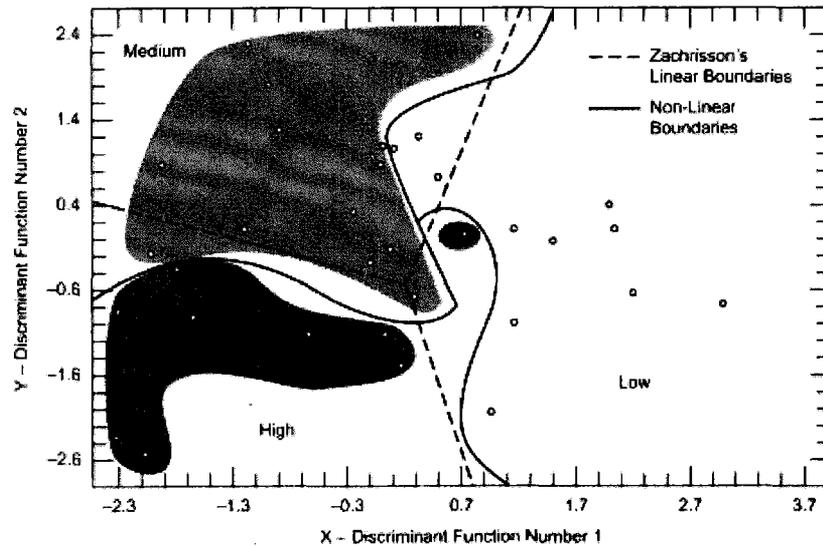


Figure 2.7 Classification des risques en fonction des deux fonctions discriminantes de Zachrisson (1990) (White, 2002)

2.2.3 Modèles utilisant l'intelligence artificielle

Ils sont utilisés pour reproduire les relations entre les données d'entrée et de sortie issues de systèmes non linéaires complexes. L'un d'entre eux, le réseau neuronal, consiste à mettre en place des algorithmes qui déterminent grâce à des rétroactions la relation existant entre les variables d'entrée et de sortie, en cherchant à minimiser les erreurs positives et négatives (Massie *et al.*, 2002) (Figure 2.8). Les réseaux neuronaux peuvent établir des limites non linéaires entre les différents résultats, et sont ainsi capables de surpasser les modèles standards de classifications statistiques.

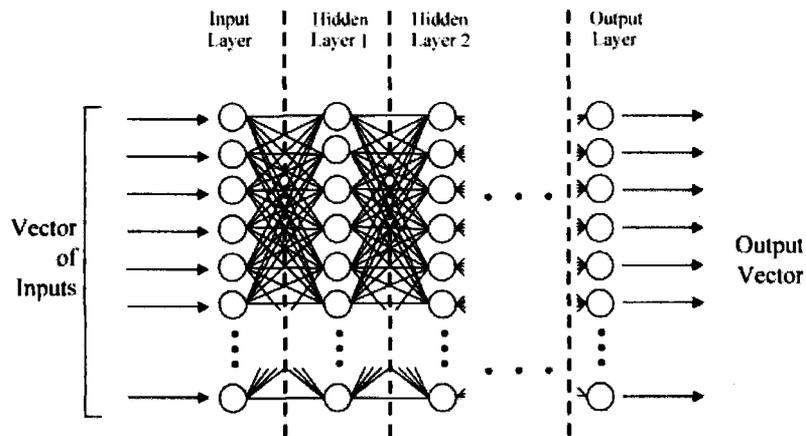


Fig. 2. Generic view of NN layered architecture.

Figure 2.8 Représentation d'un réseau neuronal (Massie et al., 2002)

Cette technique a été utilisée à la confluence des rivières Allegheny et Oil Creek à Oil City, en Pennsylvanie, où une méthode empirique et statistique existait déjà. Le réseau neuronal apporte une amélioration aux autres modèles précédemment appliqués à cet endroit (Tableau 2.3). Nous pouvons y observer que la combinaison de la méthode empirique et statistique réduit le taux d'erreur positive mais augmente considérablement le taux d'erreur négative, rendant la prévision plus précise mais moins exacte. La sélection des variables d'entrée est alors l'étape la plus cruciale, car elle influence par la suite tout le mécanisme. Dans un contexte où les modèles empiriques et statistiques n'apportent pas toujours des réponses satisfaisantes, les modèles basés sur les réseaux neuronaux semblent tenir de grandes promesses de performance.

Tableau 2.3 Comparaison des résultats de prévision pour les différentes approches (White, 2002)

Error type	Empirical	Statistical	Combined empirical and statistical	Neural network
False negative (%)	11.8	8.3	35.3	5.9
False positive (%)	40.0	15.6	18.0	7.4

2.3 Les paramètres morphologiques

2.3.1 État des lieux des paramètres morphologiques

Un certain nombre de paramètres morphologiques ont été identifiés dans la littérature comme ayant un rôle majeur dans le processus de formation et de développement des embâcles. Il n'est pas rare de trouver une combinaison de deux ou plusieurs de ces paramètres intervenant simultanément dans le cas d'un embâcle donné (Environnement Canada, 2011).

- les rétrécissements de la rivière
- les îles
- les ponts
- les méandres
- la confluence de deux rivières
- les diminutions soudaines de la pente de la rivière
- la présence d'une nappe de glace solide
- la présence de bancs de graviers (*river bars*)
- les embouchures

En ce qui concerne les embouchures de fleuves, celles-ci correspondent à des endroits où la plaine est large et l'écoulement lent, ce qui est idéal pour la formation d'embâcles (Saint-Laurent *et al.*, 2001).

Kalinin (2008), a mené une étude sur la prédisposition aux embâcles de la rivière Votkinsk (Russie). Afin d'établir une base de données des sites les plus touchés par les embâcles sur cette rivière, son étude a débuté par l'envoi de questionnaires aux populations locales. Les retours ont permis d'établir des corrélations entre certains paramètres évoqués ci-dessus. Par exemple le Tableau 2.4 présente le nombre total de cas d'embâcles en fonction des classes de sinuosité et de pente. On s'aperçoit alors que la plupart des embâcles appartiennent à l'intervalle de sinuosité [1.0, 2.0].

Tableau 2.4 Occurrence des embâcles avec des sinuosités et des pentes différentes (Adapté de Kalinin, 2008)

Fréquence d'occurrence	Nombre total de cas	Classes des coefficients de sinuosité (et de pentes, %)			
		1.00 - 1.50 (0.00 - 0.50)	1.51 - 2.00 (0.51 - 1.00)	2.01 - 2.50 (1.01 - 1.50)	2.51 - 3.50 (> 1.51)
Annuel	10	4 (5)	5 (4)	1 (1)	- (-)
Régulier	32	18 (15)	11 (8)	3 (5)	- (4)
Rare	73	33 (50)	19 (11)	15 (7)	6 (5)

La suite de l'étude de Kalinin s'intéresse aux conditions locales telles que la présence d'une île, d'un pont, d'une sinuosité élevée (*bending*), d'un méandre (*loop*), d'un affluent, ou encore d'un rétrécissement. La présence simultanée d'au moins deux de ces facteurs est typique des sections où des embâcles se produisent chaque année. Dans la plupart des cas, il y a une addition de trois voire même quatre de ces facteurs. Par exemple, un étroit lit mineur, une île et un méandre sont présents dans respectivement 90, 80 et 70 % des cas répertoriés comme embâcles annuels (Tableau 2.5).

Pour les embâcles réguliers (*often*), la présence de deux facteurs est caractéristique, le nombre d'embâcles associés à un ou trois facteurs diminuant significativement. La majeure partie des cas sont causés par la sinuosité (*bending*), et le rétrécissement. De plus, si l'on considère les parties moyennement sinueuses et les méandres comme un unique et même facteur, leur fréquence cumulée atteint 87.5 % (Kalinin, 2008). Pour les embâcles rares (*rarely*), la présence d'un seul de ces facteurs est typique (82.2 %). Le paramètre principal de la formation de ce type d'embâcle est la présence d'une sinuosité élevée (86.3 %).

Tableau 2.5 Changements de fréquence des embâcles sous l'impact de différents facteurs (Adapté de Kalinin, 2008)

Fréquence d'occurrence	Classes des coefficients de sinuosité (et de pentes, %)					
	Méandre	Courbe	Rétrécissement	île	Confluence	Pont
Annuel	40.0	70.0	90.0	80.0	20.0	30.0
Régulier	37.5	50.0	46.9	31.3	15.6	25.0
Rare	30.1	56.2	5.5	9.6	1.4	13.7

La fréquence de formation des embâcles dépend ainsi de facteurs propres. L'accumulation de trois ou quatre de ces facteurs (principalement rétrécissements, méandres et îles) cause la formation d'embâcles annuels. Analysons maintenant certaines études qui se sont attardées sur chacun des paramètres évoqués dans le Tableau 2.5.

2.3.2 Problématique des rétrécissements

Il convient avant toute chose de s'interroger sur la manière par laquelle la largeur de la rivière est représentée dans un système d'information géographique. Selon la définition que donne le Réseau Hydrographique National, la classe d'entité "Rive" correspond pour un cours d'eau à une "étendue d'eau naturelle par laquelle l'eau peut s'écouler". Nous admettrons ici que la largeur communément employée par la suite correspond au lit mineur de la rivière, soit l'espace occupé par les eaux en cas d'écoulement normal (Figure 2.9).

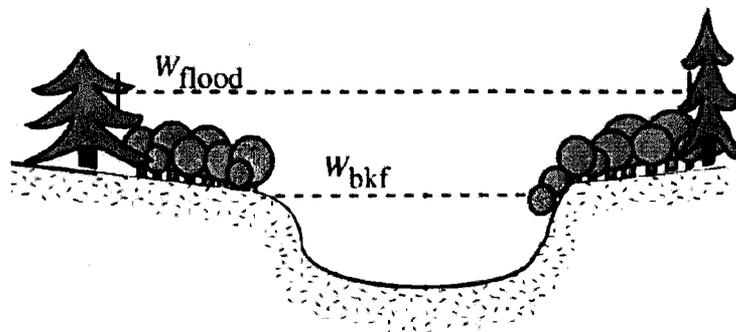


Figure 2.9 Lit majeur (W_{flood}), et lit mineur (W_{bkf}) (Adapté de Boucher *et al.*, 2009)

Le lit majeur correspond quant à lui au talus formé par les inondations morphogènes. Cependant, dans le cas des cours d'eau en proie à des embâcles fréquents, l'estimation du lit majeur est plus difficile, car la hauteur d'eau atteinte lors de chacune des crues glacielles n'est pas obligatoirement la même. De plus des embâcles répétés peuvent causer des modifications de la géométrie des sections transversales des cours d'eau (Boucher *et al.*, 2009).

La congestion proprement dite se produit lorsque le volume de glace en mouvement excède localement la capacité de transport du courant (Beltaos, 1995). Il est alors logique de trouver de façon fréquente des accumulations de glace dans des zones de constriction, soit naturelles soit dues à la présence de glace de bord (Figure 2.10).

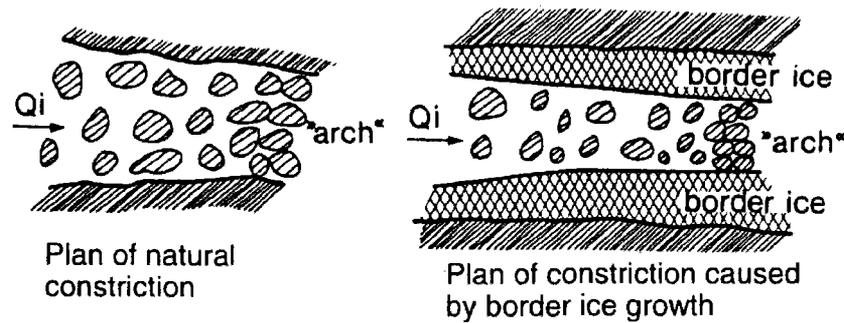


Figure 2.10 Blocage de la glace dû à un rétrécissement, naturel ou du fait de la présence de glace de bord (Extrait de Beltaos, River Ice Jams, 1995)

Selon Zufelt (1988), ces constrictions dépendent également de la taille de la banquise de glace en mouvement. Calkins et Ashton (Zufelt, 1988) ont ainsi étudié les effets du ratio de la taille de la banquise (L) sur la largeur de l'interstice (b) (Figure 2.11), et présenté une condition de formation d'une arche de glace stable (*stable arch*).

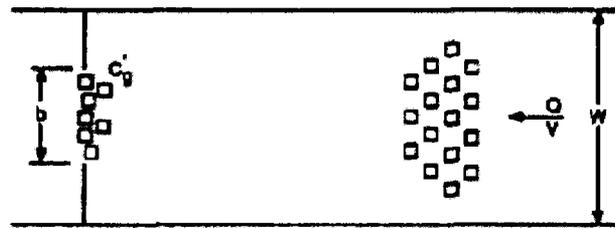


Figure 2.11 Embâcle dans une section droite (Zufelt, 1988)

Un embâcle dans une rivière large a plus de chance de s'effondrer qu'un embâcle dans une rivière étroite, ce qui explique les termes *wide-channel jam* et *narrow-channel jam*. Ces termes ont été introduits par Pariset *et al.* (1966) (Beltaos, 1995) pour décrire les embâcles formés par un effondrement interne ou par un processus hydraulique sur la couverture de glace. Cette distinction ne dépend pas de la largeur du chenal, mais implique d'autres paramètres. Beltaos a mis en évidence que les embâcles par cassure sont des *wide-channel jams*. On remarque que plus la rivière est large et pentue, plus l'embâcle devra être épais pour assurer sa stabilité, et ainsi plus l'augmentation du niveau d'eau sera importante (Beltaos, 1995).

2.3.3 Problématique des îles

La présence d'îles dans le chenal entraîne généralement un rétrécissement du chenal principal (Banshchikova, 2008) ainsi qu'une réduction de la pente, ce qui contraint la glace en mouvement à ralentir et à se bloquer (USACE, 1994).

À ce sujet Jasek (1995) a recherché l'influence que pouvait avoir la longueur d'une île sur la taille d'un embâcle. Celui-ci a exécuté des simulations d'embâcles dans des canaux rectangulaires comprenant des îles de différentes longueurs et de profils en long différents. Jasek (1995) a alors introduit la longueur relative de l'île (équation 4). Cette équation étant sans dimension, elle peut être appliquée à des canaux ayant une pente, une largeur, un écoulement et des longueurs d'îles différents.

$$R = L_{is} / B \quad (4)$$

où L_{is} : longueur de l'île (m)
 B : largeur du chenal (m)

Le but de son étude a ensuite été de modéliser l'épaisseur des embâcles au niveau des îles pour des géométries de chenal différentes et des débits différents, dans le but de généraliser ces simulations afin de leur donner un sens indépendamment de leur dimension. La simulation a montré la partie la plus fine de l'embâcle se situait en aval de l'île et la partie la plus épaisse en amont. Il peut être également noté que la profondeur minimum de l'eau sous la glace se situe en amont de l'île, ce qui augmente le risque d'embâcle.

2.3.4 Problématique des ponts

Les obstacles gênant la progression naturelle de la glace peuvent engendrer des embâcles. C'est notamment le cas des ponts ayant des piliers assez rapprochés, ou, pour des plus petites rivières, des arbres déposés le long des rives se mettant en travers de la rivière (USACE, 1994). De la même manière, un pont partiellement submergé par l'eau dans un cas de crue extrême peut agir comme un barrage pour la glace en mouvement et complètement obstruer son écoulement.

Urroz *et al.* (1994) ont trouvé que le paramètre b/B était représentatif de l'impact d'un pont sur l'écoulement de l'eau (b étant la distance entre deux piliers du pont, et B la largeur de la rivière). Plus b/B est grand, moins la réduction d'écoulement sera importante. Une étude de Beltaos (2006) a rejoint cette idée, indiquant que le nombre de piliers devait être optimisé au minimum. Bien que la présence d'un pont réduise dans tous les cas la capacité de transport de glace de la rivière, l'emplacement de ce pont peut avoir des répercussions différentes. En effet, l'étude d'Urroz *et al.* (1994) a prouvé qu'un pont placé au sommet d'un méandre réduit au minimum le transport de la glace. En revanche un pont placé à mi-distance entre deux méandres consécutifs réduit de près de la moitié le transport de la glace (entre 40 et 50%) (Figure 2.12). La position d'un pont doit donc être liée à sa sinuosité si l'on désire évaluer son impact sur l'écoulement et la retenue des glaces.

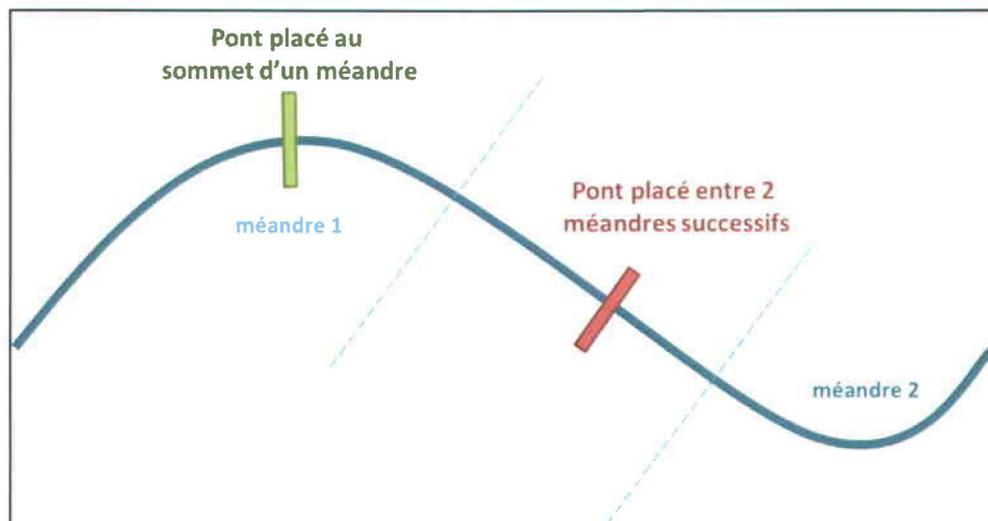


Figure 2.12 Illustration de la problématique de l'emplacement d'un pont. Un pont placé au sommet d'un méandre possède moins d'impact sur le transport de la glace qu'un pont placé entre deux méandres successifs

Dans certains cas des mesures préventives sont prises, en utilisant les piliers d'un pont comme briseurs de la glace en mouvement (Figure 2.13). Cependant nous pouvons penser que leur influence reste limitée à un couvert de glace peu épais.

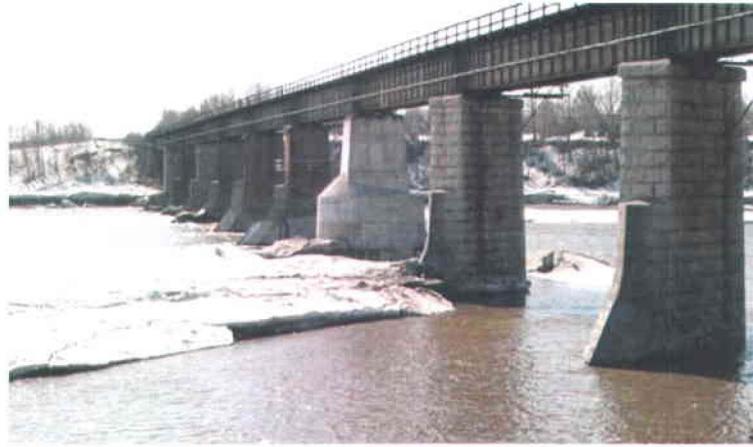


Figure 2.13 Aménagement de la structure des piliers d'un pont pour abimer le couvert de glace (Source : MSP)

Enfin, il est bien évident qu'il faut éviter au maximum de placer un pont sur un site naturellement favorable à la formation d'un embâcle (Beltaos, 2006).

2.3.5 Problématique de la sinuosité

Les courbures dans les rivières sont connues pour être des endroits favorables à la création et au développement d'embâcles. Ces parties sinueuses contribuent aux embâcles en forçant la glace en mouvement à se déplacer en direction de la rive concave (USACE, 1994). En effet les courbures sont caractérisées par des sections transversales non uniformes comprenant des champs de vitesse affectés par l'accélération centrifuge. Ce sont ces variations qui influent sur le développement d'embâcles (Zufelt, 1988).

a. Coefficients de sinuosité et de tortuosité

Le coefficient de sinuosité, souvent nommé K_s , est défini comme la longueur curviligne entre deux points d'inflexion divisée par la distance euclidienne entre ces deux mêmes points (Figure 2.14). Lorsque ces deux distances sont égales, cela signifie qu'il n'y a aucune sinuosité, et le ratio est donc égal à 1. Selon cette formule théorique la sinuosité peut donc tendre vers l'infini, mais en réalité elle n'excède que rarement 2 (Dutton, 1999). Selon Brice (1964), on considère qu'un chenal forme des méandres lorsque le coefficient de sinuosité excède 1.5.

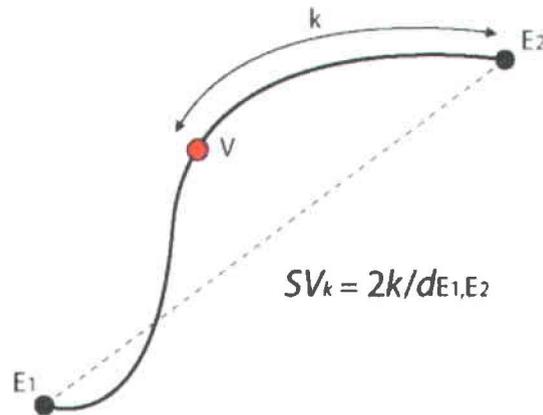


Figure 2.14 Illustration du coefficient de sinuosité (Interface de l'outil Curvature and Sinuosity, onglet aide de Frazil) (Gauthier *et al.*, 2008)

Lorsque deux courbes consécutives sont dirigées en sens opposés, on appelle le point d'inflexion le point qui les sépare (Figure 2.15). Le point de surflexion désigne lui un point qui sépare deux courbes dirigées dans le même sens.

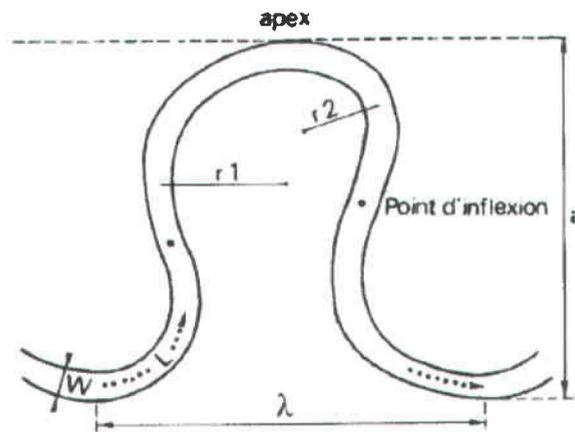


Figure 2.15 Point d'inflexion dans un méandre (Bravard et Petit, 2000)

Dans ce cadre, Dutton a mené en 1999 une étude sur le coefficient de sinuosité (noté SV). Celui-ci a alors utilisé quatre formules différentes pour ramener les valeurs de SV à un intervalle standardisé compris entre zéro et 1. La quatrième formule de Dutton (équation 5) correspond à la formule utilisée par FRAZIL (cf. 3.3.3) (Gauthier *et al.*, 2008).

$$\text{Sinuosity}_4 = \sqrt{1 - \frac{1}{SV^2}} \quad (5)$$

Dutton a alors établi trois catégories de sinuosités standardisées :

1. Sinuosité faible : valeurs comprises entre 0 et 0.34.
2. Sinuosité moyenne : entre 0.34 et 0.66.
3. Sinuosité forte : valeurs de 0.66 à 1.

Aucune justification théorique ne peut être donnée, mais l'équation 5 est la plus représentative des petites sinuosités (Dutton, 1999).

On distingue actuellement les mesures de sinuosité des mesures de tortuosité. La tortuosité peut être définie par le rapport entre la longueur curviligne du chemin réel d'écoulement et la distance linéaire entre les deux points extrêmes du tracé (Comporeale *et al.*, 2005).

b. Influence du couvert de glace

L'US Army Corps of Engineers (USACE, 2002) s'est intéressé à l'influence que pouvait avoir un couvert de glace sur l'écoulement dans un chenal. Par exemple, un chenal rectangulaire, plus large que profond, verra son rayon hydraulique être divisé de moitié en présence d'un couvert de glace. Cette observation provient du fait que le rayon hydraulique s'exprime différemment en présence d'un couvert de glace (équation 6).

$$R_i = \frac{A_i}{P_b + B_i} \quad (6)$$

où A_i : la surface mouillée sous le couvert de glace.

P_b : le périmètre mouillé associé au fond et aux berges de la rivière.

B_i : la largeur de la partie inférieure du couvert de glace.

En supposant que l'écoulement demeure constant, la présence d'un couvert de glace ayant une rugosité égale à celle du lit de la rivière réduit de 37% la capacité de transport de celle-ci (USACE, 2002).

Selon Zufelt (1988), les caractéristiques de l'écoulement à travers une courbe influencent le transport de la glace et contribuent ainsi au processus d'embâcle. Cependant, la vitesse d'écoulement du courant principal est loin d'être uniforme dans un méandre (Figure 2.16). Celle-ci diminue graduellement en entrant dans le méandre, se stabilise à proximité de la partie la plus profonde (entre 51 et 65°), et ré-accélère ensuite rapidement de 105 à 134°, où la profondeur diminue elle-aussi sensiblement.

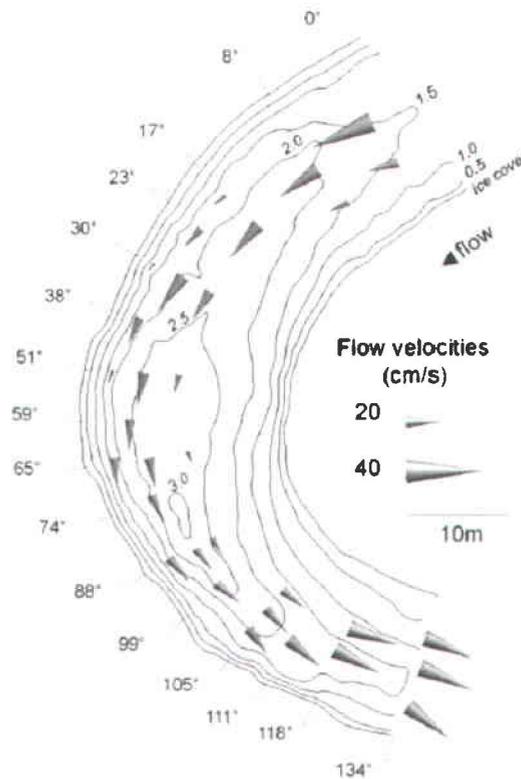


Figure 2.16 Evolution de la vitesse d'écoulement moyenne dans un méandre et profondeur sous le couvert de glace (en mètres) (Demers *et al.*, 2010)

La structure des écoulements dans une boucle de méandre favorise la formation de courants secondaires puissants qui tendent à avoir une structure hélicoïdale (Demers *et al.*, 2011). Celle-ci fait ressortir des directions divergentes des écoulements.

Ainsi, les vitesses rapides, qui affectent les glaces, sont dirigées vers la rive concave, tandis que les vitesses plus lentes à proximité du lit de la rivière, qui affectent les sédiments, sont orientées vers la rive convexe (Demers *et al.*, 2011). La concentration de glace flottante est alors plus importante près de la rive concave (Zufelt, 1988).

Les écoulements en présence d'un couvert de glace diffèrent grandement des écoulements des conditions dites "ouvertes" décrites précédemment, où l'eau est en contact direct avec l'air (Demers *et al.*, 2011). La distribution verticale des vitesses sous un couvert de glace est en fait une parabole. Les vitesses les plus élevées se retrouvent à mi-profondeur et sont dirigées vers la rive concave. Les directions d'écoulement en direction de la rive convexe se produisent près des extrémités de la colonne d'eau, que forment le lit du cours d'eau et la couche de glace solide (Figure 2.17). C'est pour cette raison que l'on assiste à une accumulation des sédiments et de la glace dans cette zone (Demers *et al.*, 2011). La partie la plus épaisse de l'embâcle se situe ainsi au niveau de la rive convexe (Urroz, 1994).

La partie convexe d'un méandre est formée de deux types de dépôts : les alluvions transportées par charriage (galets ou sable) qui se trouvent à la base, et par-dessus, des sédiments fins transportés en suspension. L'apex, partie externe de la convexité, progresse par accrétion de la charge de fond.



Figure 2.17 Vitesse longitudinale (en coloré), et courants secondaires (vecteurs) au sommet du méandre (Adapté de Demers *et al.*, 2010)

Les particules de frasil qui peuvent s'accumuler dans un méandre modifient la structure de l'écoulement du fait de leur rugosité poreuse (Demers *et al.*, 2011, source originale Sui *et al.*, 2008). Dans l'étude menée par Demers *et al.*, la glace de frasil était principalement confinée proche de la rive convexe ou du thalweg (Figure 2.18).



Figure 2.18 Accumulation de glace de frazil au sommet du méandre (Adapté de Demers *et al.*, 2010)

c. *Évolution longitudinale de la sinuosité*

Les formes et les styles fluviaux ont des origines complexes souvent associées à l'héritage géologique et climatique. Selon Bravard et Petit (2000), les formes en plan des méandres d'une rivière sont fortement influencées par la présence de berges constituées de sédiments cohésifs (sédiments de faible diamètre peu sensibles à l'érosion). En géomorphologie fluviale, on distingue d'abord les parties des cours d'eau selon leurs fonctions respectives. On retrouve ainsi la zone fonctionnelle d'érosion en amont du cours d'eau, la zone fonctionnelle de transport dans la partie médiane et finalement la zone fonctionnelle de sédimentation dans la partie aval (Figure 2.19) (Bourdon *et al.*, 2008).

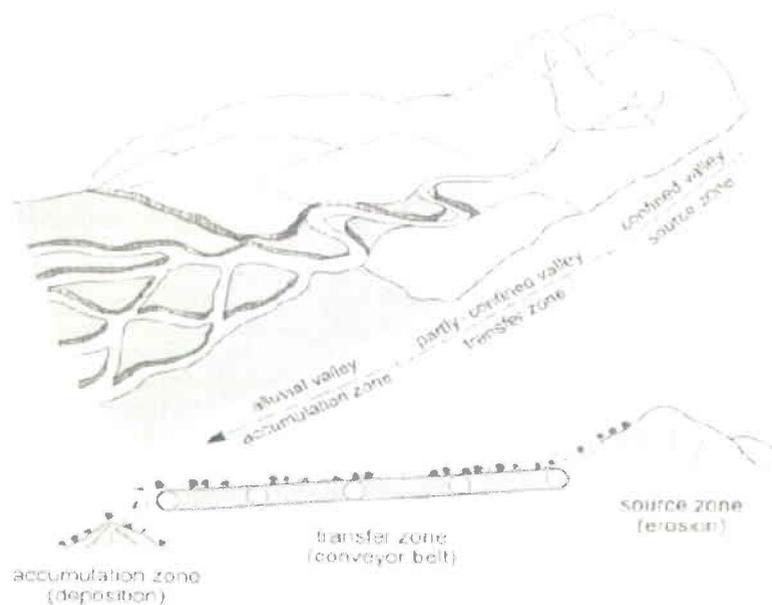


Figure 2.19 Zones fonctionnelles des cours d'eau (Bourdon *et al.*, 2008, source originale Brierley et Fryirs, 2005)

Les processus hydrodynamiques liés à ces zones vont amener à former trois genres de section de rivière. Les rivières à contrôle lithologique coulent essentiellement sur le substratum rocheux, les rivières semi-alluviales coulent en partie sur la roche et en partie sur leurs dépôts et les rivières alluviales coulent dans leurs propres dépôts (Bourdon *et al.*, 2008).

De manière générale, on observe souvent les styles de rivière en cascade (A) et seuil-mouille (B) dans les parties amont. Les zones de transfert de sédiments sont plutôt associées au style divagant (C) et à méandre (E) (tronçons semi-alluviaux et alluviaux). Les zones de sédimentation présentent des styles en tresse (D) ou anastomosés (DA). Enfin, les gorges et les canyons (F, G) peuvent présenter des styles seuil-mouille si le lit est semi-alluvial ou des rapides rocheux dans le cas de rivières à lit rocheux. Les gorges se situent dans des zones fonctionnelles d'érosion et/ou de transport (Figure 2.20) (Bourdon *et al.*, 2008).

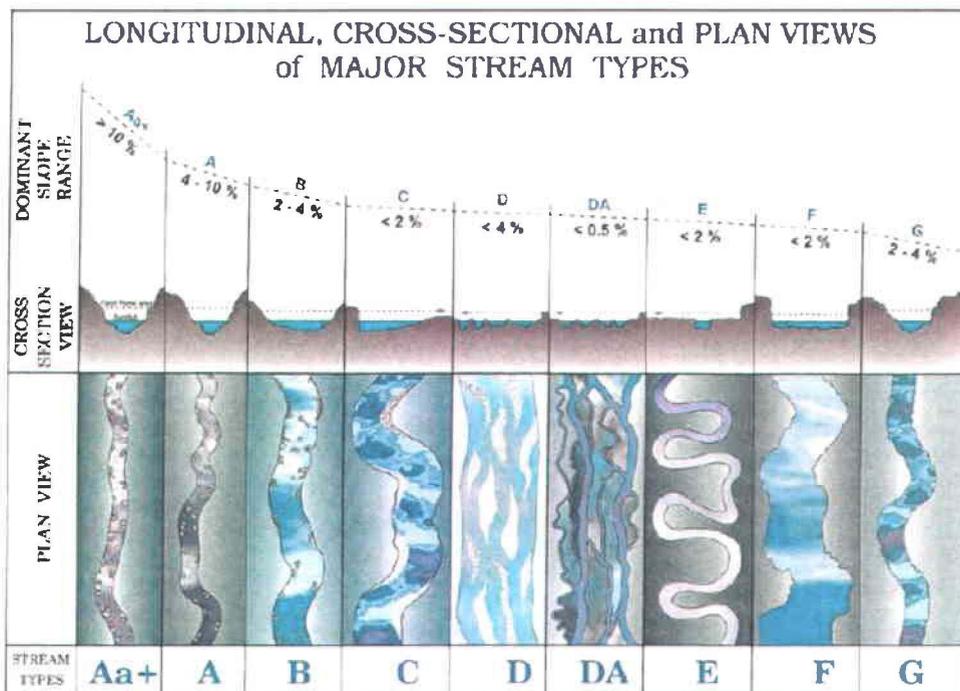


Figure 2.20 Définition des styles de cours d'eau (Bourdon *et al.*, 2008, source originale Rosgen, 1995)

Les mouilles correspondent à des zones plus profondes, généralement situées dans la boucle du méandre, tandis que les seuils correspondent au minimum de profondeur, et sont localisés aux points d'inflexions (Bravard et Petit, 2000) (Figure 2.21).

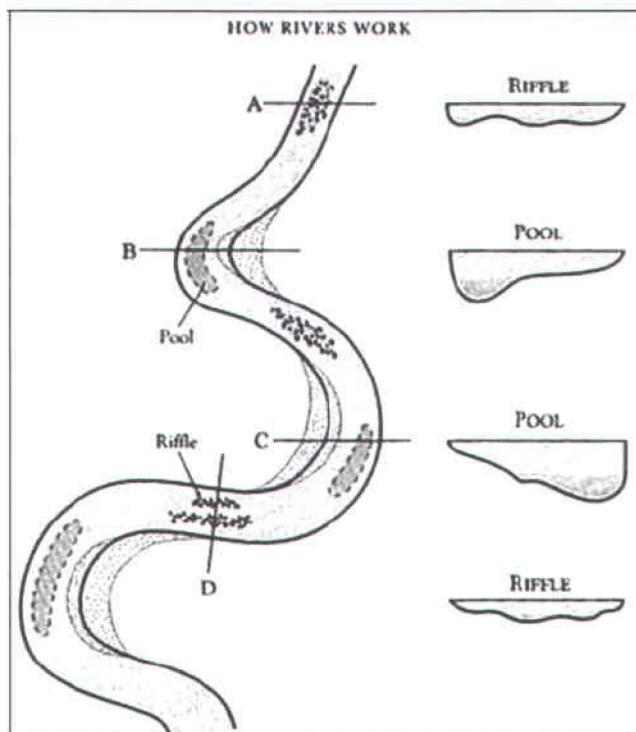


Figure 2.21 Alternance de seuils (riffles) et de mouilles (pools) (Mount, 1995)

2.3.6 Problématique des affluents

Les embâcles se forment également de façon fréquente aux endroits où un tributaire se jette dans une rivière relativement large (USACE, 1994). Les rivières étroites réagissent normalement plus rapidement à une augmentation des précipitations que les rivières plus larges, ce qui entraîne une augmentation plus rapide du niveau de l'eau et ainsi une rupture prématurée du couvert de glace. Le couvert de glace se déplace ainsi en aval jusqu'à rencontrer un couvert de glace intact et solide d'une rivière plus large, où la pente est généralement plus douce (USACE, 1994). La glace brisée du tributaire se bloque alors au point de confluence avec la rivière principale, formant un embâcle qui fait remonter le niveau de l'eau et de la glace fractionnée en amont (USACE, 1994).

L'importance de l'embâcle que l'on peut retrouver dans la rivière principale dépend donc a priori de la largeur du tributaire, mais aussi de sa réactivité à une augmentation rapide des précipitations.

Or, ce dernier point complexifie quelque peu la problématique des affluents, puisqu'elle nous amène à nous intéresser à leurs sous-bassins versants correspondants. Saint-Laurent *et al.* (2001) se sont intéressés à cette problématique, en développant l'indice d'Horton (équation 7).

$$Rf = \frac{A}{Lm^2} \quad (7)$$

où A : la surface totale du bassin (en km²)

Lm : la distance entre l'exutoire et le point le plus éloigné du bassin le long de la rivière principale (en km)

Ce ratio permet, à travers une approche géométrique, de déterminer le temps de réponse du bassin versant après un pic de précipitations. Autrement dit, celui-ci représente le temps que prend une goutte d'eau à s'écouler à travers tout le système de drainage. Selon Saint-Laurent *et al.* (2001), les bassins versants peuvent prendre les deux formes géométriques suivantes (Figure 2.22) :

A - circulaire, réagissant rapidement aux pluies orageuses, l'eau ayant une distance relativement courte à parcourir.

B - elliptique, avec une plus grande zone d'écoulement et donc un temps de drainage relativement long.

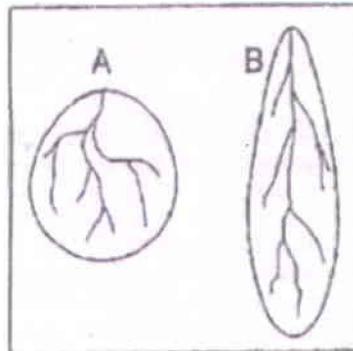


Figure 2.22 Différentes formes de bassins versants (Adapté de Saint-Laurent *et al.*, 2001)

La densité du chevelu, qui caractérise le chevelu hydrographique, influence également l'hydrogramme observé à l'exutoire du bassin. Une grande densité de drainage peut augmenter le risque d'inondation à cause du volume d'eau important provenant des affluents du cours d'eau principal. Il existe alors une relation directe entre ramification et inondation.

En revanche, pour de grands bassins, la présence de nombreux lacs ou étangs produisent un effet tampon qui réduit l'intensité de l'écoulement.

2.3.7 Problématique des changements de pente

Une variation d'une pente relativement raide vers une pente douce correspond typiquement à un endroit propice à la formation d'embâcle. En effet du fait de la force de gravité, un bloc de glace entraîné par le courant perd obligatoirement de son élan lorsqu'il atteint une zone moins pentue, pouvant ainsi s'y bloquer et initier un embâcle (USACE, 1994).

La pente de la rivière possède un effet direct sur le type de sédiment que l'on retrouve dans son lit. Bergeron *et al.* (2011) ont à ce propos établi une segmentation de la rivière reliant pente et composition sédimentaire. Les lits des rivières peuvent être décomposés en un nombre fini de segments de composition identique, chaque segment étant séparé de l'autre par un nœud et un apport important en sédiments associé à une réduction de la pente de la rivière (Figure 2.23).

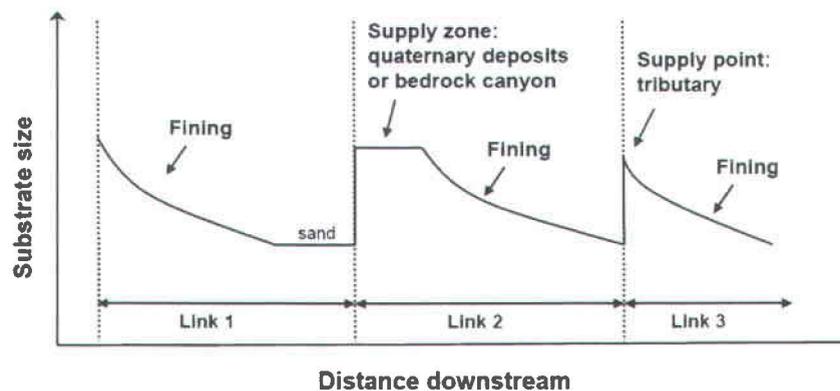


Figure 2.23 Représentation schématique des séquences de lissage des grains le long des sections sédimentaires (Bergeron *et al.*, 2011)

L'apport en sédiments peut être caractérisé par un affluent, un glissement de terrain, ou bien par une zone de réserve sédimentaire provenant d'un canyon rocheux par exemple. Bergeron *et al.* (2011) ont alors établi la classification suivante :

Lit composé de rochers : pente raide, faible valeur d'immersion (profondeur du torrent/taille des rochers <1), forte vitesse, écoulement turbulent avec rapides (partie amont).

Lit composé de petits gravillons : séquences successives de sections peu profondes et rapides sur fond de matériaux rugueux avec d'autres plus profondes et plus lentes, présence de bancs de graviers situés de chaque côté d'un thalweg sinueux. Les bancs de graviers sont évoqués de manière similaire par Banskchikova (2008). La présence de dépôts de gravillons indique habituellement que la capacité de transport de la rivière est réduite pour glace mais aussi pour les sédiments (USACE, 1994).

Lit composé de grains de sable : chenal méandreux, écoulement lent (partie aval).

Bergeron *et al.* (2011) ont ensuite observé que la probabilité d'embâcle va être dépendante de son positionnement le long du lien sédimentaire (et donc de sa pente), et que cette fonction d'occurrence va se répéter de manière périodique le long d'une rivière dans son ensemble (Figure 2.24).

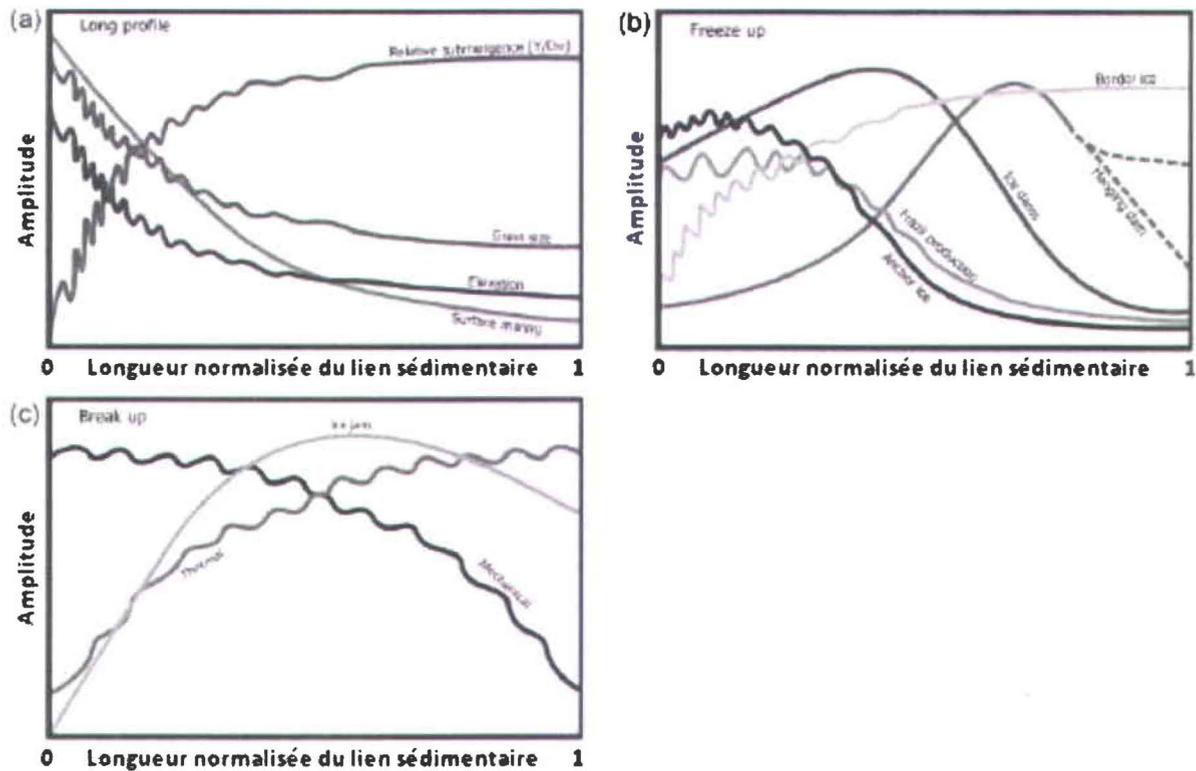


Figure 2.24 Fonctions périodiques le long des liens sédimentaires (Adapté de Bergeron *et al.*, 2011)

Rice (1998) met en évidence que l'espacement entre les tributaires apportant des sédiments peut être une aide pour trouver les liens sédimentaires. En effet la disposition des tributaires le long du cours d'eau principal n'est pas aléatoire. Les affluents principaux tendent de ce fait à être séparés les uns des autres par des distances importantes et un grand nombre de petits tributaires. Cela signifie qu'un tributaire majeur ne peut pas rejoindre le chenal principal trop proche d'un autre tributaire ayant une importance similaire, du moins du même côté du bassin versant. Ces considérations découlent d'un simple corollaire des besoins spatiaux nécessaires au développement d'un sous bassin versant.

3. MÉTHODOLOGIE

Nous avons cherché dans la partie précédente à faire ressortir toute la complexité que représente l'identification des zones prédisposées aux embâcles par cassure. Il serait en effet très complexe de mettre en place un modèle qui prendrait en compte toutes les variables impliquées dans leur formation. Dans cette étude, nous nous sommes limités à étudier la phase d'agglomération de la glace, à savoir les endroits où la glace en mouvement est plus susceptible de s'agglomérer.

Ce chapitre présente l'approche méthodologique retenue, ainsi que les sites d'études sur lesquels le modèle a été testé. Il définit ensuite les outils SIG utilisés, puis l'ensemble des données disponibles, utilisées pour la calibration et l'évaluation du modèle.

3.1 Approche méthodologique retenue

Nous avons répertorié dans le chapitre précédent un certain nombre de travaux de recherche liés ou jugés utiles à la compréhension des embâcles de glace et plus spécifiquement, du lieu où ils sont plus enclins à se former. Si certains paramètres morphologiques ayant un impact sur leur formation se distinguent nettement, leur implication dans un modèle général reste encore très floue, et difficile à déterminer. Premièrement, du fait de la base de données trop restreinte dont nous disposons, nous n'avons pas pu nous tourner vers un modèle de type statistique. Deuxièmement nous avons également écarté l'hypothèse d'un modèle physique qui se serait reposé sur les forces d'écoulement et de résistance mises en jeu lors du déplacement de la glace. En effet, des variables comme l'épaisseur de glace ou la profondeur de l'eau sont nécessaires pour la compréhension de ces forces, mais demeurent difficilement mesurables.

Finalement, en suivant les recommandations de Beltaos (2007) - pour qui le développement d'un critère général de risque réduisant au minimum les données spécifiques au site d'étude améliorerait grandement les procédures de prévision - nous avons choisi de développer un modèle conceptuel basé sur certaines caractéristiques morphologiques du chenal. Ce modèle aura pour but de détecter les sites les plus favorables à la formation d'embâcles par cassure. Pour chacun de ces paramètres, notamment mis en valeur par Kalinin (2008), nous détaillerons et justifierons les poids que nous leur accorderons.

En privilégiant cette méthode, nous nous sommes affranchis de certaines difficultés, notamment celles liées à la bathymétrie, aux mesures de débit ou à l'épaisseur du couvert de glace. Cela a de toute évidence induit une perte de précision, que nous avons essayé de quantifier. Cette approche s'inscrit dans un cadre nouveau, puisque nous y avons éliminé les données spécifiques au site d'étude. Les données que nous avons utilisées sont a priori faciles à se procurer, car habituellement publiques et gratuites. Ce modèle a de ce fait pour but de donner la prédisposition aux embâcles de n'importe quelle rivière en proie avec ce genre de problématique. Ainsi le chapitre 3 se consacre à montrer de quelle manière, à partir des considérations littéraires du chapitre 2, nous avons choisi puis extrait tous les éléments nécessaires à la modélisation proprement dite, laquelle est discutée au chapitre 4.

3.2 Sites d'étude

Nous avons choisi comme sites d'étude trois rivières qui se jettent directement dans le fleuve Saint-Laurent.

La première, la rivière Chaudière, longue de 185 kilomètres, prend sa source dans le lac Mégantic, dans le sud-ouest du Québec, et coule en direction du nord pour rejoindre le fleuve Saint-Laurent au niveau de Lévis, sur la rive sud de Québec (Figure 3.4). La Chaudière traverse la région de la Beauce dans toute sa longueur. La rivière draine un bassin versant de 6682 kilomètres carrés, en majorité dans la région des Appalaches, puis dans les basses-terres du Saint-Laurent. Elle traverse plusieurs villes dont les principales sont de l'amont vers l'aval Saint-Georges (30 000 habitants), Beauceville (6 500 habitants), Saint-Joseph-de-Beauce (4 500 habitants), et Sainte-Marie (12 000 habitants), pour un total de 180 000 habitants répartis sur l'ensemble du bassin versant (Figure 3.4).



Figure 3.1 Embâcle sur la rivière Chaudière, Lévis, 2009 (Source : MSP)

La seconde, la rivière Saint-François, longue de 210 kilomètres, draine un bassin versant de 10230 km². Elle prend sa source dans le Lac Saint-François, et s'écoule du nord vers le sud jusqu'à Lennoxville, au sud de Sherbrooke (150 000 habitants), puis reprend la direction du nord, en passant par Drummondville (72 000 habitants), pour finir sa course dans le fleuve Saint-Laurent au niveau du Lac Saint-Pierre. La géologie des terres traversées est sensiblement la même que celle de la rivière Chaudière.



Figure 3.2 Embâcle sur la rivière Coaticook, Dixville, 2010 (Source : MSP)

Enfin, la rivière l'Assomption draine un bassin versant plus modeste de 4220 km², et s'étend également sur 200 km. Elle prend sa source dans les Laurentides, avant de s'écouler dans la direction nord-sud et se jeter dans le fleuve Saint-Laurent au nord-est de Montréal (Figure 3.4). Elle est notablement plus sinueuse que les deux autres rivières. Elle passe notamment par Joliette (20 000 habitants), les parties les plus urbanisées se situant principalement sur la partie méridionale du bassin versant.



Figure 3.3 Embâcle sur la rivière du Loup, Saint-Côme-Linière, 2012 (Source : MSP)

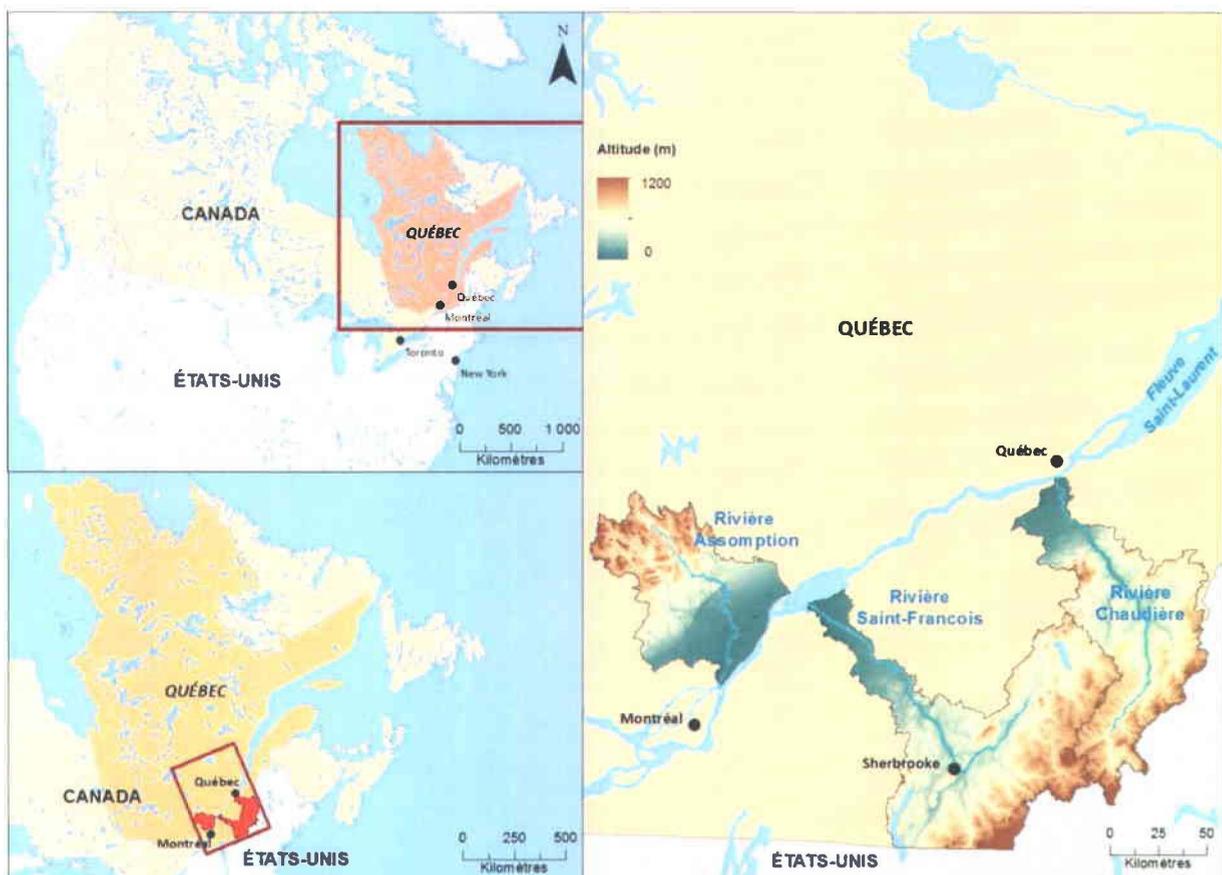


Figure 3.4 Bassin versant des rivières Chaudière, Saint-François et l'Assomption, plans de situation à l'échelle continentale, provinciale et locale

Nous avons regroupé les caractéristiques morphologiques des trois rivières à l'étude dans le tableau suivant (Tableau 3.1).

Tableau 3.1 Récapitulatif des caractéristiques morphologiques des trois rivières à l'étude : Chaudière, Saint-François et l'Assomption (¹Superficie totale, ²Superficie dans la partie québécoise uniquement)

Rivière	Longueur (km)	Surface drainée (km ²)	Dénivelée (m)	Pente moyenne (%)	Superficie forêt (%)	Superficie agricole (%)
Chaudière	185	6682	358	0.00194	70	23
Saint-François	210	10228 ¹ / 8701 ²	263	0.00132	66	23
L'Assomption	200	4220	290	0.00145	68	18

Nous avons également dressé un tableau comparatif des données hydroclimatiques, hydrologiques et morphologiques de base (Tableau 3.2). Il y apparaît que si les trois rivières ont des précipitations et des températures annuelles moyennes sensiblement similaires, les débits des rivières Chaudière et Saint-François sont bien plus conséquents que celui de la rivière l'Assomption (dix à vingt fois supérieurs). Les débits spécifiques, qui correspondent aux débits des rivières divisés par la superficie de leurs bassins versants respectifs, laissent apparaître des réponses similaires concernant les bassins versants des rivières Chaudière et l'Assomption (environ égaux à 0.02).

Tableau 3.2 Données hydroclimatiques, hydrologiques et morphologiques des trois rivières à l'étude

Rivière	Données hydroclimatiques		Données hydrologiques	Données morphologiques
	Précipitations annuelles moyennes (mm)	Températures annuelles moyennes (°C)	Débit annuel moyen (m ³ /s) / Débit spécifique (m/s)	Segmentation fluviale
Chaudière	1000 à 1300	2.5 à 5	115 / 0.017	Haute, Moyenne, Basse
Saint-François	1000 à 1150	3 à 6	192 / 0.019	Basses terres du Saint-Laurent, Appalaches
L'Assomption	1000 à 1100	0 à 5	10 / 0.0024	Plaine du Saint-Laurent, Piémont, Plateau laurentien

D'une manière générale, les rivières peuvent être segmentées en tronçons caractéristiques de la forme de la vallée, de la déclivité des versants, de la déclivité de l'axe d'écoulement, de la sinuosité, etc... (Bourdon *et al.*, 2008). De ce fait, la rivière Chaudière peut être divisée en trois tronçons : haute, moyenne et basse (Tableau 3.2, Figure 3.5) (Thibault, 2008). La rivière l'Assomption peut également être sectionnée en trois secteurs : la plaine du Saint-Laurent, le piémont et le plateau laurentien (Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2007). Cette segmentation reprend le concept des zones fonctionnelles présentées à la Figure 2.19 (cf. 2.3.5.c). Quant à la rivière Saint-François, sa segmentation suit le contour des zones géologiques (Figure 3.6) (Saint-Laurent *et al.*, 2001).

qui ne s'est terminée qu'il y a à peine 6000 ans (Université Laval, 2010), a déposé une couche de till (moraine de fond) dans lequel les rivières Chaudière et Saint-François ont fait leur lit et ont déposé des alluvions.

Les roches des Basses Terres du Saint-Laurent sont peu déformées et sont âgées de 100 à 500 millions d'années. Elles sont principalement d'origine sédimentaire. Les Basses Terres ont été recouvertes de dépôts argileux que la mer de Champlain a laissés derrière elle en se retirant à la fin de la dernière glaciation. (Université McGill, 1999).

Quant à la Province de Grenville, elle comprend les roches les plus vieilles de la Province de Québec. Celles-ci représentent les racines profondes d'une chaîne de montagnes aujourd'hui rasée par l'érosion, qui s'est formée entre 1 500 et 900 millions d'années (Ressources Naturelles Canada, 2008). La Province de Grenville une subdivision du Bouclier canadien, celui-ci formant le noyau du continent et couvrant environ la moitié du Canada (Ressources Naturelles Canada, 2009). Les roches du bouclier Canadien sont principalement d'origine ignée et métamorphique. La dernière glaciation y a aussi déposé une mince couche de till (moraine de fond) dans lequel la partie amont de la rivière l'Assomption a fait son lit avant de couler dans les argiles des Basses Terres.



Figure 3.6 Régions géologiques des bassins versants des rivières Chaudière, Saint-François et l'Assomption.

Le choix de ces trois rivières pour tester le modèle géospatial de prédisposition aux embâcles s'explique par leurs morphologies, représentatives de cours d'eau à embâcles réguliers. On y recense en effet de nombreux embâcles chaque année (Figure 3.1, Figure 3.2, Figure 3.3). Pour ces raisons le modèle pourra facilement s'exporter sur d'autres sites une fois le modèle validé. De plus, ces rivières sont particulièrement suivies par le Ministère de la Sécurité Publique à l'aide d'images du satellite canadien RADARSAT-2, opérations auxquelles coopère déjà l'INRS par l'élaboration de cartes de glace, notamment pour la rivière Chaudière (Gauthier et Bernier, 2010). Nous reviendrons plus tard sur la partie calibration et sur le partenariat avec le Ministère de la Sécurité Publique.

3.3 L'outil SIG du système FRAZIL

Les outils SIG du système FRAZIL nous ont permis de spatialiser les différents paramètres morphologiques considérés dans cette étude. L'interface de FRAZIL (Gauthier *et al.*, 2008) est directement intégrée dans la barre de menu principale à l'ouverture d'ArcGIS (Figure 3.7).



Figure 3.7 Illustration de FRAZIL sous l'environnement ArcGIS

Les outils dont nous nous sommes servis ont permis :

- de déterminer l'axe longitudinal du chenal (Outil *Centerline*)
- de segmenter la rivière et de calculer la largeur pour chaque tronçon (Outil *Reaches*)
- de calculer le rayon de courbure et la sinuosité le long de l'axe d'écoulement (Outil *Curvature and Sinuosity*)

3.3.1 L'outil *Centerline*

L'outil *Centerline* permet de générer la ligne médiane d'un cours d'eau à partir d'un fichier d'entrée de type polygone. Cela constitue la première et la plus importante étape du processus. Idéalement, l'axe longitudinal doit suivre le thalweg du chenal, à l'endroit où l'énergie de l'eau est maximale. Comme cette information nécessiterait la disponibilité d'une bathymétrie complète, la ligne médiane représente une alternative utilisée dans les modèles hydrodynamiques (Hicks, 1996). La Figure 3.8 ci-dessous présente de façon schématique le principe de cet outil.

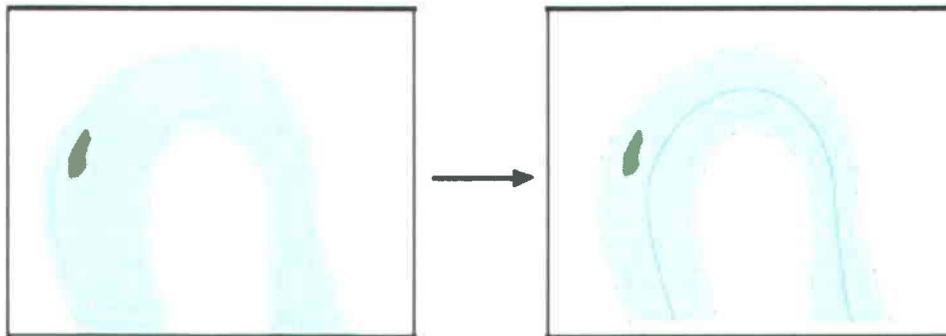


Figure 3.8 Principe d'extraction de la ligne médiane de l'outil *Centerline* de Frazil (Adapté de Gauthier et al., 2008)

La représentation de la rivière par sa ligne médiane est nécessaire afin de découper le polygone de la rivière en tronçon de longueur constante pour finalement en mesurer la largeur. Le second outil, *Reaches*, réalise ces deux opérations.

3.3.2 L'outil *Reaches*

À partir du polygone de la rivière et de sa ligne médiane, l'outil *Reaches* subdivise le polygone de la rivière en tronçons d'une longueur définie par l'utilisateur (Figure 3.9). Les limites de chaque tronçon sont perpendiculaires à la ligne médiane. Il est possible, en plus du pas de découpage, d'indiquer le kilomètre de début (par défaut 0), ainsi que la position des centroïdes (amont, milieu ou aval du tronçon).

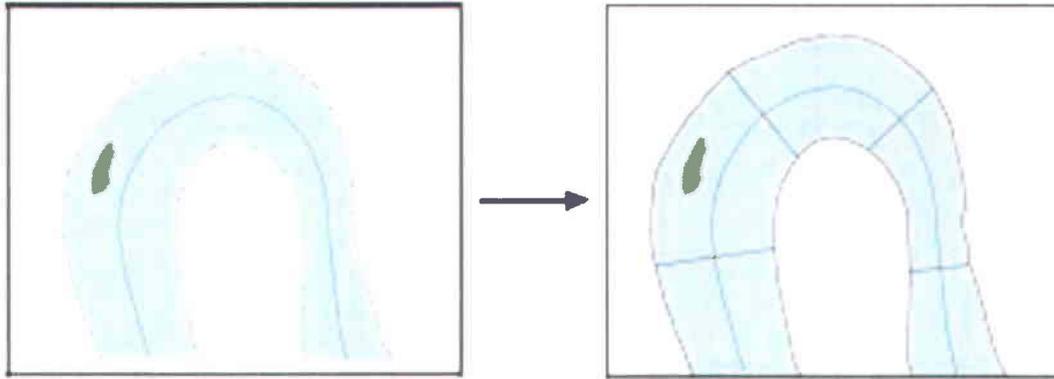


Figure 3.9 Étapes de segmentation de la rivière à partir de l'outil *Reaches* (Adapté de Gauthier *et al.*, 2008)

En présence d'une rivière très sinueuse, des tronçons trop courts par rapport à la largeur de la rivière pourraient se croiser sans atteindre les rives de la rivière, occasionnant des problèmes dans la représentation graphique des tronçons. L'outil *Reaches* permet également de calculer la largeur moyenne de chaque tronçon, en faisant la moyenne des dix mesures prises régulièrement le long du tronçon. Trois largeurs différentes peuvent être mesurées (Figure 3.10):

1-la largeur totale du tronçon d'une berge à l'autre, en faisant abstraction de la présence d'îles, si présence il y a.

2-la largeur totale du tronçon telle que définie ci-dessus moins l'espace occupé par les îles.

3-la largeur du chenal principal, soit le plus large des chenaux en présence d'îles.

Pour une rivière ou un tronçon ne contenant aucune île, ces trois valeurs de largeur seront identiques.

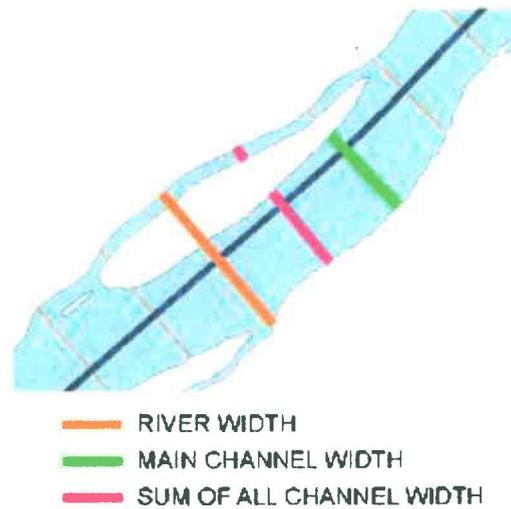


Figure 3.10 Représentation des trois largeurs différentes calculées par l'outil Reaches (Interface de l'outil Reaches, onglet aide de Frazil)

3.3.3 L'outil Curvature and Sinuosity

L'outil *Curvature and Sinuosity* permet de générer à partir de la polygone de l'axe médian le rayon de courbure et la sinuosité de celle-ci, avec un pas à déterminer par l'utilisateur, ou directement calculé selon les points d'inflexion de la courbe. Pour rappel un point d'inflexion est un point où s'opère un changement de concavité d'une courbe, c'est-à-dire à un endroit où la tangente à la courbe croise la courbe elle-même. C'est cette version améliorée que nous utiliserons pour les traitements.

Plusieurs résultats de sortie sont ensuite disponibles. Nous allons retenir la dernière valeur de sinuosité, *Sinuosity4* (cf. 2.3.5.a), ainsi que le rayon de courbure (*Radius*). Le rayon de courbure est une grandeur ayant pour unité le mètre. Il est du type horaire (CW), ou antihoraire (CCW), en regardant de l'amont vers l'aval.

3.4 Données disponibles

3.4.1 Données RHN (Réseau Hydrographique National)

Les données du Réseau Hydrographique National sont disponibles gratuitement sur le site www.geobase.ca après la création d'un compte et d'un identifiant (inscription gratuite). Elles sont téléchargeables directement au format ESRI Shapefile, compatible avec ArcGIS. Une carte interactive permet alors de rechercher le bassin versant souhaité. Par exemple celui de la rivière Chaudière est par exemple défini par le numéro 02PJ000. Ce paquetage de données permet notamment d'obtenir les entités *jonction hydrographique* (point), *rive*, *littoral*, *cours d'eau simple* (ligne), *île* et *région hydrique* (surface).

Les données spatiales sont exprimées en coordonnées géographiques de latitude (φ) et de longitude (λ) en référence au système de référence nord-américain de 1983, système canadien de référence spatiale (NAD83 SCRS). Puisque les données RHN peuvent provenir de différentes sources (ex : données provinciales ou fédérales), leur contenu peut donc différer légèrement d'une région à une autre. La majorité des entités et attributs sont peuplés directement à partir des données sources.

Une plus grande description de ces données est disponible en ligne sur le site de GéoBase à l'adresse : http://www.geobase.ca/doc/catalogue/GeoBase_RHN_Catalogue_1.0.1_FR.html. Pour plus d'informations sur les spécifications du produit, consulter http://www.geobase.ca/doc/specs/pdf/GeoBase_RHN_Specs_FR.pdf.

3.4.2 Données BNDT (Base Nationale de Données Topographiques)

Les données de la Base Nationale de Données Topographiques sont disponibles gratuitement sur le site www.geogratis.cgdi.gc.ca. Le contenu topographique de la BNDT correspond en grande partie à celui des cartes topographiques du Système national de référence cartographique (SNRC). Pour la gestion de la BNDT, le territoire canadien est subdivisé en territoires correspondant au découpage régulier du SNRC à l'échelle de 1/50 000 établi selon le Système de référence géodésique nord-américain de 1983 (NAD83). La couverture numérique au 1/50 000 étant incomplète, le produit BNDT 1/250 000 vient suppléer aux endroits où les données à l'échelle de 1/50 000 sont inexistantes.

Dans ce système, le Canada est premièrement divisé en quadrants mesurant 4° de latitude par 8° de longitude au sud du 80e parallèle, et 4° de latitude par 16° de longitude au nord du 80e parallèle (Figure 3.11). Les territoires sont basés sur une subdivision de ces quadrants.

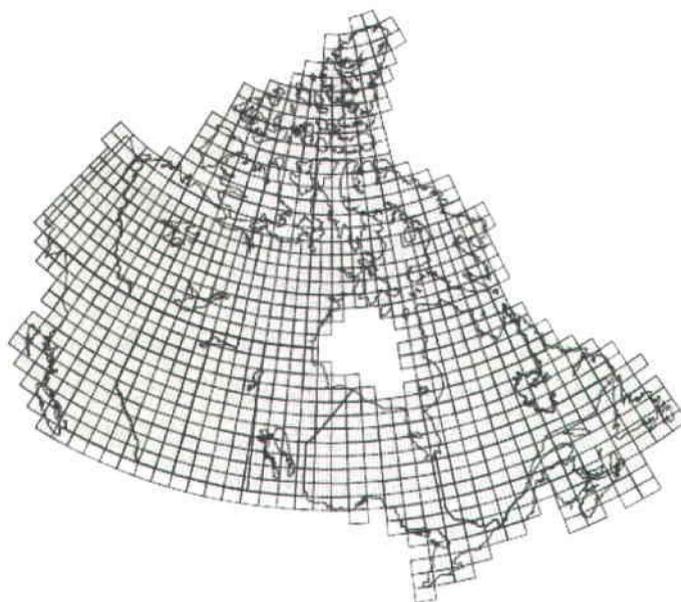


Figure 3.11 Découpage SNRC (Système National de Référence Cartographique du Canada) (GéoGratis, Normes et spécifications)

Le téléchargement des données se fait donc feuillet par feuillet. Une carte interactive permet de rechercher leurs identifiants. Le téléchargement nous fournit un fichier compressé dans lequel on trouve un nombre conséquent de couches. Voici une liste non exhaustive de celles qui ont servi pour notre étude : *Agglomération* (surface), *Bâtiment* (surface), *Chemin de fer* (ligne), *Passerelle* (ligne), *Pont* (ligne), *Route* (ligne), *Toponyme* (point). Une plus grande description de ces données est disponible en ligne sur le site de GéoGratis à l'adresse : http://ftp2.cits.rncan.gc.ca/pub/bndt/doc/dictbnd3_fr.pdf. Pour plus d'informations sur les spécifications du produit, consulter http://ftp2.cits.rncan.gc.ca/pub/bndt/doc/normbnd3_fr.pdf.

3.4.3 Données numériques d'élévation et données territoriales des municipalités

Nous avons dans un premier temps téléchargé les données d'élévation sur le site www.geobase.ca. Celles-ci se téléchargent par feuillet de la même manière que les données de la BNDT (mêmes identifiants). Les Données numériques d'élévation du Canada (DNEC) sont basées sur les éléments hypsographiques et hydrographiques des fichiers numériques de la Base nationale de données topographiques (BNDT) aux échelles de 1/50 000. Cependant nous avons préféré nous tourner vers les données issues de la BDTQ (Base de Données Topographiques du Québec). Celles-ci étant payantes, nous nous sommes adressés à un partenaire intéressé par nos travaux, le Ministère de la Sécurité Publique du Québec (MSP), qui nous a fourni la couche des courbes de niveaux correspondant aux trois bassins versants, et ce gratuitement.

Le découpage de la BDTQ se fait également par feuillet à l'échelle de 1/20 000 selon le Système québécois de référence cartographique (SQRC), compatible avec le Système national de référence cartographique (SNRC). La superficie moyenne par feuillet est de 250 km². Les valeurs d'élévation sont en mètres par rapport au niveau moyen de la mer (NMM), selon le Système de référence nord-américain de 1983 (NAD83), système de référence horizontale. La carte de base est obtenue par procédé photogrammétrique. La précision obtenue est de l'ordre de ± 4 mètres en planimétrie. En hypsométrie, elle est de ± 2 mètres pour les points cotés et de ± 5 mètres pour les courbes de niveau.

Le MSP nous a de plus fourni le fichier forme (*shapefile*) des limites territoriales des municipalités, des MRC et des régions administratives du Québec. En effet ces couches n'étaient pas disponibles gratuitement, et s'avéraient utiles pour faire des requêtes attributaires et plus largement pour améliorer le rendu visuel des cartes finales du rendu de la modélisation.

3.4.4 Données de calibration et d'évaluation

La calibration et l'évaluation du modèle s'est faite sur la base d'observations historiques d'embâcles et des connaissances locales, collectées en partenariat avec le Ministère de la Sécurité Publique (MSP). Les observations ont été sélectionnées dans un journal électronique interne au Ministère, lequel est renseigné tout au long de l'année par des agents de terrain, et ce depuis 2005. Cette base de données fonctionne comme un véritable journal.

Nous avons dû dans un premier temps rechercher les sujets et les évènements les plus pertinents. En effet, cette base de données initiale contenant des informations très diverses, comme les accidents dus aux incendies par exemple. En faisant une recherche par mot-clé, par exemple « inondation 2010 », nous pouvions avoir accès à tous les sujets ayant dans leur titre ces deux termes. C'est par exemple le cas du sujet « inondation déluge printanier 2010 ». Avant de l'ouvrir, nous pouvions connaître le type d'information contenue dans le sujet, comme les rivières et les municipalités concernées (Figure 3.12). Au sein de chaque sujet se trouvent ensuite un certain nombre d'évènements, rentrés dans un ordre chronologique par toutes les personnes du Ministère ayant eu à intervenir.

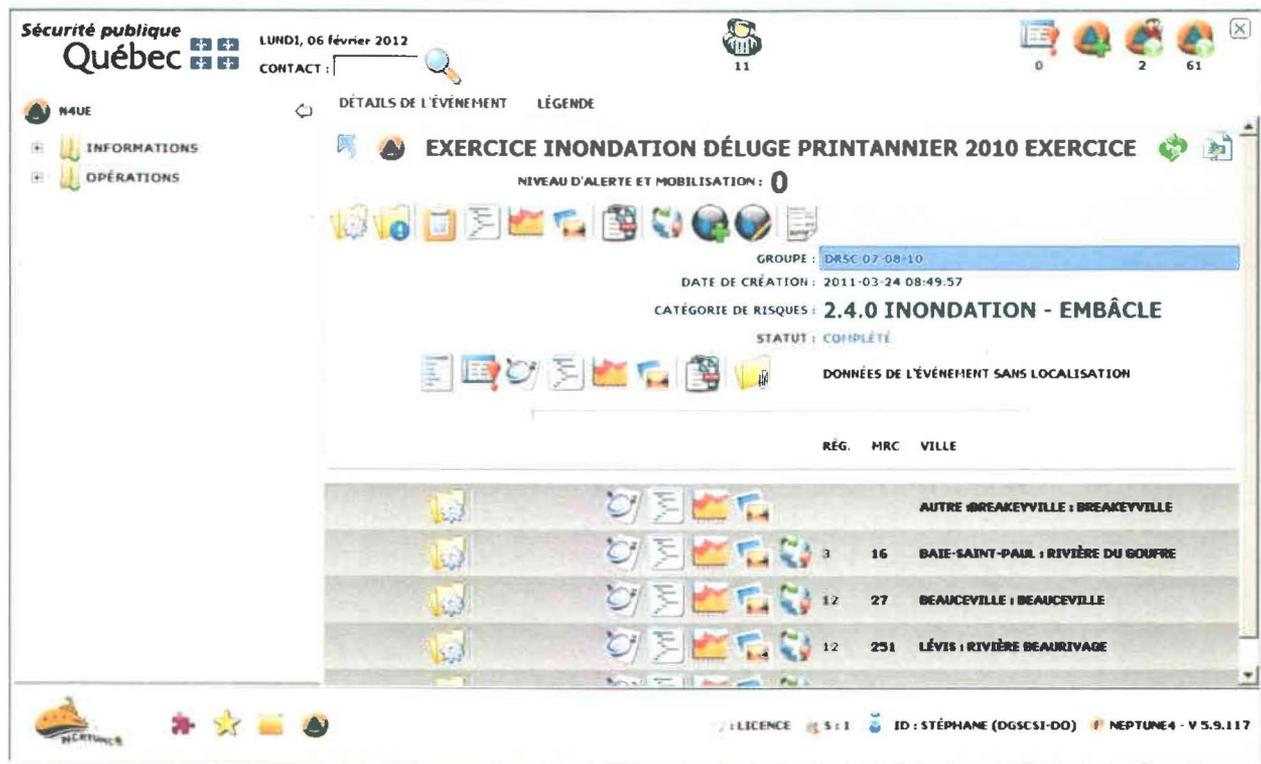


Figure 3.12 Interface du logiciel interne du Ministère, sur lequel les données sur les évènements d'embâcle ont été prélevées

Une fois l'évènement choisi, il nous a fallu interpréter et comprendre au mieux, à travers les éléments de la chronologie de l'embâcle, sa localisation et ses propriétés, quand elles étaient spécifiées (la longueur notamment). Dans certain cas, des adresses spécifiques ou des photographies prises sur le terrain nous permettaient de localiser avec précision l'embâcle en question (Figure 3.13).

SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON

SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON	DESCRIPTION : LORS DE LA DEBLACLE DE L'EMBACLE RUE BELLEVUE VERS 12H30, LES POMPIERS ET LA SQ ONT PROCÉDÉ À L'ÉVACUATION DE 41 RÉSIDENCES DE LA PLACE DES ÎLES. DEUX RÉSIDENCES N'ONT PAS ÉTÉ ÉVACUÉES DONT UNE PERSONNE HANDICAPÉE AU 184 PLACE DES ÎLES.	2009-04-05 15:41:29
SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON	DESCRIPTION : TOUTE LA GLACE S'EST DÉPLACÉ SANS PROBLÈME VIS-À-VIS PLACE DES ÎLES. LA GLACE SE DIRIGE VERS L'AVAL.	2009-04-05 14:07:28
SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON	DESCRIPTION : ACTUELLEMENT, LA CIRCULATION DE LA GLACE SE FAIT SANS PROBLÈME À LA HAUTEUR DE LA PLACE DES ÎLES	2009-04-05 13:28:26
SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON	DESCRIPTION : L'EMBACLE A COMMENCE A CEDER DEPUIS ENVIRON 12H30 ET LES GLACE SE DÉPLACENT EN DIRECTION DE PLACE DES ÎLES. POSSIBILITÉ DE BLOQUER À PLACE DES ÎLES. LES RESPONSABLES MUNICIPAUX PROCÈDENT ACTUELLEMENT À L'ÉVACUATION PRÉVENTIVE DU SECTEUR EN CAUSE.	2009-04-05 13:19:41
SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON	AJOUT D'UN FICHER AU JOURNAL DE BORD  devant le chemin bellevue 1697_ embacle partiel	2009-04-04 16:15:08
SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON	DESCRIPTION : LES GLACES ONT AVANÇÉES A ST-LAMBERT. UN CHARGEUR (LOADER) S'OCCUPE DE DÉPLACER LES GLACES QUI MONTENT SUR L'ACCOTEMENT.	
SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON	DESCRIPTION : L'EMBACLE QUI POURRAIT CÉDER EST SITUÉ DEVANT LE 500 RUE BELLEVUE ET QUI ENTRAÎNERAIT DES CONSÉQUENCES SUR LES 60 RÉSIDENCES DE PLACE DES ÎLES.	2009-04-04 11:43 54
SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON	ÉVACUÉS : 80-90 PERSONNES	2009-04-04 11:08 46
SAINT-LAMBERT-DE-LAUZON	CRÉATION DE LA LOCALISATION	2009-04-04 10:34:02

Figure 3.13 Extrait d'un évènement d'embacle issu de la base de données du MSP. Cas de la rivière Chaudière à Saint-Lambert-de-Lauzon

Certains évènements possédaient des cartes en fichiers joints, ce qui a permis une compréhension encore plus poussée de l'évènement (Figure 3.14).



Figure 3.14 Carte de localisation des accumulations de glace. Fichier joint à l'historique d'un événement d'embâcle. Base de données du MSP.

Nous pouvons de plus nous appuyer sur un logiciel de cartographie interactive, GEOLOC, développé au MSP. Celui-ci donnait la possibilité d'afficher de nombreuses couches d'informations que nous n'aurions pu nous procurer ailleurs (Figure 3.15).



Figure 3.15 Illustration de l'interface du logiciel SIG GEOLOC du Ministère de la Sécurité Publique

Cependant, nous avons été confrontés à un problème récurrent de précision. En effet, si le point de rupture du couvert de glace était souvent connu, c'était plus rarement le cas du point de congestion, celui qui nous intéressait en fait le plus. C'est pourquoi, nous avons choisi de créer deux classes de précision : *précis* et *imprécis*. Un évènement a été considéré comme précis lorsque les informations contenues dans le journal électronique ont permis un positionnement ayant un rayon de 150 mètres de marge d'erreur. Il s'agit principalement des évènements pour lesquels une adresse, une photo ou un ouvrage caractéristique (un pont par exemple) ont été mentionnés. Un évènement a été considéré comme imprécis lorsque son positionnement est resté très approximatif (par exemple « formation d'en embâcle sur trois kilomètres entre Scott et Saint-Lambert-de-Lauzon). Il a dans ce cas été placé à titre indicatif, et n'a pas pu être utilisé dans la calibration et l'évaluation du modèle. Lorsqu'elle était précisée, la longueur de l'embâcle a pu apporter une information supplémentaire sur la précision de l'évènement. Un évènement peut être, soit précis ou soit imprécis, et avoir une longueur d'embâcle.

De plus, dans la plupart des cas, un évènement était créé pour signaler la présence d'un embâcle. Il nous était alors impossible de savoir si cet embâcle s'était formé par congélation, ou par dislocation (cassure).

Cela aura un effet sur la base de données puisqu'il est possible que les sites de formation diffèrent selon le type d'embâcles. Le Tableau 3.3 indique le nombre d'évènements répertoriés et localisés pour chaque rivière.

Tableau 3.3 Nombre d'observations historiques pour chaque rivière, précise et imprécise

Rivière	Nombre d'observations historiques	
	Précis	Imprécis
Chaudière	30	13
Saint-François	7	3
Assomption	10	7

En parallèle à la construction de cette base de données, nous avons mené pour le compte du ministère des recherches concernant les données hydrologiques et météorologiques pour chaque évènement d'embâcle. Nous avons ainsi répertorié les apports verticaux et les débits moyens des cinq jours précédents l'évènement, ainsi que le degré-jour moyen des trois jours précédents l'embâcle. Le but était de rechercher d'éventuelles augmentations de précipitations, de débits ou de températures. Cependant, à partir de ces données nous n'avons pu établir une corrélation directe avec l'une de ces trois variables. Cela s'explique principalement par le fait que dans de nombreux cas les embâcles tardaient à être signalés, et nous perdions ainsi l'information précieuse de la date de sa formation.

Toutes ces données ont été utilisées pour l'évaluation finale du modèle, mais aussi pour calibrer les seuils des classes des paramètres, ce que nous verrons au chapitre 4.

4. DEVELOPPEMENT DU MODELE

Nous présentons dans ce chapitre les paramètres retenus pour la construction du modèle de prédisposition aux embâcles, ainsi que leur géospatialisation, leur adaptation en indices de risque, et enfin la manière dont ils ont été pondérés.

4.1 Choix des paramètres

Notre revue de littérature nous a permis de dégager deux grandes familles de paramètres : les paramètres statiques et les paramètres dynamiques. Parmi les statiques, on retrouve ceux présents dans l'analyse de Kalinin (2008) - qui reste l'une des seules études à comparer l'impact de différents paramètres morphologiques responsables de la formation d'embâcles - en plus de la rupture de pente :

- **la sinuosité**
- **le rétrécissement**
- **la présence d'île**
- **la présence d'un pont ou d'une passerelle**
- **la présence d'un affluent**
- **la rupture de pente**

Parmi les paramètres dynamiques, on retrouve :

- Les obstacles causés par la présence d'une couche de glace solide
- Les parties peu profondes
- Les embouchures

Pour notre étude, nous avons volontairement écarté cette dernière catégorie, car leur étude nécessitait des informations supplémentaires, notamment sur l'épaisseur du couvert de glace et sur la profondeur de l'eau. De plus, ils impliquaient également la prise en compte de phénomènes hydrologiques plus complexes à une embouchure comme celui des marées. En revanche, les six paramètres statiques retenus sont basés sur des caractéristiques morphologiques simples, sont les mieux documentés dans la littérature et sont issus de données facilement accessibles.

4.2 Géospatialisation des paramètres

Dans une première phase (De Munck *et al.*, 2011) nous avons opté pour un modèle multicritère basé sur des seuils parfois définis de manière empirique. Or cette approche s'éloignait quelque peu du concept d'exportabilité que nous souhaitons imposer à notre modèle. Pour cela, nous avons dû réviser l'approche de géospatialisation des différents paramètres, et en premier lieu, celui des îles et des rétrécissements. Nous allons nous y attarder dans une première section.

4.2.1 Segmentation de la rivière

Premièrement, nous avons choisi de segmenter la rivière en tronçons à l'aide de l'outil *Reaches* de Frazil (cf. 3.3.2). Des segmentations en tronçons de 100 mètres, 250 mètres et 500 mètres ont été testées. Nous avons choisi d'écarter les segmentations en tronçon de 100 mètres et 500 mètres, et de conserver par la suite une longueur de tronçon de 250 mètres, en nous basant sur les considérations suivantes :

- un tronçon devait se rapprocher de la longueur moyenne d'un embâcle, typiquement de l'ordre de plusieurs centaines de mètres (> 200 mètres).
- la longueur du tronçon ne devait pas être trop grande (< 500 mètres) dans le but de ne pas "manquer" un rétrécissement soudain. Rappelons que l'algorithme calcule, pour chaque tronçon, dix valeurs de largeur et conserve la valeur moyenne.

Cette segmentation nous a permis d'obtenir un maximum de 861 tronçons pour la rivière Saint-François, et un minimum de 444 pour la rivière Chaudière (Tableau 4.1). Cette différence s'explique par le fait que les polygones des rivières issus du RHN présentaient des discontinuités dans les parties amont des rivières Chaudière et l'Assomption. Comme nous avons besoin pour notre étude d'un polygone uniforme et unique, nous avons choisi de ne pas traiter ces zones. Ainsi les zones en amont de Saint-Georges pour la rivière Chaudière et en amont de Sainte-Béatrix pour la rivière l'Assomption ne sont pas comprises dans cette étude.

Tableau 4.1 Nombre de segments de 250 mètres obtenus pour chaque rivière, mis en parallèle avec le nombres de kilomètres traités

Rivière	Nombre de segments	Nombre de kilomètres traités
Chaudière	444	110 / 185
Saint-François	861	210 / 210
L'Assomption	508	127 / 200

Nous aurions également pu choisir une longueur de tronçon qui s'ajuste à la largeur de la rivière. Cependant, les outils de Frazil ne permettaient pas de réaliser cette opération, et le but était d'utiliser au maximum ces fonctions déjà existantes, qui ont permis un gain de temps notable dans l'automatisation.

À partir de cette segmentation, nous avons procédé à la géospatialisation proprement dite en créant trois indices : l'indice de rétrécissement, l'indice de sinuosité et l'indice de rupture de pente.

4.2.2 Adaptation du tracé de la rivière

Dans une étude antérieure (De Munck *et al.*, 2011), la problématique des îles a été prise en compte selon la présence de points amonts et avals. Or cette approche s'est révélée vite complexe lorsque de nombreuses îles s'imbriquaient les unes à la suite des autres, compliquant l'attribution des valeurs seuils.

a. Les îles

Nous avons donc choisi de changer d'approche et de traiter les îles comme des rétrécissements. Même si ce n'est pas tout à fait correct d'un point de vue hydraulique (l'eau s'écoulant également dans le chenal secondaire), c'est d'un point de vue géospatial, une technique facile à mettre en place. En effet, rappelons qu'en présence d'une île le chenal principal devient soudainement plus étroit, formant un endroit propice où la glace peut aisément s'agglomérer et se bloquer. Ainsi une île au centre du chenal a dans cette approche un poids naturellement plus fort qu'une île plus rapprochée d'une des rives, qui générerait moins la progression de la glace.

Nous avons choisi de garder, pour chaque tronçon segmenté de la rivière, la largeur du chenal principal uniquement. Cette approche se révèle néanmoins discutable lorsque l'île se situe quasiment au centre du chenal et que le choix du canal principal d'écoulement apparaît de façon moins nette (Figure 4.1). La ligne principale d'écoulement donnée par la fonction *Reaches* de Frazil sélectionne en effet comme chenal principal celui qui correspond au chemin le plus court, ce qui n'est pas totalement exact lors de fortes sinuosités. Il serait à ce point intéressant d'y ajouter une condition de largeur du chenal.

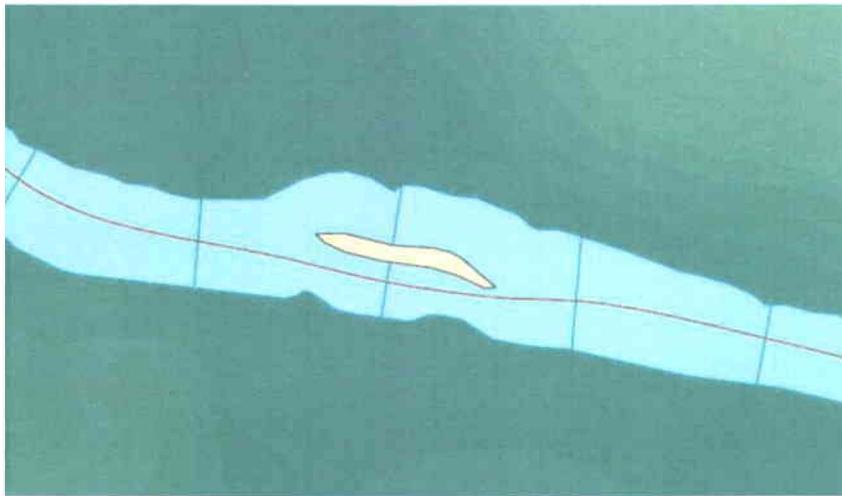


Figure 4.1 Choix du chenal principal le plus court lorsque l'île se situe au centre du chenal

b. Les ponts

Nous avons également choisi d'inclure les ponts dans l'indice de rétrécissement. En effet d'un point de vue hydraulique les piliers d'un pont subdivisent le chenal principal en plusieurs chenaux plus étroits où la glace est susceptible de se bloquer. Comme il est souvent difficile d'obtenir des informations sur le nombre de piliers en présence, nous avons choisi d'établir un rétrécissement de moitié dans chaque cas (Figure 4.8). Une telle valeur permettra de rendre l'indice de rétrécissement suffisamment sensible en l'absence d'autres facteurs, même si elle ne fait pas de distinction en fonction du nombre de piliers. Nous reviendrons plus tard sur la justification de cette valeur.

c. Les affluents

Les affluents ont également été pris en compte dans l'indice de rétrécissement. En effet, le danger majeur d'un tributaire vis-à-vis de la rivière principale est une rupture de son couvert de glace et un déplacement de celui-ci en aval jusqu'au point de confluence, venant s'y bloquer pour former un embâcle. Ainsi, nous avons considéré le couvert de glace du tributaire comme un obstacle pour la glace s'écoulant sur la rivière principale, et avons alors soustrait la largeur minimale de la rivière secondaire à son embouchure à la largeur de la rivière principale (Figure 4.2 et Figure 4.8).

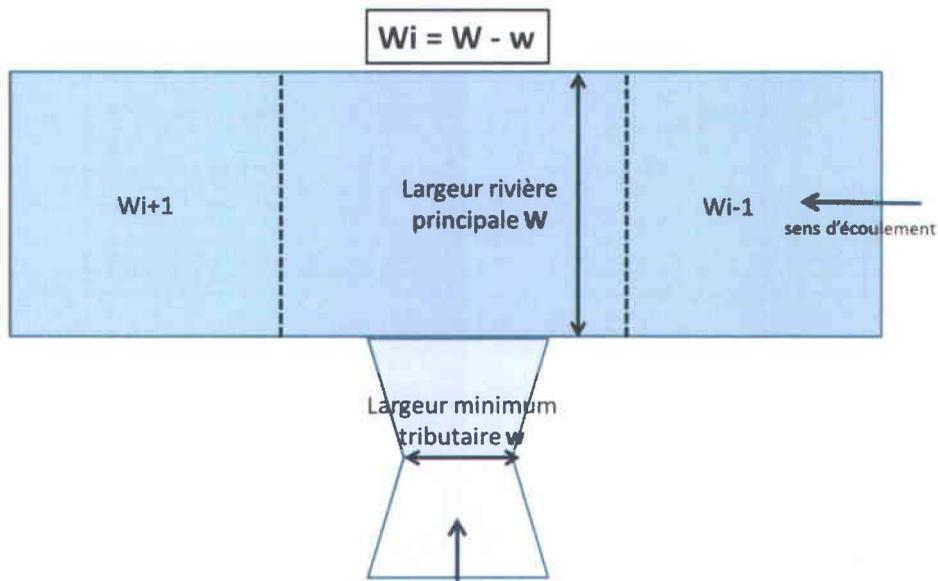


Figure 4.2 Principe de l'ajustement de la largeur de la rivière principale en présence d'un affluent. La largeur du tronçon W_i est trouvée en soustrayant à la largeur de la rivière principale W la largeur minimale de l'affluent à l'embouche w .

Bien entendu ce calcul n'a été possible que lorsque les tributaires étaient définis en fichier forme polygone, ce qui était le cas pour la plupart des bassins versants de niveau 2, selon la définition du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ). D'après ce dernier, un bassin versant de niveau 1 est un "bassin qui se draine directement dans le Saint-Laurent, la baie des Chaleurs ou dans la baie de Hannah ou de Rupert (baie James)", et un bassin versant de niveau 2 est un "sous bassin qui se draine dans un bassin de niveau 1". La définition du CEHQ ne le précise pas mais la couche des bassins versants de niveau 2 n'inclut pas tous les sous bassins versants, seulement les plus importants en superficie (Figure 4.3).



Figure 4.3 Bassins versants de niveau 2 tels que définis par le CEHQ pour la rivière Chaudière

De ce fait, nous avons choisi de considérer uniquement des confluences des affluents principaux, et de mettre de côté les affluents plus mineurs ainsi que leurs influences à l'échelle de leurs bassins versants. En effet, si de nombreux indices existent dans la littérature pour les caractériser, leur insertion dans le présent modèle n'aurait eu un sens qu'en les reliant à des valeurs de débit ou de précipitations.

4.2.3 Indice de rétrécissement

Les îles, les affluents et les ponts étant ainsi pris en compte dans le chenal principal, ceux-ci vont directement influencer sur l'indice de rétrécissement que nous avons développé. Dans notre étude préliminaire, le calcul de rétrécissement était basé sur la comparaison de la largeur d'un segment à celles des deux précédents le long de l'axe d'écoulement (rétrécissement de moitié ou du tiers). Nous avons cette fois développé un indice global qui tient en compte de largeurs maximales et minimales le long du chenal principal (Figure 4.4).

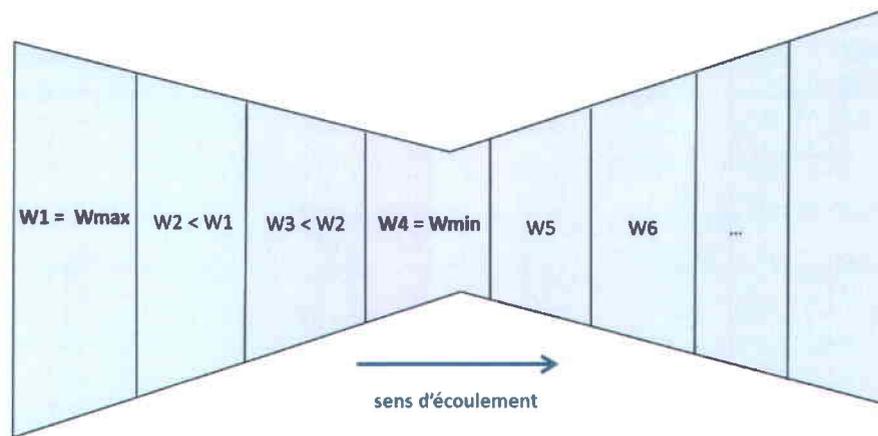


Figure 4.4 Principe de l'algorithme de l'indice de rétrécissement

Les tableaux attributaires donnant les valeurs des largeurs moyennes de chaque tronçon ont ainsi été exportés dans une feuille de calcul Excel, largeurs que nous avons modifié en cas de présence d'un pont ou d'un affluent, puis que nous avons ensuite importé dans Matlab. À partir de ces données de largeur, l'algorithme compare chaque segment à ses deux voisins les plus proches (le précédent et le suivant) afin d'enregistrer des valeurs de largeurs maximales et minimales (W_{max} et W_{min} , Figure 4.4). La lettre W , qui signifie largeur (width), a été gardée afin qu'il n'y ait pas de confusion possible avec la longueur du segment. L'indice de rétrécissement est ensuite calculé en divisant chaque largeur par la largeur maximale le précédent, et ce jusqu'à une largeur minimale ou l'indice sera alors le plus faible. En cas d'agrandissement du chenal (comme c'est le cas pour les segments 5 et 6), on attribue à l'indice la valeur 1. Le calcul se poursuit ainsi de suite dans le sens de l'écoulement jusqu'à rencontrer une nouvelle valeur maximale. Nous obtenons au final pour chaque segment un ratio entre 0 et 1.

4.2.4 Prise en compte de la sinuosité

Il a été vu dans la section 2.3.5.b que les vitesses transversales présentes dans une courbe contribuent aux embâcles en transportant la glace en mouvement sur l'extérieur de la courbe, au contraire des sédiments qui sont entraînés vers la rive intérieure.

On retrouve alors nécessairement dans une courbure une pente transversale, qui est d'autant plus grande que la courbure est importante. Ainsi, plus la sinuosité est forte plus la capacité de transport est réduite, et plus la banquise de glace est déplacée avec force vers la rive extérieure.

Pour en tenir compte nous avons utilisé l'outil *Curvature and Sinuosity* de Frazil, qui permet d'obtenir le coefficient de sinuosité standardisé *Sinuosity4* (Figure 4.7). Ce sont ces valeurs que nous avons choisi d'intégrer dans notre modèle. L'avantage est que les valeurs sont déjà échelonnées entre 0 à 1. En revanche, comme le calcul du coefficient est basé sur les points d'inflexions, les valeurs de sinuosité recoupent souvent plusieurs tronçons (Figure 4.5). Nous avons de ce fait dû adapter l'indice pour que l'on obtienne au final une valeur de sinuosité pour chaque segment de la rivière. Pour cela, nous avons donné à chaque tronçon la valeur du coefficient de sinuosité se superposant à lui. Cela signifie que nous retrouvons au final plusieurs fois la même valeur de sinuosité sur plusieurs tronçons. Dans le cas des tronçons où deux valeurs de sinuosité se superposaient, nous avons fait la moyenne des deux valeurs.

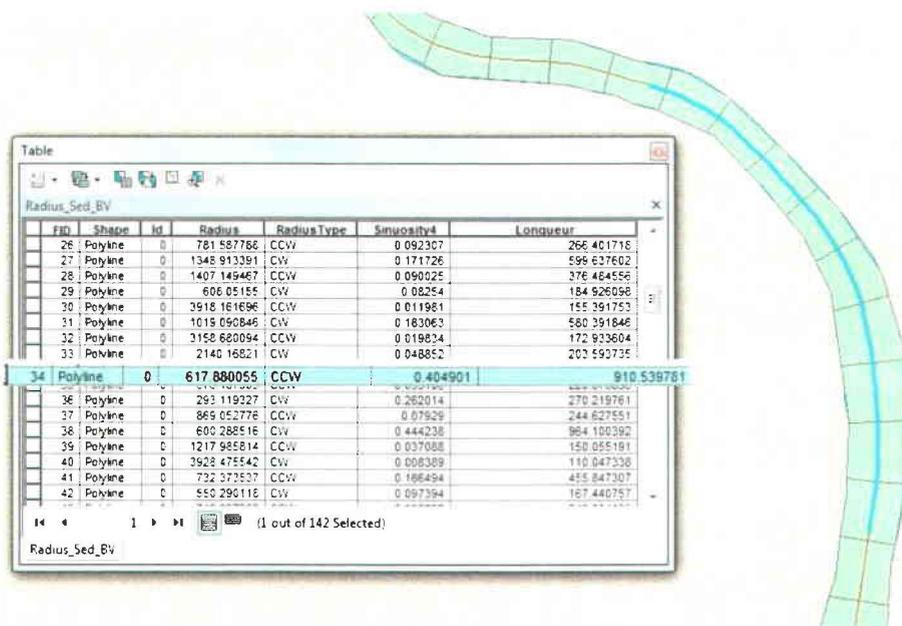


Figure 4.5 Problème d'ajustement du coefficient de sinuosité à chaque tronçon. Du fait du calcul du coefficient de sinuosité basé sur les points d'inflexion, une polygline associée à une valeur de sinuosité recoupe plusieurs tronçons. Nous avons alors donné à chaque tronçon la valeur du coefficient de sinuosité se superposant à lui, et avons fait la moyenne pour les tronçons concernés par deux valeurs de sinuosité.

4.2.5 Prise en compte de la pente

La rupture de pente influence la formation d'embâcles car elle cause un ralentissement, donc une perte de « portance » de l'eau, et ainsi une accumulation potentielle de glace. Nous allons de ce fait rechercher les endroits où la pente s'adoucit.

La pente de chaque tronçon a été calculée à partir d'un MNT obtenu avec les courbes de niveaux de la BDTQ, et du fichier forme des points amont de chaque tronçon créé par FRAZIL lors de la segmentation par l'outil *Reaches*. En interpolant pour chacun de ces points l'élévation des pixels voisins nous avons obtenu une donnée d'élévation ponctuelle. La mesure de la différence de hauteur entre deux points, divisée par la longueur du segment les séparant, donne alors la pente (Figure 4.7). Il est à signaler qu'étant donné le manque d'informations sur la profondeur de la rivière, la pente du lit de la rivière a été confondue avec la pente de la surface de celle-ci, celle qui correspond au résultat extrait du MNT. Celle-ci n'est sans doute pas l'indicateur idéal de la pente du lit de la rivière, bien qu'il existe une certaine corrélation entre ce dernier et la pente de l'eau. La connaissance de la pente du lit en tout point nécessiterait par exemple un survol LIDAR (Aronoff & Petrie, 2005), ou de manière moins coûteuse une campagne de mesure en canot avec localisation par DGPS. La Figure 4.6 illustre la pente de surface sur la rivière Chaudière, depuis la ville de Saint-Georges à son embouchure, localisée à Lévis. Il est alors normal de retrouver la structure en marche d'escalier typique des profils en long extraits des cartes de la BDTQ.

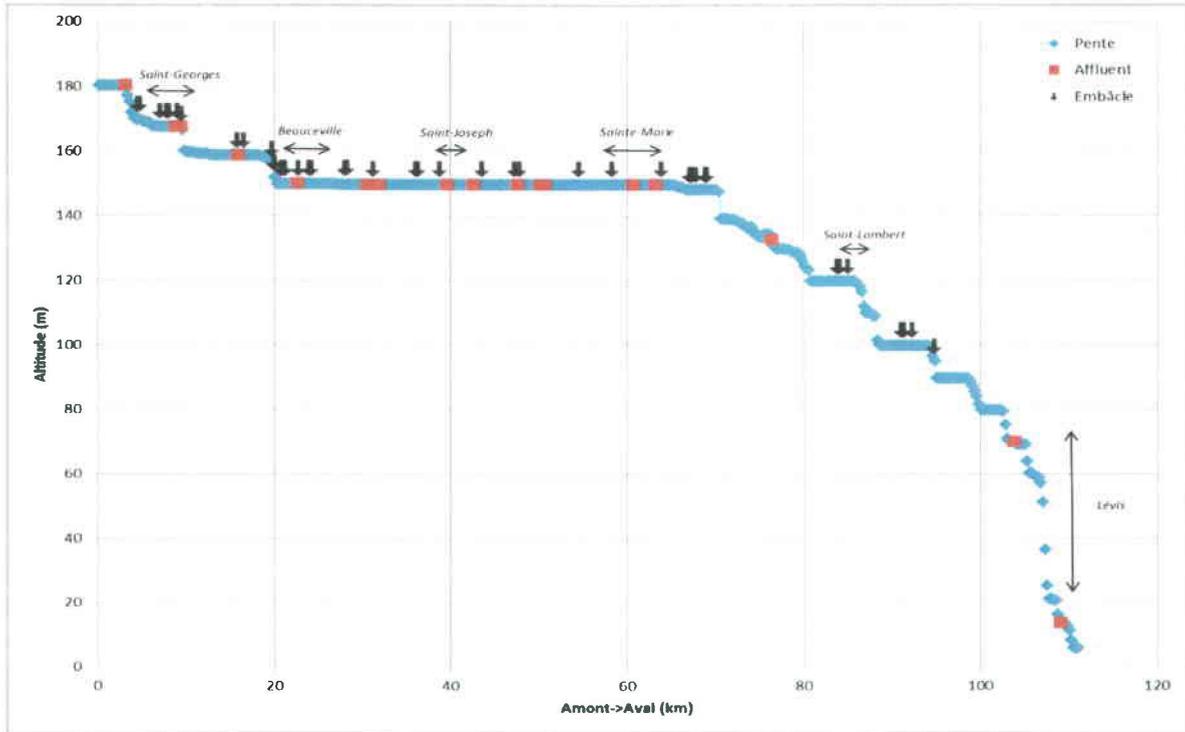


Figure 4.6 Profil en long de la rivière Chaudière de Saint-Georges à son embouchure. Les embâcles répertoriés sont indiqués par des flèches noires, les affluents par des carrés rouges.

L'indice de rupture de pente se calcule ensuite en faisant la différence de deux pentes (Figure 4.8). Lorsque pour un segment i la différence de la pente de ce segment i par celle du segment $i-1$ est négative, cela signifie que le lit de la rivière s'est aplani, ce qui est le principal danger pour la création d'embâcles. Les valeurs positives de la rupture de pente indiquent au contraire que la pente du lit s'est accentuée.

Dans certains cas, la rupture de pente est à mettre en corrélation avec les autres facteurs. Ainsi la présence d'une tête d'île, d'un pilier de pont vont entrainer une remontée du niveau de l'eau, tandis que le delta d'un affluent va causer une diminution de la pente. Cependant, ces phénomènes n'apparaissent pas de façon évidente avec la pente de surface, et auraient sans doute été plus pertinents si la pente du lit de la rivière avait été disponible. De plus, ces éléments demeurant ponctuels, la pente de surface calculée sur 250 mètres ne permettrait pas une détection convenable. Au contraire, une pente calculée sur un intervalle trop court se heurterait à la précision des données de la BDTQ.

4.2.6 Tableaux récapitulatifs

Les Figure 4.7 et Figure 4.8 proposent un résumé des trois premières étapes. La Figure 4.7 illustre de manière simplifiée la façon par laquelle nous avons exploité les données géospatiales disponibles à l'aide des outils SIG disponibles dans FRAZIL (cf. 3.3). Nous avons en effet extrait trois résultats utilisables par la suite : la largeur du chenal principal pour chaque segment, la sinuosité et la pente de la rivière à la surface de l'eau.

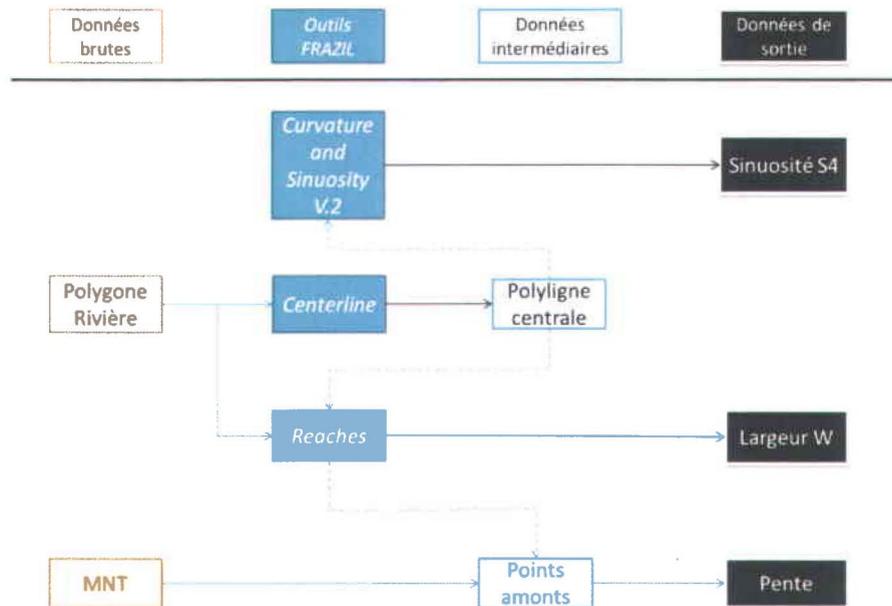


Figure 4.7 Utilisation des outils SIG de FRAZIL pour extraire des paramètres géospatiaux des données initiales

La Figure 4.8 schématise les étapes empruntées depuis les résultats de sortie données par FRAZIL jusqu'à la création des trois indices finaux : l'indice de rétrécissement, l'indice de sinuosité et l'indice de rupture de pente.

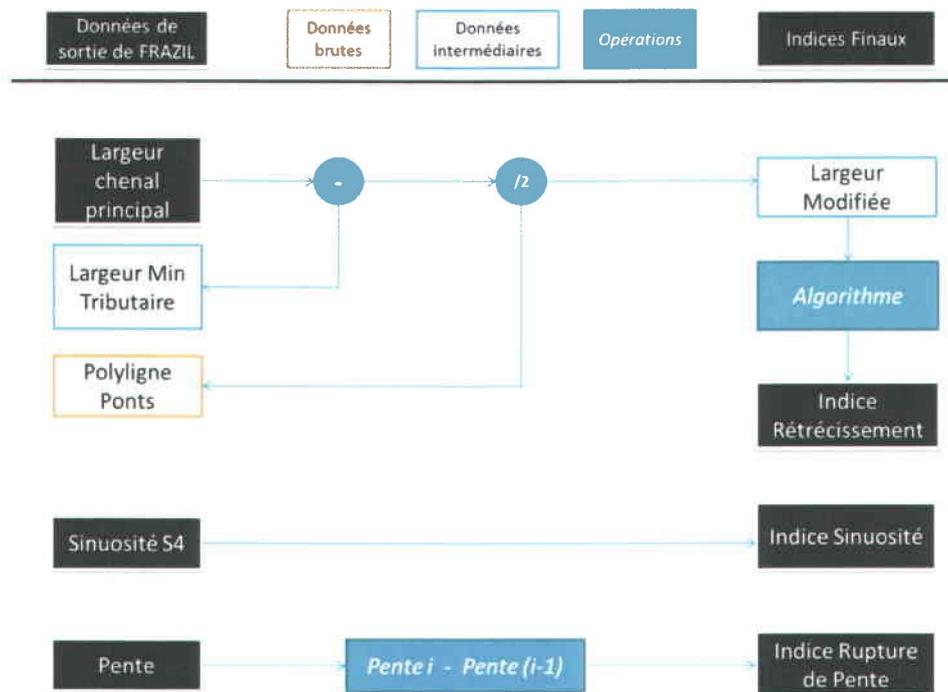


Figure 4.8 Création des indices finaux à partir des résultats de sortie de FRAZIL

4.3 Modèle conceptuel

4.3.1 Standardisation des valeurs des indices

L'indice de rétrécissement, la sinuosité standardisée et l'indice de rupture de pente sont les trois indices que nous avons conservés à partir des facteurs trouvés dans la littérature. Nous avons ensuite cherché à établir la manière par laquelle ces trois indices pouvaient être compilés afin de créer l'indice de prédisposition aux embâcles. Nous avons recherché, pour chaque indice, des classes de valeurs qui pouvaient être séparées par des valeurs seuils, dans le but d'instaurer une hiérarchie en donnant à la classe la plus faible la valeur zéro et une valeur maximum à la classe la plus forte.

Pour ce faire, nous avons regardé pour chaque évènement historique d'embâcle, et ce pour les trois rivières, quelles étaient les valeurs de l'indice rétrécissement, de sinuosité et de rupture de pente. Nous n'avons effectué ce travail que pour les embâcles répertoriés *précis* (cf. 3.4.4), puisqu'il était impossible d'associer aux embâcles classifiés *imprécis* les valeurs des indices. Lorsque plusieurs embâcles apparaissaient sur un même tronçon ou sur un tronçon adjacent, nous avons répertoriés ces tronçons comme ayant une occurrence annuelle. Lorsque l'embâcle

était seul sur un tronçon et sur un environnement proche, nous l'avons répertorié comme ayant une occurrence régulière. Enfin, lorsqu'aucun embâcle n'était présent, nous l'avons classé comme rare. Nous avons choisi le terme « rare » et non « absence », car notre base de données ne pouvait pas être exhaustive, et parce que ces tronçons pouvaient très bien être concernées par des embâcles localisés de façon imprécise. Cette approche est conforme à celle de Kalinin (2008), présentée au chapitre 2. Nous avons alors tracé des diagrammes en boîte (*box plots*) pour les trois indices, en distinguant les occurrences annuelles, régulières et rares (Figure 4.9 et Figure 4.10). Puisque nous avons voulu développer un modèle de prédisposition indépendant d'un site d'étude, nous avons regroupé les données d'embâcles des trois rivières dans un diagramme unique.

Le premier quartile est représenté par la barre inférieure bleue du diagramme en boîte, le troisième quartile par la barre supérieure bleue, et le deuxième quartile, aussi appelé médiane, correspond à la barre rouge centrale. Pour rappel, la médiane divise une série de données en deux groupes égaux, tandis que les quartiles correspondent aux trois valeurs qui séparent une distribution statistique en quatre groupes égaux.

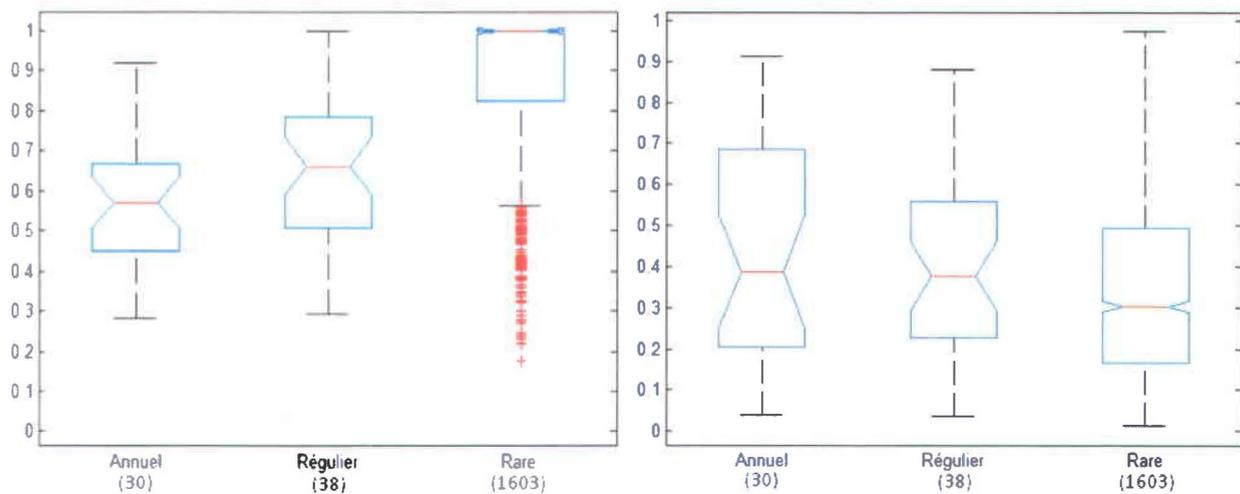


Figure 4.9 Diagramme de l'indice de rétrécissement (gauche), et de la sinuosité (droite)

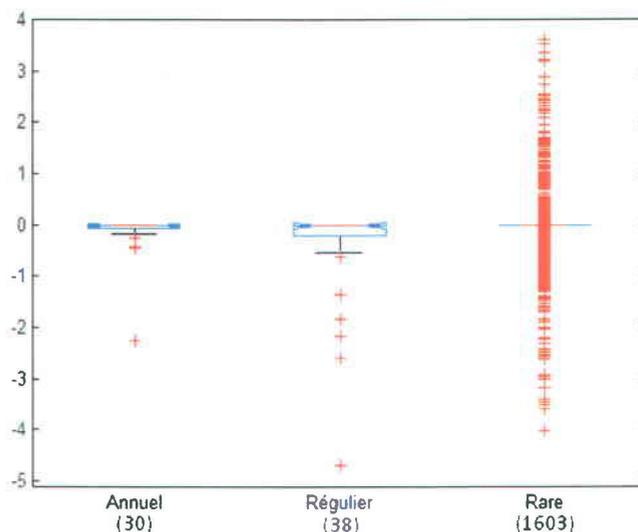


Figure 4.10 Diagramme de la rupture de pente

Nous avons noté la présence de nombreuses valeurs aberrantes pour le cas de la rupture de pente, surtout dans le cas des occurrences rares (Figure 4.10). Une valeur est considérée comme aberrante statistiquement lorsqu'elle dépasse la borne inférieure ou supérieure du diagramme en boîte. La borne inférieure correspond à la valeur du premier quartile moins une fois et demi l'intervalle interquartile. La borne supérieure correspond, quant à elle, à la valeur du troisième quartile plus une fois et demi l'intervalle interquartile. Pour les occurrences annuelles et régulières, des valeurs négatives de ruptures de pente ont globalement été trouvées, ce qui garde une certaine logique puisque cela correspond au cas où la pente diminue.

La forte dispersion des valeurs pour l'occurrence rare nous a confirmé que les données de la BDTQ n'étaient pas pertinentes pour intégrer notre modèle. En effet, les cartes topographiques de la BDTQ donnent des profils en long fortement représentatifs de l'endroit où passent les courbes de niveaux primaires (cf. 4.2.5). Ceux-ci sont ainsi difficilement utilisables pour une analyse fine des pentes des cours d'eau. Face à l'impossibilité de créer des seuils pour cet indice, nous avons décidé de l'exclure du modèle, pour ne garder que les indices de rétrécissement et de sinuosité.

L'analyse de l'indice de rétrécissement (Figure 4.9), permet d'observer une légère différence de tendance centrale entre les occurrences annuelles et régulières. En effet, les observations d'embâcles annuels tendent à avoir des valeurs d'indice de rétrécissement plus basses (ce qui correspond à des rétrécissements plus importants), avec une médiane de 0.57 contre 0.66 pour les observations de type régulières. En suivant cette même logique, il est rassurant d'observer

que les valeurs de l'indice tendent vers 1 pour les occurrences rares. Afin de vérifier si ces différences étaient significatives d'un point de vue statistique, nous avons ensuite utilisé un test de comparaison de moyennes, le test de Kruskal-Wallis, (Tableau 4.2). Le test de Kruskal-Wallis fait partie des tests non-paramétriques, et présente l'avantage, par rapport aux tests paramétriques (type ANOVA par exemple), d'être indépendant du type de distribution des données et d'être peu influencé par la présence de valeurs aberrantes dans l'échantillon. Tout d'abord, nous avons appliqué ce test à l'indice de rétrécissement pour les trois types d'occurrences. L'hypothèse nulle du test de Kruskal-Wallis consiste en l'absence de différences au plan des indices, entre les occurrences (annuelle, régulière et rare). Le Tableau 4.2 illustre les résultats obtenus.

Tableau 4.2 Résultats du test de Kruskal-Wallis appliqué à l'indice de rétrécissement, pour les trois types d'occurrences

Source de la variance	Sommes des écarts au carré	Degrés de liberté	Variance	Chi ²	P-value
Inter- classes	2.54472e+007	2	12723575.8	124.95	7.35421e-028
Intra-classes	3.14855e+008	1669	188648.9		
Total	3.40302e+008	1671			

En choisissant un niveau de probabilité $\alpha = 0.05$, nous nous apercevons que la valeur de la p -value est très petite par rapport à α , ce qui permet de rejeter l'hypothèse nulle. Ainsi au moins l'une des moyennes diffère de celle des autres. Or, d'après la Figure 4.9, il est possible d'observer que les valeurs de l'indice de rétrécissement pour l'occurrence rare semblent avoir des caractéristiques statistiques différentes des deux autres occurrences. Il est de ce fait possible de faire l'hypothèse que c'est la moyenne de l'indice de rétrécissement pour cette occurrence qui biaise le test de Kruskal-Wallis. Toutefois, afin d'être certain que les deux autres occurrences ne présentent pas des moyennes significativement différentes, nous avons répété le test en ne gardant que les occurrences régulières et annuelles. Nous avons obtenu de cette manière une p -value égale à 0.0667, qui est supérieure à 0.05. Ainsi, les moyennes de ces deux occurrences ne sont pas significativement différentes.

Pour la sinuosité en revanche, cela est plus compliqué puisque les médianes des occurrences annuelles et régulières sont quasiment égales (0.38 et 0.39). La différence majeure se situe surtout au niveau de la valeur du troisième quartile, bien plus élevée pour les occurrences annuelles (0.69 contre 0.56). Cela pourrait signifier que la sinuosité n'est pas le paramètre principal de distinction entre les deux fréquences d'occurrence. Cette tendance peut se confirmer en réalisant à nouveau un test de Kruskal-Wallis pour les trois types d'occurrences (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 Résultats du test de Kruskal-Wallis appliqué à l'indice de sinuosité, pour les trois types d'occurrences

Source de la variance	Sommes des écarts au carré	Degrés de liberté	Variance	Chi ²	P-value
Inter- classes	1.64198e+006	2	820987.9	7.04	0.0295
Intra-classes	3.87875e+008	1669	232399.6		
Total	3.89517e+008	1671			

La valeur *p-value* trouvée égale à 0.0295, qui est inférieure à $\alpha = 0.05$. Le test permet alors de rejeter l'hypothèse nulle. En revanche, le même test uniquement appliqué aux seules occurrences régulières et rares permet d'obtenir un *p-value* grand devant α ($0.8702 \gg 0.05$), ce qui permet de confirmer l'hypothèse nulle, c'est-à-dire que les moyennes de ces deux occurrences ne sont pas significativement différentes.

Ces considérations statistiques posées, nous avons alors sélectionné les valeurs seuils des deux indices, ce que nous avons fait en nous basant sur les valeurs de quartiles des deux occurrences (Figure 4.11 et Figure 4.12). Nous avons tenté de sélectionner ces seuils de la manière la plus objective possible, même quand les intervalles se recoupaient beaucoup, comme c'est le cas pour la sinuosité (Figure 4.12).

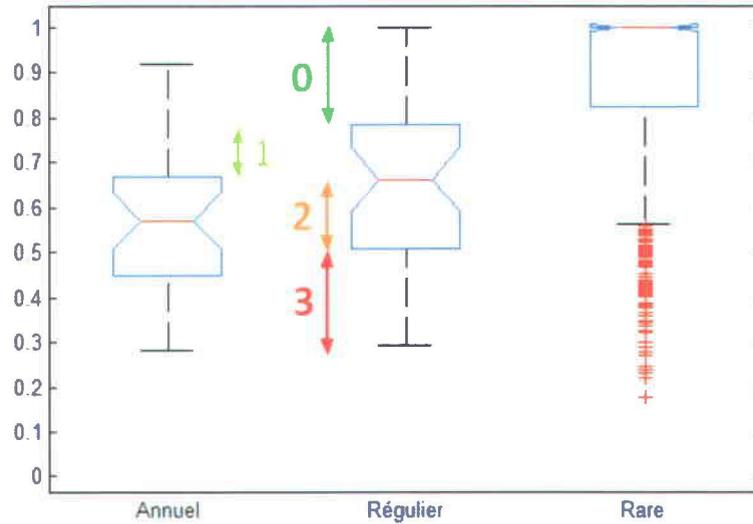


Figure 4.11 Indice de rétrécissement : choix des quatre classes en fonction des quartiles des deux types d'occurrence

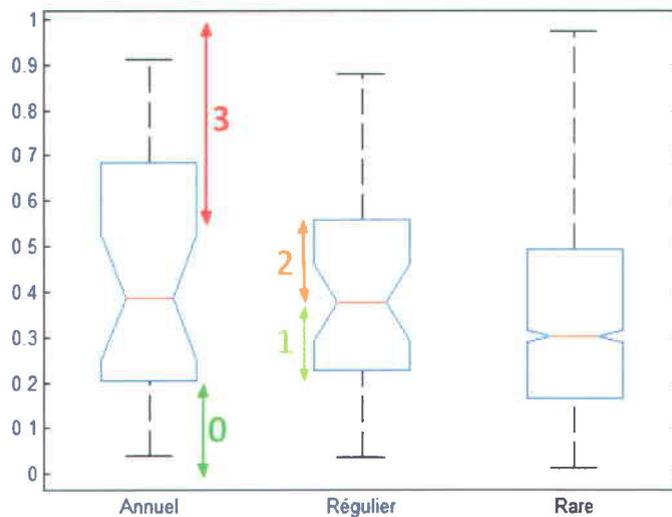


Figure 4.12 Indice de sinuosité : choix des quatre classes en fonction des quartiles des deux types d'occurrence

Nous avons choisi de diviser les données en quatre classes, la classe la plus influente sur la formation d'un embâcle ayant une valeur maximale (3), et la classe la moins influente ayant une valeur minimale (0). En utilisant les valeurs des quartiles des deux indices, les valeurs seuils ont été sélectionnées de la manière suivante :

- Pour l'indice de rétrécissement (Figure 4.11), une valeur basse de l'indice induit une plus grande influence sur la formation d'embâcles. La valeur de 0 est donc donnée à la classe la plus proche de 1. Puisque l'ensemble des valeurs de l'intervalle inter-quartile de l'occurrence rare sont supérieures à la valeur du troisième quartile de l'occurrence régulière, nous avons choisi cette dernière comme valeur seuil entre les classes 0 et 1. En descendant dans les valeurs de l'indice de rétrécissement, les valeurs allant de la médiane au troisième quartile de l'occurrence régulière sont supérieures à la valeur du troisième quartile de l'occurrence annuelle. C'est cette valeur qui est choisie comme seuil entre les classes 1 et 2. La valeur seuil entre les classes 2 et 3 a été choisie de manière à regrouper dans la classe 3 les valeurs des occurrences annuelles inférieures au premier quartile des occurrences régulières.
- Nous avons appliqué cette même logique à l'indice de sinuosité (Figure 4.12), sauf que dans ce cas ce sont les valeurs hautes de sinuosité qui se sont vu attribuer la classe maximum.

Les détails des valeurs sont donnés dans le Tableau 4.4, où les valeurs 1, 2 et 3 correspondent respectivement au premier, deuxième et troisième quartile.

Nous avons voulu confirmer cette méthodologie en appliquant pour chacun des deux indices l'algorithme du *K-Means*. Le *K-Means* est une technique de classification dite d'agrégation autour des centres mobiles. Après avoir spécifié initialement le nombre d'itérations et le nombre de classes, un tel algorithme permet de classer de manière itérative un vaste tableau de données. Une classification optimale vise alors à maximiser la variance inter-classe (rendre les classes les plus différentes possibles), tout en minimisant la variance intra-classe (rendre chacune des classes le plus homogène possible). Le Tableau 4.4 donne l'ensemble des valeurs seuils choisies pour les deux indices, ainsi que les quartiles et les valeurs des *K-Means* correspondant.

Tableau 4.4 Récapitulatif des valeurs seuils, des quartiles correspondant (A pour Annuel, R pour Régulier), et des *K-Means* pour les deux indices

Rétrécissement			Sinuosité		
Valeur seuil	Quartile	<i>K-Means</i>	Valeur seuil	Quartile	<i>K-Means</i>
0.51	1 R	0.54	0.2	1 A	0.23
0.67	3 A	0.68	0.38	2 R	0.42
0.79	3 R	0.82	0.56	3 R	0.63

Il est alors intéressant d'observer que l'algorithme du *K-Means* donne des valeurs inter-classes très proches, voir quasiment égales dans certains cas, à celles que nous avons sélectionnées à partir des quartiles des différentes occurrences.

4.3.2 Poids des indices

Une fois les valeurs seuils et les classes des deux indices définies, nous leur avons attribué une pondération. En effet, chacun des deux indices possède un degré d'importance différent dans le phénomène de formation d'un embâcle. Pour le prouver, nous nous sommes appuyés une nouvelle fois sur l'étude de Kalinin (2008), et plus précisément sur le Tableau 2.5. Kalinin y a répertorié pour trois occurrences d'embâcles (annuel, régulier et rare) les facteurs impliqués dans la formation des embâcles. Celui-ci avait trouvé que dans les cas des occurrences annuelles une forte sinuosité était présente dans 110 % des cas, et la combinaison du rétrécissement, des îles, des affluents et des ponts dans 220 % des cas. Il est à noter que la somme des pourcentages des facteurs ne donne pas 100 %, car un grand nombre d'embâcles sont causés par plusieurs facteurs. Kalinin a donc obtenu un facteur 2 entre les deux indices de rétrécissement et sinuosité. Dans les cas des occurrences régulières, ce facteur s'avéré un peu moins important, avec 90% pour la sinuosité contre 120% pour l'indice de rétrécissement.

Afin d'analyser plus en détails les effets de ces différents paramètres sur notre étude, nous avons effectué ce même travail sur nos données pour les trois rivières à l'étude, et ce pour les types d'occurrences mises en valeur, à savoir annuelles et régulières. Le Tableau 4.5 fait l'inventaire des fréquences des différents paramètres morphologiques en présence d'un embâcle issu de la base de données. La colonne *Indice R* rassemble les fréquences des facteurs présents dans l'indice de rétrécissement que nous avons construit (rétrécissement, île, affluent, pont). En dernier lieu, la dernière colonne représente le ratio de l'indice de rétrécissement par la sinuosité. Celui-ci fait ressortir pour les deux types d'occurrences un facteur proche de 3. C'est ce facteur que nous allons garder pour l'établissement des poids relatifs des indices.

Tableau 4.5 Fréquence des différents facteurs (%) pour les deux types d'occurrence (Sinuosité > 0.56 et Rétrécissement seul en absence des autres facteurs < 0.51)

Occurrence	Sinuosité	Rétrécissement	Île	Affluent	Pont	Indice R	Ratio R/S
Annuel	50	57	47	7	27	137	2.7
Régulier	34	63	21	8	13	105	3.1

Nous avons ensuite utilisé une méthode d'analyse hiérarchique multicritères développée par Saaty (1990). Celle-ci propose une approche de comparaison par paire relativement simple, consistant à comparer chaque indice avec un autre, et à attribuer à chaque paire un coefficient de comparaison. Nous nous sommes inspirés de cette étude pour développer notre propre échelle numérique de coefficients de comparaison, représentant des niveaux d'importance allant de 1 (peu important) à 5 (extrêmement important) (Tableau 4.6). Nous avons choisi de prendre comme coefficient de comparaison le facteur 3 évoqué ci-dessus, ce qui correspond dans notre échelle à une importance forte de l'indice de rétrécissement par rapport à l'indice de sinuosité.

Tableau 4.6 Échelle de comparaison de l'importance des indices les uns par rapport aux autres

	Échelle numérique
Peu important	1
Modérément important	2
Fortement important	3
Très important	4
Extrêmement important	5

L'algorithme consiste ensuite à établir par calcul statistique le poids relatif de chaque indicateur. Celui-ci calcule les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice, puis extrait le vecteur propre correspondant à la plus grande valeur propre. Ce vecteur propre, une fois normalisé, correspond au vecteur prioritaire présent dans le Tableau 4.7. L'indice 1 correspond à l'indice de rétrécissement et l'indice 2 à la sinuosité (Tableau 4.7). De la même manière que l'indice de rétrécissement possède une importance de 3 par rapport à l'indice de sinuosité, celui-ci a de ce fait une importance de 1/3 par rapport à l'indice 1.

Tableau 4.7 Importance relatives des indices et poids des indices (vecteur prioritaire)

Indice	1	2	Vecteur Prioritaire
1	1	3	0.75
2	1/3	1	0.25

Il est évident que dans le cas de deux indices, la méthode de Saaty n'est pas indispensable puisqu'il est simple de normaliser à la main un rapport de 3 pour 1. En revanche, nous avons choisi de la conserver car elle s'applique à un nombre d'indices infini, et pourra très bien être utilisée si d'autres indices venaient à être rajoutés.

4.3.3 Indice de prédisposition aux embâcles (IJPI)

L'indice final de prédisposition aux embâcles, ou IJPI (*Ice Jam Predisposition Index*), est obtenu de la façon suivante :

1. En multipliant pour chaque tronçon et pour chaque indice (k) la valeur (V) de la classe (0 à 3) par son poids (W) correspondant du vecteur prioritaire (numérateur équation 8).
2. En faisant pour chaque tronçon la somme des deux valeurs pondérées, divisée par la somme pondérée correspondant aux valeurs maximales possibles. Le résultat est divisé afin d'obtenir un indice normalisé entre 0 et 1 (dénominateur équation 8).

$$\text{Indice de prédisposition aux embâcles} = \frac{\sum_{k=1}^2 V_k W_k}{\sum_{k=1}^2 V_{max} W_k} \quad (8)$$

La valeur maximale étant 3 et le vecteur de pondération normalisé, l'équation 8 peut être réécrite ainsi (équation 9) :

$$\text{Indice de prédisposition aux embâcles} = \frac{\sum_{k=1}^2 V_k W_k}{3} \quad (9)$$

Les valeurs de l'indice de prédisposition aux embâcles ont ensuite été séparées en trois classes de prédisposition. Ces classes ont été calibrées de manière à obtenir la classification la plus satisfaisante possible.

- *Prédisposition Majeure* : $IJPI > 0.74$.

Nous avons considéré que les tronçons ayant une valeur d'indice de rétrécissement égale à 3, indépendamment de la sinuosité devaient être dans la catégorie de prédisposition majeure. Il en allait de même pour les tronçons ayant une valeur d'indice de sinuosité égale à 3, lorsqu'ils étaient accompagnés d'un indice de rétrécissement égal à 2.

- *Prédisposition Modérée* : $0.49 < IJPI \leq 0.74$.

Cette classe intermédiaire inclut les tronçons ayant une importance modérée sur la formation des embâcles. On y retrouve ainsi les tronçons ayant une valeur d'indice de rétrécissement égale à 2, indépendamment de la sinuosité, ainsi que les tronçons ayant une valeur d'indice de rétrécissement égal à 1 accompagné d'une sinuosité égale à 3.

- *Prédisposition Faible* : $IJPI \leq 0.49$.

Cette dernière classe inclut tous les tronçons qui n'ont qu'une faible importance sur le processus de formation des embâcles. Ces tronçons ont une valeur d'indice de rétrécissement égale à 1 accompagnée d'une sinuosité inférieure ou égale à 2, ou une valeur d'indice de rétrécissement égale à 0, indépendamment de la valeur de l'indice de sinuosité.

4.3.4 Récapitulatif du modèle conceptuel

La Figure 4.13 schématise et résume les opérations réalisées par le modèle depuis les trois indices (rétrécissement, sinuosité et rupture de pente) jusqu'à l'obtention de l'indice final. L'indice de rupture de pente est présenté sur la figure même s'il a ensuite été exclu du modèle, car il a été rejeté du fait de la trop faible précision des données altimétriques dont nous disposions, et non pas de l'approche conceptuelle.

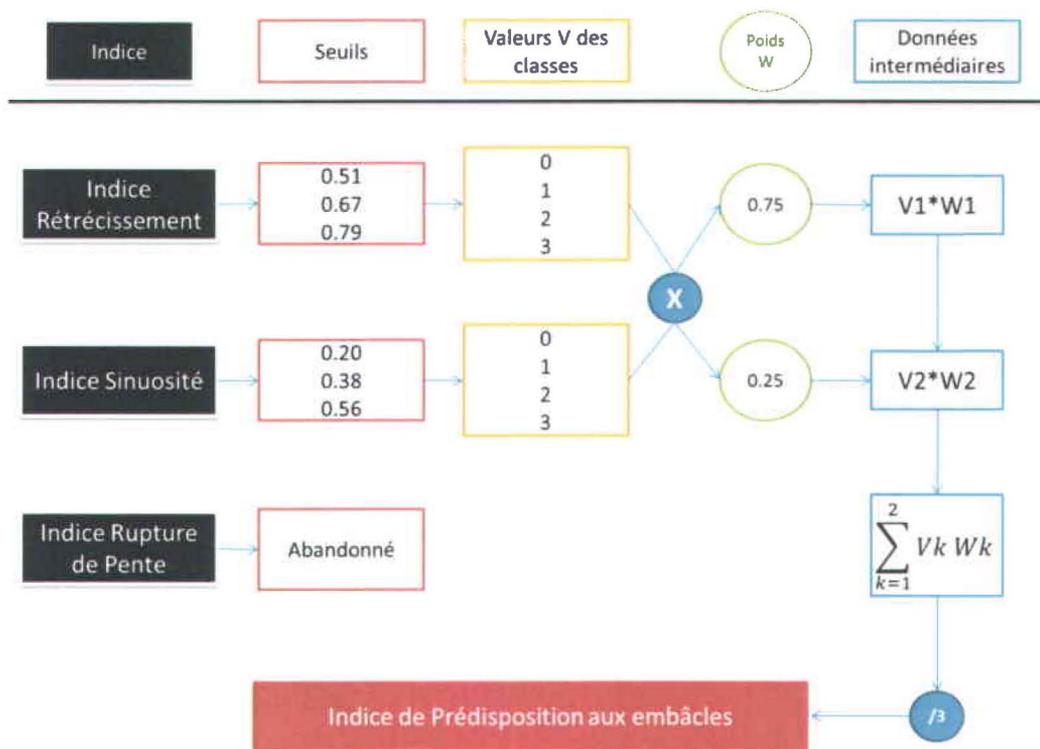


Figure 4.13 Représentation schématique de la construction de l'indice final de prédisposition aux embâcles



5. APPLICATION DU MODÈLE

Nous allons présenter dans ce chapitre les résultats de l'application du modèle précédemment développé sur chacune des trois rivières. Nous en étudierons les points forts, les points faibles et les possibles améliorations.

5.1 Retour sur l'indice de rétrécissement

Pour commencer, revenons rapidement sur l'indice de rétrécissement, qui inclut, en plus des rétrécissements classiques, les rétrécissements dus à des îles, des affluents ou encore des ponts. Nous avons alors jugé intéressant de regarder quels avaient été les effets de ces facteurs sur les résultats de la modélisation globale, dans le but de justifier au mieux les choix effectués précédemment dans l'étude.

En ce qui concerne les ponts, nous avons observé à partir de la Figure 5.1 que le choix de prendre en considération 50 % de la largeur du chenal en présence d'un pont permet d'obtenir un modèle réactif. En effet, dans ce cas précis, en absence de forte sinuosité ou d'un fort rétrécissement classique, les ponts apportent le poids suffisant pour détecter la prédisposition du chenal en conformité avec les observations historiques.

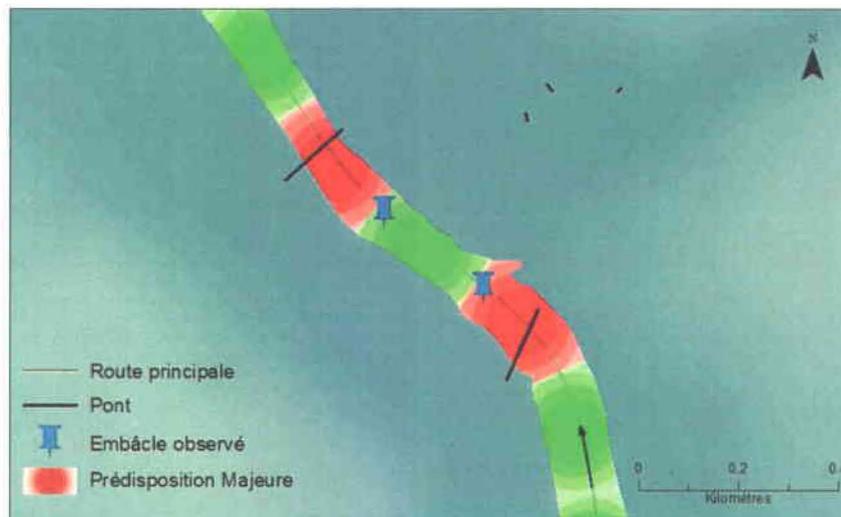


Figure 5.1 Illustration du bien-fondé de la prise en considération de 50 % de la largeur du chenal en présence d'un pont. Le modèle est réactif et détecte correctement la prédisposition des tronçons.

Il en va de même sur la Figure 5.2, qui illustre parfaitement l'effet d'un affluent moyennement large à l'embouchure sur le modèle, même si la sinuosité est ici un peu plus forte.

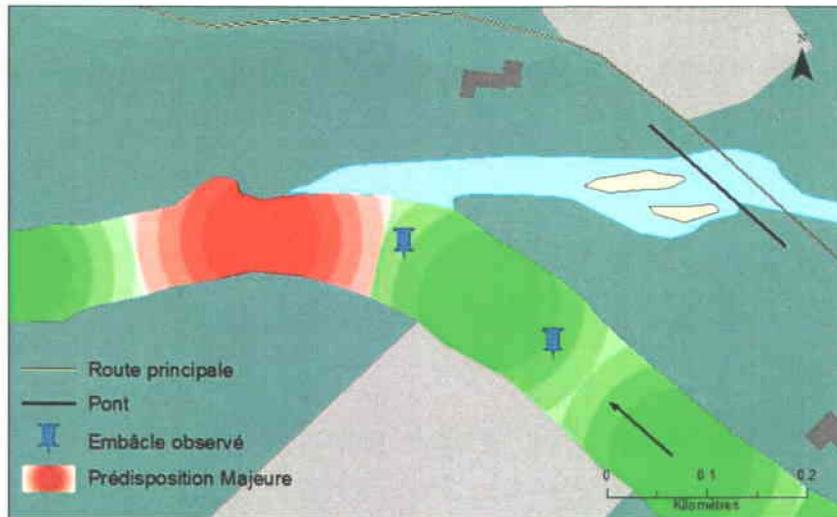


Figure 5.2 Illustration de l'effet d'un affluent moyennement large sur la prédisposition à l'embâcle (tronçon en rouge), et du bien-fondé de l'indice de rétrécissement sur le modèle

En dernier lieu, les îles semblent être bien représentées au sein de l'indice de rétrécissement puisqu'en l'absence d'autres facteurs la sensibilité de l'indice de prédisposition aux embâcles est satisfaisante (Figure 5.3).

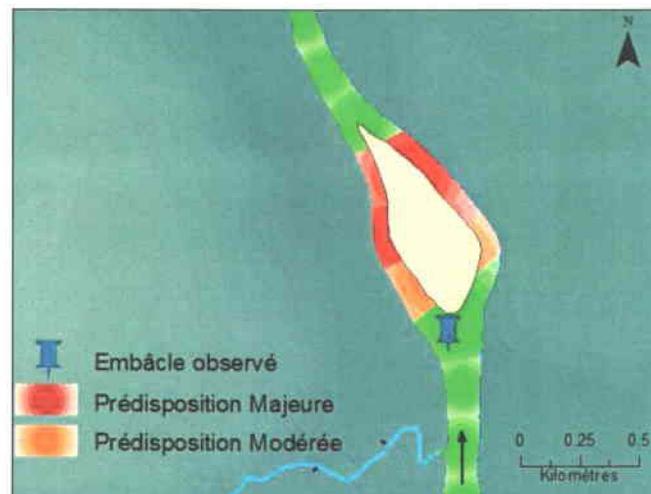


Figure 5.3 Illustration du bien-fondé de l'indice de rétrécissement pour la prédisposition à l'embâcle (tronçon en rouge) lors de la présence d'une île

Nous avons dans un deuxième temps généralisé ces observations sur l'ensemble de ces trois rivières. Ainsi le Tableau 5.1 présente le nombre de cas de ponts, de tributaires et d'îles qui sont liés à une prédisposition élevée (majeure ou modérée), ainsi qu'à une observation historique d'embâcle. Ce tableau fait très nettement ressortir que les ponts sont correctement représentés dans l'indice de rétrécissement, puisque ceux-ci sont présents dans 41 cas de prédisposition majeure, et pour 36 observations d'embâcles. En ajoutant les cas de prédisposition modérée (5), on arrive même à 100 % de succès.

Tableau 5.1 Nombre de cas de ponts, de tributaires et d'îles en présence d'une prédisposition élevée (majeure ou modérée), ou d'un embâcle observé

	Prédisposition Majeure	Prédisposition Modérée	Embâcle Observé
Pont	41	5	36
Tributaire	5	1	8
Ile	20	26	11

En ce qui concerne les tributaires, la réactivité de l'indice de rétrécissement semble suivre cette même tendance, même si moins de cas d'embâcles historiques sont observés (seulement 8). Pour les îles en revanche, le Tableau 5.1 laisse clairement entrevoir que celles-ci sont responsables d'un grand nombre d'erreurs positives. En effet on retrouve 20 cas de prédisposition majeure, 26 de prédisposition modérée, contre seulement 11 embâcles observés. La Figure 5.4 illustre justement un cas d'erreur positive.

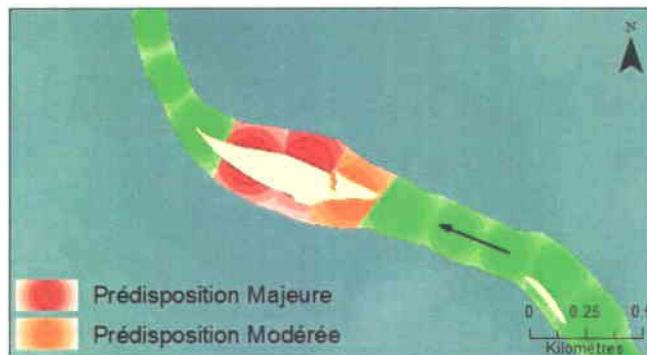


Figure 5.4 Illustration d'une erreur positive (pas d'embâcle dans la base de données) due à une île

Nous allons maintenant analyser plus en détails les résultats de la modélisation, afin de mettre clairement en évidence ses points forts et ses points faibles.

5.2 Produits cartographiques

Nous avons représenté dans cette section l'ensemble des résultats du modèle sur les Figure 5.5, Figure 5.6 et Figure 5.7. Nous avons volontairement choisi de grossir les sites de prédisposition majeure et modérée afin qu'ils apparaissent plus lisiblement sur ce format de feuille, relativement restreint. L'analyse des résultats est présentée à la section suivante.

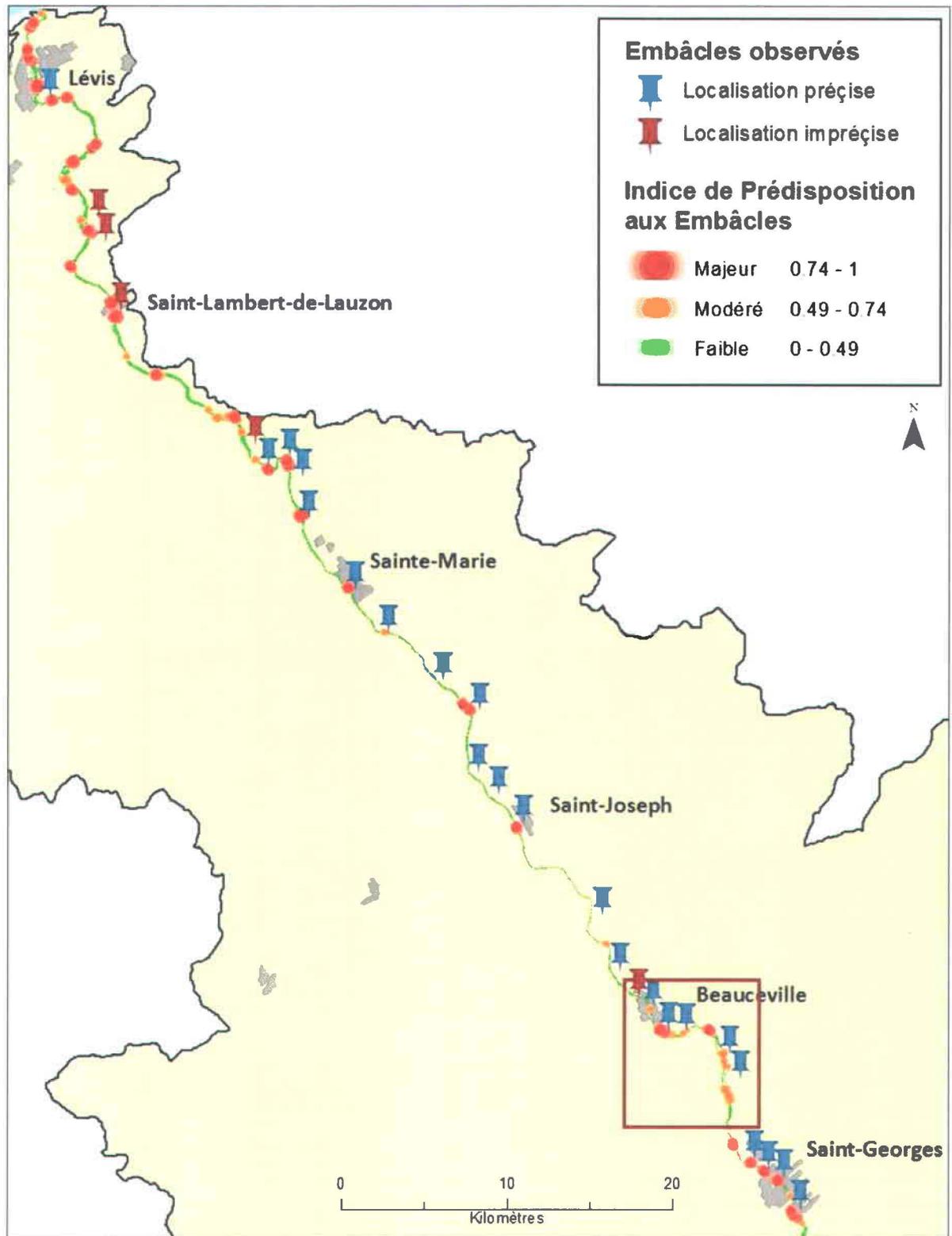


Figure 5.5 Résultat cartographique du modèle de prédiposition des rivières aux embâcles, rivière Chaudière. Le cadre rouge délimite la zone d'étude de la Figure 5.17

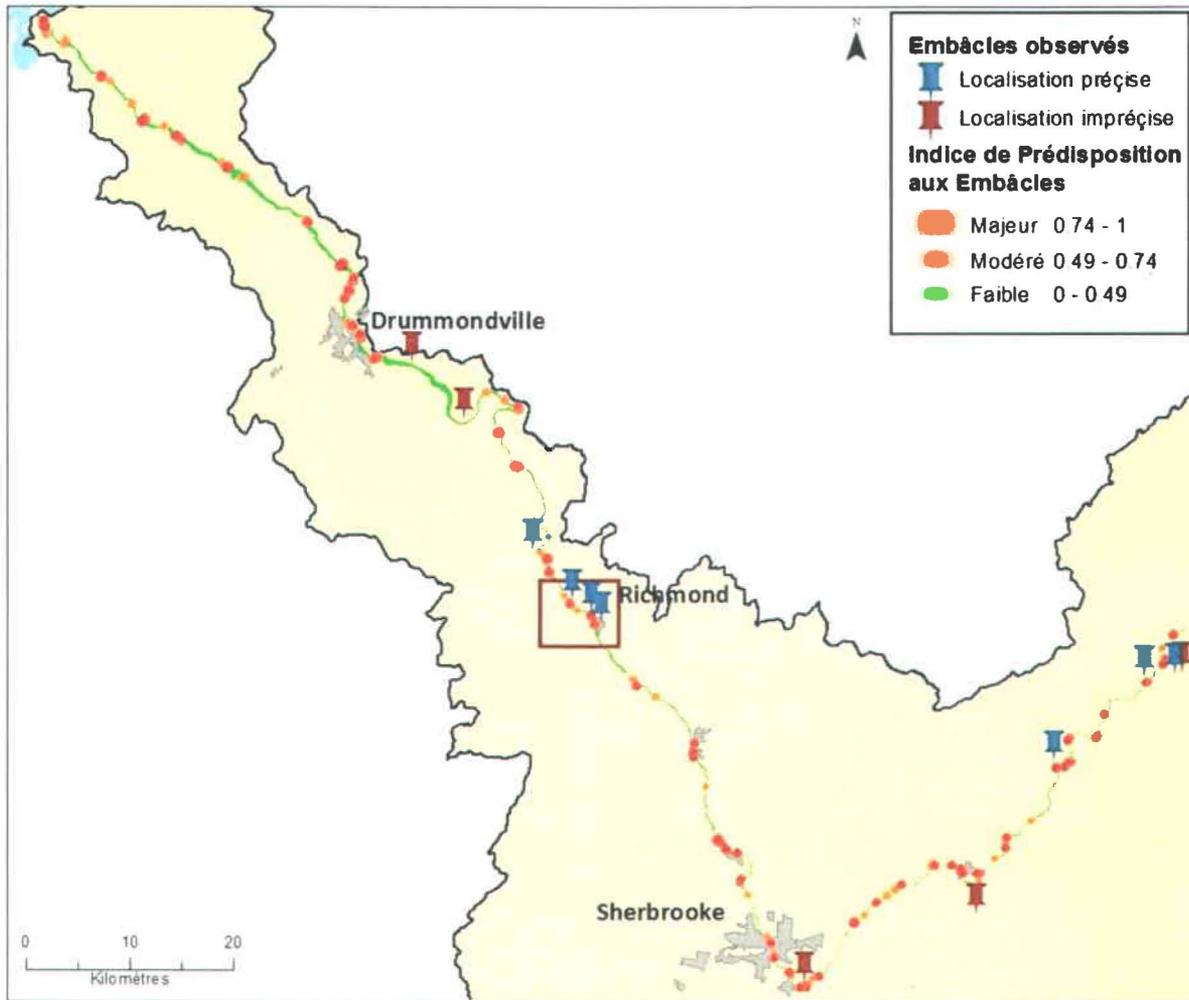


Figure 5.6 Résultat cartographique du modèle de prédiposition des rivières aux embâcles, rivière Saint-François. Le cadre rouge délimite la zone d'étude de la Figure 5.18

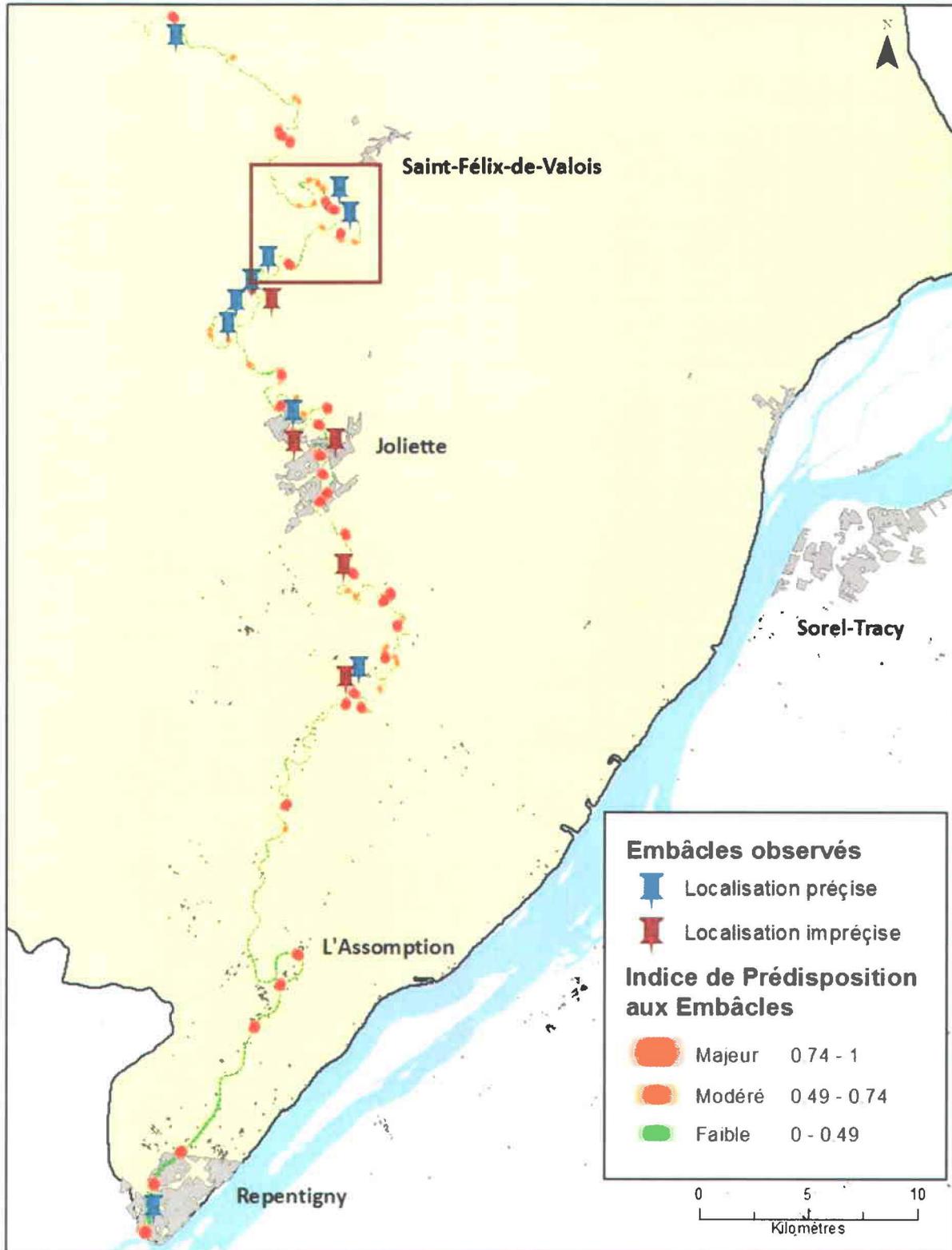


Figure 5.7 Résultat cartographique du modèle de prédiposition des rivières aux embâcles, rivière l'Assomption. Le cadre rouge délimite la zone d'étude de la Figure 5.19

5.3 Analyse complète des résultats

Nous avons ensuite compilé les résultats du modèle dans le tableau ci-dessous (Tableau 5.2). Nous avons pour cela mis en valeur la classe de risque à laquelle appartient chaque embâcle répertorié de façon précise. On s'aperçoit ainsi que pour la rivière Chaudière (Figure 5.5), pour laquelle on a le plus d'embâcles répertoriés, 12 sites d'embâcles sont classés en prédisposition majeure, 9 en prédisposition modérée et 9 en prédisposition faible. Sur les 30 sites d'embâcles de la rivière Chaudière, on peut donc considérer que 21 sont correctement classés, contre 9 mal classés.

Les rivières Saint-François (Figure 5.6) et l'Assomption (Figure 5.7) possèdent sensiblement moins d'embâcles répertoriés dans la base de données (7 pour la Saint-François, 10 pour l'Assomption). Notons que pour les deux rivières, aucun embâcle n'est classé en prédisposition modérée. Il en ressort néanmoins pour la rivière l'Assomption que le nombre d'embâcles bien classés (7) est très convenable au regard des 10 observations, d'autant plus que ces embâcles se trouvent tous dans la classe de prédisposition majeure. Pour la Saint-François, en revanche, les résultats sont moins reluisants. Avec seulement 3 sites d'embâcles correctement classés, c'est la seule rivière à présenter un pourcentage de réussite inférieur à 50 %. Néanmoins cette observation est à atténuer en considérant le peu de données d'embâcles disponibles pour cette rivière.

Tableau 5.2 Classement de prédisposition (majeur, modéré ou faible) des embâcles répertoriés précis

	Chaudière	Saint-François	L'Assomption
Total	30	7	10
Majeur	12	3	7
Modéré	9	0	0
Faible	9	4	3

Le Tableau 5.3 présente le détail des paramètres morphologiques rencontrés en présence d'une prédisposition majeure ou modérée. Nous remarquons alors que dans les cas des prédispositions majeures les paramètres les plus présents sont les ponts (10) et les méandres (8), loin devant les îles (5), les rétrécissements (4) et les tributaires (2). En y ajoutant les cas de prédisposition modérée le rapport s'équilibre entre les ponts (11), les îles (10), et les méandres (10).

Tableau 5.3 Détail des paramètres morphologiques rencontré en présence d'une prédisposition majeure ou modérée

Prédisposition	Rétrécissement	Pont	Ile	Tributaire	Méandre
Majeure	4	10	5	2	8
Modérée	2	1	5	0	2
Total	6	11	10	2	10

Nous avons également cherché à faire l'analyse inverse, en dénombrant les sites placés en prédisposition majeure alors qu'aucun embâcle historique n'était spécifié. Cette catégorie correspond aux erreurs positives, que nous avons répertorié dans le Tableau 5.4, et ce pour chaque rivière. Nous avons délibérément choisi de garder dans ce tableau uniquement les sites classés en prédisposition majeure, puisque dans la perspective d'une utilisation immédiate du modèle ce sont ces sites qui seront les plus déterminants pour la prise de mesures préventives.

Il convient une fois de plus de garder en mémoire qu'étant donné la courte période de temps que couvre la base de données (7 ans), ces taux pourraient être amenés à diminuer avec une base de données plus étendue.

Tableau 5.4 Taux d'erreurs positives (nombre de segments/nombre de segments total, et %) pour les trois rivières

Rivière	Chaudière	Saint-François	L'Assomption	Moyenne
Erreur Positive (Nb)	20/444	48/861	26/508	
Erreur Positive (%)	4.5	5.6	5.1	5.1

La première ligne du Tableau 5.4 représente le nombre de tronçons concernés par une erreur positive sur le nombre de tronçon total de la rivière. La deuxième ligne converti ce résultat en pourcentages. Nous y observons que la rivière Chaudière est la rivière qui possède le taux d'erreurs positives le plus bas, et que cela n'est sans doute pas sans lien avec le fait que ce soit aussi la rivière qui possède le plus d'observations historiques d'embâcles. Son taux (4.5 %) fait baisser le taux général des trois rivières (5.1 %).

Afin de mieux visualiser le contexte géomorphologique des erreurs positives et négatives, nous avons regroupé au Tableau 5.5 les paramètres présents sur le tronçon où se situent les dites erreurs.

Tableau 5.5 Contexte géomorphologique des erreurs positives et négatives

		Rétrécissement	Pont	Île	Tributaire	Méandre	Aucun	Total
Chaudière	Erreur Positive	12	2	3		3		20
	Erreur Négative				3	2	4	9
Saint-François	Erreur Positive	15	2	18	1	12		48
	Erreur Négative	1		2		1		4
L'Assomption	Erreur Positive	5	7			14		26
	Erreur Négative					3		3
Total	Erreur Positive	32	11	21	1	29		
	Erreur Négative	1		2	3	6	4	

Nous nous apercevons pour la rivière Chaudière que sur les 20 erreurs positives, 12 sont dues à des rétrécissements, les îles, les ponts et les méandres restant minoritaires dans cette catégorie, et les tributaires totalement absents. Notons d'ailleurs que sur les trois rivières un seul tributaire se situe dans la catégorie des erreurs positives. Le rapport de force entre les rétrécissements, les îles et les méandres s'équilibre en ce qui concerne les erreurs positives de la rivière Saint-François, avec respectivement 15, 18 et 12 tronçons. Enfin, le constat est totalement différent pour la rivière l'Assomption, pour laquelle les erreurs positives sont à dénombrer principalement pour les méandres (14) et les ponts (7). Au total on s'aperçoit que ce sont les rétrécissements et les méandres qui sont le plus présents sur les sites d'erreur positive (respectivement 32 et 29 fois). Viennent ensuite les îles (21), les ponts (9), et les tributaires (1). En regroupant les rétrécissements, les ponts, les îles et les tributaires pour reformer l'indice de rétrécissement, nous arrivons à un total de 65 sites, contre 29 pour l'indice de sinuosité.

Nous avons reporté ces deux sommes à la deuxième ligne du Tableau 5.6. Celui-ci propose un comparatif entre l'indice de rétrécissement et l'indice de sinuosité. La première ligne représente le nombre de tronçons classés correctement en prédisposition majeure ou modérée du fait de l'un ou l'autre des indices. Les chiffres présentés sur cette ligne ne sont pas exactement égaux à ceux que l'on peut retrouver dans le Tableau 5.2 du fait de l'influence parfois simultanée des deux indices. La troisième ligne présente de la même façon le nombre d'erreurs négatives. Enfin, les deux dernières lignes présentent des taux de réussite pour chacun des deux indices, en faisant le rapport des prédispositions fortes par les erreurs positives, et le rapport des prédispositions fortes par les erreurs négatives. Plus ce rapport est grand, plus l'indice présente des résultats satisfaisants.

Tableau 5.6 Contexte géomorphologique des erreurs positives et négatives

	Indice Rétrécissement	Indice Sinuosité
Prédisposition Majeure / Modérée (1)	29	10
Erreur Positive (2)	65	29
Erreur Négative (3)	6	6
(1)/(2)	0.45	0.34
(1)/(3)	4.83	1.67

Nous observons alors que pour le premier rapport, les deux indices donnent globalement des résultats similaires (0.45 pour l'indice de rétrécissement, 0.34 pour l'indice de sinuosité). En effet, si l'indice de rétrécissement est responsable de plus d'erreurs positives (65 contre 29 pour l'indice de sinuosité), il est aussi impliqué dans plus de tronçons correctement classés en prédisposition élevée (29 contre 10). En revanche, le deuxième rapport fait ressortir un ratio plus favorable pour l'indice de rétrécissement (4.83 contre 1.67 pour l'indice de sinuosité). En effet, cette fois, pour le même nombre de tronçons correctement classés, les erreurs négatives demeurent égales pour les deux indices (6). Ainsi, si on avait pu penser à la vue du Tableau 5.5 que le nombre conséquent d'erreurs positives et négatives pouvait être dû à une surestimation de l'importance de l'indice de rétrécissement dans le modèle, le Tableau 5.6 montre au contraire c'est celui qui donne les résultats les plus satisfaisants.

On observe enfin que le nombre d'erreurs positives est bien plus conséquent que le nombre d'erreurs négatives. Bien que ce dernier reste dépendant du nombre d'observations, il est toujours plus satisfaisant de voir les erreurs positives favorisées au détriment des erreurs négatives, qui sont plus lourdes de conséquences pour les populations.

Concernant les erreurs négatives, sur les 16 sites répertoriés 6 sont dus à la présence de méandres, 3 à la présence d'un tributaire, 2 à une île et 1 seul à un rétrécissement (Tableau 5.5). Avec aucun élément présent, les ponts sont absents de cette liste. Il est de plus intéressant de noter qu'une nouvelle catégorie fait ici son apparition, la catégorie où aucun des cinq paramètres n'est présent, mais où une erreur négative est cependant bien présente. Pour tenter d'éclaircir ce point, nous avons procédé à une analyse de photos (aériennes et terrain) des quatre sites en question (Figure 5.8 à Figure 5.16). Ces sites sont tous les quatre situés sur la rivière Chaudière, entre Beauceville et Sainte-Marie.

Nous remarquons pour les trois premiers sites la présence de bancs de sable, qui sont sans aucun doute une entrave supplémentaire au transport de la glace en mouvement. Cette donnée n'a pas pu être prise en compte dans le modèle car elle est dépendante de la profondeur du lit de la rivière. Ces bancs peuvent être visible ou non selon la hauteur d'eau, mais ils témoignent dans tous les cas d'une élévation du lit de la rivière (Figure 5.8 à Figure 5.14). Ce constat se remarque particulièrement à la Figure 5.8, où deux embâcles répertoriés imprécis sont dans ce même cas de figure.



Figure 5.8 Image aérienne illustrant un résultat d'erreur négative non expliqué par les données géomorphologiques (point bleu, site 1). Ajout de deux résultats similaires, pour des embâcles classés imprécis (points rouges, sites 1 et 2). Beauceville, rivière Chaudière (Source : Google Map)



Figure 5.9 Photographie des hauts fonds localisés au site 1 de la Figure 5.8. Beauceville, rivière Chaudière (Source : Google Map, septembre 2012)

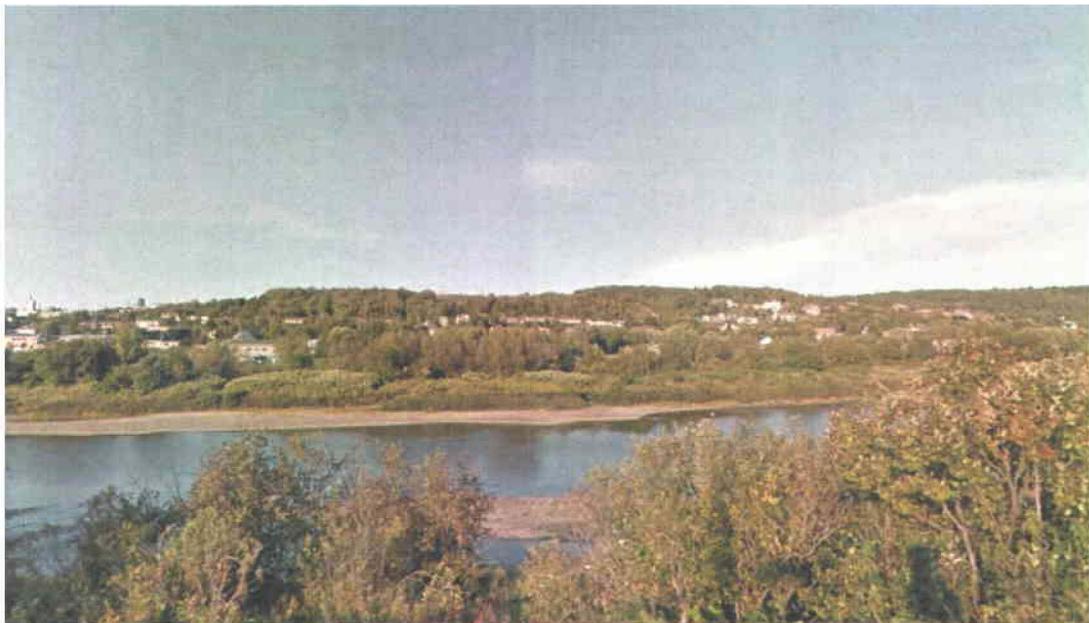


Figure 5.10 Photographie des bancs de sable localisés au site 2 de la Figure 5.8. Beauceville, rivière Chaudière (Source : Google Map, septembre 2012)



Figure 5.11 Image aérienne localisant un résultat d'erreur négative non expliqué par les données géomorphologiques (point bleu). Site : île Boisée, Beauceville, rivière Chaudière (Source : Google Map)



Figure 5.12 Photographie des hauts fonds (bancs de sable), au site de l'île Boisée. Beauceville, rivière Chaudière (Source : Google Map, septembre 2012)

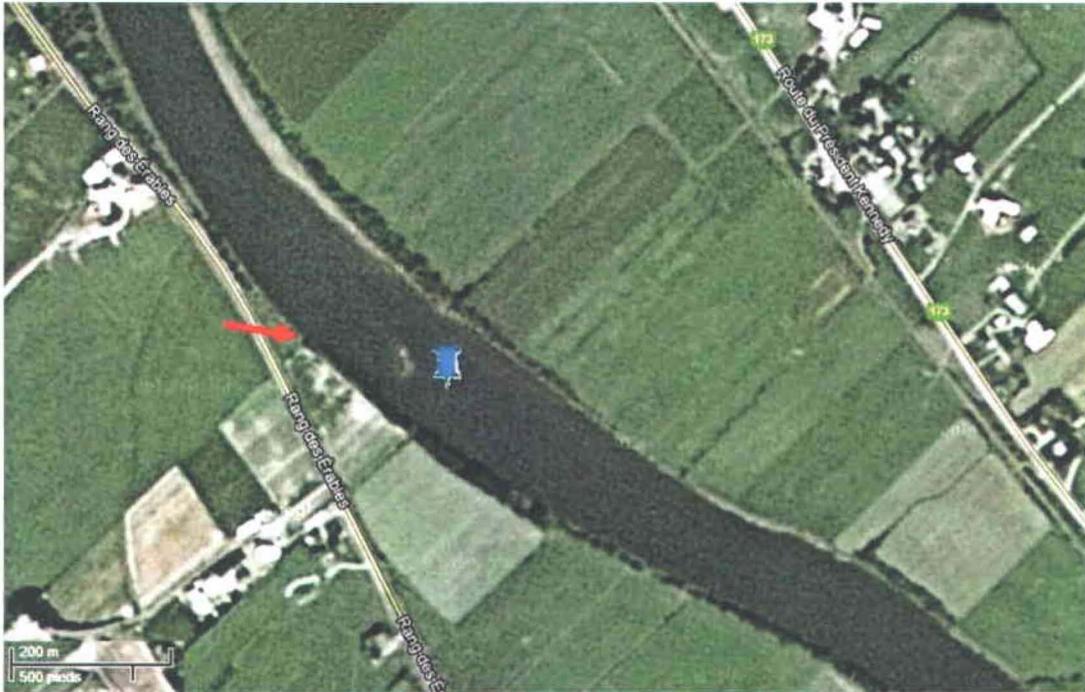


Figure 5.13 Image aérienne localisant un résultat d'erreur négative non expliqué par les données géomorphologiques (point bleu). Site : Saint-Joseph-de-Beauce, rivière Chaudière (Source : Google Map)



Figure 5.14 Photographie d'un banc de sable localisé à Saint-Joseph-de-Beauce, rivière Chaudière (Source : Google Map, août 2012)

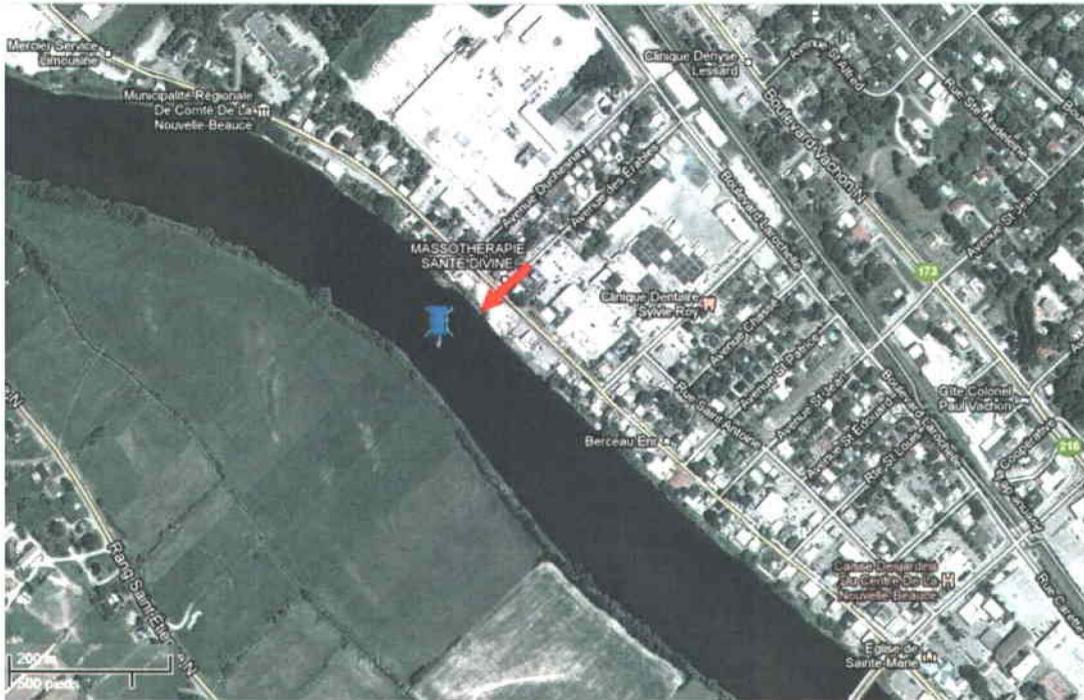


Figure 5.15 Image aérienne localisant un résultat d'erreur négative non expliqué par les données géomorphologiques (point bleu). Site : Sainte-Marie, rivière Chaudière (Source : Google Map)



Figure 5.16 Photographie du rétrécissement de la rivière Chaudière localisé à Sainte-Marie (Source : Google Map, août 2012)

Seules les images du quatrième site, localisé à Sainte-Marie (Figure 5.15 et Figure 5.16), n'apportent pas d'éléments supplémentaires à la présence d'une erreur négative. Mais le léger rétrécissement visible à la Figure 5.15 pourrait très bien être accompagné d'une diminution de la hauteur d'eau, qui ne serait pas pour autant visible sur la Figure 5.16 à la date de la prise de vue.

5.4 Analyse des résultats à l'échelle locale

Nous avons par la suite sélectionné pour chaque rivière des zones ciblées à plus petite échelle, sans changer la dimension des tronçons, afin d'avoir un meilleur aperçu de la finesse des résultats. Nous avons ainsi représenté le secteur de Beauceville pour la rivière Chaudière (Figure 5.17), le secteur de Richmond pour la rivière Saint-François (Figure 5.18), et le secteur de Saint-Mélanie (Figure 5.19), pour la rivière l'Assomption.

Concernant la rivière Chaudière, dans le secteur de Beauceville (Figure 5.17), nous nous apercevons que plusieurs sites ne sont pas autant réactifs que ce que l'on aurait pu s'attendre. Ces sites sont numérotés sur la carte de 1 à 7. Aux sites n°1 et 4, nous sommes dans le cas où le modèle a détecté une prédisposition (modérée pour les sites n°1, majeure pour le site n°4) alors qu'en réalité aucun embâcle n'a été observé (erreurs positives). Aux sites n°2, 3, 5 et 7, des prédispositions modérées ont été trouvées, assez justement puisque des embâcles y ont été observés. Néanmoins une prédisposition majeure aurait été plus satisfaisante au site n°5, où trois embâcles sont répertoriés. Enfin, des prédispositions modérées et fortes ont été trouvées au site n°6, ce qui au regard des embâcles observés (un précis et un imprécis), semble correct. Pour finir, il est intéressant de constater qu'aucune erreur négative n'apparaît, c'est-à-dire qu'aucun embâcle observé ne coïncide avec une prédisposition faible.

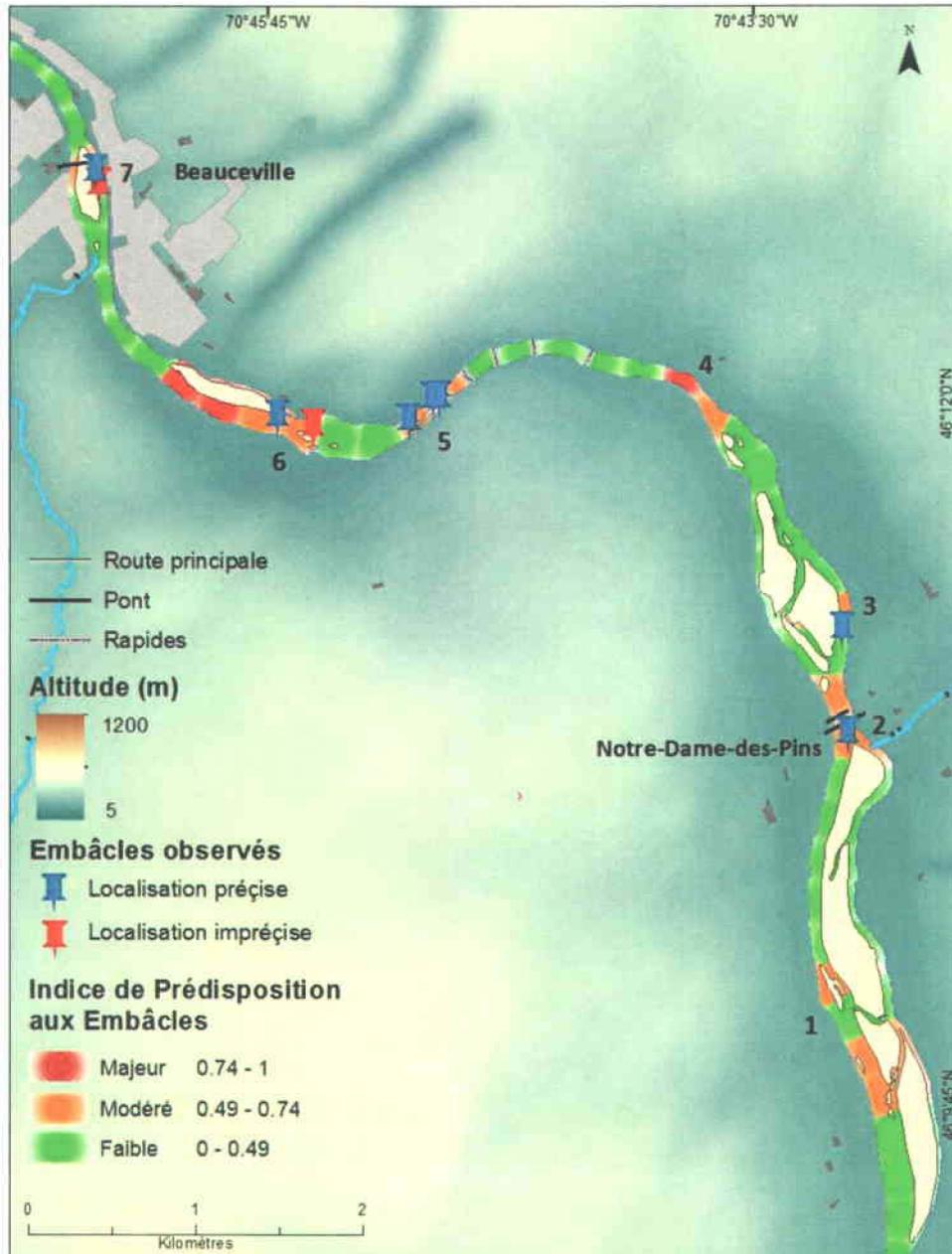


Figure 5.17 Résultat cartographique du modèle de prédiposition des rivières aux embâcles, secteur de Beauceville et Notre-Dame-des-Pins, rivière Chaudière

Pour la rivière Saint-François, dans le secteur de Richmond (Figure 5.18), le modèle a très bien réagit pour les sites n°1 et 5, où la rivière est traversée par des ponts. Une prédiposition forte est également trouvée au site n°2, même si pour celui-ci aucun embâcle n'y a été observé.

Il en va de même pour les sites n°4 et 6, où des prédispositions modérées ont été trouvées du fait de rétrécissements, portant le nombre d'erreurs positives à trois sur ce secteur. Enfin une erreur négative apparaît au site n°3, où le modèle n'a pas réagi suffisamment sensiblement à la présence d'une île.

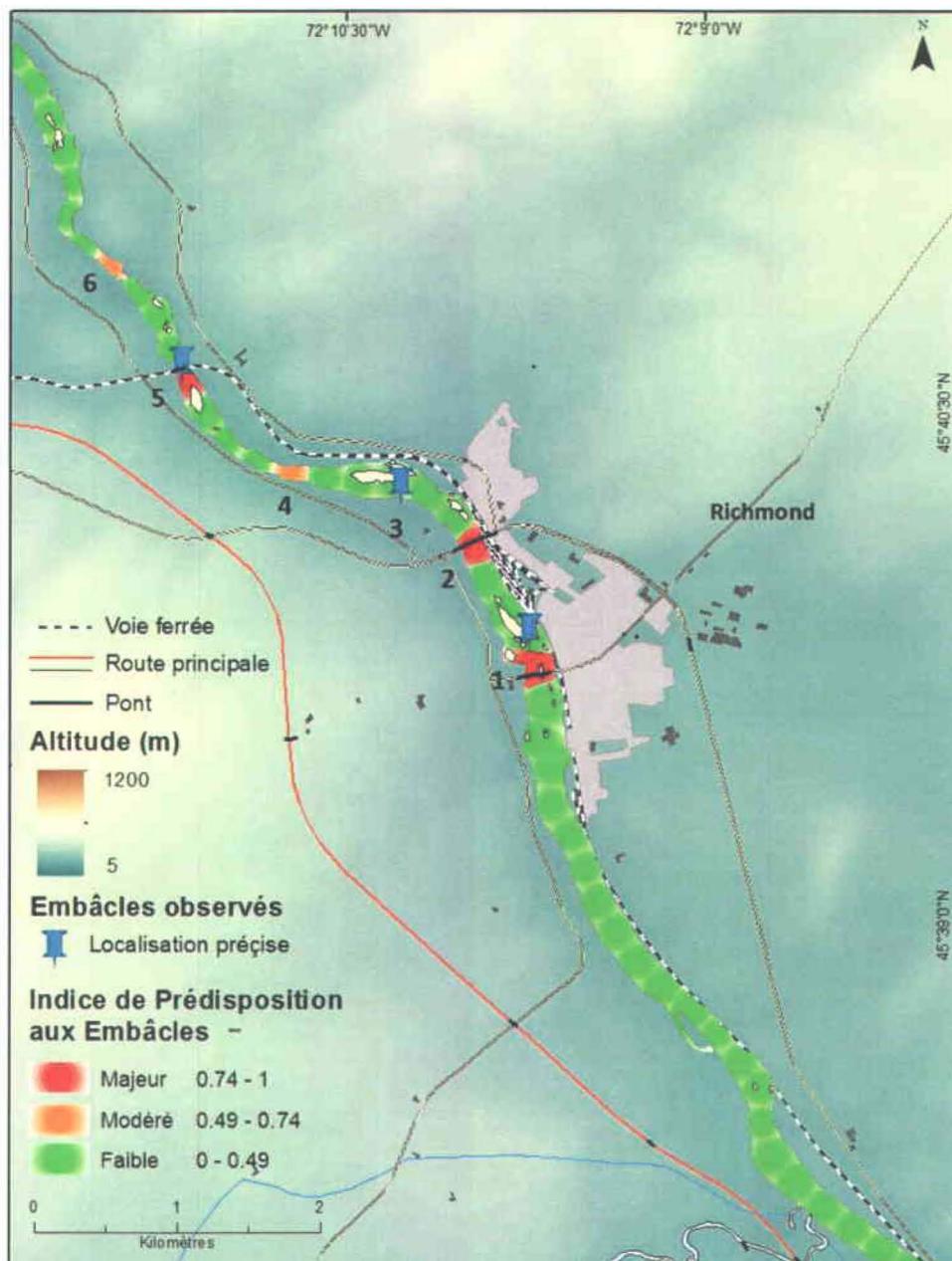


Figure 5.18 Résultat cartographique du modèle de prédisposition des rivières aux embâcles, secteur de Richmond, rivière Saint-François

Enfin la rivière l'Assomption, dans le secteur de Sainte-Mélanie (Figure 5.19), possède aussi son lot d'erreurs positives et d'erreurs négatives. Ainsi, si les sites n°1 et 4 ont tendance à être surévalués par le modèle, c'est l'inverse qui se produit au site n°5. Le modèle de prédisposition aux embâcles apporte des résultats satisfaisants aux sites n°2, 3, et 6, ou des prédispositions majeures ont été trouvées, du fait de sinuosités élevées (sites n°2 et 3), et de la présence d'un pont (site n°6).

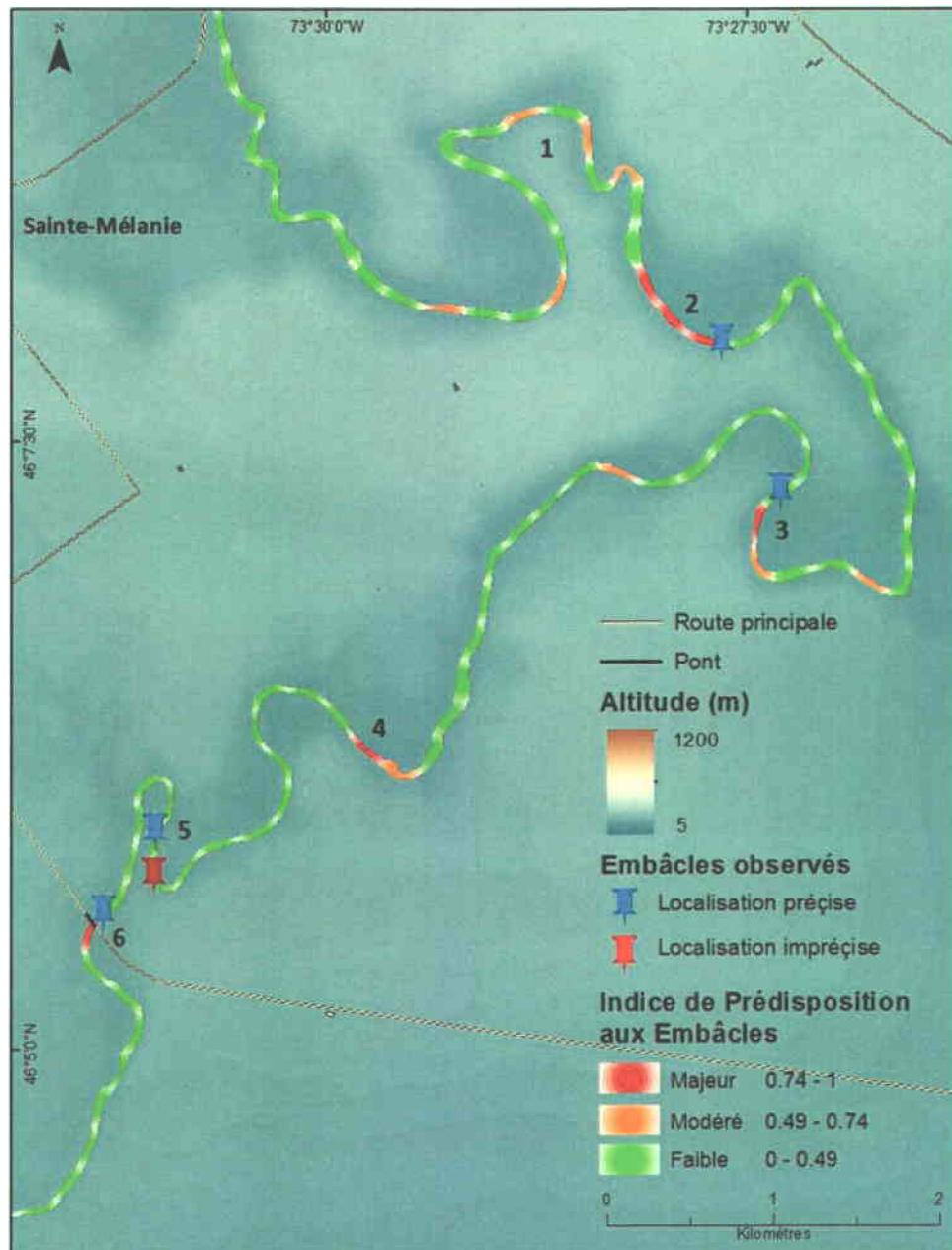


Figure 5.19 Résultat cartographique du modèle de prédisposition des rivières aux embâcles, secteur de Sainte-Mélanie, rivière l'Assomption

Les observations présentées dans cette section rejoignent les observations faites dans la partie précédente, à savoir que plusieurs sites semblent avoir été surévalués par le modèle (erreurs positives), du fait de rétrécissements naturels.

5.5 Discussion

Nous venons de présenter, à travers les sections 5.2, 5.3 et 5.4, les résultats du modèle à l'échelle du bassin versant et à une échelle locale, en prenant le soin de présenter un nombre conséquent d'illustrations et de tableaux chiffrés. Nous allons maintenant prendre le temps de tirer un premier bilan de ces résultats.

Ce modèle de prédisposition des rivières aux embâcles présente le net avantage, par rapport à ce que nous avons trouvé dans la littérature, de s'affranchir des données spécifiques à un site d'étude. La calibration simultanée qui a été effectuée sur les trois rivières aurait tout aussi bien pu être appliquée à un nombre plus étendu de cours d'eau. De plus celui-ci pourrait être a priori utilisable dans d'autres pays en proie à de tels problématiques, puisque toutes les données utilisées sont gratuites et que les régimes d'écoulement de l'eau sont semblables quel que soit le lieu.

En revanche, si les données d'entrée utilisées peuvent être trouvées n'importe où, les seuils choisis sont totalement spécifiques aux sites choisis. Les seuils seraient donc à recalculer de nouveau dès lors qu'une autre rivière serait intégrée dans la base de données historique d'embâcles. Or, beaucoup de rivières ne disposent pas de tels historiques, et il serait ainsi bien souvent difficile de connaître l'exactitude des résultats du modèle. Il serait alors nécessaire, afin de déterminer l'exportabilité du modèle, d'introduire des bases de données plus conséquentes qui intégreraient des sites d'études provenant de régions plus éloignées (et idéalement d'autres continents). En effet, l'influence de la base de données sur les embâcles est apparue prépondérante sur la création des seuils de chaque indice et sur leur pondération. Il en a été de même pour l'évaluation des résultats. Une plus large base de données nous aurait par exemple permis de valider l'exportabilité de l'indice de prédisposition aux embâcles en testant le modèle sur des sites d'embâcles n'ayant pas servi à la calibration du modèle. Cette opération aurait par exemple pu être réalisée en calibrant le modèle sur deux rivières et en testant le modèle sur la troisième. Néanmoins, dans le cas présent, cette méthodologie nous aurait fait perdre de précieuses données de localisation d'embâcle, ce que nous ne pouvions pas nous permettre compte tenu du nombre peu conséquent dont nous disposions à l'origine (47 sites).

Nous pourrions envisager au travers de ces observations un certain nombre d'améliorations à apporter au modèle pour améliorer la précision des détections :

- Nous pouvons regretter la non-intégration dans le modèle de l'indice de rupture de pente. En effet, un modèle à trois indices serait sans doute plus adéquat, tant la pente est un paramètre souvent cité dans la littérature. De plus, elle apporterait sans aucun doute un regard nouveau sur les coefficients du Tableau 5.6.
- Une autre amélioration consisterait à augmenter la base de données historique en y ajoutant de nouveaux événements d'embâcles. Même si nous avons utilisé au maximum les données disponibles au Ministère de la Sécurité Publique, nous n'avons pas exploré d'autres pistes comme la morphologie des berges ou la dendrochronologie des cicatrices glacielles. Ceux-ci pourraient également nous aider à distinguer les embâcles de formation des embâcles par cassure, distinction qui est souvent loin d'être évidente à la lecture d'un rapport d'évènement du MSP.
- Une troisième amélioration concerne les sites de production de glace. En effet nous avons volontairement écarté du modèle la problématique de la formation et de l'influence de la glace de frasil, tant les paramètres à prendre en compte étaient complexes. Néanmoins une étude plus poussée des zones dans lesquelles sont produits les radeaux de glace aiderait grandement à l'identification de sites prédisposés. L'identification de ces zones permettrait de faire ressortir plus concrètement la segmentation en séquences de lissage telles qu'évoquées par Bergeron *et al.* (2011) (cf. 2.3.7), qui est une alternative envisageable à la segmentation en tronçons de distance constante.

Néanmoins, afin de faciliter l'utilisation et l'exportation du modèle vers d'autres rivières, il faudrait envisager le développement de l'automatisation du processus menant à l'indice de prédisposition aux embâcles. En effet, lors du développement de ce modèle, certaines parties ont été automatisées, d'autres non, sans que la distinction ait bien été faite au fil des étapes.

D'une part, les traitements effectués avec FRAZIL demeurent semi-automatisés, puisque l'interface existait déjà. Les quelques difficultés qui ont persisté à ce niveau concernent les prétraitements nécessaires à la création du MNT, par exemple, mais surtout à la préparation du polygone du chenal pour son utilisation dans FRAZIL. En effet, la fonction *Reaches* n'accepte comme entrée qu'un polygone unique, au contraire des données hydrographiques du RHN, qui regroupaient une multitude de polygone de rivières et de lacs. Une première étape manuelle de

sélection de la rivière souhaitée a donc été nécessaire. Ces considérations restent bien sûr rattachées aux types de données et aux logiciels utilisés.

D'autre part, la partie du traitement menant aux différents indices (cf. Figure 4.8) a nécessité un grand nombre d'opérations différentes. Certaines ont été manuelles (sélection de largeur minimale d'un affluent au point de confluence, sélection des tronçons intersectés par des ponts), d'autres ont été automatisés dans Excel (calcul de la pente), ou dans Matlab (algorithme de l'indice de rétrécissement, calcul final de l'indice de prédisposition aux embâcles). Quoi qu'il en soit, toutes ces étapes pourraient assez facilement être automatisées directement dans un langage ArcObjet, et permettraient, outre un gain de temps certain, d'éviter des vas et viens fréquents entre différents logiciels.



6. CONCLUSION

Le modèle que nous avons réalisé sur la base d'une revue de littérature conséquente et de la construction d'une base de données d'observations historiques d'embâcles se révèle être satisfaisant, même si celui-ci ne traite pas de tous les aspects ni de tous les paramètres reliant le lit d'une rivière et les processus glaciels. Nous avons construit des indices sur la base de paramètres décrits dans la littérature comme favorables à la formation d'embâcles, trouvé des classes de valeurs, et avons ajusté les poids de manière à coller au mieux aux données de calibration. La prise en compte des îles, des affluents et des ponts, qui furent des aspects difficiles à traiter, donnent au final, entière satisfaction. En revanche, l'abandon de la rupture de pente serait certainement à revoir en présence d'une base de données plus conséquente, ou si la pente du lit de ces trois rivières venait à être disponible. Car c'est un facteur considéré comme ayant un impact majeur sur la formation des embâcles, et son introduction dans l'indice de prédisposition aux embâcles améliorerait sans doute la performance du modèle.

En effet, des tronçons demeurent mal classifiés. On en dénombre 94 concernés par des erreurs positives, et 16 par des erreurs négatives. Ces chiffres sont, au regard du nombre total de tronçons traités (1813), relativement bas, mais pourraient être améliorés. Toutefois, du point de vue des données que nous avons en notre possession et de leur précision, nous avons en tout cas atteint, à notre sens, la précision la plus élevée possible du modèle. En effet, nous avons tiré le maximum des données à notre disposition, car la précision de celle-ci, telles que relevées dans les journaux internes du Ministère de la Sécurité Publique, limitait celle des résultats de l'étude. Comme nous l'avons déjà dit dans la partie concernant les données de calibration et d'évaluation (cf. 3.4.4), le point de congestion du couvert de glace n'était pas assez souvent indiqué, au profit du point de rupture du couvert de glace, qui ici nous intéressait un peu moins. De plus, la présence de barrages sur le parcours de l'écoulement des glaces peut fausser dès le départ certains résultats. Ce sont des points de constriction du chenal volontairement créés par l'homme, et l'obstacle de nature anthropique en présence est censé être calculé pour ne pas créer d'embâcle et donc de danger supplémentaire pour les populations riveraines.

Au-delà de cette seule base de données historiques sur les embâcles, il y a beaucoup à tirer de cette collaboration avec le Ministère de la Sécurité Publique du Québec. En effet, ce modèle est d'ores et déjà opérationnel, pour ces trois rivières, afin de guider les instances gouvernementales, les organismes de bassins versants ou encore les municipalités à mieux gérer l'impact de l'hiver sur leurs citoyens. Nous pouvons en prendre pour preuve les

municipalités de la rivière Chaudière, qui ont déjà mis au point un système de surveillance de la rivière en fournissant des informations sur la hauteur de l'eau et sur le débit en plusieurs lieux, la plupart du temps au niveau des ponts et des barrages. Certaines de ces stations d'observations des glaces sont même dotées de caméras de surveillance, comme à Beauceville ou à Sainte-Marie par exemple. Même si le débit n'est pas connu à chacune de ses stations, ce système est un exemple à suivre en matière de surveillance des rivières (Système de Surveillance de la Rivière Chaudière, n.d.). La ville de Sainte-Marie est même allée plus loin puisqu'elle propose à ses habitants de recevoir un message d'alerte, par courriel, lorsque la hauteur de l'eau de la rivière devient menaçante (Système de Mesure du Niveau de la Rivière Chaudière, n.d.). Ce modèle assisterait de manière très pertinente les décideurs de ces municipalités, aussi bien les élus locaux que les directeurs des centres de sécurité civile et incendie. En plus de ce mémoire, un article en anglais décrivant cette étude sera également disponible pour les utilisateurs potentiels. Il sera prochainement soumis à la revue NHESS (*Natural Hazards and Earth System Sciences*) de l'EGU (*European Geosciences Union*).

De plus, pour que son utilisation par et pour les citoyens soit optimale, une future étude se devra de tenir en compte du relief des rives et du caractère habité ou non des zones inondables. La création de profils en travers de la rivière ou l'obtention des données d'urbanisation et d'occupation du territoire seraient autant de pistes à étudier sérieusement. Saint-Laurent (Saint-Laurent *et al.*, 2001) et Kusatov (Kusatov *et al.*, 2012) se rejoignent d'ailleurs sur ce point. Selon eux, les facteurs d'origine anthropique sont sources d'aggravation des inondations. Une future étude devrait également accorder une plus grande importance aux sous-bassins versants de la rivière principale, qui vont réagir différemment à de fortes précipitations. Pour rappel, plus le débit de sortie est soudainement élevé, plus la force s'appliquant sur le couvert de glace proche de l'embouchure est grande, et plus celui-ci a une chance de céder. Cette différence peut être due à leur morphologie (ronde ou elliptique), mais aussi à leur géologie (à travers les coefficients de ruissellement notamment).

À terme, ce modèle conceptuel pourrait être un entrant dans des modélisations futures qui tiendront aussi en compte des conditions hydrologiques et météorologiques, et qui permettront d'intégrer la composante temporelle en complément de la composante spatiale. L'intégration des données hydrologiques, et notamment des débits, permettrait également de mettre en rapprochement la prédisposition des embâcles avec le style fluvial du cours d'eau.

Cependant, un travail complémentaire serait sans doute nécessaire, concernant autant son automatisation que la calibration des seuils et des pondérations des indices à partir d'autres données historiques. Une automatisation rendrait son utilisation plus facile pour les utilisateurs potentiels, tandis qu'une nouvelle étude sur le modèle en lui-même permettrait de confirmer - ou d'infirmer le cas échéant - que les valeurs choisies pour les seuils et les pondérations étaient optimales.



7. RÉFÉRENCES

- Agence spatiale canadienne (Février 2009) Sécurité publique depuis l'espace : frazil et embâcles de glace de mer sur le fleuve St-Laurent. http://www.asc-csa.gc.ca/fra/programmes/igot/archive_0902.asp (Consulté le 22 février 2011)
- Aronoff S (Édit.) & Petrie G (2005) Remote Sensing for GIS Managers. *Chapter 8, Active sensors: Radar and Lidar*. ESRI Press. p 197-244.
- Banshchikova LS (2008) Monitoring of the Ice Jamming Process in Rivers Using Spatiotemporal Plots of the Water Levels. *Russian Meteorology and Hydrology* 33(9): 600-604. Doi: 10.3103/S1068373908090082
- Beltaos S (2008) Progress in the study and management of river ice jams. *Cold Regions Science and Technology* 51: 2-19.
- Beltaos S (2007) River Ice Breakup. *Chapter 6, Onset of Breakup*. Water Resources Publications. p 167-206.
- Beltaos S (2007) River Ice Breakup. *Chapter 5, Pre-Breakup Period*. Water Resources Publications. p 125-166.
- Beltaos S (2007) River ice breakup processes: recent advances and future directions. *Canadian Journal of Civil Engineering* 34: 703-716.
- Beltaos S, Miller L, Burrell BC & Sullivan D (2006) Formation of Breakup Ice Jams at Bridges. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(11): 1229-1236. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:11(1229)
- Beltaos S (1995) River Ice Jams. *Chapter 3, Ice Jam Processes*. Water Resources Publications. p 71-104.
- Bergeron NE, Buffin-Bélanger T & Dubé J (2011) Conceptual model of river ice types and dynamics along sedimentary links. *River Research and Applications*. Doi: 10.1002/rra.1479
- Boucher E, Bégin Y, Arseneault D (2009) Impacts of recurring ice jams on channel geometry and geomorphology in a small high-boreal watershed. *Geomorphology* 108 : 273–281. Doi: 10.1016/j.geomorph.2009.02.014
- Bourdon P, Buffin-Bélanger T (2008) *Stratégie québécoise des aires protégées et l'harnachement des hydrosystèmes: Les composantes exceptionnelles sont-elles vraiment mises en valeur?* Mémoire présenté dans le cadre des audiences publiques sur l'environnement pour le projet d'harnachement hydro-électrique de la rivière Romaine.
- Bravard JP & Petit F (2000) Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial. *Chapitres 7-8-9, Morphologie des lits mobiles, L'ajustement des lits fluviaux aux flux liquides et sédimentaires, Lits rocheux, canyons et rapides*. Armand Colin. p 111-159.
- Brice JC (1974) Evolution of Meander Loops. *Geological Society of America Bulletin* 85: 581-586.
- Comporeale C, Perona P, Porporato A, Ridolfi L (2005) On the long-term behavior of meandering rivers. *Water Resources Research* 41, W12403. DOI: 10.1029/2005WR004109

- Demers S, Buffin-Bélanger T, Roy AG (2011) Helical cell motions in a small ice-covered meander river reach. *River research and applications* 27: 1118–1125. DOI: 10.1002/rra.1451
- De Munck S, Gauthier Y, Bernier M, Legaré S (s.d.) River predisposition to ice jams: a geospatial model. *Natural Hazards and Earth System Sciences, Open Access Journal of the European Geosciences Union*.
- De Munck S, Gauthier Y, Bernier M, Poulin J & Chokmani K (2011) Preliminary development of a geospatial model to estimate a river channel's predisposition to ice jams. *CRIFE 16th Workshop on River Ice*. http://cripe.civil.ualberta.ca/Downloads/16th_Workshop/DeMunck-et-al-2011.pdf (Consulté le 26 septembre 2012)
- Dutton G (1999) Scale, Sinuosity and point selection in digital line generalization. *Cartography and Geographic Information Science* 26(1): 33-53.
- Environnement Canada Ministère de l'Environnement - Direction des eaux intérieures du Nouveau-Brunswick (2011) *Guide des glaces fluviales au Nouveau-Brunswick*. 2^e éd. <http://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Publications/GuideGlacesFluviales.pdf> (Consulté le 16 septembre 2012)
- Gauthier Y & Bernier M (2010) *Rapport de validation de l'algorithme ICEMAP pour la cartographie radar de la glace de rivière dans des conditions printanières*. Rapport de recherche confidentiel R-1167, Annexe au rapport de recherche R-1079.
- Gauthier Y, Paquet L-M, Gonzalez A & Bernier M (2008) Utilisation d'images radar et d'un SIG en appui à la prévision des crues hivernales. *Geomatica* 62(2): 273-285.
- Grand Québec, *La crainte des embâcles ne date pas d'hier*. <http://grandquebec.com/montreal-histoire/embacles/> (Consulté le 8 mars 2011)
- Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (2007) *Portrait Territorial, Lanaudière*. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/territoire/planification/planification-portraits.jsp> (Consulté le 15 février 2013)
- Hicks FE (1996) Hydraulic Flood Routing with Minimal Channel Data: Peace River, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering* 23(2) : 524-535.
- Jasek M (1995) *Ice Jam Simulation in Rivers with Islands*. 8th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers: 421-442.
- Kalinin VG (2008) Study of Spatial Distribution and Occurrence Frequency of Ice Jams in Rivers of the Votkinsk Reservoir Catchment. *Russian Meteorology and Hydrology* 33(12): 819-822. Doi: 10.3103/S1068373908120091
- Kusatov KI, Ammosov AP, Kornilova ZG & Shpakova RN (2012) Anthropogenic Factor of Ice Jamming and Spring Breakup Flooding on the Lena River. *Russian Meteorology and Hydrology* (37)6: 54-60. Doi: 10.3103/S1068373912060064
- Massie DD, White KD, Daly SF (2002) Application of neural networks to predict ice jam occurrence. *Cold Regions Science and Technology* 35: 115– 122.
- Ministère de la Sécurité Publique du Québec - Direction générale de la sécurité civile et de la sécurité incendie (2008) *Concepts de base en sécurité civile*. http://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite_civile/publications/concepts_base/concepts_base.pdf (Consulté le 1^{er} mai 2012)

- Mount JF (1995) California Rivers and Streams. The Conflict Between Fluvial Process and Land Use. *Chapitre 4 : The Shape of a River*. University of California Press. 376 p.
- Prowse TD, Bonsal BR, Duguay CR & Lacroix MP (2007) River-ice break-up/freeze-up: a review of climatic drivers, historical trends and future predictions. *Annals of Glaciology* 46: 443-451.
- Ressources Naturelles Canada (2009) *Provinces géologiques*. L'Atlas du Canada. <http://atlas.nrcan.gc.ca/auth/francais/maps/environment/geology/geologicalprovinces/1> (Consulté le 16 octobre 2012)
- Ressources Naturelles Canada (2008) *Un héritage géologique incomparable*. <http://www.nrcan.gc.ca/sciences-terre/produits-services/produits-cartographie/geoscape/quebec/5964> (Consulté le 16 octobre 2012)
- Rice S (1998) Which tributaries disrupt downstream fining along gravel-bed rivers? *Geomorphology* 22: 39-56.
- Saaty T (1990) How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research* 48: 9-26.
- Saint-Laurent D, Couture C, McNeil E & Baudouin Y (2001) Spatio-Temporal Analysis of Floods of the Saint-François Drainage Basin, Québec, Canada. *Environnements* 29(2): 73-89.
- Shen Hung Tao & Liu Lianwu (2003) Shokotsu River ice jam formation. *Cold Regions Science and Technology* 37: 35-49.
- Système de Surveillance de la Rivière Chaudière, Aperçu général des stations. http://www.ssrc.cobaric.qc.ca/publique_index.php (Consulté le 30 avril 2010)
- Système de Mesure du Niveau de la Rivière Chaudière, Ville de Sainte-Marie. <http://www.ville.sainte-marie.qc.ca/fr/niveau-riviere/niveau-riviere.php> (Consulté le 5 mai 2010)
- Thibault G (2008) *État de l'écosystème aquatique du bassin versant de la rivière Chaudière : faits saillants 2004-2006*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-53173-9 (PDF), 25 p.
- Université Laval (2010), *Le Quaternaire au Québec : une histoire de glaciations-déglaciations*. http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html (Consulté le 30 octobre 2010)
- Université McGill (1999) *Histoire naturelle du Québec*. http://redpath-museum.mcgill.ca/Qbp_fr/histoire_naturelle/fnat_hist.html (Consulté le 16 octobre 2012)
- Urroz GE, Schaefer J & Ettema R (1994) Bridge-pier location and ice conveyance in curved channels. *Journal of Cold Regions Engineering* 8(2): 66-72.
- US Army Corps of Engineers (USACE) (2002) *HEC-RAS, River Analysis System User's Manual (CPD-68) and Hydraulic Reference Manual (CPD-69)*. Hydrologic Engineering Center. 377 p.
- US Army Corps of Engineers (USACE), Engineering and Design (1994) *Ice Jam Flooding: Causes and Possible Solutions*. CECW-EH, EP 1110-2-11. 48 p.

White KD (2006) *Ice Jams in the United States*. US Army Corps of Engineers (USACE), Engineer Research and Development Center (ERDC). Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL). 13th International Conference on Cold Regions Engineering, Maine, United States.

White KD (2002) Review of prediction methods for breakup ice jams. *National Research Council (NRC) Research Press Web site*: 89-100. Doi: 10.1139/L02-047

Wuebben JL & Gagnon JJ (1995) *Ice Jams Flooding on the Missouri River Near Williston, North Dakota*. CRREL Report 95-19. 25 p.

Zufelt ZE (1988) Transverse Velocities and Ice Jamming Potential in a River Bend. *5th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers*: 193-207.