

RISQUE D'INONDATIONS PAR EMBÂCLES DE GLACES ET ESTIMATION DES DÉBITS HIVERNAUX DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES (VOLET A)

B. Morse et B. Turcotte
Université Laval

Mars 2018

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



Table des matières

Liste des Figures.....	5
Liste des Tableaux.....	8
Lexique.....	9
1. Introduction.....	10
2. Objectifs.....	11
3. Revue de la littérature.....	11
3.1 Modèles de simulation ou de prévision des débâcles.....	11
3.1.1 Modèles numériques.....	12
3.1.2 Modèles empiriques.....	13
3.2 Impact des changements climatiques sur le régime hivernal des rivières.....	14
4. Méthodologie / données.....	15
4.1 Développement des modèles de débâcles dynamiques.....	16
4.2 Estimation de la fréquence des débâcles dynamiques passées.....	20
4.3 Évaluation du risque d'inondation associé aux embâcles passés.....	23
4.4 Sélection de scénarios de changements climatiques.....	25
4.5 Estimation de la fréquence des débâcles dynamiques futures.....	27
4.6 Évaluation du risque d'inondation associé aux embâcles futurs.....	29
4.7 Calcul des bilans.....	29
5. Résultats.....	30
5.1 Rivière Montmorency.....	30
5.2 Rivière Sainte-Anne.....	32
5.3 Rivière L'Assomption.....	34
5.4 Rivière Châteauguay.....	37
5.5 Rivière Saint-François.....	40
5.6 Rivière Chaudière.....	43
5.7 Rivière Matapédia.....	46
5.8 Rivière Matane.....	49
5.9 Rivière Mistassini.....	52
5.10 Résultats globaux.....	55
6. Analyse et discussion.....	58
6.1 Retour sur l'approche.....	58

6.2	Limitations du projet.....	59
6.2.1	Limitations relatives à l'hydrologie	59
6.2.2	Limitations relatives aux conditions climatiques	59
6.2.3	Limitations relatives à la dynamique des glaces	60
6.2.4	Limitation relative à la morphologie	61
6.2.5	Limitations relatives à l'impact de l'homme	62
6.2.6	Limitation de la portée des résultats	62
6.3	Suite du projet	63
7.	Conclusion et recommandations	64
7.1	Résumé des résultats	64
7.2	Recommandations et adaptation	65
7.2.1	Adaptation spécifique	65
7.2.2	Adaptation générale dans le long terme	65
8.	Références	67
9.	Annexes 1.....	71
10.	Annexes 2.....	74

Liste des Figures

Figure 1. Diagrammes montrant l'interaction entre différents paramètres ou indicateurs qui affectent ou contrôlent (A) la résistance à la débâcle et (B) la mobilisation du couvert de glace. Les encadrés gris montrent des paramètres difficiles à quantifier, les encadrés noirs présentent les conditions météo et les encadrés pointillés montrent des paramètres spécifiques au niveau local (adapté de Turcotte et Morse, 2015).	12
Figure 2. Exemple de modèle de débâcles dynamiques pour la rivière Chaudière, avec les 6 points qui délimitent les zones des premiers mouvements de glaces (jaune, veille, embâcles possibles) et de mouvements de glaces plus généralisés (rouge, alerte, embâcles très probables).	18
Figure 3. Hydrogramme de l'hiver 1985-1986 sur la rivière Chaudière montrant plusieurs pics de crues. Le pic entouré en bleu est retiré manuellement du lot puisqu'il ne peut pas contribuer à générer des embâcles (voir critère 4 présenté précédemment), même si les zones rouges et jaunes étaient éventuellement recalibrées.	21
Figure 4. Pics de crues hivernales (gauche) et printanières (droite) pour la rivière Chaudière entre 1972 et 2000, suite à l'élimination de certains événements selon les critères 1 à 9.	21
Figure 5. Relation entre les dommages probables et le débit estimé à la station 050408 pour les années 2001 à 2014 sur la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond de Portneuf.	23
Figure 6. Diagramme montrant le rôle des intervenants du projet avec les données produites et utilisées.	26
Figure 7. (A) Hydrogramme hivernal historique de 1985-1986 et (B) hydrogramme simulé de 2055-2056 (H50_CM5_MPL_R41) sur la rivière Chaudière.	26
Figure 8. (A) Hydrogramme hivernal historique de 1985-1986 et (B) hydrogramme simulé de 2055-2056 (H50_CM5_MPL_R41) sur la rivière Montmorency.	27
Figure 9. Distribution hivernale cumulative des débâcles historiques et selon les trois niveaux d'intensité de scénarios de changements climatiques pour la rivière Châteauguay (A) et Matane (B).	28
Figure 10. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Montmorency (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus des connaissances de l'Université Laval sur cette rivière).	30
Figure 11. Distribution cumulative et hebdomadaire historique des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Montmorency.	31
Figure 12. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Ste-Anne (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus des connaissances de l'Université Laval sur cette rivière).	32
Figure 13. Distribution cumulative et hebdomadaire historique des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Ste-Anne à St-Raymond de Portneuf.	33
Figure 14. Modèle de débâcle dynamique de la rivière L'Assomption (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des	

fins de calibration des différents seuils (en plus des connaissances de l'Université Laval sur la physique de la débâcle en général sur ce type de cours d'eau).....	34
Figure 15. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière L'Assomption.....	35
Figure 16. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière L'Assomption, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à avril) à Joliette. La valeur en noire représente la donnée historique.....	36
Figure 17. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Châteauguay (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus des connaissances de l'Université Laval sur la physique de la débâcle en général sur ce type de cours d'eau).....	37
Figure 18. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Châteauguay.	38
Figure 19. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière Châteauguay, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à avril) à l'Aéroport de Montréal. La valeur en noire représente la donnée historique.	39
Figure 20. Modèle de débâcle dynamique de la rivière St-François (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus des connaissances de l'Université Laval sur la physique de la débâcle en général et d'observations occasionnelles).....	40
Figure 21. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière St-François.....	41
Figure 22. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière St-François, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à avril) à Drummondville. La valeur en noire représente la donnée historique.....	42
Figure 23. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Chaudière (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus des connaissances de l'Université Laval sur cette rivière depuis quelques années).	43
Figure 24. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Chaudière.....	44
Figure 25. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière Chaudière, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à avril) à Beauceville. La valeur en noire représente la donnée historique.	45
Figure 26. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Matapédia (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus d'information complémentaire et des connaissances de la physique de la débâcle sur ce type de cours d'eau).	46

Figure 27. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Matapédia.....	47
Figure 28. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière Matapédia, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à avril) à Causapscal. La valeur en noire représente la donnée historique.....	48
Figure 29. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Matapédia (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus d'information complémentaire et des connaissances de la physique de la débâcle sur ce type de cours d'eau).....	49
Figure 30. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Matane.....	50
Figure 31. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière Matane, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à mai) à St-Jean de Cherboung. La valeur en noire représente la donnée historique.....	51
Figure 32. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Mistassini (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus d'information complémentaire).....	52
Figure 33. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Mistassini.....	53
Figure 34. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière Mistassini, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à mai) à Dolbeau-Mistassini. La valeur en noire représente la donnée historique.....	54
Figure 35. Bilan des dommages moyens annuels (DMA) associés aux embâcles de glaces sur 7 rivières du Québec. L'index de couleur suit celui des graphiques précédents : jaune = réchauffement climatique limité, orange = réchauffement climatique moyen et rouge = réchauffement climatique important.....	55
Figure 36. Carte montrant les tendances du DMA associées aux inondations par les glaces dans un contexte de changements climatiques sur les bassins versants du projet. En rouge, une augmentation du DMA, en vert une diminution du DMA, en jaune un DMA relativement stable et en noir, une tendance encore inconnue. Les modèles, et les résultats présentés qui en découlent, ne sont applicables que sur une portion, significative ou limitée, de chaque bassin versant. Le lecteur peut faire référence au Tableau 4 pour obtenir plus de détail.....	57
Figure 37. Couverture de glace (% du chenal sur la longueur et la largeur) sur 10 km de la rivière Sainte-Anne en amont de Saint-Raymond en fonction des degrés-jours de gel cumulés (DJGC) pour trois débuts d'hiver consécutifs.....	60

Liste des Tableaux

Tableau 1. Rivières sélectionnées dans le cadre du projet et sources d'information permettant d'identifier des dates d'embâcles ou de débâcles dynamiques historiques.	15
Tableau 2. Liste des stations météorologiques et hydrométriques ayant fourni les données requises pour la calibration et l'utilisation du modèle de débâcles pour chaque rivière. Les stations en gras sont les stations de référence tandis que les autres stations sont utilisées pour combler les trous dans les données historiques à la station de référence, en utilisant une corrélation entre les données des stations.	17
Tableau 3. Facteur de pointe pour obtenir une estimation du débit maximal instantané lors des crues hivernales pour chaque rivière.....	18
Tableau 4. Zone d'applicabilité des différents modèles de débâcles dynamiques, pour chaque rivière du projet	19
Tableau 5. Résumé des hivers historiques et des mois d'hiver pour chaque rivière avec le nombre de crues.....	20
Tableau 6. Nombre de débâcles dynamiques historiques sur 29 hivers et fréquence résultante des événements.	22
Tableau 7. Coûts estimés des événements d'inondations par embâcle selon les zones jaune et rouge et ratio entre les dommages probables réels et les dommages probables potentiels, ces derniers étant basés sur une application des valeurs ou des relations empiriques aux pics de crues des périodes correspondantes (généralement de 1991 à 2014).....	24
Tableau 8. Estimation du dommage moyen annuel (DMA) historique des inondations par embâcles par rivière.....	24
Tableau 9. Nombres de pics de crues futures analysés (total de 9 scénarios de 29 hivers) et nombres de débâcles dynamiques retenues sur 7 rivières.	27
Tableau 10. Nombres de pics de crues analysés et nombres de débâcles dynamiques obtenues pour les scénarios CQM de références sur 5 rivières. La colonne de droite présente le facteur de division entre la fréquence des débâcles historiques (colonne de droite au Tableau 9) et la fréquence des débâcles pour les scénarios de la période de référence.	28
Tableau 11. Tableau résumant les tendances de la fréquence des débâcles dynamiques et du dommage moyen annuel associé aux inondations par embâcles de glaces dans un contexte de changement climatique sur 7 rivières du Québec. Les données historiques sont présentées en noir. Les 9 scénarios de changements climatiques sont ici regroupés en 3 niveaux d'intensité comparable (jaune = 2.1 à 3.0°C, orange = +3.3 à 4.2°C, rouge = +4.8 à 6.0°C). À la dernière colonne, la tendance rouge indique une augmentation du DMA, la tendance verte indique une réduction du DMA et le jaune indique une tendance mitigée du DMA, considérant les résultats et l'incertitude.....	56

Lexique

Certaines expressions scientifiques, ou terminologies plus ou moins techniques, reviennent fréquemment dans ce rapport. Voici une brève définition de plusieurs termes importants :

- **Crue** : Augmentation du débit d'un cours d'eau suite à une augmentation du ruissellement (pluie et/ou fonte de neige)
- **Débit** : Quantité d'eau passant à un endroit donné pendant une certaine période. Dans le présent rapport, la quantité est exprimée en volume (m^3) tandis que la période est très courte, soit une seconde (s). Le débit est donc exprimé en m^3 par s, ou m^3/s .
- **Débâcle** : La débâcle se définit comme une période durant laquelle les glaces de rivière se dégradent et sont emportées par le courant. La débâcle débute donc avec les premiers signes de fonte et se termine lorsque les glaces sont évacuées d'un bassin versant. Cette période peut durer quelques heures à plusieurs semaines, selon les conditions météorologiques et les caractéristiques du bassin. La débâcle peut être graduelle et thermique, ou soudaine et dynamique. Les embâcles sont majoritairement associés au deuxième scénario de débâcle.
- **Embâcles** : Les embâcles sont des accumulations de glaces qui se forment dans les cours d'eau. Les embâcles les plus connus sont ceux qui sont associés à la débâcle. Un embâcle peut occasionner un rehaussement significatif du niveau d'eau et il peut mesurer, dans le sens de l'écoulement, quelques mètres à plusieurs kilomètres, la longueur étant un mauvais indicateur de son impact sur les niveaux d'eau puisque l'impact dépend également de la morphologie des cours d'eau et du débit qui prévaut.
- **Pied de l'embâcle** : Partie aval de l'embâcle qui initie sa formation vers l'amont et qui repose sur un obstacle quelconque : couvert de glace intact, rétrécissement, structure hydraulique, rochers émergents, etc.
- **Tête de l'embâcle** : Partie amont de l'embâcle qui reçoit les glaces à la dérive et qui a moins d'impact sur les niveaux d'eau.
- **Cisaillement** : Le cisaillement est une force parallèle à une surface qui se compare à un frottement. C'est le cisaillement entre la vitesse du courant et le couvert de glace immobile qui détermine souvent le moment où la mobilisation du couvert de glace survient lors de la débâcle.
- **Facteur de pointe** : Ce facteur est le rapport entre le débit maximal d'une crue (estimé à un pas de temps de 15 minutes, correspondant à la fréquence de mesures du niveau d'eau par les instances gouvernementales) et le débit moyen de la journée. Dans les petits cours d'eau, les crues sont très courtes et le facteur de pointe peut être supérieur à 10. Dans les cours d'eau plus importants, les crues sont beaucoup plus longues (hydrogramme plus arrondi) et le facteur de pointe peut être légèrement supérieur à 1 (il est toujours supérieur à 1 par définition).
- **Hydrogramme** : Graphique présentant le débit estimé en fonction du temps.

1. Introduction

Les rivières du sud et du centre du Québec se couvrent historiquement de glace entre la mi-novembre et la mi-avril. Pendant ces 5 mois d'hiver, les conditions d'écoulement et les conditions de ruissellement sont largement affectées par différents types de couverts de glace. La présence de glace stationnaire provoque un rehaussement des niveaux d'eau comparativement aux situations à l'eau libre pour un même débit et le débit lui-même devient particulièrement difficile à estimer. Si ce couvert stationnaire est un embâcle, accumulations de plaques et de blocs de glace, le rehaussement peut atteindre plusieurs mètres. Il est donc fréquent que des embâcles génèrent des inondations et ce, à des débits qui sont souvent largement sous le seuil de l'inondation à l'eau libre. Aussi, les inondations par embâcles peuvent survenir très rapidement et avec peu ou pas de préavis. Des citoyens de la Ville de Québec ont pu corroborer ce fait le 12 janvier 2018.

Les embâcles de glaces sont relativement méconnus au Québec et ce malgré leur fréquence. À titre indicatif, les ingénieurs, hydrologues et géographes qui graduent des universités du Québec n'ont souvent que très peu ou simplement pas reçu de formation sur la dynamique hivernale des cours d'eau. Les ouvrages de référence utilisés pour l'enseignement proviennent souvent des États-Unis ou de la France, où l'hiver est beaucoup moins dominant durant l'année et sur le territoire. Aussi, les zones inondables au Québec ne considèrent souvent pas la probabilité des débordements associés aux embâcles. Dans les secteurs où ils sont fréquents, seule une simple enveloppe des zones historiquement inondées par les embâcles est parfois intégrée aux cartes. Enfin, l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie des cours d'eau du Québec est étudié depuis plusieurs années, mais la plupart des études excluent la période hivernale.

Ce manque de considération pour la dynamique hivernale de nos cours d'eau s'explique de plusieurs manières. Il semble premièrement que les conditions de glaces soient trop souvent considérées comme étant exceptionnelles alors que l'hiver survient chaque année. Deuxièmement, le manque de connaissances combiné à l'aspect apparemment chaotique et imprévisible des conditions de glace fait que l'hiver est difficile à intégrer dans les projets et les études. En effet, les modèles qui tentent de simuler ou de prévoir des conditions hydrologiques ou hydrodynamiques hivernales produisent un plus haut taux d'erreur que les modèles qui simulent ou prévoient des conditions sans glace. Ce résultat est normal puisque la simulation des conditions hivernales dépend de beaucoup plus de paramètres que la simulation des conditions à l'eau libre. Cette situation est le résultat d'un troisième point : en hiver il fait froid et les conditions sont peu invitantes ou carrément dangereuses pour effectuer des mesures sur le terrain qui permettraient, comme premier pas et avant tout objectif de simulation, de simplement comprendre ce qui se passe sur nos cours d'eau.

Les inondations par les glaces sont communes en régions tempérées ou nordiques (ex. : Beltaos, 1995), et il est normal de s'y intéresser, au moins proportionnellement aux inondations à l'eau libre. Le présent projet fait donc deux pas vers une inclusion de l'hiver dans l'étude des cours d'eau au Québec. Non seulement tente-t-il de simuler des processus complexes de débâcles des glaces, mais également de les projeter dans l'avenir pour mieux anticiper l'impact des changements climatiques.

L'équipe de l'Université Laval cumule plusieurs années d'expérience dans l'étude des glaces de rivière. Entreprendre le présent projet représentait une étape logique pour que le Québec puisse développer et entretenir une plus grande expertise sur l'aspect hivernal de ses cours d'eau.

2. Objectifs

Le présent rapport porte sur le volet A d'un projet global sur l'hydrologie hivernale des cours d'eau du Québec et qui incluait originalement un Volet B portant sur l'estimation des débits hivernaux. Ce dernier projet a finalement été complété en parallèle et ce, avec le financement provenant du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDELCC). Ce volet B a été séparé en deux sous projets et les résultats sont présentés dans Turcotte et Morse (2017 et 2018).

L'objectif principal du Volet A, sujet du présent rapport, est d'estimer l'évolution du risque d'inondations par embâcles de glaces dans un contexte de changements climatiques sur les cours d'eau du Québec. Un deuxième objectif du projet est d'entrevoir certaines mesures d'adaptation pour faire face au risque d'inondations par les glaces.

Le risque inclut une composante fréquentielle et une composante de vulnérabilité. Comme premier projet de recherche sur le sujet, la présente étude considère que la vulnérabilité est stationnaire dans le temps. Cette approche est peu représentative de l'évolution de la société, mais elle est fort utile pour bien comparer le passé et l'avenir et pour bien orienter l'adaptation. C'est plutôt l'évolution de la fréquence qui représente le principal défi de ce projet puisqu'il faut préalablement estimer la fréquence présente (passée) des inondations par embâcles. Pour ce projet, la période historique, ou de référence, est associée aux hivers 1972 à 2000 (29 hivers) alors que la période future est associée aux hivers 2042 à 2070 (également 29 hivers).

3. Revue de la littérature

Pour simuler l'impact des changements climatiques sur le risque d'inondations par embâcles de glaces, il faut premièrement pouvoir simuler les débâcles qui causent ces embâcles. Cette revue de littérature porte donc sur deux sujets complémentaires :

- La simulation des débâcles qui peuvent générer des inondations
- L'impact des changements climatiques sur le régime hivernal des cours d'eau

3.1 Modèles de simulation ou de prévision des débâcles

La nature et l'intensité d'une débâcle des glaces de rivière sont le résultat d'une inversion entre les forces de résistances du couvert de glace (dominant pendant la majeure partie de l'hiver) et les forces de mobilisation du couvert de glace (dominante lorsque les glaces se mettent en mouvement). Avec adaptation d'une figure publiée dans Turcotte et Morse (2015), les Figures 1A et 1B présentent respectivement les facteurs qui affectent la résistance du couvert de glace et les facteurs qui affectent la mobilisation du couvert de glace. Les encadrés blancs représentent des données, paramètres ou conditions (indicateurs) relativement faciles à confirmer, obtenir ou estimer. Les encadrés gris représentent des indicateurs difficiles à confirmer, obtenir ou estimer tandis que les encadrés noirs représentent des indicateurs météorologiques, qui affectent tous les autres paramètres en aval sauf ceux attribuables aux caractéristiques physiques du bassin versant ou du chenal. Enfin, les encadrés en pointillés représentent des indicateurs qui varient significativement d'une section de rivière à l'autre ou même à un niveau encore plus local.

3.1.1 Modèles numériques

Certains modèles numériques s'attaquent à plusieurs de ces paramètres et tentent de simuler spécifiquement les embâcles en plus des conditions d'écoulement de l'eau dans un environnement 1D ou 2D. Carson et coll. (2011) présentent sommairement une revue de ces modèles et comparent leurs résultats pour trois différents cas de simulation, avec plus ou moins de complexité et de disponibilité d'information de terrain.

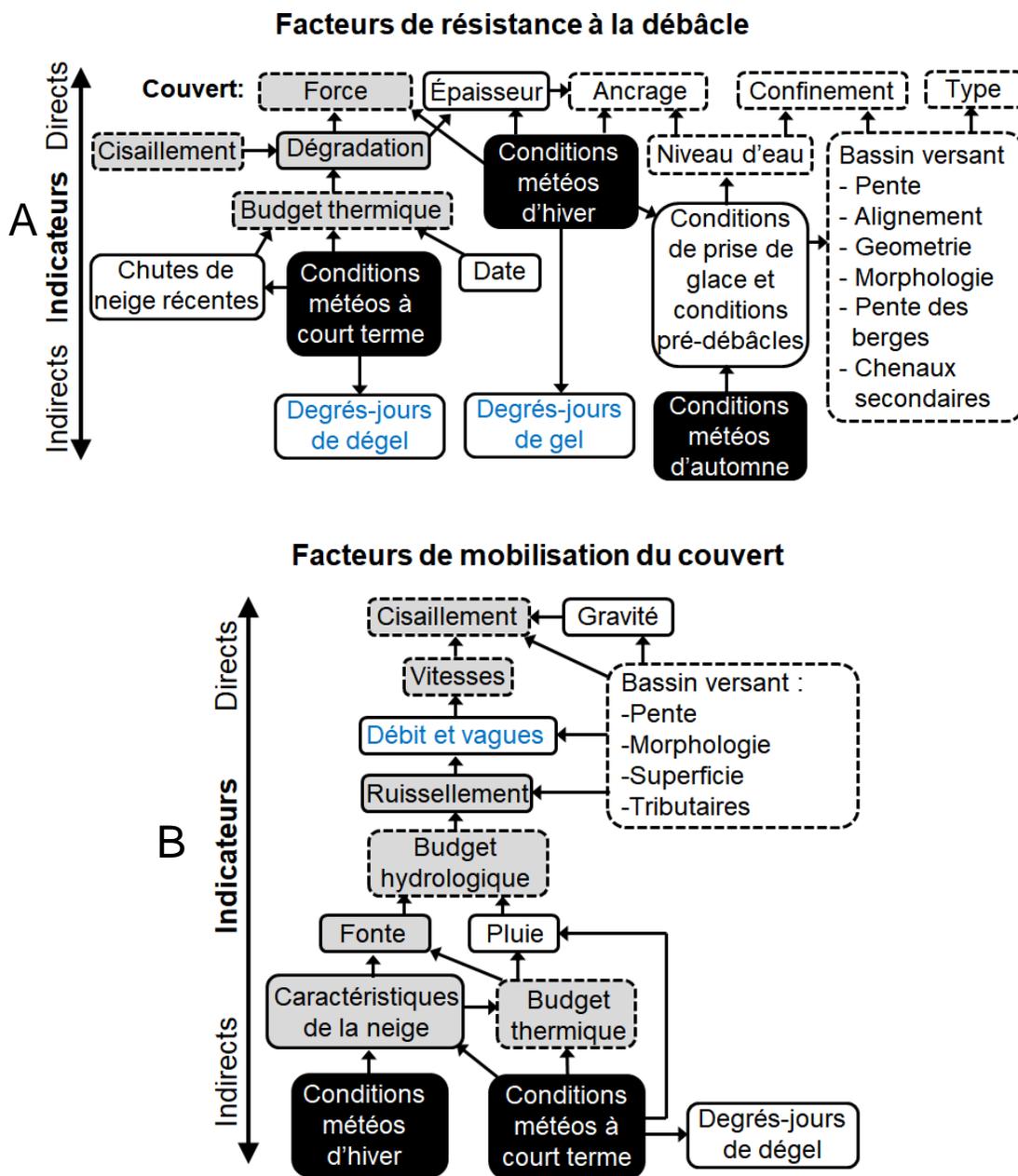


Figure 1. Diagrammes montrant l'interaction entre différents paramètres ou indicateurs qui affectent ou contrôlent (A) la résistance à la débâcle et (B) la mobilisation du couvert de glace. Les encadrés gris montrent des paramètres difficiles à quantifier, les encadrés noirs présentent les conditions météo et les encadrés pointillés montrent des paramètres spécifiques au niveau local (adapté de Turcotte et Morse, 2015).

Une majorité de ces modèles numériques est plutôt utile en conditions statiques, c'est-à-dire qu'ils peuvent simuler les forces dans un embâcle en condition d'équilibre et sous un débit d'eau constant, sans avoir à simuler les processus dynamiques de transport, d'interception, de congestion et d'empilement des glaces de différentes tailles et caractéristiques. C'est le cas du modèle HEC RAS, très connu pour les simulations à l'eau libre, mais qui peut également être utile pour reproduire un embâcle, moyennant la calibration de plusieurs paramètres qui demandent des informations de terrain, incluant la très importante localisation du pied de l'embâcle (la localisation du pied, ou partie aval, représente un élément dominant permettant de simuler les niveaux d'eau le long d'un tronçon de rivière affecté par la glace).

D'autres modèles numériques plus complexes comme CRISSP2D (Shen et coll., 2000; Liu et coll., 2006), peuvent simuler les processus dynamiques incluant la congestion, ce qui leur permet parfois d'établir eux-mêmes la localisation du pied d'un embâcle. Par contre, malgré leur plus grande autonomie, ce sont des modèles complexes qui doivent être alimentés de nombreux paramètres d'entrée et parfois difficilement quantifiables, incluant le volume de glace qui formera potentiellement un embâcle et le taux de dégradation ou de résistance du couvert de glace.

Ces modèles, toujours en développement, constituent des outils possibles pour étudier l'impact des changements climatiques, comme en fait foi le travail initié par l'Université de la Saskatchewan (Das et coll., 2017). Toutefois, il est important de mentionner que l'interdépendance entre les paramètres d'entrée des modèles hydrodynamiques qui incluent la simulation des embâcles n'a pas encore été étudiée à ce jour et que cette approche, hautement demandante en temps et en données, n'a pas prouvé sa représentativité et son applicabilité à des situations concrètes.

3.1.2 Modèles empiriques

Une autre avenue pour étudier la débâcle et les embâcles est l'utilisation ou le développement de modèles empiriques qui simplifient les relations physiques dictant la formation des embâcles. Ils peuvent être calibrés pour un site en particulier, pour de larges distances ou même pour plusieurs cours d'eau de caractéristiques comparables.

Ces modèles tentent normalement d'utiliser les paramètres qui sont les plus souvent associés à la présence ou à l'absence d'embâcles ou d'inondations par embâcles, d'une année à l'autre. Le choix d'un ou de plusieurs paramètres permet de déterminer, avec plus ou moins de succès ou de précision, le moment d'une débâcle. Il est évident que l'utilisation d'indicateurs facilement disponibles et relativement versatiles doit également tenir compte de leur influence directe ou indirecte sur la dynamique des glaces (Figure 1).

Au fil des décennies passées, plusieurs scientifiques et ingénieurs ont développé des modèles empiriques plus ou moins complexes pour simuler et prévoir la date et l'intensité probable de la débâcle printanière. Il s'agissait souvent d'une réponse à une demande des services de sécurité civile suite à un événement majeur ou dans un contexte de production hydroélectrique. La plupart de ces modèles étaient développés pour une seule rivière, souvent large et de faible pente. L'Annexe 1 présente un résumé des paramètres considérés par ces modèles empiriques. À notre connaissance, malgré l'existence de plusieurs modèles empiriques au niveau international, aucun d'entre eux n'avait encore été utilisé pour analyser l'impact des changements climatiques sur le régime des glaces.

3.2 Impact des changements climatiques sur le régime hivernal des rivières

Les différents auteurs qui ont entrepris des recherches sur le sujet se sont, pour la plupart, contentés de décrire des impacts possibles et logiques, en se basant sur une compréhension physique des phénomènes, ou de commenter des tendances statistiques généralement associées aux dates de formation et de départ des glaces, le tout sur des rivières relativement larges et de faibles pentes. Un chapitre du livre « River ice Breakup » produit par Beltaos et Burrell en 2008 présente des tendances observées et anticipées pour certaines rivières du Canada, mais il ne comporte pas vraiment de détail sur le régime des glaces du Québec.

En règle générale, les tendances et impacts suivants ont été mentionnés dans la littérature :

- La période hivernale sera plus courte et les couverts de glace seront globalement moins épais dans le futur (Beltaos et Prowse, 2009). Pour un réchauffement de 2 à 3°C, on constate un retard dans la formation d'un couvert de glace de 10 à 15 jours et un devancement de la débâcle printanière comparable (Prowse et Beltaos, 2002).
- Les impacts des changements climatiques ne seront pas simplement réduits à une diminution de la quantité de glace de rivière, mais bien à de possibles effets négatifs d'un point de vue environnemental et économique (Beltaos et Prowse, 2009). En effet, l'interaction entre différents paramètres qui influencent l'intensité des débâcles pourrait mener à des événements dommageables sur une base plus fréquente (Beltaos et Burrell, 2003).
- Les débâcles hivernales pourraient devenir plus fréquentes et intenses dans le futur (Beltaos, 2002, Prowse et Ferrick, 2002) incluant dans les provinces atlantiques (Beltaos et Burrell, 2003) et dans les secteurs boréaux (Stickler et coll., 2010).
- Il est possible qu'une réduction des couverts de neige rende les débâcles dynamiques printanières moins fréquentes (Beltaos et Prowse, 2009). Par contre, au Québec, la neige au sol est rarement une limitation au ruissellement, à moins que le couvert de neige soit si important et non mature qu'il absorbe une partie de la pluie.
- Des débits plus élevés à l'automne pourraient causer une formation du couvert de glace à une élévation supérieure, entraînant une réduction de la fréquence des embâcles printaniers, mais à une augmentation de leur intensité (Prowse et Beltaos, 2002). Cette possibilité est plutôt théorique et seulement applicable aux grandes rivières à faible pente.
- Les impacts des changements climatiques sur les glaces seront plus importants le long des rivières du Nord canadien (Prowse et Culp, 2003), incluant un chevauchement entre l'événement de débâcle et la crue printanière, qui étaient autrefois considérés comme des événements hydrologiques distincts (Janowicz, 2017).
- Dans le sud, le couvert de glace de certaines rivières pourrait demeurer partiel ou spatialement intermittent pendant tout l'hiver (Prowse et Beltaos, 2002).
- Dans les 50 dernières années, les provinces atlantiques ont été affectées par un climat légèrement plus froid et les dates de débâcle n'ont pas suivi la tendance canadienne (Beltaos et Burrell, 2003).
- Les changements climatiques auront un effet sur la morphologie des cours d'eau à travers les processus de glace qui influencent le transport de sédiments (Best et coll., 2005).

Bref, malgré des tendances logiques, l'impact des changements climatiques sur les embâcles n'a pas encore été démontré, ni étudié en détail. Beltaos et Burrell avaient suggéré en 2003 qu'il serait bientôt temps d'utiliser des modèles pour simuler l'impact des changements climatiques sur des processus de glace complexes comme les embâcles. Le présent projet suit leur recommandation.

4. Méthodologie / données

Au début du projet, un total de 9 cours d'eau a été identifié par l'Université Laval, en collaboration avec Ouranos et le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Le choix des cours d'eau était basé sur les critères suivants :

- Historique d'embâcles passés ayant généré des inondations et des dommages
- Études passées ayant répertorié ou étudié les causes, les impacts ou la dynamique des débâcles et des embâcles
- Présence d'une ou de plusieurs stations hydrométriques depuis au moins 1970 et disponibilité des projections hydrologiques du MDDELCC (Atlas hydroclimatique du Québec méridional¹)
- Taille de bassin versant supérieure à 1000 km²
- Régime d'écoulement naturel ou peu régularisé

Le Tableau 1 montre les rivières sélectionnées avec les articles, rapports ou toute autre source d'information relative à leurs embâcles historiques.

Tableau 1. Rivières sélectionnées dans le cadre du projet et sources d'information permettant d'identifier des dates d'embâcles ou de débâcles dynamiques historiques.

Rivières	Sources d'information
Montmorency	<ul style="list-style-type: none">➤ Leclerc et coll., 2001➤ Turcotte et coll., 2015➤ Turcotte et Morse, 2015➤ Observations sur le terrain de 2010 à 2015➤ Base de données du MSP sur les embâcles rapportés / observés
Ste-Anne	<ul style="list-style-type: none">➤ Morse et Turcotte, 2014➤ Observations sur le terrain de 2014 à 2017➤ Base de données du MSP sur les embâcles rapportés / observés➤ Site internet d'Urgence Portneuf (www.urgenceprtneuf.com)
L'Assomption	<ul style="list-style-type: none">➤ Observations sur le terrain en 2017➤ Base de données du MSP sur les embâcles rapportés / observés➤ Données compilées par M Jean-Pierre Tremblay
Châteauguay	<ul style="list-style-type: none">➤ Base de données du MSP sur les embâcles rapportés / observés➤ Données compilées par l'OBV (SCABRIC)
St-François	<ul style="list-style-type: none">➤ Base de données du MSP sur les embâcles rapportés / observés➤ Données compilées par l'OBV (COGESAF)
Chaudière	<ul style="list-style-type: none">➤ Observations sur le terrain en 2014➤ Base de données du MSP sur les embâcles rapportés / observés➤ Site internet de Patrimoine Beauceville (www.patrimoine-beauceville.ca)
Matapédia	<ul style="list-style-type: none">➤ Base de données du MSP sur les embâcles rapportés / observés➤ Dubé, 2009
Matane	<ul style="list-style-type: none">➤ Base de données du MSP sur les embâcles rapportés / observés
Mistassini	<ul style="list-style-type: none">➤ Lagadec et coll., 2015 (années d'embâcles probables, sans date spécifique)➤ Base de données du MSP sur les embâcles rapportés / observés

¹ https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/atlas/atlas_hydroclimatique.pdf

4.1 Développement des modèles de débâcles dynamiques

La première étape du projet consistait à identifier la fréquence réelle des débâcles dynamiques qui génèrent des embâcles et des inondations, ce qui inclut non seulement les embâcles historiques, mais également les autres événements de débâcles qui auraient pu être associés à des embâcles et à des inondations sans toutefois être rapportés ou confirmés. Il était donc nécessaire de développer et de calibrer un modèle de simulation (ou de prévision) de débâcles dynamiques pour chaque cours d'eau. Pour développer un tel modèle, il fallait identifier des indicateurs de débâcles dynamiques. En se basant sur ce qui est présenté à la Figure 1, les paramètres suivants ont été retenus (voir paramètres en bleu à la Figure 1) :

- Les degrés-jours de gel cumulés (DJGC²) et les degrés-jours de dégel cumulés (DJDC³) à un pas de temps journalier pour respectivement simuler la résistance et la dégradation d'un couvert de glace (Figure 1A), données :
 - Qui représentent un indicateur largement indirect, mais assez représentatif de la résistance du couvert de glace en général.
 - Facilement accessibles et relativement précises parce que directement calculées avec les températures de l'air moyennes journalières mesurées.
- Les débits moyens journaliers (Q) pour simuler les forces de mobilisation du couvert de glace (Figure 1B), une donnée :
 - Qui représente un indicateur direct des vitesses (cisaillement) sur de grandes distances de cours d'eau.
 - Relativement accessible et souvent disponible avec un degré de précision adéquat.

Par la suite, pour des fins de calibration, il a fallu associer les dates d'embâcles confirmés (les embâcles historiques), hivernaux ou printaniers, à un Q et à des DJGC ou à des DJDC au-dessus de -5°C (DJDC-5, pour tenir compte de la chaleur moyenne que peut fournir le soleil et la nappe phréatique, entre autres sources de chaleur, afin de faire fondre de la glace même si la température de l'air est sous le point de congélation). Les degrés-jours (DJ) ont été calculés en utilisant les températures de l'air moyennes journalières à une ou des stations météorologiques du MDDELCC ou d'Environnement et changement climatique Canada (ECCC) tandis que les Q estimés ont été extraits des données archivées de stations hydrométriques du MDDELCC. Les stations de références, telles que présentées au Tableau 2 pour chaque rivière, ont été sélectionnées en considérant la longévité et la relative proximité avec les zones où des embâcles ont été observés dans le passé.

Pour chaque crue hivernale ou printanière, il peut y avoir une différence importante entre le débit moyen journalier et le débit instantané maximal qui influence la débâcle, surtout si la crue survient pendant la nuit (à cheval entre deux journées). Il a donc fallu calculer un facteur de pointe moyen probable pour chaque cours d'eau, en utilisant les données instantanées disponibles pour des crues d'automne ou de printemps. Le Tableau 3 montre les facteurs de pointe utilisés pour évaluer le débit maximal lors de crues pour chaque cours d'eau.

² Les DJGC se calculent en faisant la somme quotidienne de l'inverse des températures de l'air moyenne. Le total ne peut jamais être inférieur à 0, mais il peut diminuer. Par exemple, pour des journées consécutives avec des températures à 2°C, -5°C, -10°C, 1°C et -3°C, les DJGC seraient, dans le même ordre, 0°CJ (parce que 2°C est supérieur à 0°C), 5°CJ, 15°CJ, 14°CJ et 17°CJ.

³ Dans le cas des DJDC, il s'agit de la même approche, mais on considère une température de référence et on fait la somme des °CJ qui sont supérieurs à cette valeur. Par exemple, pour une référence à -5°C, les DJDC correspondants à des journées à -6°C, -1°C, 5°C, -6°C et 0°C seraient, dans le même ordre, 0, 4, 14, 13 et 18°CJ.

Tableau 2. Liste des stations météorologiques et hydrométriques ayant fourni les données requises pour la calibration et l'utilisation du modèle de débâcles pour chaque rivière. Les stations en gras sont les stations de référence tandis que les autres stations sont utilisées pour combler les trous dans les données historiques à la station de référence, en utilisant une corrélation entre les données des stations.

Rivière	Stations météorologiques	Stations hydrométriques (ratio)
Montmorency	Québec / Jean Lesage INTL Québec / Jean Lesage INTL A	051001
Ste-Anne	Rivière Verte Chute-Panet Donnacona Ste-Christine	050408
L'Assomption	Joliette L'assomption (7014160) St-Jacques	052219
Châteauguay	Pierre Elliot Trudeau A (702S006)	030905
St-François	Drummondville (7022160) St-Nazaire Chute- Hemmings St-Guillaume Richmond	030208 030284 (2.8266) 030206 (1.5536) 030204 (0.9146)
Chaudière	Beauceville (7028754) St-Georges	023429 023426 (0.7543)
Matapédia	St Alexis de Matapédia Causapscal (7051200) Lac humqui L'Alverne Tide Head 2	011509 011507 (1.000) 011508 (5.000)
Matane	St-Jean de Cherbourg (7057395) Matane Petite Matane St-René de Matane Causapscal	021601
Mistassini	Pérignonka (7065960) Mistassini Normandin Albanel Saint-Prime	062102

Enfin, une fois les DJGC ou les DJDC-5 et les Q estimés pour chaque événements historiques ou observés, des seuils de débâcles ont été tracés sous la forme d'un graphique (voir exemple de la rivière Chaudière à la Figure 2). En plus des données historiques, les seuils ont également été choisis en considérant les connaissances des rivières (ex. : les crues qui ne causent pas de mouvements de glaces) de même que la physique de formation et de dégradation ou de mobilisation d'un couvert de glace.

Tableau 3. Facteur de pointe pour obtenir une estimation du débit maximal instantané lors des crues hivernales pour chaque rivière.

Rivière	Facteur de pointe
Montmorency	1.30
Ste-Anne	1.15
L'Assomption	1.10
Châteauguay	1.15
St-François	1.15
Chaudière	1.25
Matapédia	1.05
Matane	1.15
Mistassini	1.05

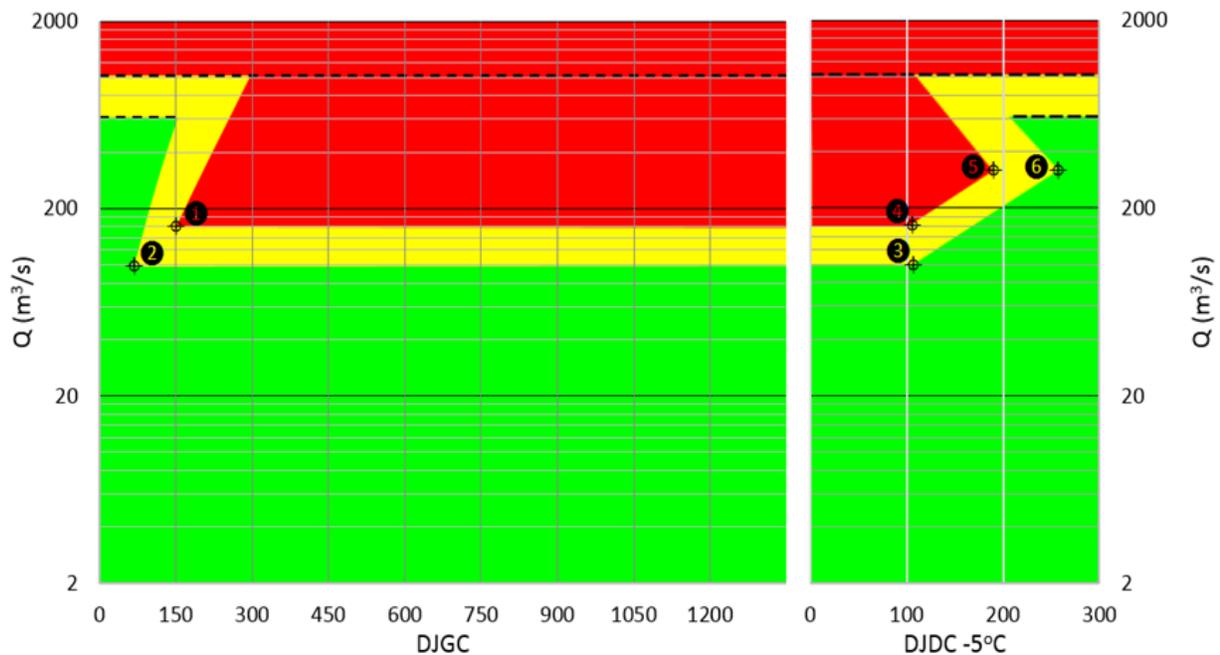


Figure 2. Exemple de modèle de débâcles dynamiques pour la rivière Chaudière, avec les 6 points qui délimitent les zones des premiers mouvements de glaces (jaune, veille, embâcles possibles) et de mouvements de glaces plus généralisés (rouge, alerte, embâcles très probables).

Chaque modèle de débâcle dynamique présente une structure similaire à la Figure 2 et fonctionne comme suit :

- Au début de l'hiver, c'est la partie de gauche du graphique qui doit être utilisée.
- Les points 1 et 2 dictent le moment (DJGC et Q) à partir duquel des embâcles sont possibles ou très probables. En effet, tant qu'il n'y a pas de couvert de glace et tant qu'une crue ne mobilise pas le couvert de glace, aucun embâcle associé à une débâcle ne devrait survenir.
- Pendant l'hiver, il est établi, par simplicité, que le seuil de débâcle est largement indépendant de l'épaisseur de couvert de glace, tel que représenté par les DJGC, un comportement plutôt associé aux rapides. Donc, si le débit augmente au-delà du premier ou du deuxième seuil (jaune et rouge), des embâcles deviennent respectivement possibles ou très probables.

- Au printemps (établi à partir du 15 février pour toutes les rivières du projet), si des degrés-jours de dégel s'accumulent au-dessus de -5°C (DJDC-5), c'est la partie de droite du graphique qui doit être utilisée.
- Les points 3 et 4 dictent le moment où le couvert commence à se dégrader, ce qui affecte le Q à partir duquel les glaces sont mobilisées et évacuées. La forme en flèche simule d'un côté, la perte de résistance du couvert qui devient moins apte à former des embâcles majeurs et de l'autre, la perte de résistance qui diminue le débit d'évacuation complète des glaces.
- Enfin, les points 5 et 6 indiquent respectivement la fin possible et fort-probable de la période de glace, donc le début des conditions à l'eau libre (bref, des embâcles sont toujours possibles dans la zone jaune, mais ils ne sont plus fort probables si Q augmente).

La localisation des embâcles historiques et de certaines observations a permis de cerner les zones le long desquels le modèle de chaque rivière devrait être applicable. Le Tableau 4 présente ces informations. Il est important de comprendre que même si le débit augmente vers l'aval, surtout aux endroits des tributaires majeurs, le débit est toujours associé à une seule station hydrométrique (voir Tableau 2) et le modèle reste donc valide sur les distances mentionnées, pourvu que les stations de référence demeurent les mêmes.

Tableau 4. Zone d'applicabilité des différents modèles de débâcles dynamiques, pour chaque rivière du projet

Rivière	Distance d'applicabilité	Ville amont	Ville aval
Montmorency	15 km	Ste-Brigitte de Laval	Québec
Ste-Anne	21 km	St-Raymond	St-Raymond (Chute-Panet)
L'Assomption	100 km	St-Côme	Joliette
Châteauguay	60 km	Huntington	Châteauguay
St-François	200 km	Weedon	Pierreville
Chaudière	150 km	St-Ludger	Saint-Lambert
Matapédia	70 km	Causapscal	Matapédia
Matane	30 km	St-René de Matane	Matane
Mistassini	70 km	Notre-Dame-De-Lorette	Dolbeau-Mistassini

Chaque modèle de débâcle (voir la section des résultats) a été calibré au meilleur des connaissances disponibles. Ils pourraient faire l'objet d'ajustements dans le futur, surtout s'ils sont utilisés en mode opérationnel dans le but de limiter les fausses alertes d'embâcles tout en évitant les événements manqués. Par contre, même en étant imparfait, il est important de spécifier que le même modèle est utilisé pour établir la fréquence des embâcles en conditions passées et dans un contexte de changements climatiques. Donc la comparaison des tendances historiques et futures, même s'il existait un certain biais, demeurerait réaliste dans un contexte relatif, ce qui répond à l'objectif du projet.

4.2 Estimation de la fréquence des débâcles dynamiques passées

Les données historiques de débits estimés (Q) et de degrés-jours cumulés (DJGC et DJDC-5) de 29 hivers par rivière ont été appliquées aux modèles de débâcles dynamiques en mettant l'emphase sur les pics de crues. Le Tableau 5 montre les hivers considérés et les mois inclus dans l'analyse pour chaque rivière afin de ne manquer aucune crue susceptible d'avoir provoqué une débâcle.

Tableau 5. Résumé des hivers historiques et des mois d'hiver pour chaque rivière avec le nombre de crues.

Rivières	Hivers historiques	Mois d'hiver	Nombre de crues
Montmorency	1971-1972 à 1999-2000	1 ^{er} Nov. au 30 Avr.	274
Ste-Anne	1971-1972 à 1999-2000	1 ^{er} Nov. au 30 Avr.	233
L'Assomption	1971-1972 à 1999-2000	1 ^{er} Nov. au 30 Avr.	173
Châteauguay	1971-1972 à 1999-2000	1 ^{er} Nov. au 30 Avr.	350
St-François	1981-1982 à 2009-2010*	1 ^{er} Nov. au 30 Avr.	568
Chaudière	1971-1972 à 1999-2000	1 ^{er} Nov. au 30 Avr.	338
Matapédia	1971-1972 à 1999-2000	1 ^{er} Nov. au 30 Avr.	143
Matane	1979-1980 à 2007-2008*	1^{er} Nov. au 31 Mai*	289
Mistassini	1971-1972 à 1999-2000	1^{er} Nov. au 31 Mai*	202

On peut noter que pour les rivières St-François et Matane, la période historique considérée n'est pas 1972 à 2000. Dans le premier cas, les données de débits estimés ne semblaient pas être corrigées pour tenir compte de l'effet de glace, surtout entre 1972 et 1980 alors que dans le deuxième cas, les données hivernales de 1973 à 1978 étaient absentes et impossibles à reconstituer avec celles d'autres stations. Le Tableau 5 montre également le nombre de pics de crues automatiquement détectés par deux algorithmes simples, selon les critères suivants :

1. Crue survenant à plus de 0 DJGC ou à moins de 300 ou 400 DJDC-5, selon les rivières
2. Crue dont le débit atteint un seuil minimal (largement sous le seuil de débâcle possible)

La Figure 3 montre un exemple d'hydrogramme hivernal et printanier pour la rivière Chaudière pour l'hiver 1985-1986. On peut répertorier deux crues hivernales (à environ 650 et 700 DJGC dans le graphique de gauche) et trois pics de crue printanière dans les zones jaunes ou rouges (à environ 20, 80 et 110 DJDC-5). Deux autres pics (80 DJGC et 180 DJDC-5) se trouvent près de la zone jaune et auraient pu devenir importants si les limites de chaque zone avaient été recalibrées à la baisse. D'autres critères, ceux-ci difficilement automatisables, ont permis d'éliminer certains pics de crues d'analyses subséquentes. Ces critères reposent une physique des glaces plus représentative, mais plus complexe :

3. Est-ce que cette crue est supérieure à celle qui précède immédiatement?
4. Est-ce que cette crue peut générer d'autres embâcles ou mobiliser des embâcles existants ou si elle n'a, en fait, aucun effet sur l'impact glaciaire d'une crue précédente?
5. Est-ce que de la glace a été produite dans les zones ouvertes depuis la dernière crue significative de manière à générer une nouvelle débâcle ou à aggraver la situation?
6. Est-ce que de la chaleur a été absorbée dans les zones ouvertes depuis la dernière crue significative de manière à dégrader les glaces et les embâcles existants?
7. Quelle est la date (est-ce que les degrés-jours valent moins [avant le 1^{er} mars] ou plus [après le 20 mars] que la référence de -5°C)?
8. Est-ce que l'hiver a été froid et est-ce que le couvert de glace serait donc plus résistant?
9. Est-ce que l'amont du bassin est plus froid que le site de la station et est-ce que des trains de glaces subséquents peuvent empirer la situation et générer d'autres embâcles?

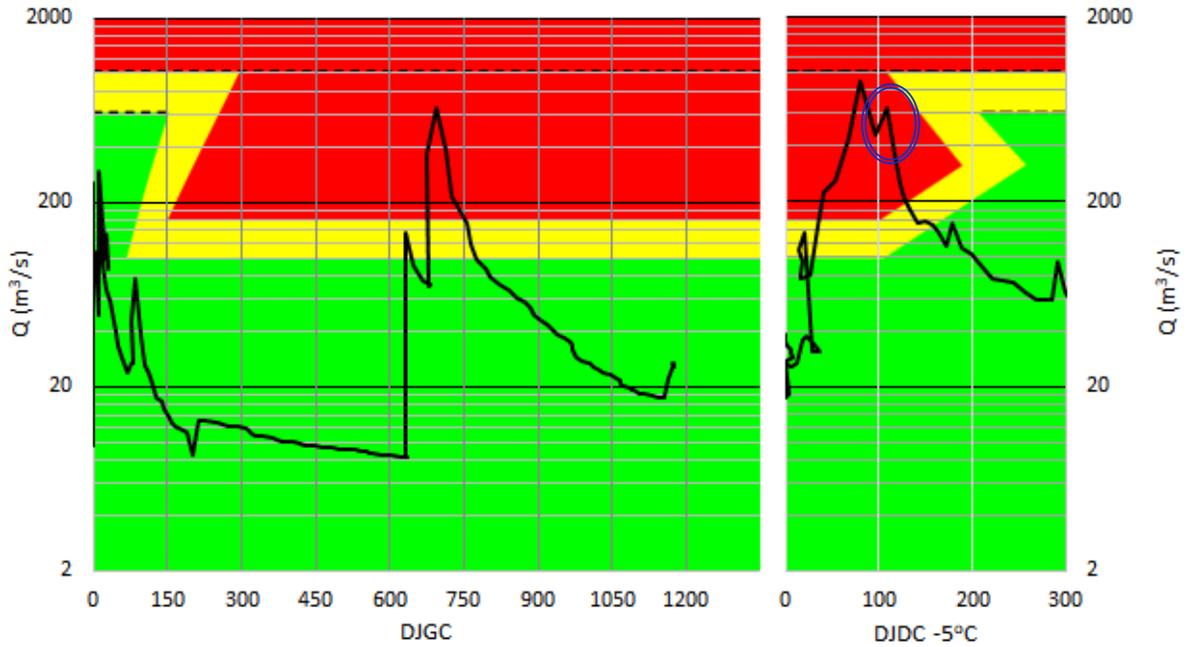


Figure 3. Hydrogramme de l'hiver 1985-1986 sur la rivière Chaudière montrant plusieurs pics de crues. Le pic entouré en bleu est retiré manuellement du lot puisqu'il ne peut pas contribuer à générer des embâcles (voir critère 4 présenté précédemment), même si les zones rouges et jaunes étaient éventuellement recalibrées.

En gardant en tête ces critères, le pic de crue entouré en bleu est manuellement retiré de l'analyse des débâcles dynamiques puisqu'il ne peut générer des embâcles plus importants que ce qui existe possiblement déjà dans la rivière, ni des niveaux d'eau plus élevés (voir critère 4 de la liste précédente). La Figure 4 montre tous les pics de crues historiques (hivers 1972 à 2000) considérés pour la suite de l'analyse pour la rivière Chaudière, incluant les pics de crues associés à des embâcles rapportés.

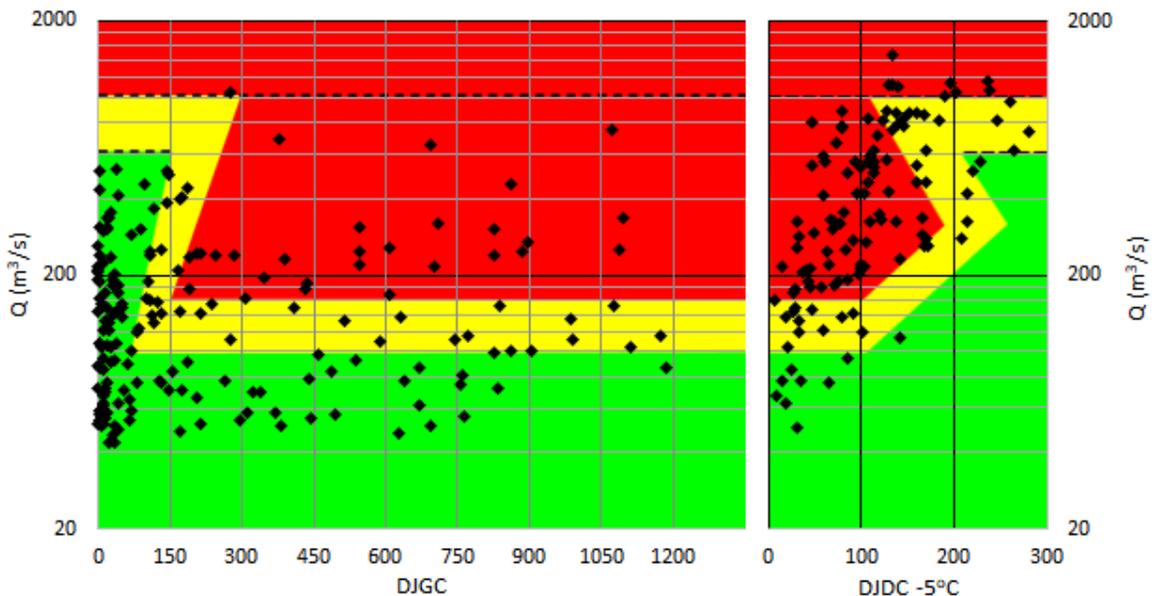


Figure 4. Pics de crues hivernales (gauche) et printanières (droite) pour la rivière Chaudière entre 1972 et 2000, suite à l'élimination de certains événements selon les critères 1 à 9.

L'étape suivante, également automatisée par des équations reliant les coins de chaque zone jaune et rouge, tel que présenté à la Figure 2, consiste à :

10. Retenir uniquement les pics de crues qui atteignent ces zones. Encore une fois, si la limite des zones jaune et rouge était recalibrée, il y aurait ajustement automatique et inclusion ou exclusion de certains pics de crues, d'où la conservation, jusqu'à cette étape, des crues qui se trouvent dans la zone verte.

Le Tableau 6 présente le nombre de pics de crues ayant pu générer des débâcles dynamiques et des embâcles, regroupant les zones jaunes et rouges, et ce, pour chaque rivière (cette information inclut également les embâcles rapportés). Par exemple, à la Figure 3, pour l'hiver 1985-1986 sur la rivière Chaudière, il y a 4 pics de crues associés à des débâcles dynamiques probables ou rapportées (à 650 DJGC, 700 DJGC, 20 DJDC-5 et 80 DJDC-5). La colonne de droite présente quant à elle la fréquence des débâcles dynamiques historiques sur 29 hivers.

Tableau 6. Nombre de débâcles dynamiques historiques sur 29 hivers et fréquence résultante des événements.

Rivières	Nombre de débâcles dynamiques historiques probables ou confirmées	Fréquence des débâcles dynamiques historiques
Montmorency	49	1.7
Ste-Anne	43	1.5
L'Assomption	37	1.3
Châteauguay	87	3.0
St-François	74	2.6
Chaudière	95	3.3
Matapédia	66	2.3
Matane	58	2.0
Mistassini	38	1.3

Des graphiques de fréquence de débâcles dynamiques hebdomadaires entre les mois de novembre et mai ont été tracés pour chaque rivière de manière à interpréter et comparer les dynamiques hivernales de bassins versants distincts (voir section 5).

Il est important de noter :

- Que pour chaque événement retenu, il peut en résulter plusieurs embâcles (comme le long de la rivière Chaudière) ou un seul embâcle (comme c'est souvent le cas dans la rivière Montmorency). Le présent projet ne tente pas d'estimer le nombre d'embâcles, mais bien le nombre d'événements hydrologiques (les débâcles) causant des embâcles.
- Qu'à cette étape, une erreur difficilement quantifiable est induite dans les résultats à cause des imprécisions dans l'estimation des Q hivernaux par le MDDELCC. Cette tâche est hautement complexe et des recherches sont en cours pour tenter de la faciliter (Turcotte et Morse, 2018).
- Qu'à cette étape, une erreur difficilement quantifiable est induite par l'application d'un facteur de pointe constant pour chaque pic de crue (voir Tableau 3). En réalité, le facteur de pointe est variable d'une crue à l'autre, autour d'une valeur moyenne, et il peut en résulter l'inclusion ou l'exclusion d'un pic de crues des zones jaune ou rouge.
- Que pour la suite du projet, les crues de 2000 à 2014 ont également été analysées selon les critères 1 à 10 afin de pouvoir compléter l'étape présentée à la section 4.3. les informations relatives à ces années ne sont pas incluses aux Tableaux 5 et 6, ni à la Figure 4.

4.3 Évaluation du risque d'inondation associé aux embâcles passés

Des données confidentielles de dédommagement événementiel fournies par le ministère de la Sécurité publique (MSP) pour la période de 1991 à 2014 ont permis de passer de la fréquence probable des débâcles avec embâcles (Tableau 6) au risque d'inondations par embâcles, en termes de dommage moyen annuel (DMA). Pour ce faire, il fallait compléter les étapes suivantes, pour chaque rivière, en incluant toutes les municipalités le long des tronçons couvert par les modèles (voir Tableau 4) :

1. Identifier les événements associés aux glaces parmi les remboursements du MSP pour chaque municipalité (l'aléa inondation incluait les embâcles et les crues à l'eau libre et il fallait faire la distinction selon les dates mentionnées ou selon une analyse des débits de toute l'année).
2. Combiner les dédommagements pour toutes les municipalités le long d'une même rivière pour un même événement de débâcle (parfois, un événement demeure local tandis que pour d'autres occasions, la même débâcle génèrent plusieurs embâcles qui affectent plusieurs municipalités).
3. Actualiser les dommages en \$ de 2017 (taux d'actualisation de 1.5%) et multiplier les dédommagements du MSP par 3 pour tenir compte de tous les autres dommages probables et non remboursables par le MSP, sur les bases d'une analyse effectuée par Turcotte et coll. (2017). Le résultat donne les dommages probables réels.
4. Distinguer les événements associés à des pics de crues touchant aux zones jaunes et rouges (ex. : Figure 4) et les associer au pic de crue (Q) de l'événement.
5. Générer des relations empiriques logiques entre les dommages probables réels de la période 1991-2014 et les événements jaunes et rouges, ou entre les dommages probables réels et le débit maximal, selon la meilleure corrélation possible (voir exemple à la Figure 5). Dans certains cas, il ne semblait y avoir aucun lien entre les dommages et les zones jaunes ou rouges ou avec le débit. Dans ces circonstances, des valeurs moyennes de dommages probables réels par événement étaient alors calculées.

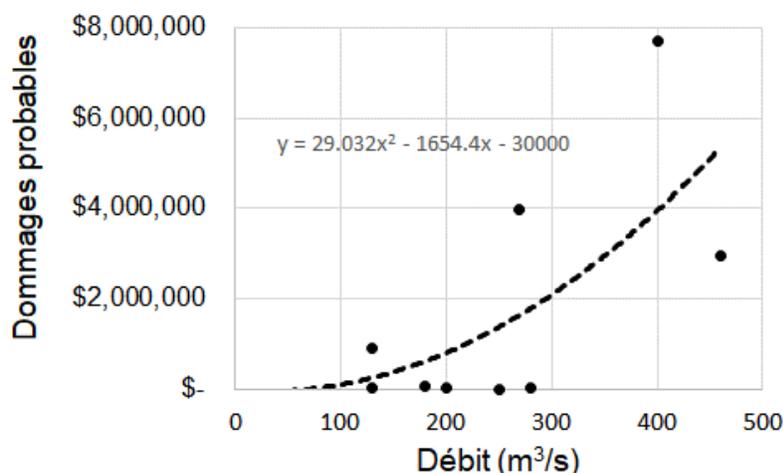


Figure 5. Relation entre les dommages probables et le débit estimé à la station 050408 pour les années 2001 à 2014 sur la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond de Portneuf.

Le Tableau 7 montre les valeurs moyennes ou les relations empiriques établies pour les 9 rivières, selon les zones jaune ou rouge. Il est à noter que pour la rivière Mistassini, trois relations ont été développées pour compenser le manque d'événements d'inondations par embâcles avec remboursement par le MSP (seulement 4). Dans ce cas, une moyenne des résultats a été calculée.

Tableau 7. Coûts estimés des événements d’inondations par embâcle selon les zones jaune et rouge et ratio entre les dommages probables réels et les dommages probables potentiels, ces derniers étant basés sur une application des valeurs ou des relations empiriques aux pics de crues des périodes correspondantes (généralement de 1991 à 2014).

Rivières	Calcul de dommages probables associés à un pic de crue		Réels / potentiels
	dans la zone jaune	dans la zone rouge	
Montmorency	234 342 \$	234 342 \$	69%
Ste-Anne	29.0 (Q ²) - 1654.4 (Q) -30,000 \$	29.0 (Q ²) - 1654.4 (Q) -30,000 \$	16%
L’Assomption	5 600 \$	1 120 000 \$	80%
Châteauguay	26 500 \$	265 000 \$	28%
St-François	20 000 \$	0.26 (Q ²) + 73.5 (Q) – 100 000 \$	42%
Chaudière	10 000 \$	1.97 (Q ²) + 1 107.1 (Q) – 500 000 \$	16%
Matapédia	1 010.5 (Q) – 50 000 \$	1 010.5 (Q) – 50 000 \$	24%
Matane	190 390 \$	190 390 \$	47%
Mistassini	3.2885 (10 ⁻³²) (Q ^{11.93}) \$	3.2885 (10 ⁻³²) (Q ^{11.93}) \$	24%
	0 \$	0.721 (Q ²) – 770.6 (Q) + 200,000 \$	17%
	25 000 \$	250 000\$	28%

Par la suite :

- Ces relations ou valeurs ont été appliquées aux données de Q et DJ des périodes correspondantes (généralement de 1991 à 2014) afin d’estimer les dommages probables potentiels sur la base des informations présentées au Tableau 7. Il était en effet évident que les modèles de débâcles dynamiques menaient à de fausses alertes et que le MSP ne remboursait pas des dommages pour chaque débâcle dynamique. Un ratio de dommages probables réels par rapport aux dommages probables potentiels a été établi (voir 4^e colonne du Tableau 7).
- Les relations ou valeurs empiriques du Tableau 7 ont été appliquées à la période historique, correspondant généralement à 1972 à 2000 (Voir Tableau 5), puis multipliées par le ratio de dommages probables réels par rapport aux dommages probables potentiels, pour tenir compte des fausses alertes. La somme des dommages a par la suite été divisée par 29 hivers pour obtenir le DMA associé aux embâcles sur chaque rivière. Le Tableau 8 présente les résultats.

Tableau 8. Estimation du dommage moyen annuel (DMA) historique des inondations par embâcles par rivière.

Rivières	DMA historique (\$/an)
Montmorency	280 000 \$
Ste-Anne	750 000 \$
L’Assomption	280 000 \$
Châteauguay	150 000 \$
St-François	350 000\$
Chaudière	890 000\$
Matapédia	180 000\$
Matane	180 000\$
Mistassini	180 000 \$
Total (9 rivières)	3 240 000 \$

Une étude réalisée pour le compte du MSP par l'Université Laval (Turcotte et coll., 2017) portait sur l'estimation du DMA à Saint-Raymond (rivière Sainte-Anne), sur la base d'une étude de récurrence des niveaux d'eau atteints lors d'embâcles, en tenant compte de la vulnérabilité au centre-ville selon les valeurs foncières des habitations et commerces. Le résultat était de 530 000 \$ / an entre 1976 et 2014, valeur comparable à une approche plus simple menant à une estimation de 750 000 \$ /an entre 1972 et 2000. Il est important de comprendre que la précision des valeurs présentées au Tableau 8 est basée sur les meilleures approches disponibles, mais qu'au-delà de ce résultat très important, l'évolution de la tendance du risque (DMA), objectif du projet, est encore plus fiable puisque le point de comparaison (le biais dans les relations empiriques de dommages et la modélisation) demeure le même.

4.4 Sélection de scénarios de changements climatiques

Afin d'avoir une idée de ce que nous réserve l'avenir (période 2042-2070), différents scénarios climatiques ont été simulés par Ouranos. Puisque les modèles de débâcles dynamiques, tels que décrits à la section 4.1, ne reposaient que sur des indicateurs hydrométéorologiques simples, il était envisageable d'utiliser ces scénarios climatiques dans le but de les convertir en données utiles pour interpréter le futur hivernal des rivières sélectionnées pour le projet.

Une première étape à franchir était de choisir différentes simulations climatiques représentatives parmi des centaines de possibilités, selon des projections de taux de CO₂ variables. Ouranos, en concertation avec les auteurs, a identifié neuf simulations parmi l'ensemble CMIP5 utilisé pour la production de l'édition 2015 de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional, qui ont été regroupés en 3 niveaux d'intensité :

- Réchauffement limité (+2.1 à 3.0 °C, évalué du 1^{er} novembre au 30 avril [ou 31 mai])
 - MPI-ESM-LR, membre #1, RCP4.5
 - ACCESS1-3, membre #1, RCP4.5
 - CMCC-CMS, membre #1, RCP4.5
- Réchauffement moyen (+3.3 à 4.2 °C, évalué du 1^{er} novembre au 30 avril [ou 31 mai])
 - MPI-ESM-LR, membre #1, RCP8.5
 - BNU-ESM, membre #1, RCP8.5
 - CMCC-CMS, membre #1, RCP8.5
- Réchauffement important (+4.8 à 6.0 °C, évalué du 1^{er} novembre au 30 avril [ou 31 mai])
 - MIROC5, membre #1, RCP8.5
 - MIROC-ESM-CHEM, membre #1, RCP4.5
 - MIROC-ESM-CHEM, membre #1, RCP8.5

Par la suite, des techniques reconnues de post-traitement statistique des simulations climatiques ont été utilisées. Il était question de choisir entre une perturbation par quantile des données historiques (scénarios nommés « PQM » dans l'Atlas hydroclimatique) ou une correction par quantile du biais des simulations CMIP5 sélectionnés, afin que les scénarios climatiques obtenus respectent les statistiques historiques observées (scénarios nommés « CQM » dans l'Atlas hydroclimatique). La première option a été retenue de manière à pouvoir comparer des hivers similaires, espacés de 70 ans. Les simulations CQM pour la période de référence (1972-2000) ont été conservés pour utilisation ultérieure éventuelle.

Les données climatiques d'Ouranos permettaient directement de calculer les degrés-jours de gel et de dégel aux stations météorologiques mentionnées (en gras) au Tableau 2 pour la période 2042-2070. Par

ailleurs, grâce à la production de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional, le MDDELCC avait en banque des résultats de simulations hydrologiques du modèle HYDROTEL pour les stations hydrologiques mentionnées (en gras) au Tableau 2 et pour les simulations sélectionnées. Il ne restait donc plus qu'à alimenter les modèles de débâcles dynamiques dans le but d'estimer la fréquence future des débâcles dynamiques causant des embâcles et des inondations. La Figure 6 résume le processus de sélection des simulations et d'obtention des indicateurs utiles pour le projet.

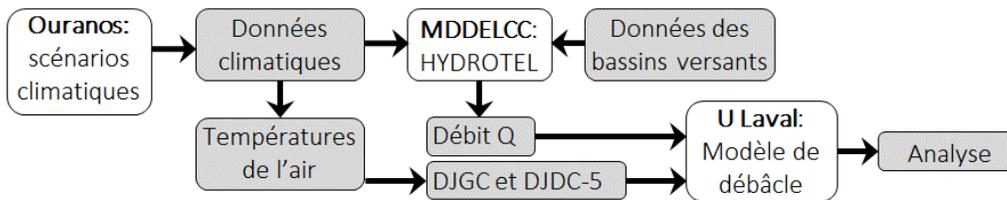


Figure 6. Diagramme montrant le rôle des intervenants du projet avec les données produites et utilisées.

Une dernière étape d'analyse, avant de passer à l'estimation de la fréquence des débâcles dynamiques durant la période de 2042 à 2070, consistait à comparer la forme des hydrogrammes (Q par rapport aux DJ) historiques et futurs pour chaque rivière afin de déterminer si les simulations hydrologiques du MDDELCC apparaissaient réalistes. La Figure 7 compare l'hydrogramme historique de 1985-1986 avec l'hydrogramme simulé de 2055-2056 (scénario H50_CM5_MPL_R41) pour la rivière Chaudière. On peut remarquer que les crues sont comparables, en termes de nombre, de position selon les DJGC et de forme (montée horizontale, par temps doux et tarissement en fonction des jours froids suivants). Par contre, la Figure 8, qui compare les hydrogrammes de 1995-1996 et 2055-2066 (scénario H50_CM5_MPL_R41) pour la rivière Montmorency, montre des divergences sévères pour les crues et même des instabilités hydrologiques significatives simulées par HYDROTEL, pour des raisons inconnues au moment de produire ce rapport. Des constats similaires sur d'autres années et pour d'autres scénarios ont mené à l'exclusion des rivières Montmorency et Ste-Anne de la suite du projet, par manque de confiance envers les simulations hydrologiques hivernales. Des modèles mieux calibrés pour la période hivernale, qui seront utilisés pour produire le prochain Atlas hydroclimatique du Québec méridional, permettrait de compléter les analyses pour ces rivières en conditions futures.

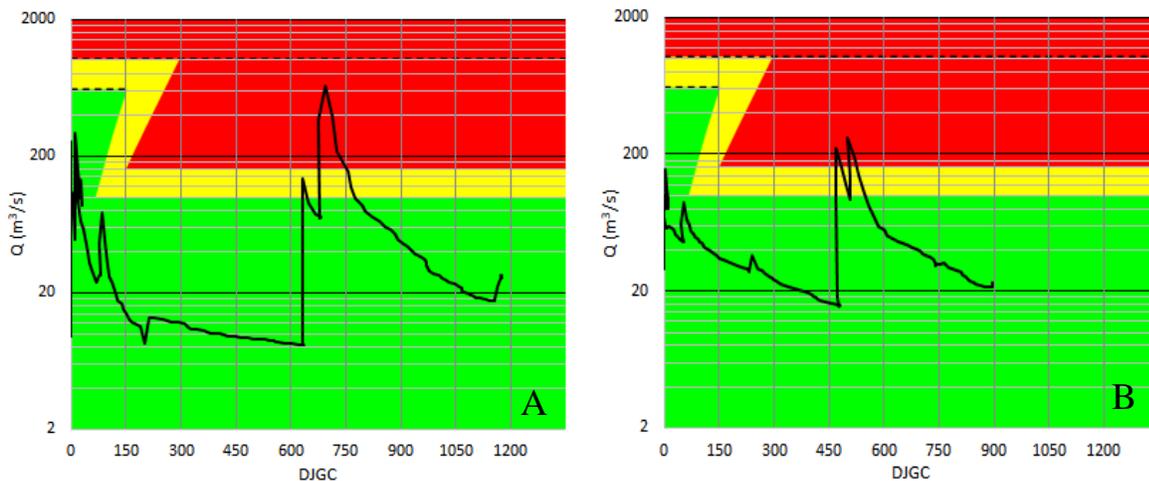


Figure 7. (A) Hydrogramme hivernal historique de 1985-1986 et (B) hydrogramme simulé de 2055-2056 (H50_CM5_MPL_R41) sur la rivière Chaudière.

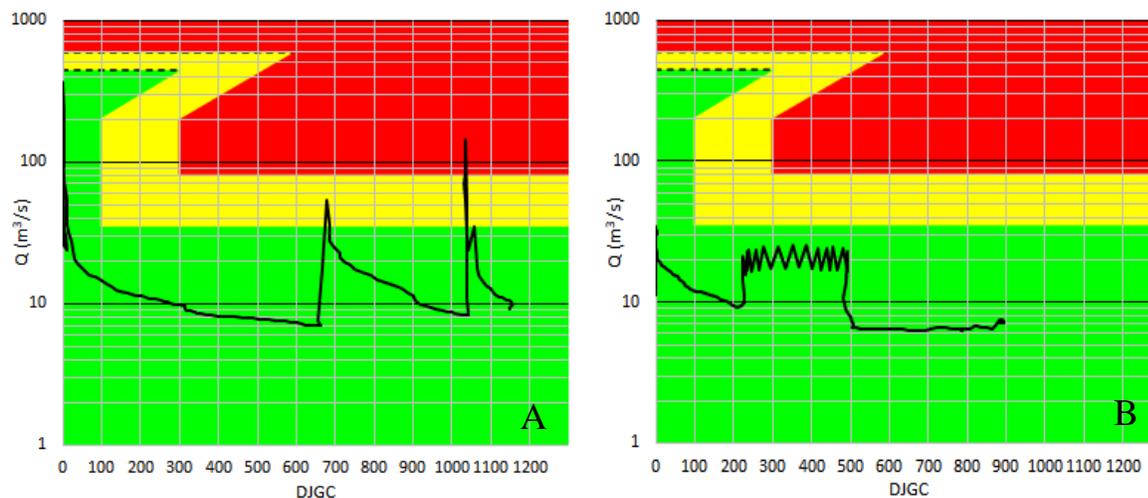


Figure 8. (A) Hydrogramme hivernal historique de 1985-1986 et (B) hydrogramme simulé de 2055-2056 (H50_CM5_MPL_R41) sur la rivière Montmorency.

4.5 Estimation de la fréquence des débâcles dynamiques futures

Pour les 9 scénarios climatiques sélectionnés sur les 7 rivières du projet (suite à l'exclusion des rivières Montmorency et Ste-Anne), le Tableau 9 indique le nombre de pics de crues qui ont été analysés, un à la fois, selon les critères 3 à 9 mentionnés à la Section 4.2, ainsi que les événements de débâcles dynamiques résultants. L'Annexe 2 présente le résumé statistique des Q, DJGC et DJDC-5 pour les 7 rivières. Les données associées aux scénarios CC1, CC2 et CC3 font référence à la moyenne de trois scénarios climatiques, tel que présenté à la section 4.4.

Tableau 9. Nombres de pics de crues futures analysés (total de 9 scénarios de 29 hivers) et nombres de débâcles dynamiques retenues sur 7 rivières.

Rivières	Nb. de pics de crues	Nb. de débâcles dynamiques retenues
L'Assomption*	919	253
Châteauguay	2833	537
St-François*	2387	434
Chaudière	3011	839
Matapédia*	721	334
Matane*	852	283
Mistassini*	1148	356

Avant de sauter aux conclusions trop rapidement, il était nécessaire d'évaluer si la performance des modèles hydrologiques, pour les 7 rivières retenues, induisait une erreur qui affecterait les tendances futures estimées. Pour ce faire, les résultats des 9 scénarios climatiques futurs, regroupés en 3 niveaux d'intensité (CC1, CC2 et CC3), ont été comparés aux données historiques. La Figure 9 présente deux résultats, ceux de la rivière Châteauguay (A) et ceux de la rivière Matane (B). Dans le premier cas, on constate que la tendance suit une certaine logique et que la distribution hivernale évolue de manière raisonnable si la température moyenne augmente. Dans le second cas, la tendance semble contradictoire avec une réduction des débâcles dynamiques associées à des réchauffements limités, mais à une augmentation des débâcles si le réchauffement devenait plus important.

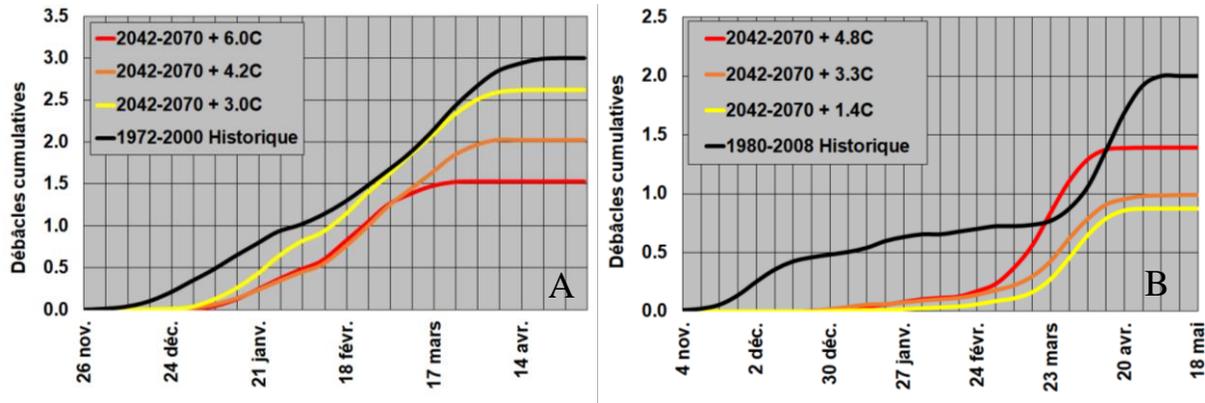


Figure 9. Distribution hivernale cumulative des débâcles historiques et selon les trois niveaux d'intensité de scénarios de changements climatiques pour la rivière Châteauguay (A) et Matane (B).

Une incertitude similaire à ce qui est présenté à la Figure 9B a été obtenue pour 5 rivières sur les 7 cas analysés (voir * au Tableau 9). Afin de réduire au maximum le biais induit par les simulations hydrologiques, les scénarios de la période de référence (1972-2000) de la famille des CQM ont été mis à contribution. L'objectif était de confirmer, pour des températures et des précipitations statistiquement semblables (scénario CQM de référence) aux données mesurées (historiques), si les statistiques hydrologiques issues des simulations hydrologiques étaient également semblables. Le Tableau 10 montre les pics de crues analysés et les débâcles dynamiques résultantes pour les 5 rivières qui ont été analysées à l'aide des scénarios CQM de référence. L'Annexe 2 présente également les Q, DJGC et DJDC-5 associés à ces scénarios.

Tableau 10. Nombres de pics de crues analysés et nombres de débâcles dynamiques obtenues pour les scénarios CQM de références sur 5 rivières. La colonne de droite présente le facteur de division entre la fréquence des débâcles historiques (colonne de droite au Tableau 9) et la fréquence des débâcles pour les scénarios de la période de référence.

Rivières	Nombre de pics de crues	Débâcles dynamiques retenues	Facteur historique / référence
L'Assomption*	727	154	1.35
St-François*	1683	242	1.86
Matapédia*	504	135	2.64
Matane*	487	126	3.05
Mistassini*	620	189	1.18

Un facteur de correction a par la suite été calculé pour les 5 rivières, en divisant la fréquence des débâcles historiques par la fréquence des débâcles pour la période de référence. Les valeurs présentées à la colonne de droite au Tableau 10 varient de 1.18 pour la rivière Mistassini (mésentente limitée entre les débits historiques et de référence) à 3.05 pour la rivière Matane (mésentente significative entre les débits historiques et de référence). Ce facteur a par la suite été multiplié aux résultats des scénarios de changements climatiques (CC1, CC2 et CC3), de manière à pouvoir les comparer aux résultats historiques en réduisant au maximum, le biais associé aux simulations hydrologiques. Il est à noter que l'analyse a considéré qu'il y aurait peu d'impact à comparer la période historique des rivières St-François (1982-2010) et Matane (1980-2008) à une période de référence légèrement décalée (1972-2000), considérant les incertitudes induites à chaque étape de la méthodologie.

4.6 Évaluation du risque d'inondation associé aux embâcles futurs

La dernière étape de la méthodologie, pour atteindre les objectifs du projet, était d'évaluer le risque (DMA) futur d'inondations par embâcles de glaces en considérant une vulnérabilité (et une exposition) constante dans le temps. Les équations de dommages en fonction des zones jaune et rouge ainsi que du débit, développées pour chaque rivière (Tableau 7), ont été appliquées aux débâcles dynamiques obtenues pour les différents scénarios climatiques (Tableau 9). La même opération a été effectuée pour les crues des scénarios de référence (Tableau 10) pour cinq rivières. Puis, les résultats directs (rivière Châteauguay et Chaudière) et indirects (en utilisant un facteur historique vs. référence pour les rivières L'Assomption, St-François, Matapédia, Matane et Mistassini) ont été calculés.

4.7 Calcul des bilans

Le bilan de l'impact des changements climatiques, en termes de fréquence des débâcles dynamiques causant des embâcles, mais surtout en termes de dommage moyen annuel (DMA) associé aux embâcles de glaces, a été effectué pour 7 rivières. Les résultats et les tendances sont présentés à la section suivante.

5. Résultats

Cette section présente les résultats, suivant la méthodologie appliquée pour analyser les données relatives à chaque rivière.

5.1 Rivière Montmorency

L'Université Laval a effectué un suivi des glaces de cette rivière au début des années 2000 et de 2010 à 2015. La Figure 10 présente le modèle de débâcle dynamique, à gauche pour la partie hivernale, basée sur les degrés-jours de gel cumulés (DJGC) à partir du 1^{er} novembre et à droite pour la partie printanière, basée sur les degrés-jours de dégel cumulés au-dessus de -5°C (DJDC-5) à partir du 15 février. En général, les rapides de la rivière Montmorency commencent à se couvrir de glace à environ 300 DJGC et ils se libèrent de leur glace à un débit supérieur à 35 m³/s à la station 051001. Des embâcles importants sont survenus dans le passé alors que le débit était d'environ 80 m³/s ou plus et que les DJDC-5 étaient inférieurs à 150. Par ailleurs, en général, le chenal se libère dynamiquement ou thermiquement de la majorité de ses glaces sur plus de 30 km au-dessus de 200 DJDC-5.

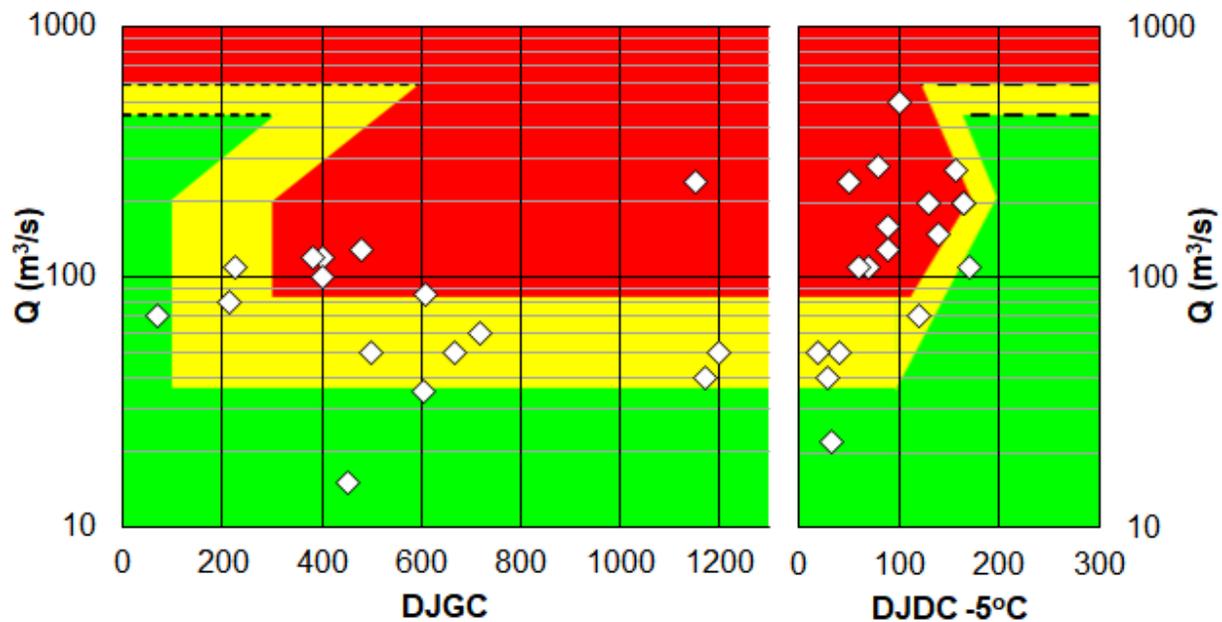


Figure 10. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Montmorency (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus des connaissances de l'Université Laval sur cette rivière).

L'application de ce modèle aux données météorologiques et hydrologiques historiques (1972-2000) a mené à une estimation de la distribution cumulative et hebdomadaire des pics de crues causant des débâcles dynamiques sur la rivière Montmorency (Figure 11). La moyenne obtenue est de 1.7 débâcles dynamiques par hiver, avec une fréquence historique non-nulle débutant dès les premiers jours de décembre et se terminant au tout début du mois de mai. La période historique la plus active pour les débâcles dynamiques sur cette rivière se déroule entre la mi-mars et la mi-avril, mais des débâcles hivernales sont également survenues relativement régulièrement au mois de décembre et au mois de janvier. Selon les analyses, les embâcles historiques causent environ 280 000\$ de dommages annuellement le long de la rivière Montmorency à Ste-Brigitte de Laval et à Québec.

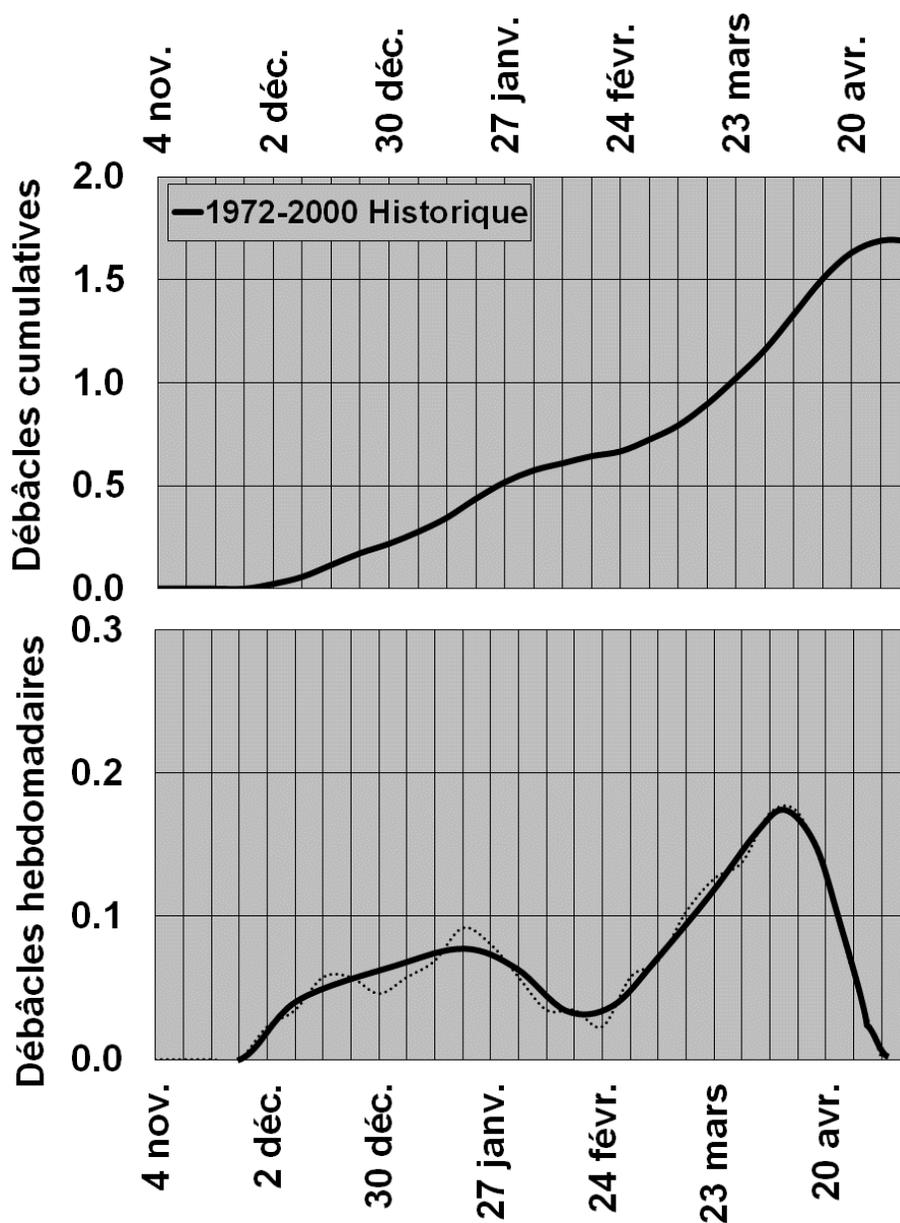


Figure 11. Distribution cumulative et hebdomadaire historique des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Montmorency.

La rivière Montmorency a été affectée par des embâcles hivernaux majeurs récemment, soit le 26 janvier 2010, le 31 janvier 2013, ainsi que le 12 janvier 2018. Bien que l'analyse future (changements climatiques) n'ait pu être complétée pour les raisons présentées à la section précédente, les observations et des témoignages de riverains de longue date semblent pointer vers une augmentation de la fréquence des débâcles hivernales depuis quelques années.

5.2 Rivière Sainte-Anne

L'Université Laval a fait un suivi régulier des glaces de la rivière Ste-Anne entre 2014 et 2018. La Figure 12 présente le modèle de débâcle dynamique, à gauche pour la partie hivernale à partir du 1^{er} novembre et à droite pour la partie printanière à partir du 15 février. En général, un imposant barrage de frazil commence à se former très tôt durant la période hivernale à la limite aval de la zone couverte par le modèle et il peut dès lors intercepter des glaces provenant de l'amont. Les rapides de la rivière Ste-Anne se libèrent de leur glace à un débit supérieur à 50 m³/s à la station 050408. Des embâcles importants sont survenus dans le passé alors que le débit était d'environ 100 m³/s ou plus et que les DJDC-5 étaient inférieurs à 150. En général, l'accumulation massive de frazil est la dernière à fondre au printemps et sa présence prolongée peut mener à l'interception de trains de glaces et à la formation d'embâcle jusqu'à 250 DJDC-5.

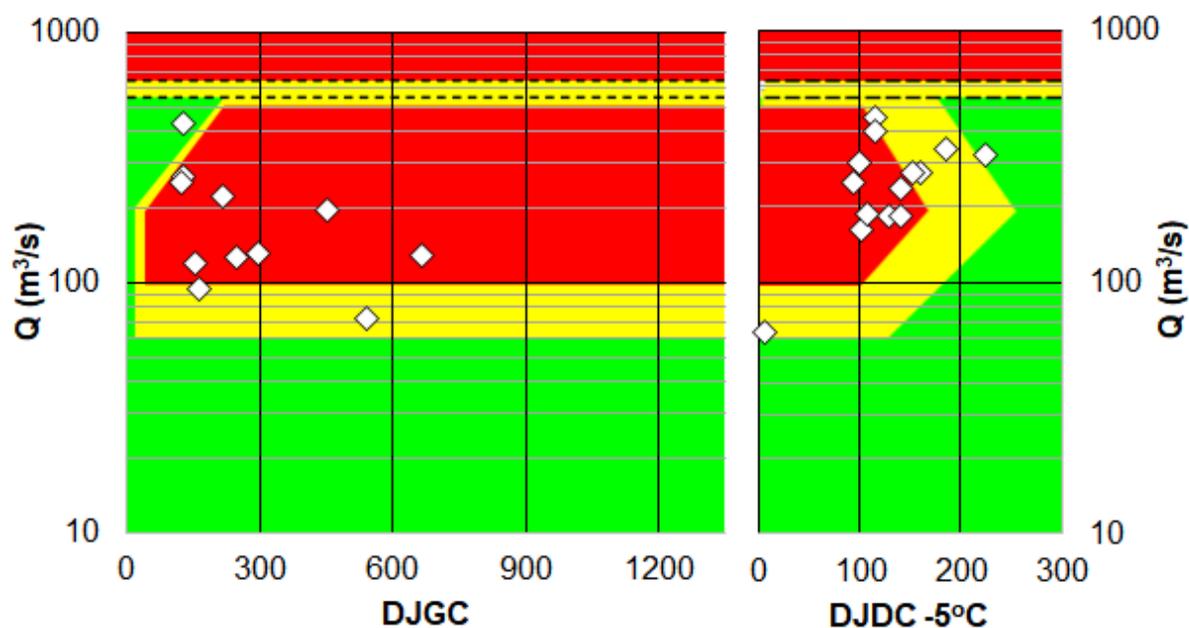


Figure 12. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Ste-Anne (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus des connaissances de l'Université Laval sur cette rivière).

L'application du modèle présenté à la Figure 12 aux données météorologiques et hydrologiques historiques (1972-2000) a mené à une estimation de la distribution cumulative et hebdomadaire des pics de crues causant des débâcles dynamiques sur la rivière Ste-Anne (Figure 13). La moyenne obtenue est de 2.5 débâcles dynamiques par hiver, avec une fréquence historique non-nulle débutant dès le mois de novembre et se terminant dans les premiers jours du mois de mai. La période historique la plus active pour les débâcles dynamiques sur cette rivière se déroule au mois de décembre et dans les trois premières semaines du mois d'avril. La rivière a été affectée par des débâcles hivernales assez régulièrement au cours des hivers passés, incluant le 11 janvier 2016 ainsi que le 12 janvier 2018 et bien que l'analyse future n'ait pu être complétée, en considérant les observations et les témoignages de riverains de longue date, il est probable que la fréquence des débâcles hivernales soit en croissance.

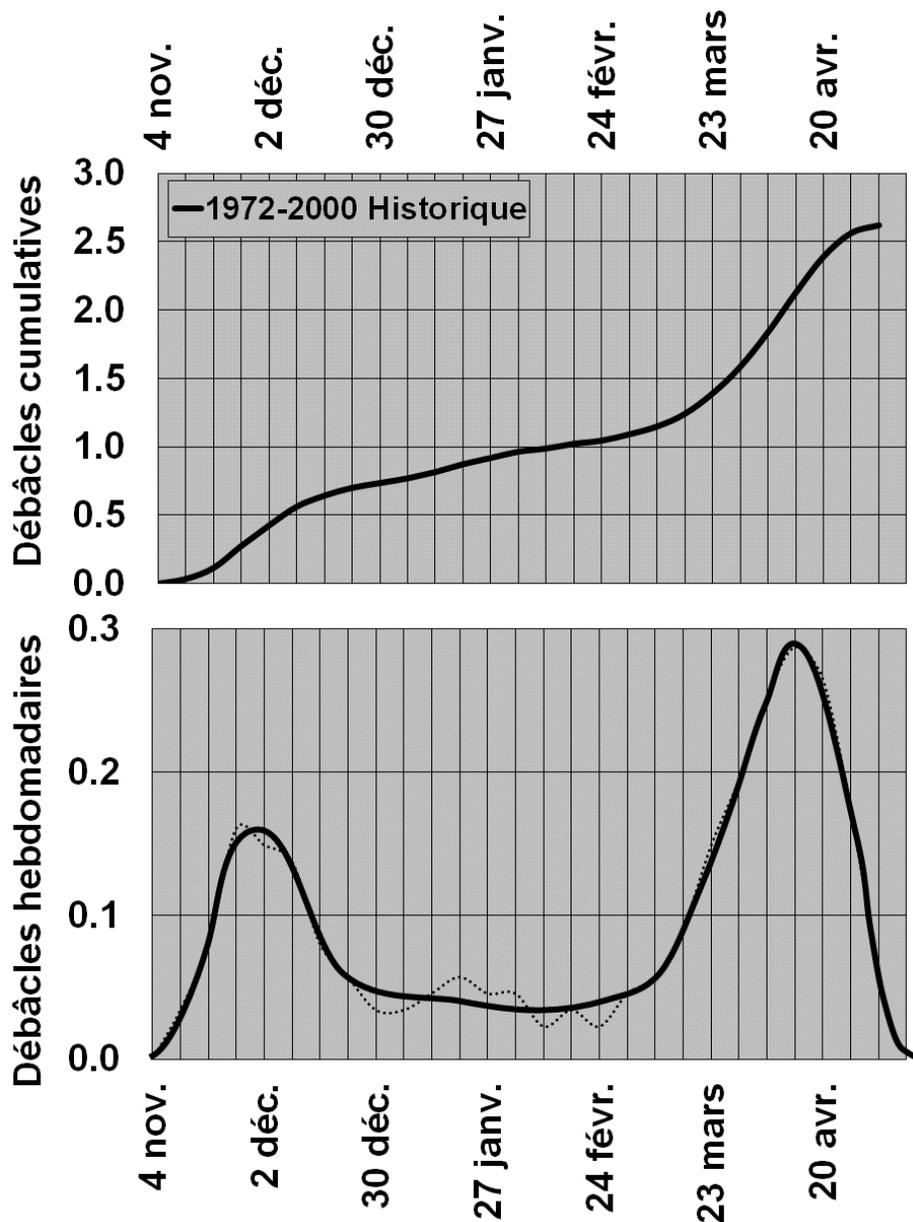


Figure 13. Distribution cumulative et hebdomadaire historique des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Ste-Anne à St-Raymond de Portneuf.

Selon la méthodologie utilisée, les embâcles historiques causent environ 750 000\$ de dommages annuellement le long de la rivière Ste-Anne à St-Raymond de Portneuf. Une autre approche a mené à une estimation d'environ 530 000\$ par année (Turcotte et coll., 2017). Comme pour la fréquence des embâcles des dernières années, il est probable que la tendance du dommage moyen annuel soit à la hausse. Par contre, l'Université Laval, en partenariat avec le ministère de la Sécurité publique du Québec, travaille activement à réduire le risque d'inondation à St-Raymond.

5.3 Rivière L'Assomption

Le modèle de débâcles dynamiques de la rivière L'Assomption est présenté à la Figure 14. Considérant la morphologie des zones situées en amont du secteur couvert par le modèle, il est anticipé que la production de frasil accélère la formation d'un couvert de glace complet à certains endroits. Il en résulte une possibilité de formation d'embâcles à partir de 50 DJGC mesurés à Joliette, en aval du bassin versant, soit relativement tôt dans la saison froide. Les embâcles ayant été rapportés dans le passé (losanges blancs à la Figure 14) étaient tous associés à des crues de débit supérieur à environ $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Par contre, un embâcle a déjà été observé par les auteurs dans la rivière Ouareau, voisine de la rivière L'Assomption, à un débit inférieur à $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Aussi, considérant les débits médians historiques hivernaux sous les $10 \text{ m}^3/\text{s}$, il est fort probable que des glaces soient mobilisées à un débit d'environ 30 à $40 \text{ m}^3/\text{s}$ dans les rapides, d'où le seuil conservateur fixé à la Figure 14. Au printemps (partie de droite de la Figure 14), il semble que très peu d'embâcles aient été rapportés sous les 100 DJDC-5, possiblement à cause de la position de la station météorologique de référence par rapport à l'orientation du bassin (nord-sud) et à sa pente (massif des Laurentides). Par ailleurs, comme pour les autres rivières, la formation d'un embâcle au-dessus de 250 DJDC-5 est peu envisageable à cause de la détérioration ou fonte trop importante du couvert de glace le long des secteurs couverts par le modèle. Il faut spécifier que la présence des premières zones d'eau libre accélère de manière exponentielle la fonte des glaces lorsque les DJD s'accumulent.

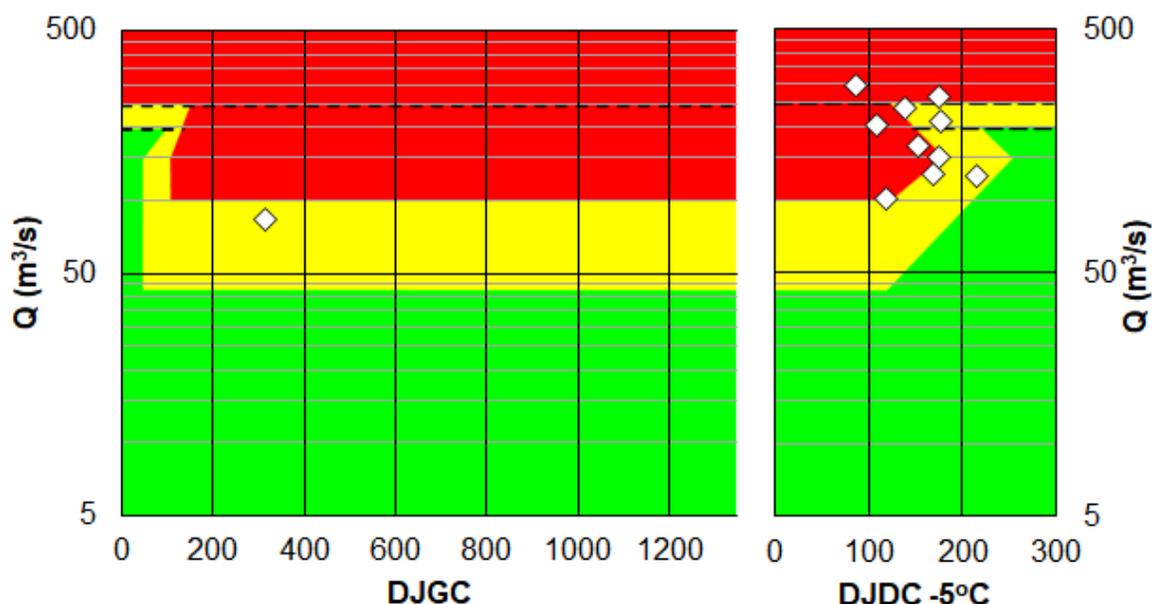


Figure 14. Modèle de débâcle dynamique de la rivière L'Assomption (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus des connaissances de l'Université Laval sur la physique de la débâcle en général sur ce type de cours d'eau).

L'application du modèle présenté à la Figure 14 aux données météorologiques et hydrologiques historiques (1972-2000) a mené à une estimation de la distribution cumulative et hebdomadaire des pics de crues causant des débâcles dynamiques sur la rivière L'Assomption (ligne noire à la Figure 15). La moyenne obtenue est de 1.3 débâcles dynamiques par hiver, avec une fréquence historique non-nulle débutant à la mi-novembre et se terminant dans les premiers jours du mois de mai. La période historique la plus active pour les débâcles dynamiques sur cette rivière se déroule entre la mi-mars et la mi-avril.

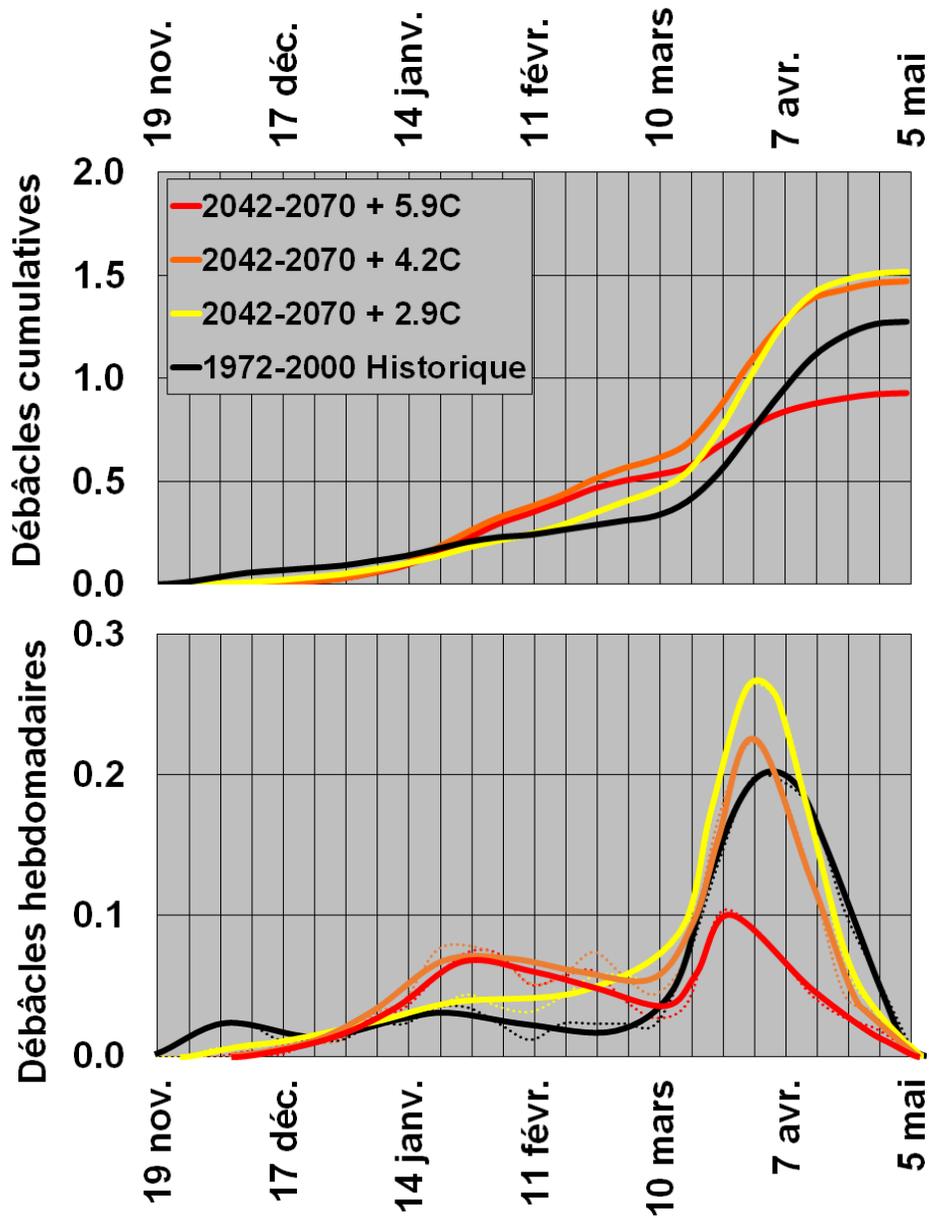


Figure 15. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière L'Assomption.

La Figure 15 présente également les données cumulatives et hebdomadaires des trois niveaux d'intensité de changements climatiques, incluant l'ajustement effectué en considérant les données de référence (voir statistiques à l'Annexe 2). Il semble que les changements climatiques, selon leur intensité, affecteront à la hausse ou à la baisse la fréquence des débâcles causant des embâcles. Aussi, dans le cas de la rivière L'Assomption, des débâcles hivernales plus fréquentes pourraient survenir et la débâcle printanière pourrait être devancée de 1 à 2 semaines.

La Figure 16 présente les tendances possibles, selon le réchauffement climatique simulé à Joliette, de la fréquence des débâcles dynamiques hivernales et printanières de même que du dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles de glaces, selon la méthodologie décrite à la section 4. Pour la rivière L'Assomption, il semble que la tendance soit incertaine, c'est-à-dire qu'il pourrait y avoir hausse ou baisse de la fréquence des débâcles dynamiques (Figure 16, partie du haut), alors que pour le DMA, la tendance semble plutôt être à la hausse, à cause de l'occurrence future possible de crues de plus forte amplitude en présence de glace. Une forte hausse du DMA associée aux inondations par embâcle est donc à considérer comme impact probable résultant des changements climatiques.

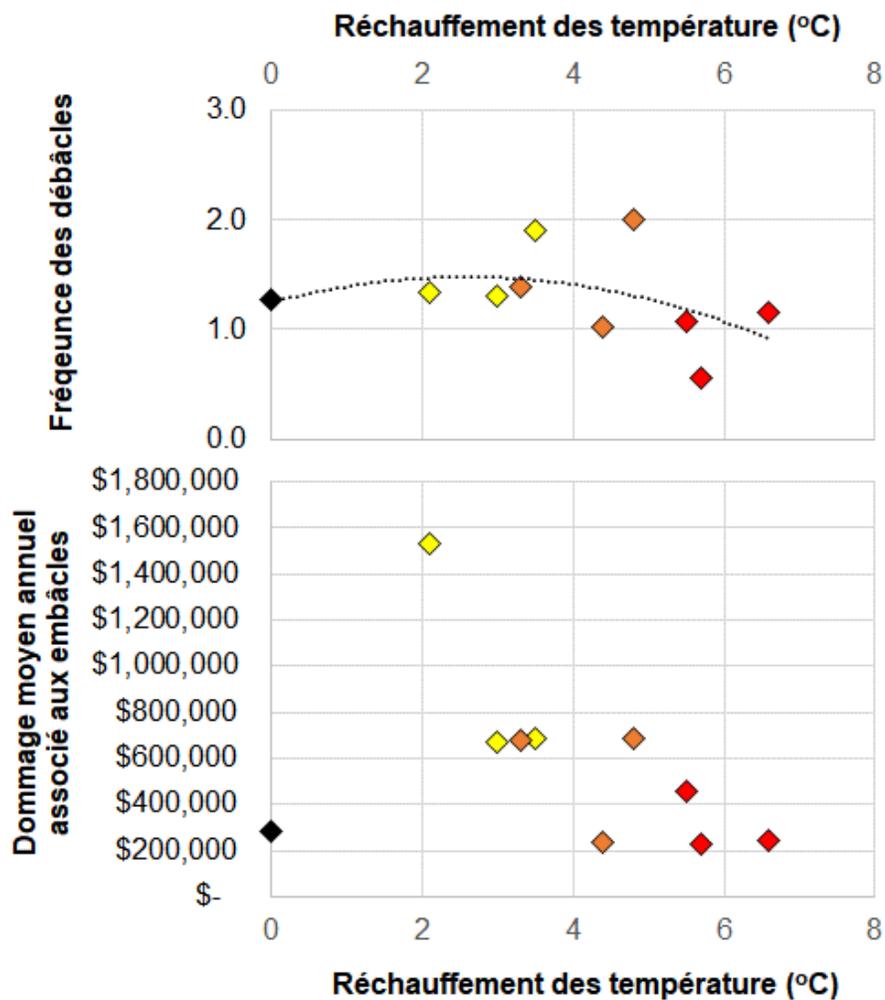


Figure 16. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière L'Assomption, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à avril) à Joliette. La valeur en noire représente la donnée historique.

5.4 Rivière Châteauguay

La Figure 17 présente le modèle de débâcles dynamiques de la rivière Châteauguay, dont le bassin versant est le plus au sud de ce projet de recherche. Selon les données relatives au bassin versant de même qu'en se basant sur les embâcles historiques, il semble qu'une probabilité non-nulle de formation d'embâcle débute à environ 100 DJGC à l'aéroport Pierre-Elliott Trudeau de Montréal. Les embâcles historiques ont également été utilisés pour tracer un seuil de débâcle dynamique imminent à $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Par contre, en considérant le débit historique du mois de février à environ $15 \text{ m}^3/\text{s}$, le débit associé aux premiers mouvements de glace a été fixé à un seuil plus conservateur de $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Au printemps (partie de droite de la Figure 17), il semble que très peu d'embâcles aient été observés au-delà de 150 DJDC-5, ce qui s'explique possiblement par l'orientation sud-nord du bassin versant. Un seuil thermique plus conservateur de 200 DJDC-5 a tout de même été choisi, de manière comparable au modèle d'autres rivières.

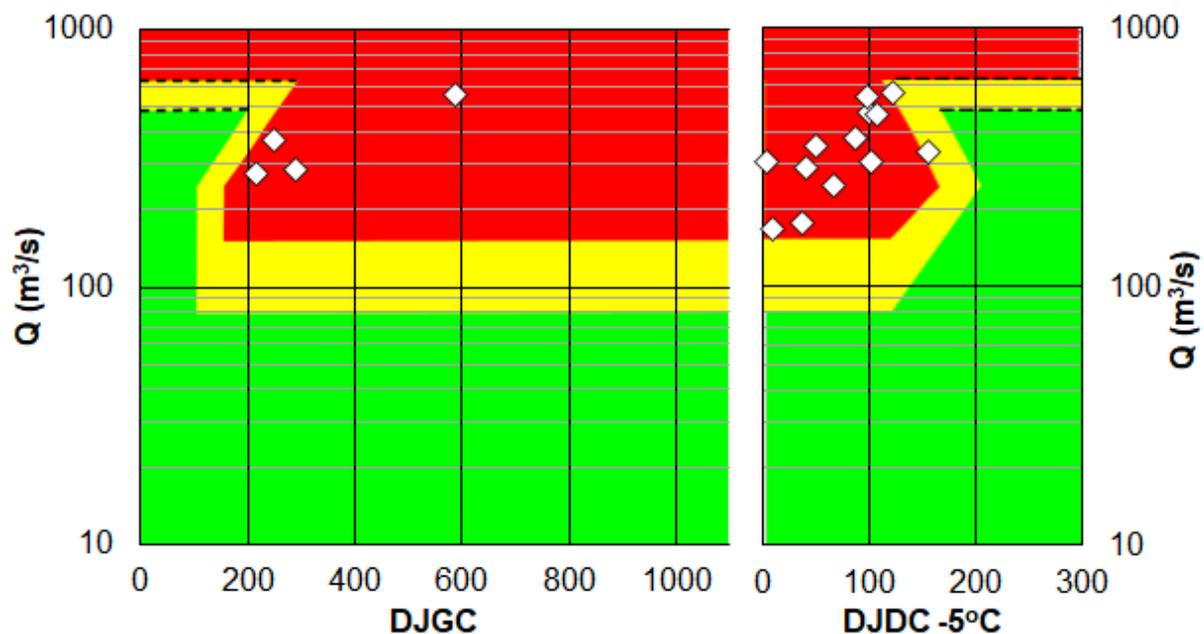


Figure 17. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Châteauguay (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus des connaissances de l'Université Laval sur la physique de la débâcle en général sur ce type de cours d'eau).

Les données météorologiques de l'aéroport de Montréal et les données hydrologiques de la station 030905 entre 1972 et 2000 ont été appliquées au modèle de la Figure 17. La distribution cumulative des débâcles est présentée à la partie du haut de la Figure 18. Historiquement, la rivière Châteauguay était affectée par environ 3 événements de débâcle causant des embâcles à chaque hiver, avec une probabilité plus importante dans les semaines autour du 20 mars, mais également avec très peu de répit durant la période hivernale. La transition entre les résultats historiques et les données associées à la période future de 2042 à 2070 était assez cohérente pour ne pas avoir à effectuer une analyse des données de référence. On constate en effet que les débâcles cumulatives passent de 3.0 à 2.6, puis à 2.0 et à 1.5 selon différents niveaux d'intensité de changements climatiques.

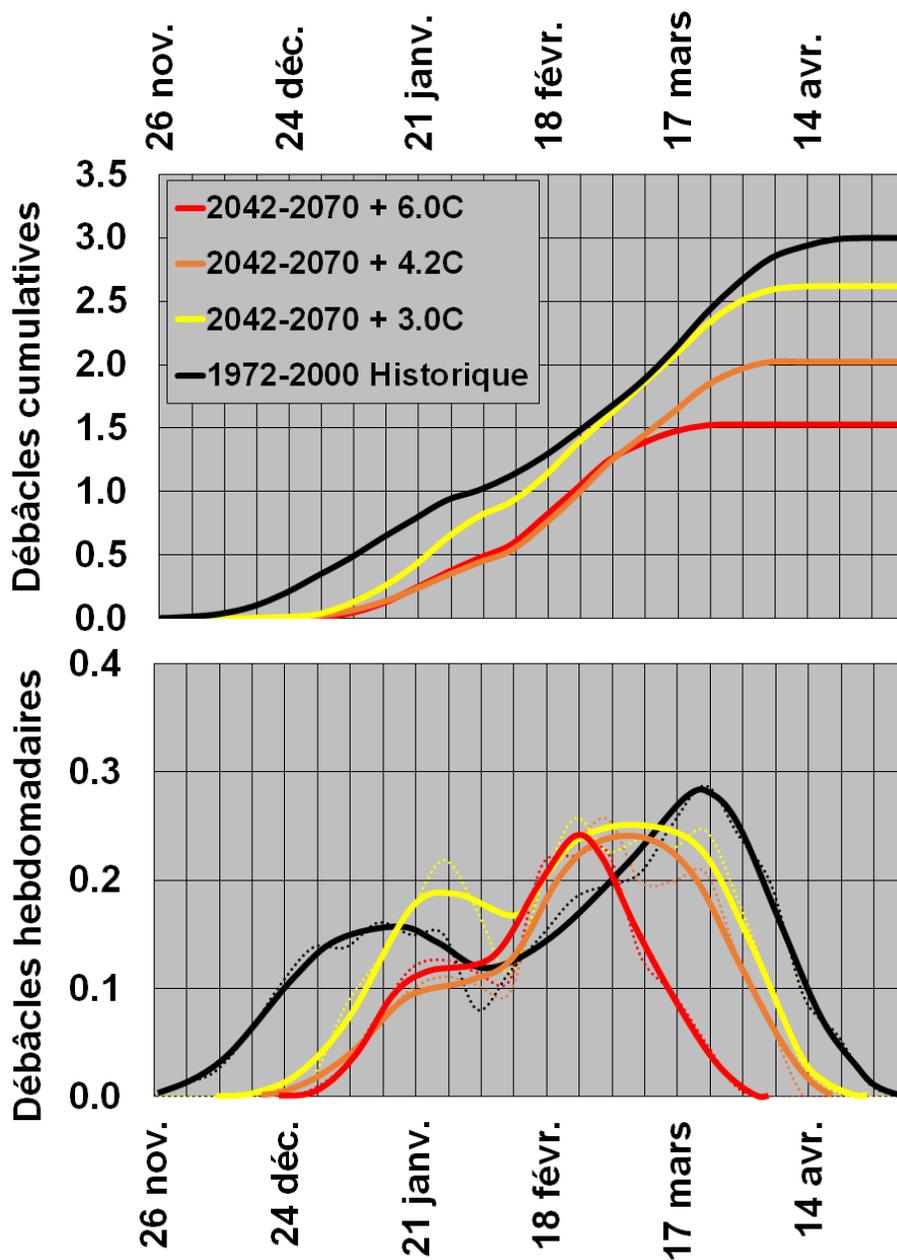


Figure 18. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Châteauguay.

Le bas de la Figure 18 montre plus en détail l'évolution future possible de la distribution hebdomadaire des débâcles dynamiques, en fonction de l'intensité des changements climatiques (voir statistiques à l'Annexe 2). On peut constater que l'hiver pourrait être retardé de 3 à 5 semaines et se terminer 2 à 5 semaines plus tôt, selon les scénarios analysés. Aussi, la faible période hivernale historique associée à une réduction de la fréquence des débâcles hebdomadaire disparaîtrait dans tous les contextes de changements climatiques.

La Figure 19 présente, pour la rivière Châteauguay, les tendances évaluées de la fréquence des débâcles dynamiques hivernales et printanières de même que du dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles de glaces dans différents contextes de changements climatiques, selon la méthodologie décrite à la section 4. La tendance semble assez claire, avec une réduction maximale de 60% de la fréquence des débâcles qui causent des embâcles et des inondations à l'horizon 2042-2070, mais également de l'intensité des débâcles, qui se traduit par une réduction maximale du DMA d'environ 70%.

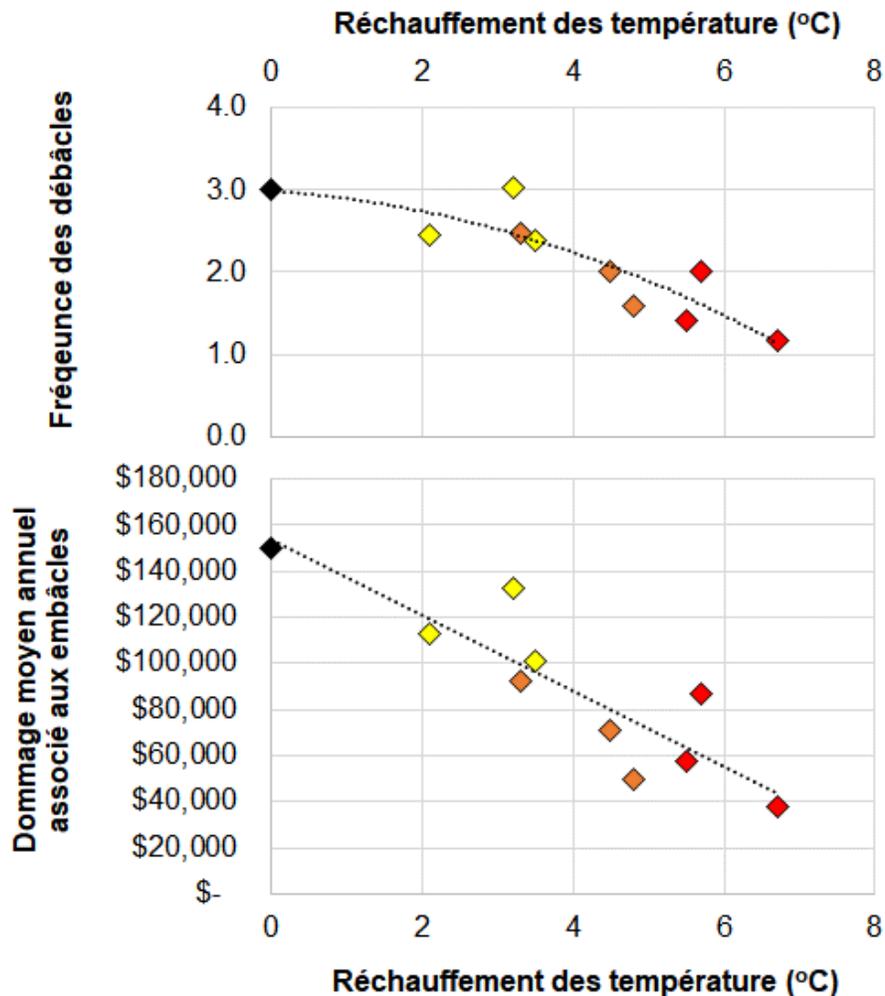
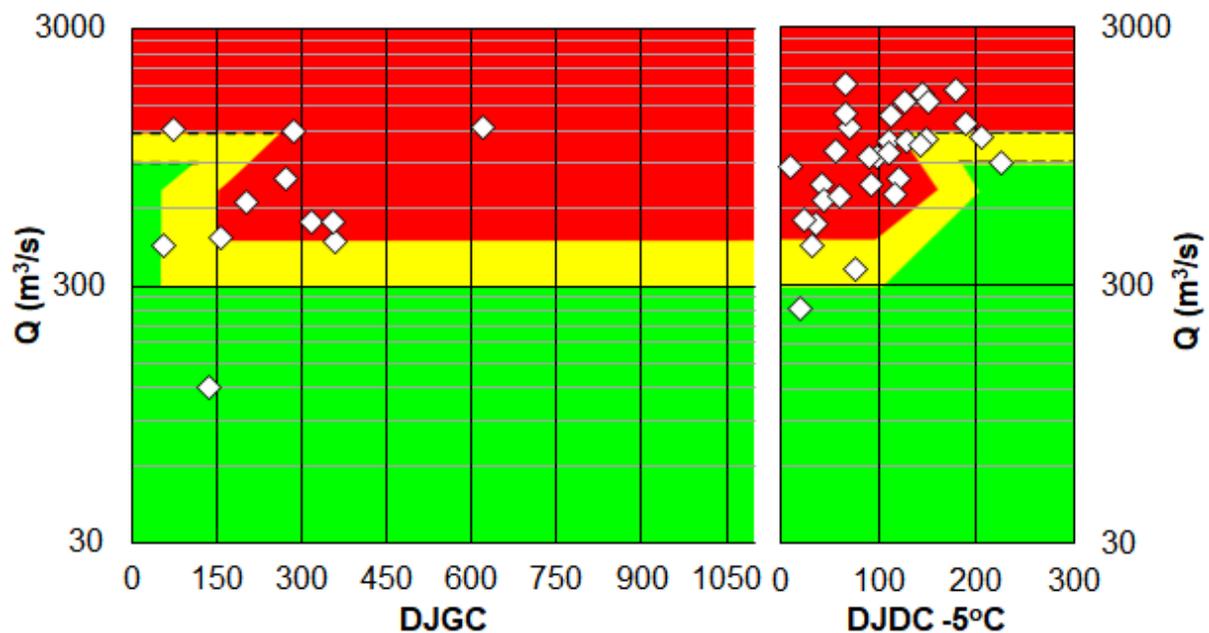


Figure 19. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière Châteauguay, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à avril) à l'Aéroport de Montréal. La valeur en noire représente la donnée historique.

5.5 Rivière Saint-François

La Figure 20 présente le modèle de débâcles dynamiques de la rivière St-François, valide sur environ 200 km entre les villes de Weedon et Pierreville, avec des données hydrologiques associées à la station 030208 et des données météorologiques mesurées à Drummondville. Cette rivière a une dynamique assez complexe à cause de sa régulation partielle et de la présence de lacs importants en amont de Sherbrooke. Selon les données relatives aux embâcles historiques (losanges blancs à la Figure 20), il semble qu'une probabilité non-nulle de formation d'embâcles débute à environ 50 DJGC au début de l'hiver. Les débits associés aux embâcles historiques ont également permis de fixer un seuil de débâcle imminente à $450 \text{ m}^3/\text{s}$, mais, considérant les dommages rapportés par le MSP, les embâcles associés au plus grand risque pourraient se former à partir de $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour sa part, le seuil plus conservateur de mouvements de glace a été fixé à $300 \text{ m}^3/\text{s}$ afin de tenir compte de certains événements historiques ayant peu de dommages associés. Au printemps (partie de droite de la Figure 20), le bassin étant orienté de manière générale vers le nord et la station météorologique de référence se trouvant dans sa partie aval, la probabilité d'embâcles devient pratiquement nulle au-delà de 200 DJDC-5. Les événements répertoriés comme des embâcles historiques (losanges blancs) se trouvant dans la zone verte de la Figure 20 sont possiblement associés au frasil ou à des erreurs de date ou d'estimation du débit.



L'application du modèle présenté à la Figure 20 aux données météorologiques et hydrologiques historiques (1982-2010, exceptionnellement) a mené à une estimation de la distribution cumulative et hebdomadaire des pics de crues causant des débâcles dynamiques sur la rivière St-François (ligne noire à la Figure 15). La moyenne obtenue est d'environ 2.5 crues associées à des débâcles dynamiques par hiver, avec une fréquence historique non-nulle débutant à la mi-novembre et se terminant à la fin du mois d'avril. La période historique la plus active pour les débâcles dynamiques sur cette rivière se déroule, comme pour la rivière L'Assomption, entre la mi-mars et la mi-avril.

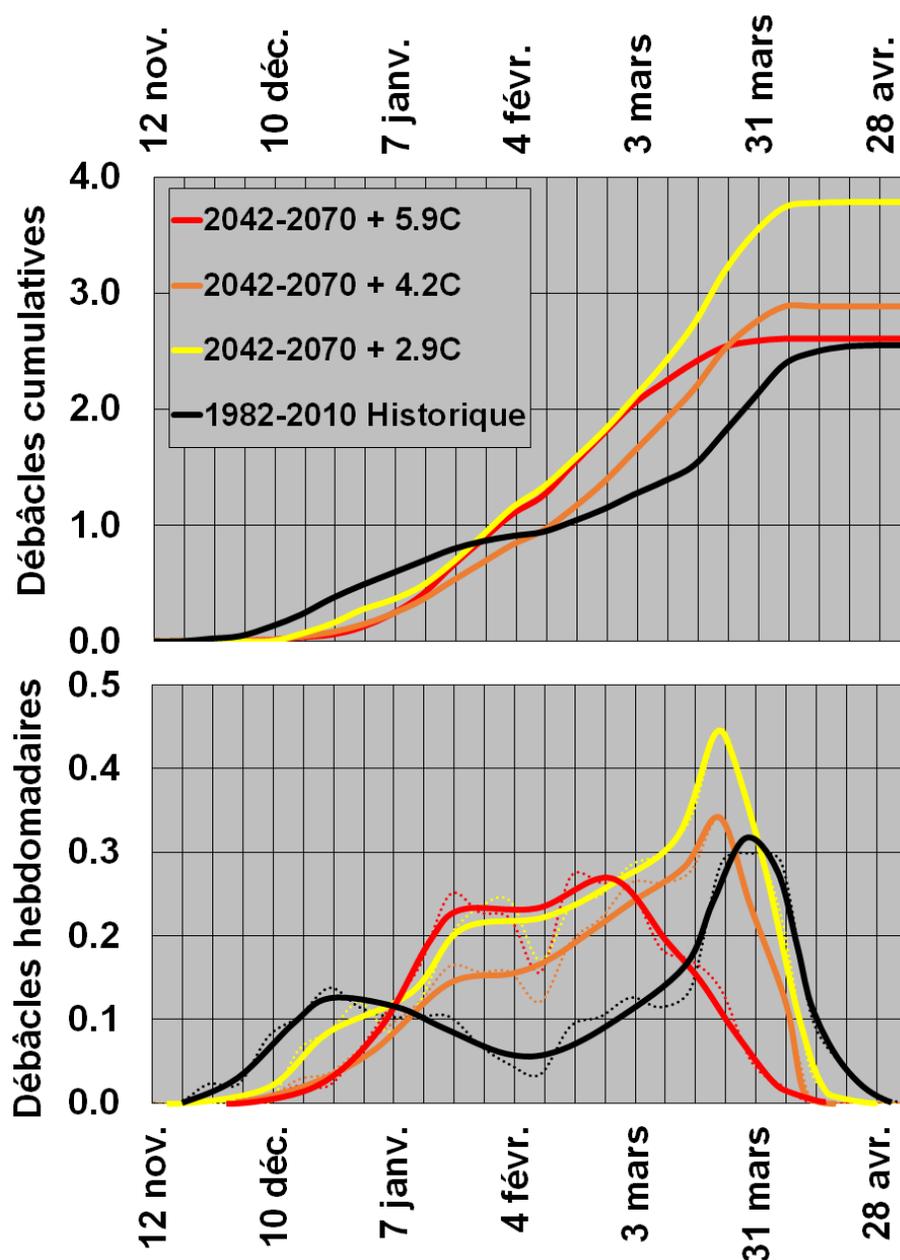


Figure 21. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière St-François.

La Figure 21 présente également les résultats associés aux trois niveaux d'intensité de changements climatiques pour la période de 2042-2070, après correction considérant les données de référence (voir statistiques à l'Annexe 2). Il semble que des changements climatiques modérés (+2.9°C) contribueraient à une compression temporelle de l'hiver, raccourci d'environ 3 à 4 semaines, mais à une fréquence des débâcles hivernales et printanières qui seraient nettement plus élevée. Puis, pour des scénarios de changements climatiques plus intenses, l'hiver continuerait à se comprimer, les débâcles printanières tendraient à se fusionner aux débâcles hivernales et globalement, la fréquence des débâcles pendant toute la saison des glaces reviendrait possiblement à la moyenne historique.

Une conclusion similaire peut également être tirée de la Figure 22, dont la partie supérieure montre une tendance à la hausse, puis à la baisse de la fréquence des débâcles dynamiques sur la rivière St-François pour les 9 scénarios de changements climatiques. Par ailleurs, l'analyse des dommages et l'application des relations empiriques développées pour la rivière St-François (bas de la Figure 22) tendent vers une légère augmentation de 15% à une baisse plus significative possible de 40% pour la période 2042-2070.

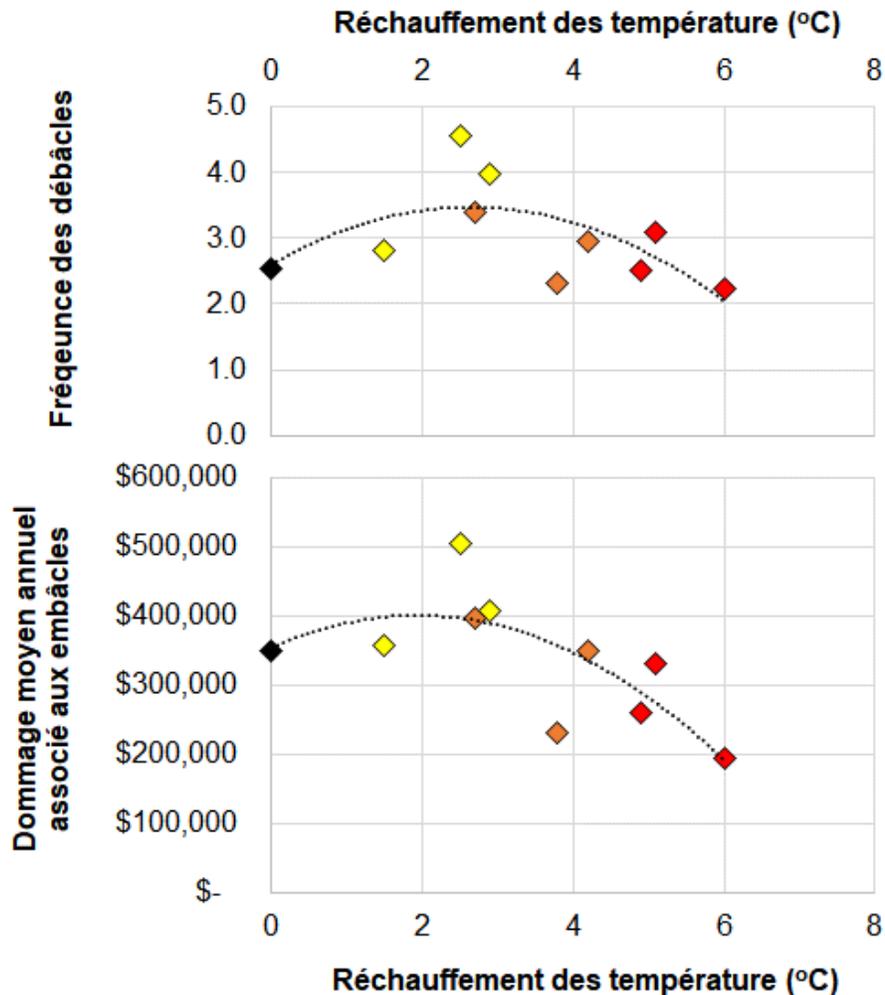


Figure 22. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière St-François, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à avril) à Drummondville. La valeur en noire représente la donnée historique.

5.6 Rivière Chaudière

Le modèle de débâcles dynamiques de la rivière Chaudière, bien connue pour ses embâcles, est présenté à la Figure 23. Ce modèle est valide sur la majeure partie des zones vulnérables de la rivière, soit entre les villes de St-Ludger et de St-Lambert, donc sur environ 150 km. La station hydrologique de référence est située au barrage Sartigan (023429) et non pas à St-Lambert de Lauzon (023402), tandis que les données météorologiques sont mesurées à Beauceville, soit au centre du bassin versant. Cette rivière a une dynamique assez simple, avec des affluents vigoureux et une pente diminuant significativement l'amont vers l'aval, combinaison qui cause des embâcles sur une base annuelle.

Les données relatives aux embâcles historiques (losanges blancs à la Figure 23) suggèrent qu'une probabilité non-nulle de formation d'embâcles débute au-delà de 200 DJGC. Toutefois, puisqu'un couvert de glace se forme rapidement dans certains secteurs, les seuils d'initiation de débâcles dynamiques possibles sont fixés à 75 et 150 DJGC. En hiver, la majeure partie des débâcles dynamiques surviennent à un débit supérieur à 160 m³/s, avec quelques événements s'étant manifestés tout juste au-dessus des 100 m³/s. Ces deux seuils sont donc utilisés dans le modèle. Historiquement, des embâcles relativement tardifs sont survenus sur cette rivière et il est jugé qu'il faut plus de 250 DJDC-5 pour dégrader les glaces à un point où elles n'ont plus la résistance suffisante pour former un embâcle important.

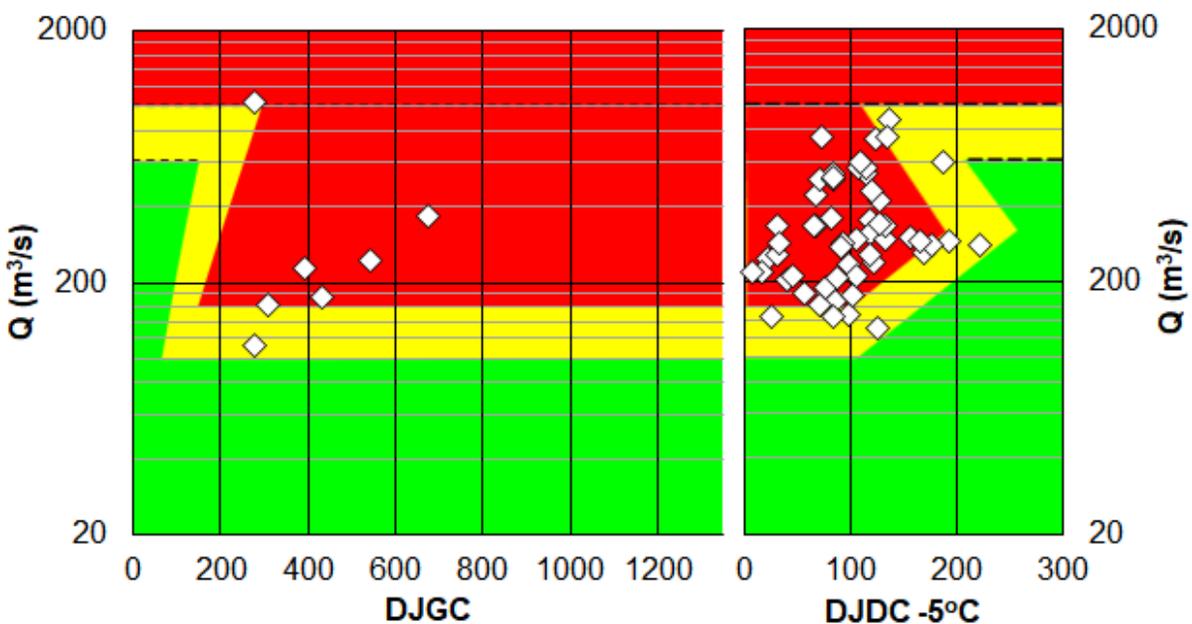


Figure 23. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Chaudière (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus des connaissances de l'Université Laval sur cette rivière depuis quelques années).

Ce modèle a été utilisé pour convertir les données météorologiques et hydrologiques de la période 1972-2000 en fréquence historique cumulative et hebdomadaire des crues causant des embâcles (ligne noire au haut de la Figure 24). La moyenne obtenue est d'environ 3.3 débâcles dynamiques par hiver, se concentrant nettement entre le début mars et la fin avril, mais avec quelques événements possibles dès le début de l'hiver, puis de manière un peu moins fréquente durant la période froide de janvier et février (bas de la Figure 24).

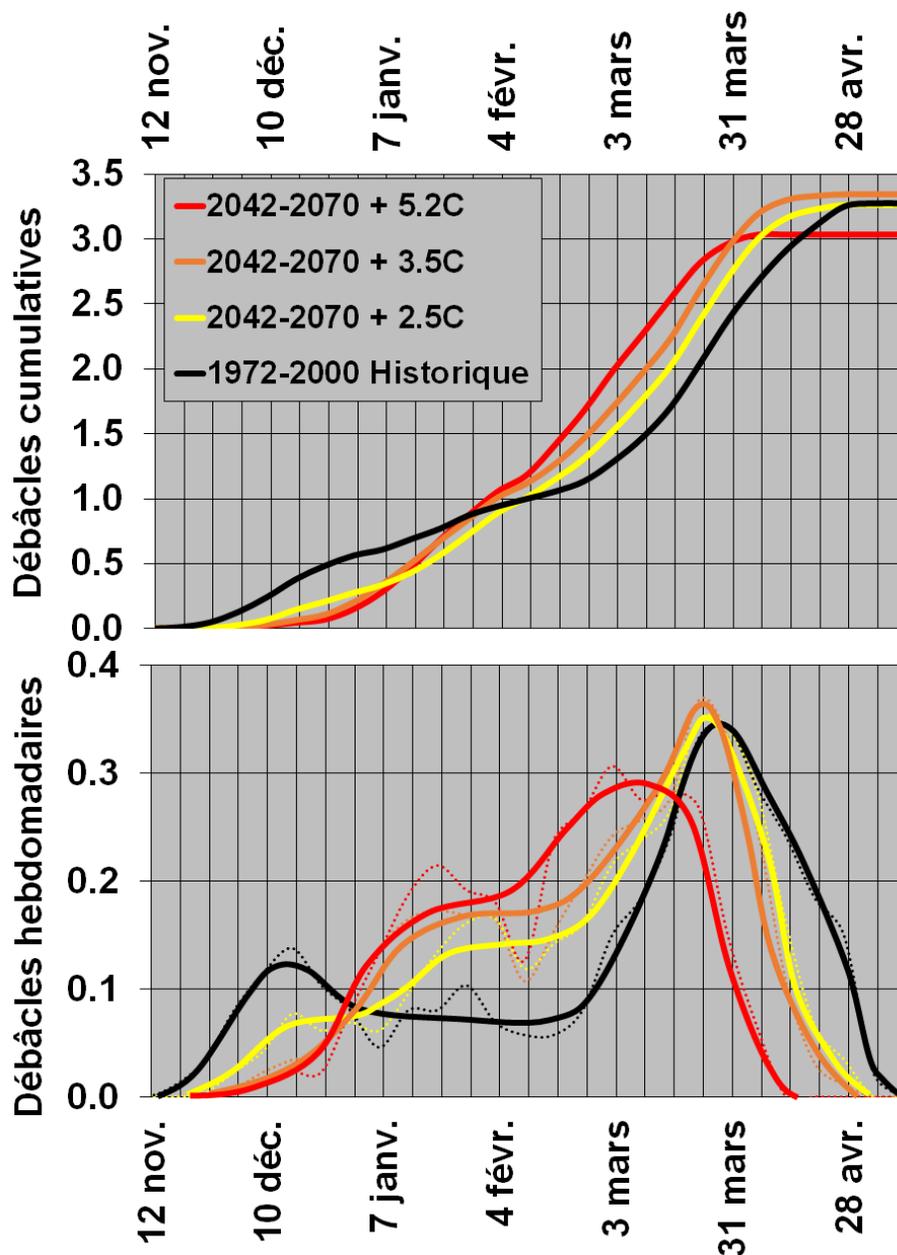


Figure 24. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Chaudière.

Comme pour la rivière Châteauguay, la transition entre les résultats historiques et les données futures de 2042 à 2070 sur la rivière Chaudière était assez cohérente pour ne pas avoir à effectuer une analyse des données de référence (voir statistiques à l'Annexe 2). Au haut de la Figure 24, on constate en effet que les débâcles cumulatives sont relativement constantes alors que les courbes présentent une transition dont la forme s'explique par l'analyse visuelle du bas de la Figure 24. Dans le futur, on peut en effet entrevoir un raccourcissement de l'hiver de 3 à 5 semaines avec des débâcles printanières plus hâtives et qui tendent même à s'estomper, comme pour les rivières Châteauguay et St-François. Par ailleurs, les débâcles hivernales pourraient devenir de plus en plus fréquentes dans le futur.

La Figure 25 présente les tendances associées à la fréquence des débâcles dynamiques hivernales et printanières de même que du dommage moyen annuel (DMA) lié aux inondations par embâcles de glaces selon différentes intensités de réchauffements climatiques. Dans les deux cas, la tendance semble assez stable pour la rivière Chaudière. Évidemment, puisque cette rivière cause des dommages importants sur une base régulière, le message ici tend à démontrer que les changements climatiques ne vont probablement pas améliorer la situation.

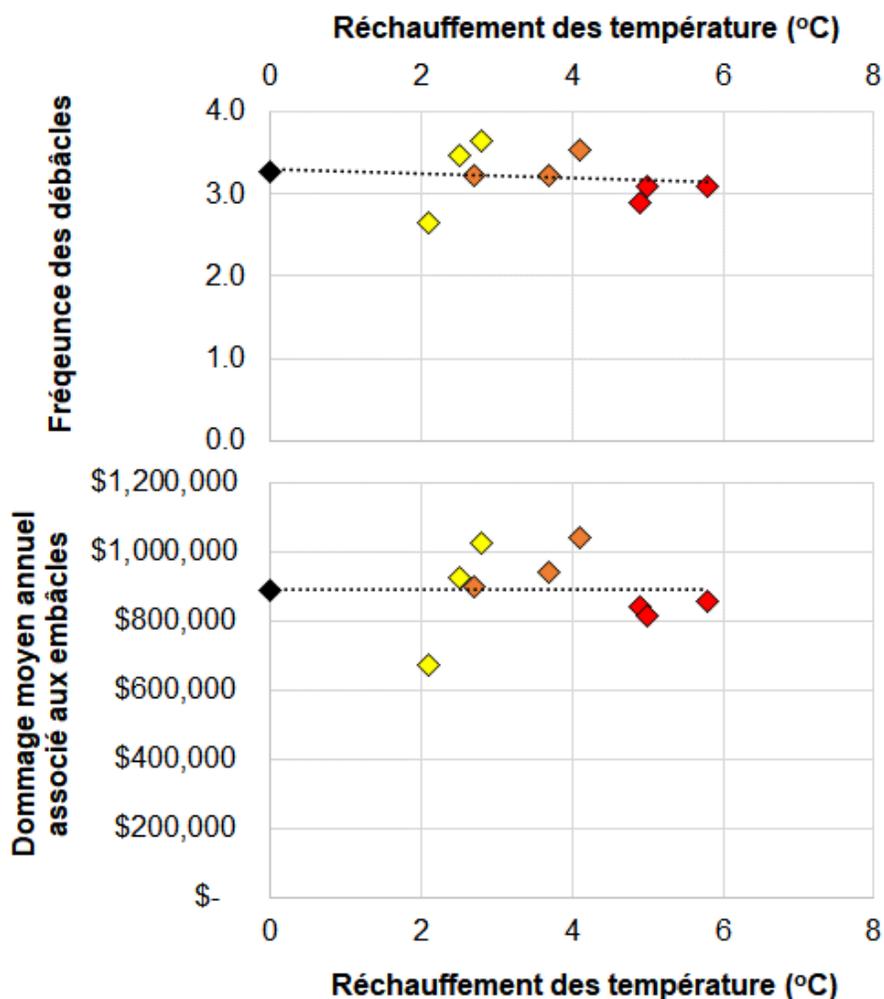


Figure 25. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière Chaudière, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à avril) à Beauceville. La valeur en noire représente la donnée historique.

5.7 Rivière Matapédia

La Figure 26 présente le modèle de débâcles dynamiques de la rivière Matapédia, calibré pour être applicable en aval de Causapsal jusqu'à son embouchure dans la rivière Restigouche et même sur une partie de la Restigouche jusqu'à la Baie des Chaleurs. Toutefois, cette fusion entre une rivière venant du nord et une autre, plus imposante, venant du sud, rend la précision du modèle plus incertaine dans ce secteur. Les données météorologiques de référence sont prises plus au nord, et plus en altitude, à Causapsal, tandis que la station hydrologique de référence porte le numéro 011509.

Très peu de données étaient disponibles pour calibrer la partie hivernale du modèle. Les différents seuils ont été établis en analysant, entre autres, les oscillations de débits instantanés qui indiquent la présence de glace dans la rivière au début de l'hiver. Les losanges blancs dans la partie de droite de la Figure 26 sont utilisés pour tracer la limite de la période contraignante des glaces, entre 180 et 220 DJDC-5. Des observations sur le terrain pourraient permettre un réajustement des différents seuils, mais pour le moment, avec les connaissances et les données disponibles, il s'agit du meilleur modèle pouvant être développé pour la rivière Matapédia.

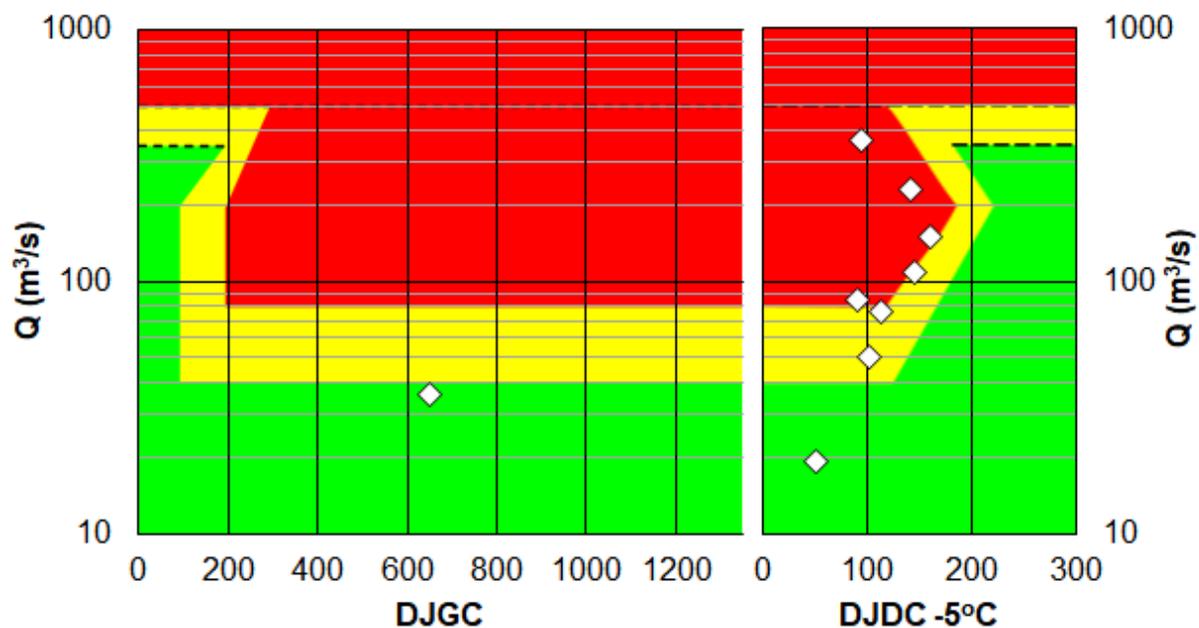


Figure 26. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Matapédia (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus d'information complémentaire et des connaissances de la physique de la débâcle sur ce type de cours d'eau).

L'application du modèle présenté à la Figure 26 aux données météorologiques et hydrologiques historiques (1972-2000) a permis d'effectuer une estimation de la distribution cumulative et hebdomadaire des pics de crues causant des débâcles dynamiques sur la rivière Matapédia (ligne noire à la Figure 27). La moyenne obtenue est d'environ 2.2 crues associées à des débâcles dynamiques par hiver, avec une fréquence historique non-nulle débutant dès le début novembre et se terminant au début de mois de mai. La période historique la plus active pour les débâcles dynamiques sur cette rivière se déroule au tout début de mois de décembre ainsi qu'à la fin du mois d'avril.

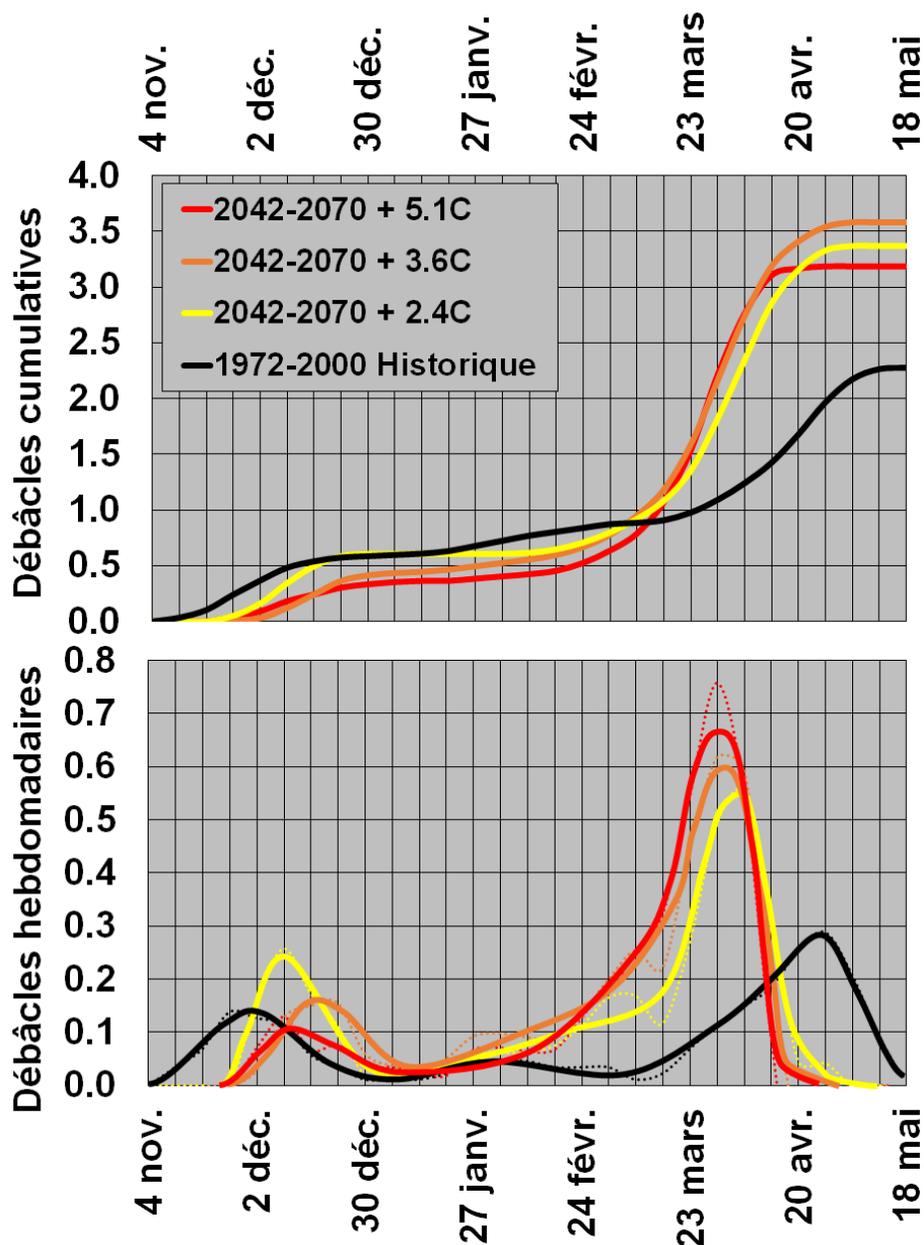


Figure 27. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Matapédia.

La tendance associée aux résultats des projections climatiques (trois niveaux d'intensité, lignes jaune, orange et rouge à la Figure 27) ne concordait initialement pas avec la tendance historique et les données de références ont été utilisées pour obtenir des résultats plus représentatifs (voir Section 4.5 et (voir statistiques à l'Annexe 2). Selon ces résultats, il semble que, pour la période de 2042 à 2070, les débâcles dynamiques du début de l'hiver seront retardées d'environ 1 à 3 semaines avec une amplitude comparable aux fréquences historiques alors que les débâcles dynamiques printanières seront devancées de 3 à 4 semaines, avec une fréquence probable beaucoup plus élevée que celle de la moyenne historique.

Enfin, la Figure 28 présente la tendance, selon les 9 scénarios de changements climatiques à partir de la donnée historique (noire), de la fréquence des débâcles dynamiques (haut) et du dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles de glaces (bas). Les deux graphiques suggèrent des tendances futures à la hausse. Pour ce qui est du DMA, il pourrait être 100% supérieur à la moyenne historique probable, passant de presque 200 K\$ par année à presque 400 K\$ par année.

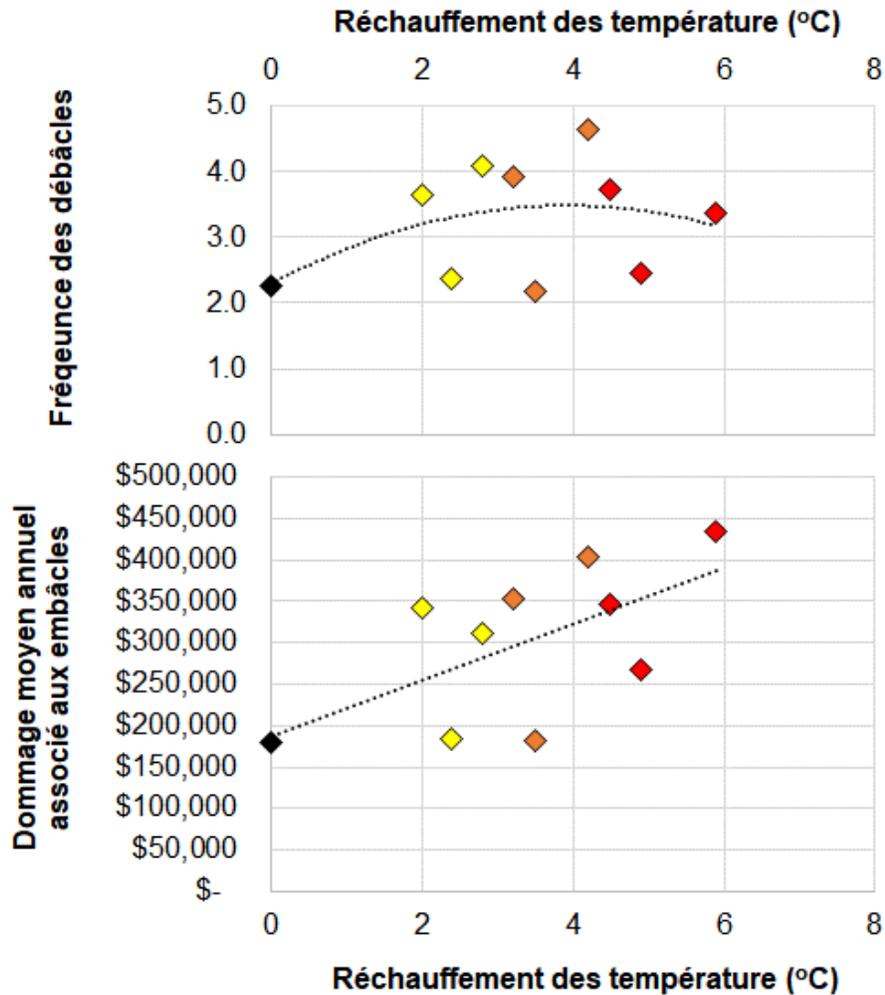


Figure 28. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière Matapédia, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à avril) à Causapscal. La valeur en noire représente la donnée historique.

5.8 Rivière Matane

La Figure 29 présente l'avant dernier modèle de ce projet, celui de la rivière Matane, calibré pour être valide sur environ 30 km entre les villes de St-René de Matane et l'embouchure dans l'Estuaire du St-Laurent. Les données hydrologiques associées au modèle sont celles de la station 021601 alors que les données météorologiques sont mesurées un peu à l'intérieur des terres, à St-Jean de Cherboung. Comme pour la Matapédia, très peu de données d'embâcles historiques ont été trouvées pour permettre de calibrer la partie hivernale du modèle. Considérant l'orientation sud-nord du bassin et sa relative inclinaison, des seuils thermiques de 100 et 200 DJGC ont été adoptés. Les embâcles historiques et des données hydrologiques ont tout de même permis de fixer les seuils de débâcles à 40 et 50 m³/s. Ce modèle a la particularité de proposer que les embâcles seraient évacués à 400 m³/s, soit sous le seuil d'inondations à l'eau libre qui est fixé à 500 m³/s. Une vérification au fil des années à venir devrait confirmer ou infirmer cette hypothèse. Le seuil thermique de la débâcle a été fixé entre 150 et 200 DJDC-5, selon les embâcles printaniers historiques répertoriés.

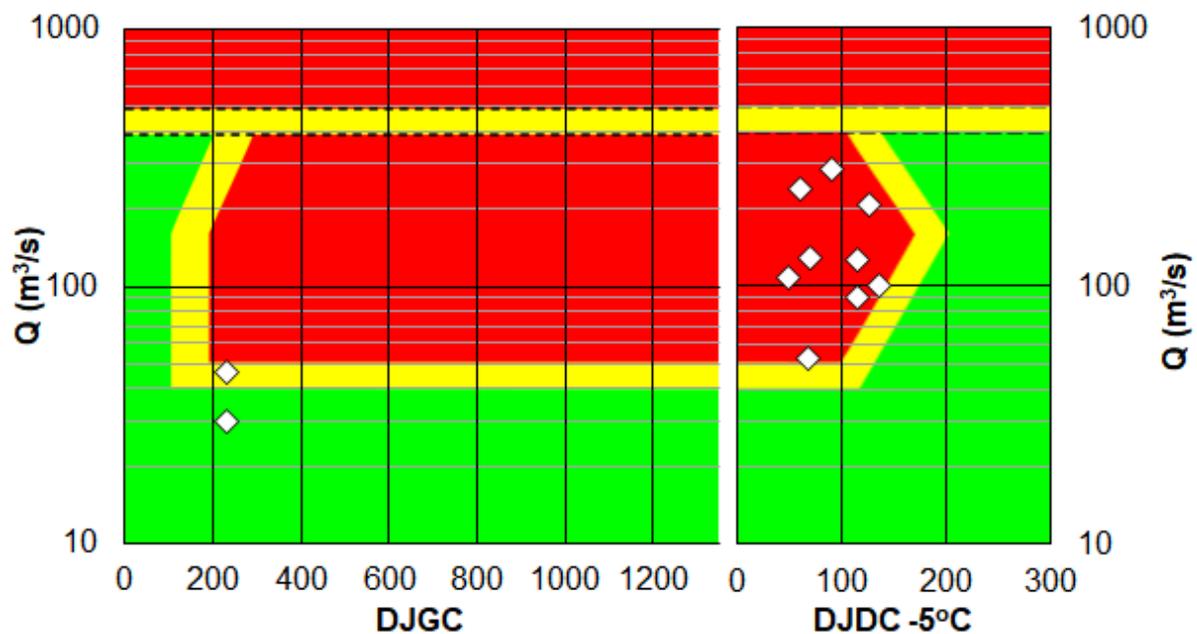


Figure 29. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Matapédia (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus d'information complémentaire et des connaissances de la physique de la débâcle sur ce type de cours d'eau).

Le modèle de la Figure 29 a été utilisé pour estimer la fréquence historique des débâcles dynamiques entre 1980 et 2008. La Figure 30 présente la distribution historique cumulative et hebdomadaire de la fréquence des événements d'embâcles probables (ligne noire). Une probabilité non-nulle d'une débâcle dynamique débutait au début novembre pour se terminer à la mi-mai avec une longue période hivernale (début janvier à la mi-mars) présentant une faible probabilité hebdomadaire de débâcle.

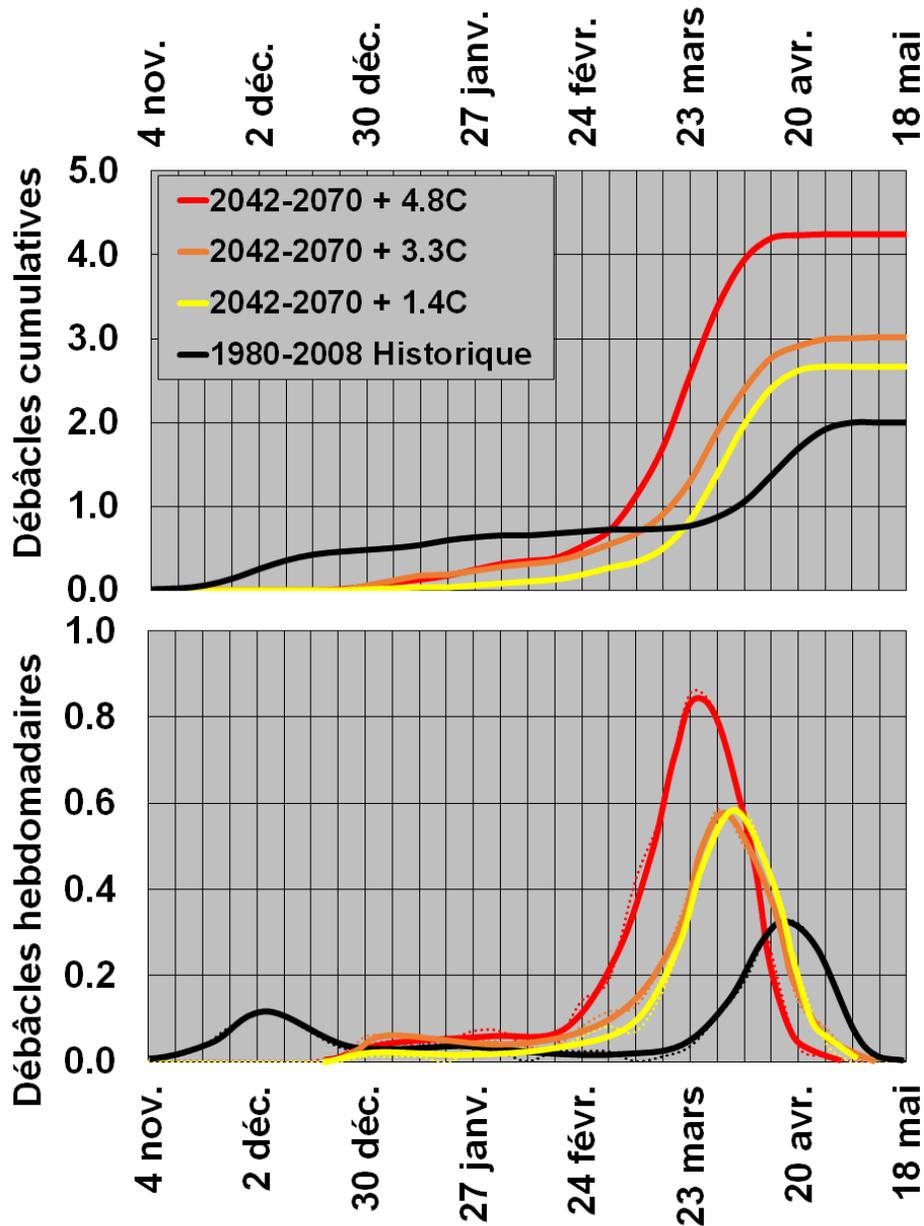


Figure 30. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Matane.

Le même modèle de la Figure 29 a été utilisé pour analyser les données climatiques et hydrologiques futures (lignes jaune, orange et rouge à la Figure 30, voir statistiques à l'Annexe 2). Bien qu'une importante incertitude subsiste concernant l'improbable disparition des débâcles du début de l'hiver, la tendance proposée indique tout de même une hausse des débâcles hivernales (janvier et février) ainsi qu'un devancement de la débâcle printanière de 2 à 3 semaines et une hausse significative de probabilité de pics de crues causant des embâcles pouvant générer des inondations.

La Figure 31 montre la même tendance, soit une hausse significative probable de la fréquence des débâcles dynamique de même que du risque, ou DMA, associé aux inondations par embâcles de glaces sur la rivière Matane. Les coûts annuels pourraient apparemment doubler entre 2040 et 2070.

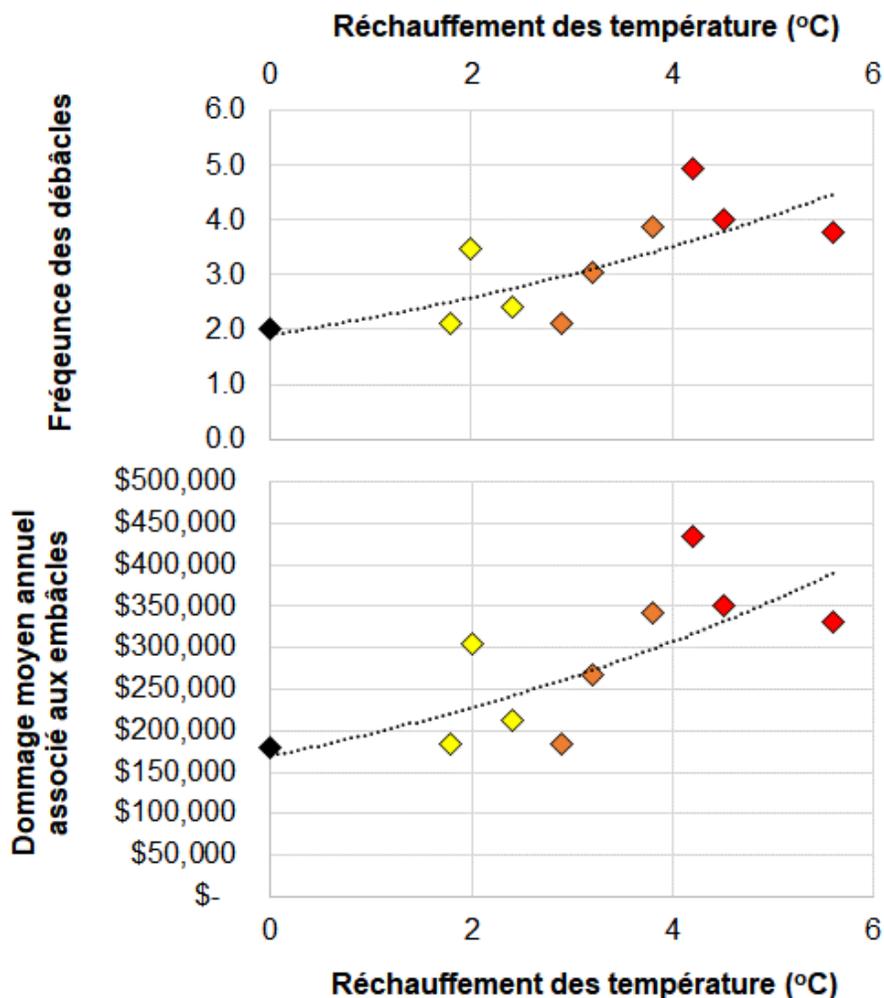


Figure 31. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière Matane, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à mai) à St-Jean de Cherbouurg. La valeur en noire représente la donnée historique.

5.9 Rivière Mistassini

La rivière Mistassini est la plus nordique et la plus imposante des rivières incluses dans ce projet. Elle est représentative des grandes rivières du Nord du Lac St-Jean, mais possiblement également de celles qui sont non-régularisées sur la Côte-Nord. Le modèle de débâcles dynamiques de la rivière Mistassini est présenté à la Figure 32. Des débâcles historiques survenues entre Notre-Dame-de-Lorette et Dolbeau-Mistassini ont été utilisées pour sa calibration, ce qui représente environ 70 km de cours d'eau. La station hydrométrique de référence porte le numéro 062102 et les données météorologiques de référence sont mesurées tout au sud du bassin, à Péribonka (ou Péribonca, selon les sources consultées). La dynamique de la débâcle le long de cette rivière a été largement étudiée par l'UQAM (Lagadec et coll., 2015), mais le modèle de prévision des embâcles développé par cette équipe est bien différent de celui présenté ici. Il est à noter que les années d'embâcles rapportés par Lagadec et coll. (2015) n'étaient pas associées à des dates spécifiques et il est possible que la position de certains losanges blancs à la droite de la Figure 32 soit imprécise.

Deux embâcles historiques ont permis de déterminer que les débâcles dynamiques peuvent survenir très tôt en hiver, soit à 50 DJGC, ce qui est normal, considérant l'orientation nord-sud de la rivière et la localisation à l'exutoire de la station météorologique de référence. Les mêmes données ont servi à déterminer que les seuils de débâcles possibles et hautement probablement sont situés à environ 300 et 600 m³/s, ce qui est raisonnable, considérant le débit moyen historique d'environ 100 m³/s lors de la formation du couvert de glace. Au printemps, le dégel tardif du haut du bassin fait en sorte qu'il faut cumuler environ 400 degrés-jours de dégel au-dessus de -5°C pour voir le risque d'embâcle devenir pratiquement nul, seuil qui s'explique encore une fois par la position de la station météorologique de référence.

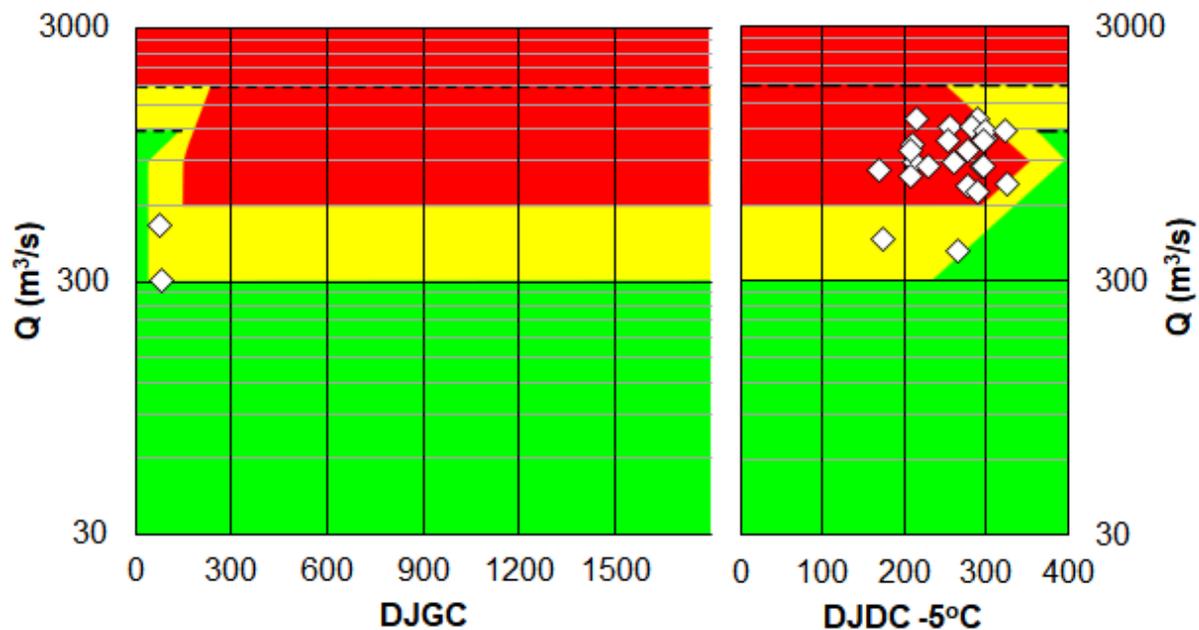


Figure 32. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Mistassini (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus d'information complémentaire).

Le modèle de la Figure 32 a été utilisé pour estimer la fréquence historique des débâcles dynamiques entre 1970 et 2000. La Figure 33 présente la distribution historique cumulative et hebdomadaire de la fréquence des événements d'embâcles probables (ligne noire). Un épisode de probabilité non-nulle d'une débâcle dynamique est visible vers la fin de mois de novembre, mais il est suivi par environ 100 jours consécutifs durant lesquels aucun embâcle historique ou aucune crue significative associée à une débâcle dynamique n'a été répertorié. Au printemps, la débâcle printanière survenait historiquement dans les deux semaines avant ou après le 1^{er} mai.

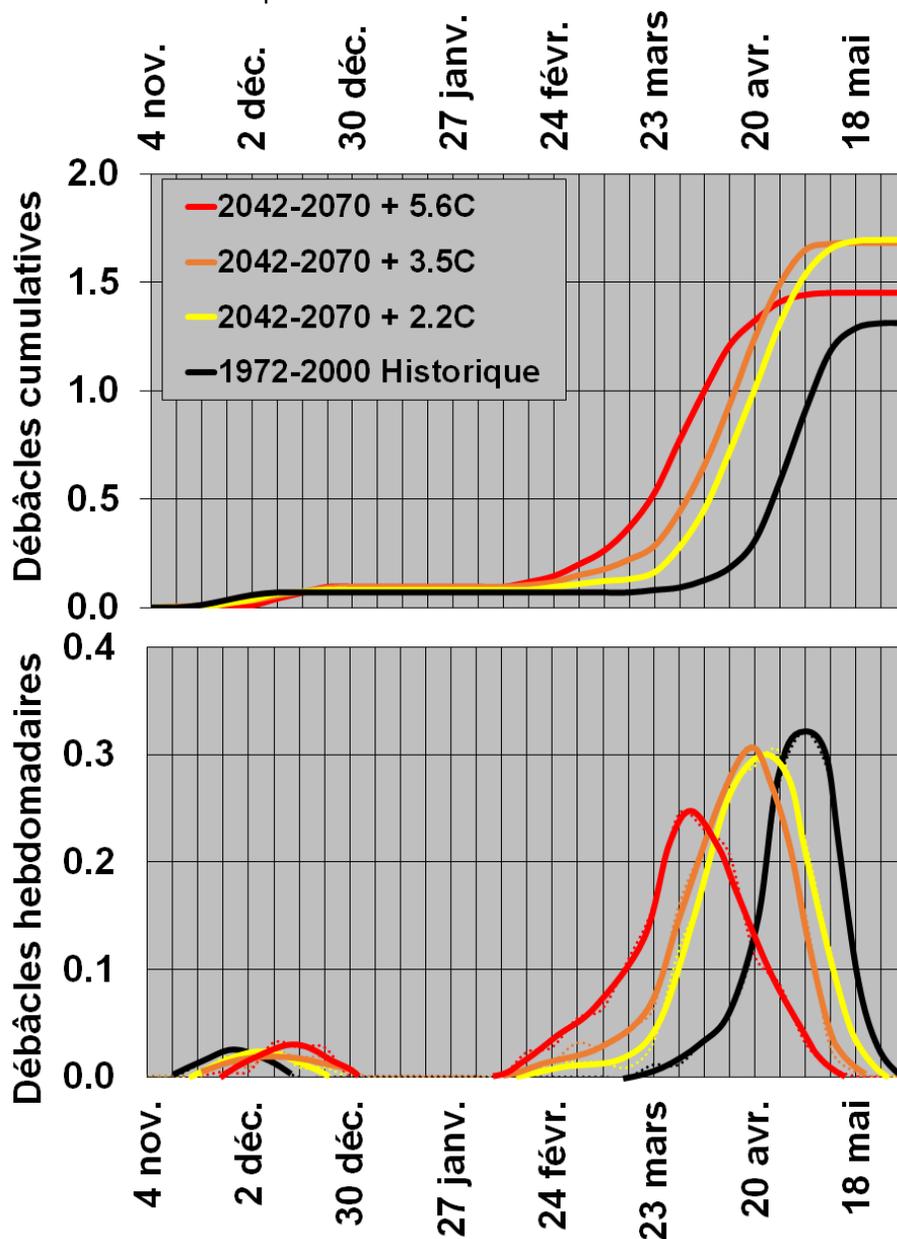


Figure 33. Distributions cumulatives (haut) et hebdomadaires (bas) historiques et futures des débâcles dynamiques causant des embâcles sur la rivière Mistassini.

Le modèle de la Figure 32 a également été utilisé pour analyser les données climatiques et hydrologiques futures (lignes jaune, orange et rouge à la Figure 33, voir statistiques à l'Annexe 2). Les résultats montrent que, dans un contexte de changements climatiques, pour la rivière Mistassini, (1) la période de glace tendrait à se réduire de 2 à 5 semaines, (2) une période hivernale sans débâcle subsisterait, mais serait généralement plus courte, et (3) la débâcle printanière serait devancée et, bien que sa probabilité globale demeure semblable, sa probabilité d'occurrence serait beaucoup plus large en termes de dates possibles.

Enfin, la Figure 34 illustre bien le fait que la fréquence des débâcles dynamiques serait plutôt stable dans un contexte de changement climatique. Par contre, à cause de crues futures plus significatives et hâtives, il est probable que le risque, ou DMA, augmente de manière significative selon différents scénarios de changements climatiques. Il pourrait en effet être multiplié par 6. Il est encore trop tôt pour comprendre la raison de cette différence entre la fréquence des crues et le DMA, mais il est probable qu'il y ait une diminution du nombre de pics par crue, mais que les crues seraient associées à des débits maximaux plus élevés.

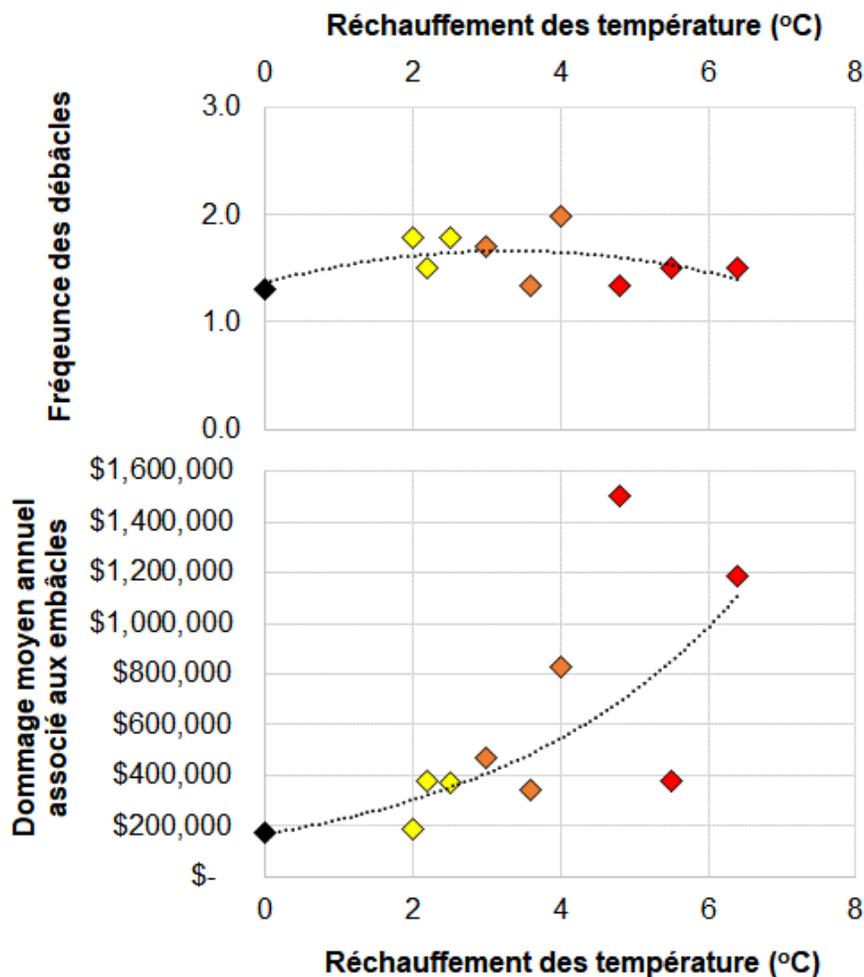


Figure 34. Fréquence des débâcles causant des embâcles à chaque hiver et dommage moyen annuel (DMA) associé aux inondations par embâcles le long de la rivière Mistassini, le tout exprimé en fonction de l'augmentation possible des températures hivernales (novembre à mai) à Dolbeau-Mistassini. La valeur en noir représente la donnée historique.

5.10 Résultats globaux

La Figure 35 montre un bilan des 7 rivières concernant le dommage moyen cumulatif associé aux inondations par embâcles. En général, les dommages seraient donc à la hausse et une possible baisse des dommages sur certaines rivières à cause du manque de glace pour former des embâcles serait compensée par des crues hivernales et printanières plus intenses menant à des débâcles dynamiques et à des embâcles plus fréquents.

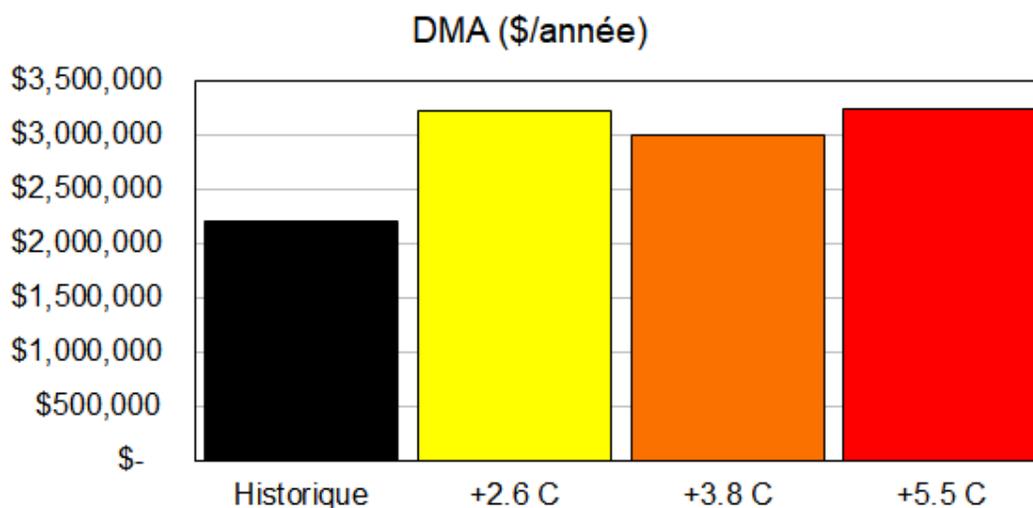
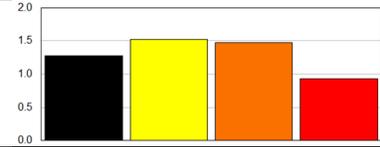
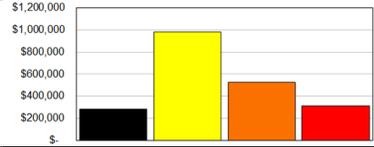
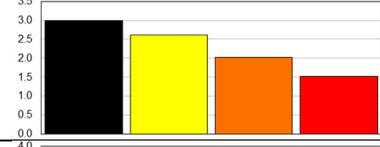
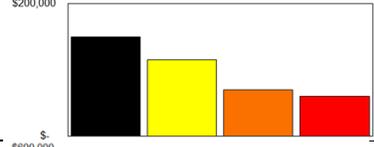
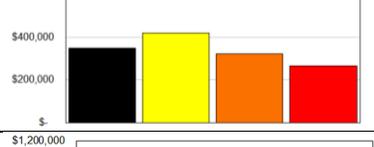
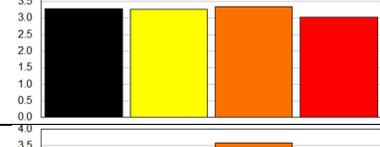
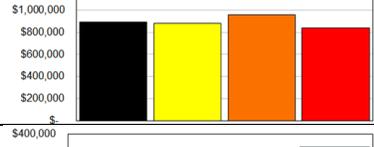
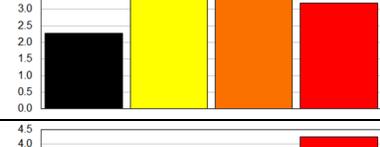
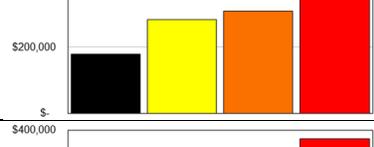
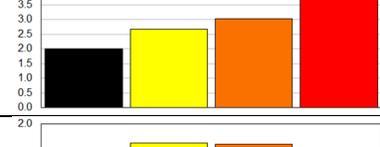
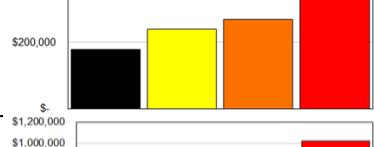
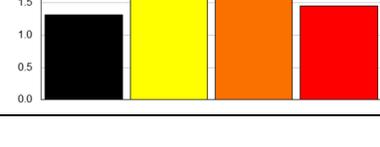
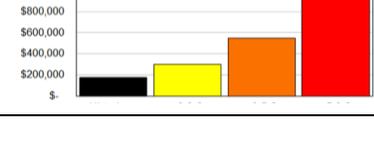


Figure 35. Bilan des dommages moyens annuels (DMA) associés aux embâcles de glaces sur 7 rivières du Québec. L'index de couleur suit celui des graphiques précédents : jaune = réchauffement climatique limité, orange = réchauffement climatique moyen et rouge = réchauffement climatique important.

Le Tableau 11 montre un bilan récapitulatif des tendances associées à la fréquence des débâcles dynamique par hiver et au DMA associé aux inondations par embâcles pour les 7 rivières analysées dans le cadre de ce projet. Enfin, la carte présentée à la Figure 36 montre la tendance du DMA pour les bassins versants étudiés.

La section suivante présente une discussion des résultats obtenus dans le cadre de ce projet.

Tableau 11. Tableau résumant les tendances de la fréquence des débâcles dynamiques et du dommage moyen annuel associé aux inondations par embâcles de glaces dans un contexte de changement climatique sur 7 rivières du Québec. Les données historiques sont présentées en noir. Les 9 scénarios de changements climatiques sont ici regroupés en 3 niveaux d'intensité comparable (**jaune** = 2.1 à 3.0°C, **orange** = +3.3 à 4.2°C, **rouge** = +4.8 à 6.0°C). À la dernière colonne, la tendance **rouge** indique une augmentation du DMA, la tendance **verte** indique une réduction du DMA et le **jaune** indique une tendance mitigée du DMA, considérant les résultats et l'incertitude.

Rivière	Débâcles par an	DMA (\$/an)	Tendance (\$/an)
L'Assomption			Passant de 280K\$ à 600 K\$, en moyenne
Châteauguay			Passant de 150K\$ à 80 K\$, en moyenne
St-François			Passant de 350K\$ à 340 K\$, en moyenne
Chaudière			Passant de 890K\$ à 890 K\$, en moyenne
Matapédia			Passant de 180K\$ à 320 K\$, en moyenne
Matane			Passant de 180K\$ à 300 K\$, en moyenne
Mistassini			Passant de 180K\$ à 630 K\$, en moyenne

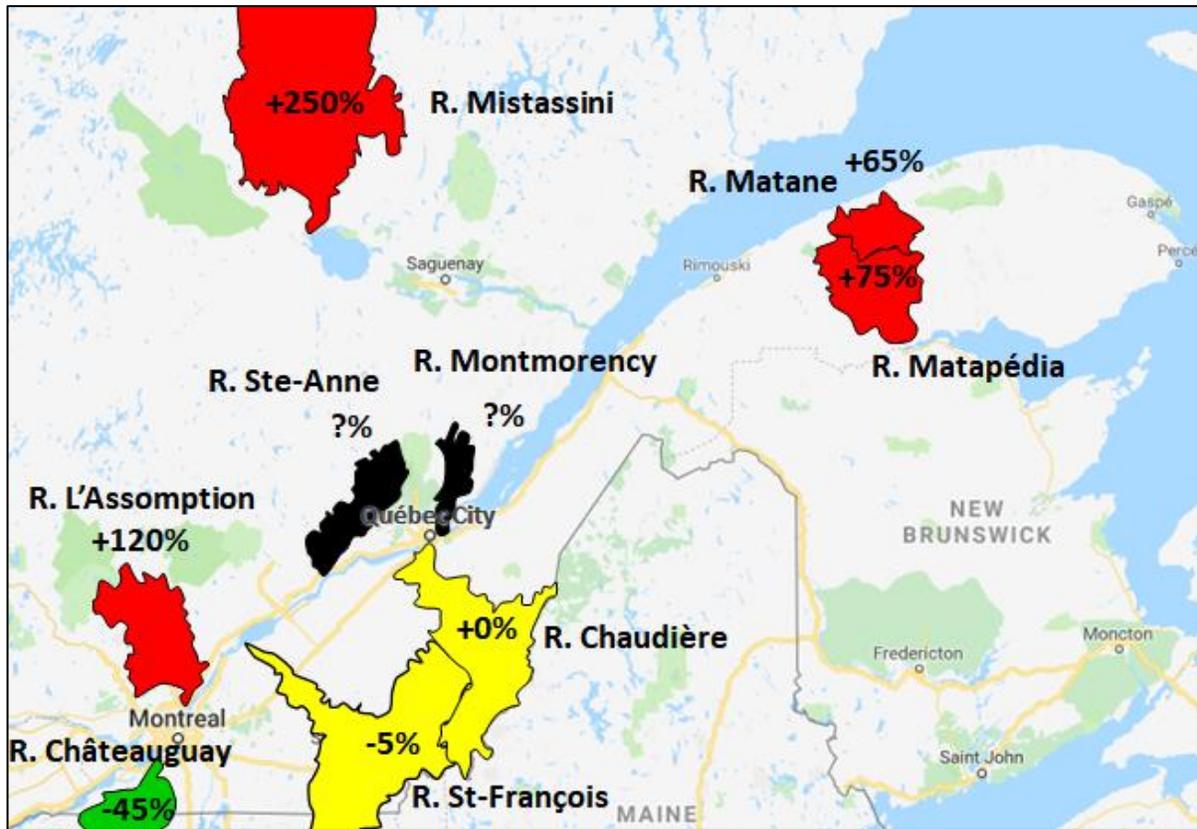


Figure 36. Carte montrant les tendances du DMA associées aux inondations par les glaces dans un contexte de changements climatiques sur les bassins versants du projet. En rouge, une augmentation du DMA, en vert une diminution du DMA, en jaune un DMA relativement stable et en noir, une tendance encore inconnue. Les modèles, et les résultats présentés qui en découlent, ne sont applicables que sur une portion, significative ou limitée, de chaque bassin versant. Le lecteur peut faire référence au Tableau 4 pour obtenir plus de détail.

6. Analyse et discussion

6.1 Retour sur l'approche

L'étude reposait essentiellement sur trois étapes importantes :

1. Développer et calibrer un modèle de débâcles dynamiques sur 9 rivières avec des données historiques et des connaissances sur la physique hivernale des cours d'eau dans le but de déterminer la fréquence des inondations par embâcles.
2. Faire un lien entre les débâcles dynamiques passées et les dommages potentiels dans le but d'évaluer le risque d'inondations par embâcles.
3. Identifier, produire et traiter les données de scénarios climatiques futurs pour les intégrer au modèle dans le but de tracer une tendance de l'évolution du risque à l'horizon 2040-2070.

La première étape est née d'un projet de recherche avec la Ville de Québec sur la prévision de la débâcle le long de la rivière Montmorency (Turcotte et coll., 2015). Elle reposait essentiellement sur la calibration de modèles similaires pour les autres rivières faisant partie du projet, à la lumière d'informations propres à chaque cours d'eau (voir Tableau 1). Les modèles ont permis d'identifier un total de 4 429 débâcles dynamiques sur 2958 hivers-rivières.

La deuxième étape requérait la préparation, par le ministère de la Sécurité publique, d'une banque d'information confidentielle sur les dommages associés aux inondations le long des 9 rivières entre 1991 et 2012. Par la suite, l'Université Laval devait identifier les dommages relatifs aux embâcles et les associer à des événements hydrométéorologiques spécifiques. Un total de 121 événements sur les 9 rivières a été identifié. Il est à noter que dans la plupart de cas, par analyse des données hydrométéorologiques, la date précise des événements ne faisait aucun doute alors que les données du MSP étaient plutôt classées par saison ou pas mois de l'année.

Enfin, la troisième étape dépendait largement d'Ouranos et du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). En effet, 9 scénarios climatiques devaient être choisis et il devait exister des extrants hydrologiques associés à ces scénarios pour les rivières faisant partie du projet et plus spécifiquement, pour les stations hydrométriques de référence. Malgré ce nombre restreint de scénarios, des critères de sélection ont été appliqués afin de s'assurer que les scénarios choisis représentent bien l'incertitude climatique de l'ensemble global disponible. Des techniques reconnues de post-traitement statistique ont été employées afin que les données des modèles soient représentatives du climat historique. Il est toutefois impossible de commenter sur leur probabilité d'occurrence. Pour ce qui est des simulations hydrologiques, les auteurs n'ont eu aucune implication dans la modélisation des scénarios et les résultats reposaient sur le travail déjà effectué par le partenaire gouvernemental. Par contre, dans ce cas, les auteurs pouvaient juger de la représentativité des résultats et une mesure (comparer les résultats historiques et de référence pour obtenir un facteur correctif) a pu être prise pour 5 rivières afin de minimiser l'impact négatif de certaines imprécisions.

Les auteurs croient que l'approche utilisée pour compléter l'étude est non seulement avant-gardiste, mais également robuste, puisqu'elle repose sur des indicateurs simples et sur une analyse pointue de 18 462 crues. Les erreurs induites par les imprécisions des modèles de débâcles dynamiques ont été minimisées par la comparaison du passé et du futur selon des critères semblables.

Les tendances obtenues correspondent assez bien à ce qui avait été envisagé par les auteurs avant de débiter le projet. Toutefois, en plus des tendances, les auteurs sont également fiers d'avoir quantifié l'évolution de la fréquence et du risque des inondations par embâcles de glaces à l'horizon 2040-2070.

6.2 Limitations du projet

Ce projet représente un premier effort de recherche connu visant à documenter l'évolution probable de l'impact des changements climatiques sur un processus de glace dynamique et largement imprévisible qui cause des inondations importantes et récurrentes en région froide. Les auteurs de ce rapport sont confiants que les résultats sont représentatifs. Toutefois, la nature étant complexe et l'approche utilisée étant une simplification empirique de la réalité, il existe quelques incertitudes par rapport aux résultats obtenus.

6.2.1 Limitations relatives à l'hydrologie

- Les données de débit utilisées dans le cadre de ce projet représentent des approximations pour deux raisons. Premièrement, elles ont été estimées par la Direction de l'Expertise hydrique du MDDELCC au cours des décennies passées en utilisant des niveaux d'eau mesurés et souvent à partir d'informations et d'outils limités (un projet est actuellement en cours d'achèvement entre l'Université Laval et le MDDELCC à cet effet). Deuxièmement, le facteur de pointe constant pour chaque bassin versant, utilisé pour évaluer le débit maximal instantané de chaque crue, induit une certaine incertitude lorsque vient le temps de classer les crues selon les seuils de débâcles établis.
- Parallèlement, la version du modèle HYDROTEL utilisé dans le cadre de ce projet produisait, dans certains cas, des hydrogrammes hivernaux dont la forme ne se comparait pas vraiment à ce qui était observé dans le passé (ex. : rivières Ste-Anne et rivière Montmorency, Figure 8). Il est maintenant clair qu'une reproduction des statistiques hydrologiques ne suffit pas pour pouvoir intégrer les séries de données hydrologiques simulées à une méthodologie qui repose sur une analyse de chacune des crues entre les mois de novembre et mai. Même si l'utilisation des séries de référence a pour effet de réduire l'erreur induite par les versions d'HYDROTEL utilisées, une version mieux calibrée d'HYDROTEL, produisant des données plus représentatives, serait requise.
- Dans certains cas, la régularisation des débits historiques par des opérations de barrages modifiait la forme et même l'amplitude des crues. Certaines informations portent par exemple à croire que des opérations de barrage ont causé une débâcle dans le haut de la rivière St-François par le passé, embâcle rapporté dans la banque de données du MSP. Or, dans un contexte de simulation des débits, les stratégies de régularisation sont incertaines et il devient donc difficile de comparer les données mesurées passées aux données simulées futures.

6.2.2 Limitations relatives aux conditions climatiques

- Les degrés-jours de gel (DJG) sont connus pour représenter un indicateur relativement robuste de l'épaississement d'un couvert de glace. Toutefois, à part pour ce qui a été fait à l'Université Laval dans le cadre d'autres projets de recherche (Figure 37), très peu d'études ont établi un lien entre les températures de l'air et l'apparition des premiers ponts de glace qui peuvent initier un embâcle. Même s'il est probable que les DJG soient un indicateur de la progression spatiale de couvert de glace, des études devraient le confirmer, en tenant compte de la variabilité spatiale et interannuelle. Aussi, le calcul des DJG est basé sur les températures moyennes journalières. Il devrait plutôt être basé sur les températures horaires, ce qui donnerait des résultats plus précis, même si cela représente l'analyse de 24 fois plus de données.

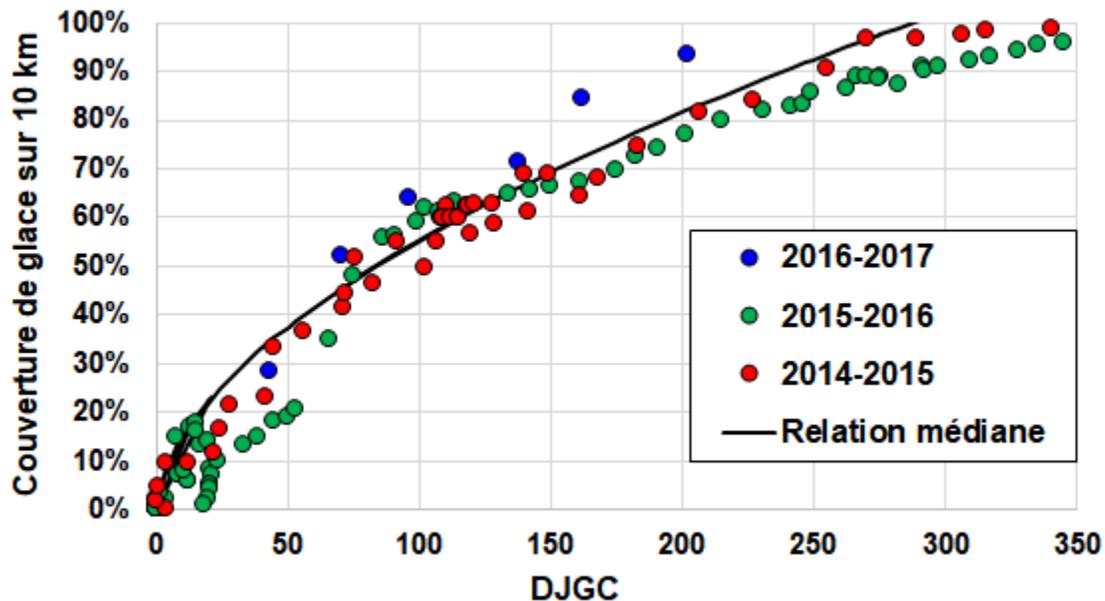


Figure 37. Couverture de glace (% du chenal sur la longueur et la largeur) sur 10 km de la rivière Sainte-Anne en amont de Saint-Raymond en fonction des degrés-jours de gel cumulés (DJGC) pour trois débuts d'hiver consécutifs.

- Il existe une incertitude importante par rapport aux degrés-jours de dégel cumulés (DJDC) comme indicateur d'affaiblissement du couvert de glace. En effet, l'impact des températures de l'air dépend largement de la latitude et de la date (-5°C en février étant beaucoup plus froid que -5°C en avril, d'un point de vue d'apport de chaleur global, en considérant l'angle du soleil et la durée des journées), de la quantité de nouvelle neige sur le couvert de glace de même que sur son épaisseur avant la débâcle. Dans le cadre du présent projet, une analyse subjective a été appliquée pour tenir compte de ces facteurs (voir Section 4.2). Par contre, il serait possible de modifier les indicateurs et d'automatiser certaines analyses de manière à rendre le processus de classification des crues plus cohérent et scientifiquement rigoureux. Aussi, comme pour le calcul des DJG, les DJD devraient plutôt être calculés en utilisant les températures horaires, ce qui donnerait des résultats plus précis.
- Pour les gros bassins versants (St-François, Chaudière, Mistassini), les données météorologiques mesurées ou simulées à un seul endroit ne sont possiblement pas représentatives de tout le bassin versant chaque hiver. Par exemple, le gradient nord-sud est possiblement différent selon les années et les patrons climatiques. Puisque les degrés-jours sont cumulés, une différence journalière de moins d'un degré peut tout de même se répertorier dans les résultats, ce qui influence le seuil de débâcle printanière à travers les DJDC-5.

6.2.3 Limitations relatives à la dynamique des glaces

- Il y existait une quantité limitée d'embâcles historiques et de dommages rapportés le long de certaines rivières faisant partie du projet. Or, même si l'évolution relative du risque d'inondation permet d'effacer en grande partie l'influence d'une possible imprécision des seuils de débâcle, le manque de données nuit tout de même à la représentativité et à la confiance envers certains chiffres présentés, par exemple, le dommage moyen annuel (DMA) actuel et futur. Le temps pourrait graduellement permettre de combler cette lacune.

- Très peu de recherche a été effectuée sur l'interaction entre un embâcle existant et un train de glaces provenant de l'amont. Or, dans le cadre de ce projet, des critères subjectifs, basé sur l'expérience et une bonne connaissance des processus de glace en général, permettaient d'établir si des embâcles formés lors d'une débâcle partielle antérieure allaient être mobilisés ou plutôt si ces embâcles résisteraient pour causer d'autres inondations lors de l'occurrence d'une nouvelle débâcle. Une recherche spécifique sur le sujet, le long des rivières faisant partie du projet, permettrait d'établir un critère qui correspond plus à ce qui peut survenir en réalité lors de deux crues successives ou lors d'une crue à plusieurs pics.
- Dans le cadre de ce projet, les seuils de débâcles, en termes de débit, sont horizontaux. Cette simplification de la réalité repose principalement sur l'observation suivante : dans les rapides, et toutes les rivières en comportent, la fragilité du couvert de glace est largement indépendante de la rigueur de l'hiver. Donc, le seuil de mobilisation du couvert de glace (interface vert-jaune) est plutôt une propriété de la morphologie. Par contre, l'épaisseur de glace flottante dans les sections moins pentues, et toutes les rivières en comportent également, peut avoir un impact sur l'intensité des embâcles. Par exemple, théoriquement, une crue majeure a un plus grand potentiel d'occasionner des inondations par embâcle si le couvert a une épaisseur de 70 cm que si le couvert à une épaisseur limitée à 40 cm. Tenir compte de cette réalité impliquerait le traçage d'un seuil hivernal de débâcle imminente (interface jaune-rouge) légèrement ascendant et d'un seuil de débâcle printanière initialement variable en fonction des conditions hivernales précédentes, ce qui serait souhaitable puisque le présent projet vise à quantifier l'impact des changements climatiques en tenant également compte de la diminution de l'épaisseur des couverts de glace flottants.
- Les valeurs empiriques identifiées ou les relations empiriques développées entre les dommages associés aux inondations et les débits ou les seuils de débits atteints sont largement incertaines. En effet, le positionnement d'un seul bloc de glace peut mener à un rehaussement plus important des niveaux d'eau pour un même débit, ce qui illustre le comportement chaotique des embâcles que le présent projet tente de moyenniser. La combinaison de certains facteurs très spécifiques peut mener ou non à une catastrophe alors que tous les ingrédients semblent indiquer une inondation mineure. Il n'en demeure pas moins que les chercheurs et ingénieurs ont le devoir de faire de leur mieux pour documenter le risque.
- Enfin, il est clair que d'autres processus de glace peuvent causer des inondations : glace de fond, embâcle de frasil, débâcle par temps froid, etc. Ces processus sont influencés par des paramètres qui sont différents de ceux qui sont associés aux débâcles dynamiques. Par contre, ces processus sont tous, à un certain degré de confiance, prévisibles. Aussi, une inondation peut survenir s'il y a interaction entre un train de glaces et un barrage de frasil situé en aval, donc le risque n'est pas indépendant d'un aléa d'inondation hivernale à l'autre.

6.2.4 Limitation relative à la morphologie

- Il existe un lien entre le transport de sédiments, la morphologie des cours d'eau et les processus de glace (ex. : Turcotte et coll., 2011) et il est anticipé qu'une altération du régime glacial mènera indirectement à un réajustement géomorphologique des cours d'eau, ce qui, en contrepartie, générera une modification de la capacité des cours d'eau à évacuer les glaces. Il en va de même pour les crues à l'eau libre. Or, le projet, dans son état actuel, maintient les seuils de débâcles, en termes de débit, à un niveau constant, comme si l'alignement, la largeur et la profondeur des rivières allaient demeurer constants. Il est clair qu'ignorer le comportement adaptatif des cours d'eau représente une limitation à l'interprétation des résultats du projet.

6.2.5 Limitations relatives à l'impact de l'homme

- Le présent projet a tenu compte d'une vulnérabilité et d'une exposition constante en fonction du temps. Cette simplification était nécessaire pour orienter les mesures d'adaptation possibles (voir conclusion). Par contre, il est clair que plusieurs facteurs peuvent affecter à la hausse ou à la baisse, la vulnérabilité du bâti. Par exemple, la population grandissante dans certaines régions, le désir des personnes de vivre prêt de l'eau et le besoin des municipalités de soutirer une plus grande part de taxes sont tous des facteurs qui ont affecté à la hausse la vulnérabilité aux inondations par le passé. Par contre, des mesures d'adaptation visant à protéger les résidences et les infrastructures affecteraient positivement, à la baisse, la vulnérabilité, donc le risque.
- Certains bassins versants ont vu leur coefficient de ruissellement augmenter au cours des décennies passées, résultat de la déforestation et de l'urbanisation. Ceci a un impact direct sur l'amplitude des crues, incluant les crues hivernales qui causent des embâcles. La tendance future est incertaine et des mesures d'adaptation visant à réduire l'aléa inondation pourraient être mises en place à l'échelle des bassins versants, ce qui affecterait non pas les seuils de débâcle, mais plutôt la fréquence des crues contraignantes.
- Aussi, les pratiques agricoles et les approches de stabilisation des berges ont un impact direct sur le régime hydrologique et sédimentaire des réseaux hydriques, ce qui affecte la morphologie et l'interaction glace – chenal, donc les seuils de débâcle. Les structures hydrauliques (ponts, seuils, barrages) ont également un impact direct sur la mobilisation et l'interception des glaces. Encore une fois, le passé n'est possiblement pas garant de l'avenir et il est difficile d'entrevoir comment la réglementation et les nouvelles pratiques pourront empirer ou corriger les tendances passées.

6.2.6 Limitation de la portée des résultats

- Les tendances obtenues pour les 7 rivières qui ont fait l'objet d'une analyse complète ne sont, jusqu'à preuve du contraire, pas nécessairement représentatives de cours d'eau situés dans la même région, même si leur bassin versant présente des caractéristiques semblables. Les résultats de l'étude ne peuvent donc pas être simplement transférés à des bassins versants voisins, ni même à des affluents situés dans les bassins versants des rivières étudiées. Une extension ou une prolongation de cette recherche est nécessaire pour documenter cette transférabilité.
- Certaines régions n'ont pas été couvertes par le modèle. Par exemple, aucun résultat n'a été obtenu pour des cours d'eau de la région de Québec (Ste-Anne et Montmorency), de la Mauricie (Batiscan, Du Loup), de Charlevoix (Sainte-Anne du Nord, Du Gouffre, Malbaie), de l'Outaouais (Rouge, Dumoine, Gatineau) et de l'Abitibi (Broadback, Harricana). Aussi, des rivières dont le bassin présente une forte densité de population comme les rivières Yamaska et Bécancour n'ont pas encore fait l'objet d'une analyse relative aux embâcles. Toutes les régions et les cours d'eau seront affectés de manière différente par les changements climatiques et une meilleure couverture du Québec est souhaitable.

6.3 Suite du projet

La Section 6.2 a identifié un total de 17 limitations affectant la représentativité, l'incertitude et la portée des résultats du projet. L'approche développée dans le cadre du présent projet étant à la fois robuste et modifiable, une suite logique au projet consisterait à initier une deuxième phase d'étude en incluant les améliorations suivantes :

1. Raffiner les analyses des facteurs de pointe de chaque crue, en utilisant, par exemple, les données brutes de niveaux d'eau instantanés avec les relations-niveaux débit et rejeter les périodes durant lesquelles les estimations historiques de débit présentent une fiabilité questionable. Une approche statistique plus complexe utilisant du « Bootstrapping » pourrait également être utilisée.
2. Utiliser des simulations hydrologiques reposant sur une version mieux calibrée d'HYDROTEL ou un autre modèle, avec une attention particulière envers les crues hivernales et printanières, et s'assurer que l'influence de la dynamique des glaces sur les hydrogrammes soit considérée.
3. Compléter des observations sur le terrain lors de la période de formation d'un couvert de glace sur les cours d'eau étudiés et ce pendant trois automnes consécutifs, afin de faire un lien entre la couverture de glace et les degrés-jours de gel cumulés. Cette activité pourrait être complétée à l'aide de drone ou en collaboration avec les différents organismes de bassins versants.
4. Utiliser les températures horaires pour calculer les DJ.
5. Inclure une température de référence (-5°C) variable pour corriger les degrés-jours de dégel cumulés afin de tenir compte de la date et de la latitude dans le processus de détérioration du couvert de glace.
6. Comparer les données de deux stations météorologiques de référence pour certains bassins versants, selon leur dimension, leur orientation et la disponibilité des données.
7. Continuer à inclure de nouvelles données historiques et récentes au sujet des embâcles. Ceci pourrait inclure la collaboration d'historiens et d'historiennes, et un échange constructif avec la banque de données AQUARISK financée par Ouranos.
8. Compléter des observations lors de débâcles, spécifiquement pour documenter l'interaction entre les trains de glaces et les embâcles existants. De la modélisation numérique pourrait également être intégrée à un projet conjoint.
9. Créer des seuils de débâcle hivernaux qui considèrent l'épaississement du couvert de glace et développer des seuils de débâcle printaniers adaptables selon les hivers, sur certains cours d'eau.
10. Inclure de manière plus affirmée, l'impact direct et indirect des barrages de frasil sur les inondations en présence de glace.
11. Considérer l'évolution morphologique possible des cours d'eau, du moins approximativement, en tenant compte, entre autres, de la récurrence des crues à l'eau libre qui modifient également le chenal par le transport de sédiments.
12. Tester la transférabilité des résultats en incluant des bassins versants voisins dans le projet.
13. Inclure des cours d'eau d'autres régions et de caractéristiques différentes afin d'obtenir une meilleure couverture du Québec.
14. Inclure des analyses de sensibilité (météorologiques, hydrologiques, seuils de débâcle, etc.)
15. Pousser l'analyse du lien entre les dommages et d'autres paramètres qui affectent les inondations par embâcles afin de développer des valeurs et équations empiriques plus représentatives.

Une seconde phase du projet devrait inclure une certaine automatisation des critères d'identification des crues causant des débâcles dynamiques, et ce afin de gagner un temps précieux. Par contre, aucune automatisation ne devrait jamais complètement remplacer le jugement et l'expérience des personnes qui seront impliquées dans le projet.

7. Conclusion et recommandations

Depuis des décennies, plusieurs inondations au Québec ont été causées par les embâcles de glaces. Dans le cadre du présent projet, une étude sur 9 rivières a permis d'estimer que 50% des inondations et 50% des dommages d'inondations remboursés par le ministère de la Sécurité publique (MSP) étaient associés aux embâcles entre 1991 et 2012. Par le passé, Ouranos avait investi temps et argent afin de compléter des études portant sur l'impact de changements climatiques sur les inondations à l'eau libre, mais les inondations en présence de glace n'avaient pas encore reçu d'attention de la part de la communauté scientifique québécoise. L'objectif du présent projet, accepté et financé par Ouranos, en collaboration avec le MDDELCC et le MSP, était de quantifier l'évolution de la fréquence et du risque d'inondations par embâcles de glaces à l'horizon 2040-2070 sur 9 cours d'eau.

7.1 Résumé des résultats

Ce projet a impliqué les activités suivantes :

- Le développement et la calibration de 9 modèles de débâcles dynamiques, un par cours d'eau, sur la base d'informations associées à 239 débâcles historiques avec embâcle(s).
- La classification et le traitement d'environ 45 ans (1970-2015) de données hydrométéorologiques historiques pour chaque cours d'eau.
- L'utilisation de 9 scénarios climatiques.
- L'analyse de 2958 hivers – rivières, incluant 2570 crues historiques et de 15892 crues simulées.
- Le calcul de fréquences, passée et future, de débâcles dynamiques causant des embâcles et des inondations, variant de 0.7 à 3.8 événements par année, selon les rivières et les scénarios.
- L'identification de montants ou d'équations empiriques permettant d'estimer les dommages associés aux débâcles dynamiques, sur la base de dommages rapportés par le MSP.
- Le calcul du risque passé et futur des inondations par embâcles, variant de 60 000\$/an à plus de 1 000 000\$/an, selon les rivières et les scénarios, incluant un facteur multiplicatif de 3 pour tenir compte des dommages non remboursables par le MSP.

Les résultats obtenus montrent que :

- Dans certains cas, probablement plus spécifiquement sur des rivières du sud du Québec, le risque (dommage moyen annuel, DMA) d'inondations par embâcles pourrait diminuer à mesure que les températures hivernales se réchauffent, simplement par manque de glace pour former des embâcles, à cause de la trop grande fréquence des crues inoffensives.
- Dans d'autres régions, incluant spécifiquement les rivières St-François et Chaudière, la diminution de la quantité de glace et le raccourcissement de la période hivernale seraient compensés par une fréquence plus élevée des crues qui causent des débâcles dynamiques et des embâcles. Ainsi, le risque serait plus ou moins constant dans différents contextes de changements climatiques. L'hiver 2017-2018 fait en ce moment office d'exemple, avec plusieurs débâcles au cours d'un même hiver.
- Enfin, le long de plusieurs cours d'eau situés dans des régions du Québec allant de Lanaudière à la Gaspésie et au Lac-Saint-Jean, l'augmentation de la fréquence et de l'amplitude des crues hivernales et printanières aurait pour effet d'accroître le risque d'inondations par embâcles de glaces, parfois de manière significative et même alarmante.
- Globalement, le DMA sur 7 cours d'eau du Québec augmenterait d'environ 40% à l'horizon 2040-2070 comparativement à la période de référence de 1970-2000 (Voir Figure 35).

À la lumière de ces résultats, la section suivante présente des recommandations et des mesures d'adaptation.

7.2 Recommandations et adaptation

Il existe plusieurs moyens de classer les différentes recommandations des auteurs. Ces recommandations peuvent être exprimées en termes de mesures d'adaptation en réponse aux résultats du présent projet.

7.2.1 Adaptation spécifique

La vision du ministère de la Sécurité publique (MSP) est généralement de réduire le risque associé à un aléa en luttant, justement, sur plusieurs fronts : prévenir, préparer, intervenir et rétablir. Le présent projet permet de travailler principalement sur les deux premiers points de la manière suivante :

- Informer les directions régionales, les MRC, les gestionnaires de l'eau et les municipalités sur les inondations par les glaces et sur les tendances anticipées.
- Développer des mesures d'atténuation adaptées (interventions structurelles en rivière, affaiblissement préventif du couvert de glace, gestion des débits) ou plus génériques (immunisation, adaptation du cadre législatif sur le développement du territoire, inclusion des inondations par les glaces dans la définition des zones inondables, développement de protocoles d'intervention en cas de sinistre) pour réduire le risque.
- Utiliser et valoriser les modèles de prévisions des inondations développés et calibrés dans le cadre de ce projet, possiblement en collaboration avec le MDDELCC et le MSP.
- Continuer à étudier l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie hivernale et les processus glaciels, entre autres, en procédant à une seconde phase suivant le présent projet, en considérant les points mentionnés à la section 6.3.

7.2.2 Adaptation générale dans le long terme

Il semble que le Québec ne se soit que très partiellement approprié ses cours d'eau durant la période hivernale au cours de son histoire. Il y a bien entendu le point de vue récréatif, la production hydroélectrique, et la régularisation des cours d'eau pour limiter les inondations en considérant également la fonte des neiges. Mais, les processus hivernaux des cours d'eau sont encore généralement mal compris, même par les ingénieurs qui les influencent et qui en subissent les conséquences. Les rivières sont encore apparemment perçues comme des systèmes largement imprévisibles par les preneurs de décisions.

L'article très descriptif de Turcotte et Morse (2011), accepté pour publication parce qu'apportant une contribution à la science, montre à quel point les connaissances relatives aux cours d'eau en hiver ne se sont pas adéquatement développées au cours des siècles et surtout, qu'elles ne se sont pas transmises d'une génération à l'autre ou d'une région froide à l'autre. Il en résulte que la société dans son ensemble se trouve en position réactive lorsque vient le temps de faire face aux processus de glace qui causent des dégâts. Certaines municipalités ou régions sont mieux outillées que d'autres, mais les connaissances de base pour comprendre les phénomènes sont largement partielles dans la plupart des régions. Les embâcles, sous toutes leurs formes, ne sont pourtant pas un phénomène nouveau.

Voici la vision des auteurs par rapport à cette réalité :

- Il faut montrer, dès l'enfance, que les cours d'eau sont bien vivants, même en hiver, et qu'ils représentent à la fois une richesse et un milieu particulier (les enfants apprennent les détails du système solaire bien avant de savoir dans quel bassin versant leur maison est située).
- Il faut former une nouvelle relève de professionnels, de scientifiques et de travailleurs impliqués dans le domaine hydrique ou dans la gestion du territoire en insistant sur la période hivernale et sur les processus de glace. Le génie civil et le génie des eaux font en ce moment piètre figure à cet effet, avec certains ouvrages de référence utilisés pour l'enseignement qui viennent tout droit de la Californie.
- Il faut mieux documenter les événements d'inondations par les glaces et les embâcles en général. Il existe une banque de données hydrologiques significative au MDDELCC permettant de retracer les crues et les inondations à l'eau libre. Il doit en être de même, en construisant sur l'excellent travail déjà amorcé par le MSP au sujet de la banque de données sur les embâcles, une première au Canada (mise à part l'effort constant de l'Alberta pour comprendre les glaces et l'expérience des Néo-Brunswickois dans ce domaine).
- Tout ingénieur ayant suivi un cours sur l'hydrologie sait produire une carte d'inondations à l'eau libre alors que les cartes d'inondations par les glaces sont encore largement qualitatives, subjectives et rudimentaires. Aussi, la prévision des inondations par les glaces est probablement dix fois plus complexe que la prévision des inondations à l'eau libre. Il faut financer et promouvoir la recherche sur l'hydrologie hivernale des cours d'eau et sur les processus de glace. Il y a un net besoin pour des demandes additionnelles de financement provenant du milieu académique et parallèlement, un besoin pour des budgets gouvernementaux spécifiquement dédiés au développement des connaissances et d'outils afin de comprendre et mieux vivre avec les cours d'eau durant l'hiver.
- Enfin, il faut créer un réseau de compétence hydrique hivernale au niveau du Gouvernement (personnes, outils, données, ressources, etc.), sous le leadership du MDDELCC. À cette fin, il faut redonner le mandat hivernal des cours d'eau au domaine public, non pas seulement pour estimer les débits et produire des prévisions hydrologiques, mais également pour ce qui est des aspects légaux et sécuritaires en plus des expertises particulières. Les organismes de bassins versants et les MRC doivent être impliqués dans les processus physiques et quantitatifs des cours d'eau puisqu'ils sont bien placés pour développer, entretenir et gérer les connaissances locales sur les cours d'eau.

8. Références

- Beltaos, S., 2013. Hydrodynamic and climatic drivers of ice breakup in the lower Mackenzie River. *Cold Regions Science and Technology* 95: 39-52.
- Beltaos, S., 2008. Onset of Breakup. Dans: S. Beltaos (ed.): *River ice Breakup*. Water resources publications, Highland Ranch, Colorado.
- Beltaos S. 2002. Effects of climate on mid-winter ice jams. *Hydrological Processes* 16(4): 789–804.
- Beltaos, S., 1997. Onset of river ice breakup. *Cold Regions Science and Technology*, 25(3): 183-196.
- Beltaos, S., 1987. Ice freeze-up and breakup on the lower Thames River: 1983-84 observations. *National Water Research Institute Contribution 87-19*, Burlington, Ontario.
- Beltaos, S., Prowse, T.D., 2009. River-ice hydrology in a shrinking cryosphere. *Hydrological Processes* 23: 122-144.
- Beltaos, S., Burrell, B.C., 2008. Climatic aspects. Dans: S. Beltaos (ed.): *River ice Breakup*. Water resources publications, Highland Ranch, Colorado.
- Beltaos, S., Burrell, B.C., 2003. Climatic change and river ice breakup. *Canadian Journal of Civil Engineering* 30: 145-155.
- Best, H., McNamara, J.P., Liberty, L., 2005. Association of Ice and River Channel Morphology Determined Using Ground-Penetrating Radar in the Kuparuk River, Alaska. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 37(2), 157-162.
- Carson, R., Beltaos, S., Groeneveld, J., Healy, D., She, Y., Malenchak, J., Morris, M., Sauce, J-P., Kolerski, T., Shen, H.T., 2011. Comparative testing of numerical models of river ice jams. *Canadian Journal of Civil Engineering* 38: 669-678.
- Das, A., Rokaya, P., Lindenschmidt, K-E., 2017. Assessin the impact of climate change on ice jams along the Athabasca River at Fort McMurray, Alberta, Canada. Présenté dans le cadre de la conference CGU-HS CRIPE Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Whitehorse, YK, 9-12 juillet 2017. 12 p.
- Dubé., P., 2009. *Trésor Volé. Des Scandales environnementaux et écologiques extrêmes qui détruisent l'héritage naturel de l'est du Canada et des États-Unis*. ISBN : 978-1-4389-6564-2 (SC). 259 p.
- Galbraith, P.W., 1981. On estimating the likelihood of ice jams in the Saint John River using meteorological variables. *Proceedings of the 5th Canadian Hydrotechnical Conference*, Fredericton, New-Brunswick, 219-237.
- Hicks, F., Cui, W., Andres, D., 1995. Forecasting breakup on the Mackenzie River at the Ft. Providence Ferry Crossing. *Water Resources Engineering Report 95-H2*, University of Alberta, Edmonton, 202 p.

Huntington, T.G., Hodgkins, G.A., Dudley, R.W., 2003. Historical trend in river ice thickness and coherence in hydroclimatological trends in Maine. *Climatic Change* 61: 217-236.

Janowicz, R., 2017. Impact of Climate Warming on River Ice Break-up and Snowmelt Freshet Processes on the Porcupine River in Northern Yukon. Dans: 19th CGU-HS CRIPE Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Whitehorse, Yukon, July 9-12, 2017.

Kil'myaninov, V.V., 2012. The effect of Meteorological Conditions Prior to Ice Run on the Extent of Ice Jam Floods on the Lena River. *Russian Meteorology and Hydrology* 37(4): 276-278.

Lagadec, A., Boucher, É., Germain, D., 2015. Tree ring analysis of hydro-climatic thresholds that trigger ice jams on the Mistassini River, Quebec. *Hydrological Processes*, 29(23): 4880-4890. DOI: 10.1002/hyp.10537.

Leclerc, M., Morse, B., Francoeur, J., Heniche, M., Boudreau, P., Secretan, Y., 2001. Analyse de risques d'inondations par embâcles de la rivière Montmorency et identification de solutions techniques innovatrices – Rapport de la Phase I – Préfaisabilité- Document de travail présenté au Comité de suivi. Rapport conjoint enregistré à l'INRS-Eau R577, et à l'Université Laval - Département de Génie civil, Janvier, 118 p.

Liu, L., Li, H., and Shen, H.T. 2006. A two-dimensional comprehensive river ice model. Présenté à la 18e Conférence de l'IAHR Ice Symposium, Sapporo, Japon.

Morse, B., Turcotte, B., 2014. Réduction du risque d'inondations causées par les glaces de la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond. Phase I : Identification des mesures possibles. Présenté à la Ville de Saint-Raymond et à la CAPSA. 109 p.

Prowse, T.D., Beltaos, S., 2002. Climate Control of River-Ice Hydrology: A Review. *Hydrological Processes* 16: 802-822.

Prowse, T.D., Culp, J.M., 2003. Ice breakup: a neglected factor in river ecology. *Canadian Journal of Civil Engineering* 30: 128-144.

Prowse, T.D., Ferrick, 2002. Hydrology of ice-covered rivers and lakes: scoping the subject. *Hydrological Processes* 16: 759-762.

Robichaud, D., 2003. Hydrometeorological factors Influencing Breakup on the Athabasca River at Fort McMurray, A.B. M.Sc. thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.

Shaw, J.K.E., Lavender, S.T., Stephen, D., Jamieson, K., 2013. Ice Jam Flood Forecasting at the Kashechewan FN Community on the North Albany River. Proc. 17th Workshop on River Ice, Edmonton, Alberta, 20 pp.

Shen, H.T., Su, J., and Liu, L. 2000. SPH simulation of river ice dynamics. *Journal of Computational Physics*, 165(2): 752–770. doi:10.1006/jcph.2000.6639.

Shulyakovskii, L.G. 1963. Manual of forecasting ice-formation for rivers and inland lakes. Israel Program for Scientific Translations TT 66-51016, Jerusalem, Israel, 1966.

Stickler, M., Alfredsen, K.T., Linnansaari, T., Fjeldstad, H-P., 2010. The influence of dynamic ice formation on hydraulic heterogeneity in steep streams. *River Research and Applications* 26: 1187-1197.

Turcotte, B., Morse, B., 2018. Amélioration de l'estimation du débit des cours d'eau en présence de glace, Phase II : Évaluation du potentiel de certaines approches et outils. Rapport final. Présenté à la Direction de l'expertise hydrique du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). 65 pages.

Turcotte, B., Morse, B., Marois, L., 2017. Réduction du risque relié aux inondations dans la ville de Saint-Raymond. Sous-projet 2 : Rapport final sur la quantification du risque actuel d'inondations, présenté au ministère de Sécurité publique. 12 décembre. 59 p.

Turcotte, B., Morse, B., 2017. Identification de méthodes visant l'amélioration de l'estimation du débit hivernal des cours d'eau du Québec. Rapport Final. Présenté à la Direction de l'expertise hydrique du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). 58 pages.

Turcotte B., Morse, B., Pigeon, F., 2015. Guide de la débâcle des glaces sur la rivière Montmorency. Préparé pour le Bureau de la Sécurité publique de la Ville de Québec. 29p.

Turcotte, B., Morse, B., 2015. River ice breakup forecast and annual risk distribution in a climate change perspective. Présenté dans le cadre de la conférence CGU-HS CRIPE Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers. Québec, QC, 18-20 août 2015. 21p.

Turcotte, B., Morse, B., 2011. Ice processes in a steep river basin, *Cold Region Science and Technology* 67(3), 146-156.

Turcotte, B., Morse, B., Bergeron, N.E., Roy, A.G., 2011. Sediment transport in ice-affected rivers, *Journal of Hydrology*, 409, 561-577.

Tuthill, A.M., Wuebben, J.L., Daly, S.F., White, K.D., 1996. Probability distributions for peak stage on rivers affected by ice jams. *Journal of Cold Regions Engineering* 10(1): 36-57.

Wang, J., He, L., Chen, P-P., 2013. Numerical simulation of mechanical breakup of river ice-cover. *Journal of hydrodynamics* 25(3): 415-421.

White, K.D., 2008. Breakup Ice Jam Forecasting. In S. Beltaos (ed.): *River ice Breakup*. Water resources publications, Highland Ranch, Colorado.

White, K.D., 1999. Forecasting Systematic Ice Jam Occurrence along the Yukon River, Alaska. *Proceedings of the 10th Workshop on the Hydraulics of Ice-Covered Rivers*. J. Doering (ed.), Winnipeg, Manitoba: 30-43.

White, K.D., 1996. Predicting Breakup ice jams Using Logistic Regression. ASCE Journal of Cold Regions Engineering 10(4): 178-189

White, K.D., Daly, S.F., 2002. Predicting ice jams with discriminate function analysis. Proceedings of the 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Oslo, Norway.

Wuebben, J.L., Gagnon, J.J., Deck, D.S., 1995. Ice jamming near the confluence of the Missouri and Yellowstone Rivers: characterization and mitigation. USA CRREL Report SR 95-19.

Zachrisson, G. 1990. Severe break-ups in the River Tornealven: measures to mitigate damages from ice jamming. Proceedings of the IAHR Ice Symposium, Espoo, Finland, Vol. 2: 845-857.

Zhao, L., 2012. River ice breakup forecasting using artificial neural networks and fuzzy logic systems. Ph.D. thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.

9. Annexes 1

Liste partielle des modèles empiriques de prévision de la débacle et des embâcles.

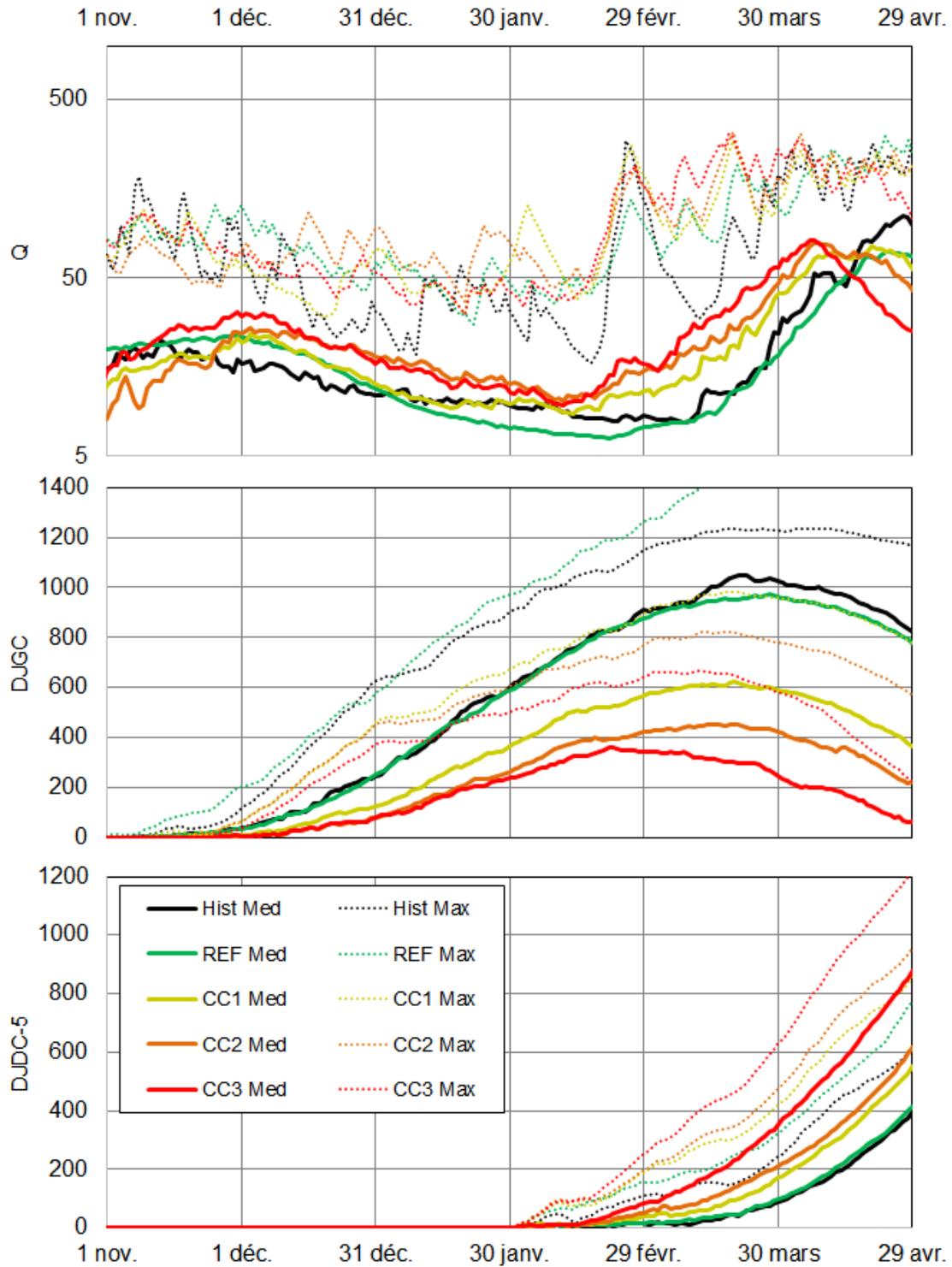
Rivière	Type de cours d'eau	Années de données	Référence	Indicateur de débacle
Rivière Tornealven	ND	~33 ans	Zachrisson (1990)	- Q - DJD - Précipitation
Rivière Lena	Faible pente à chenal unique (0.01%) et en tresse (0.02%)	70 ans	Kil'myaninov (2012)	- T_{air} (anomalies mensuelles et moyennes mensuelles) - Date
Rivière Lena	Faible pente	21 ans	Shulyakovskii (1963)	- Niveau d'eau
Rivière Amur	Faible pente en tresse (~0.005%)	~27 ans	Shulyakovskii (1963)	- Niveau d'eau - Budget thermique
Rivière Yenisei	Faible pente à chenal unique ou anastomosé (~0.03%)		Shulyakovskii (1963)	- Niveau d'eau lors de la formation de glace
Fleuve Jaune	Faible pente à méandres (0.02%)	5 ans	Wang et al. (2013)	- Q - Mécanique des glaces
Fleuve Yukon	Variable (0.013% en moyenne)	19 ans	White (1999)	- Localisation des embâcles historiques
Fleuve Mackenzie au delta	Faible pente – delta (0.003%)	11 ans	Beltaos (2013)	- Niveau d'eau - Cisaillement - Géométrie du chenal - Alignement du chenal - Résistance du couvert - Épaisseur de glace (DJDC) - Date - Q
Fleuve Mackenzie à Fort Providence	Transition d'un lac vers des chenaux anastomosés avec quelques rapides (~0.02%)	4 ans	Hicks et al. (1995)	- Budget thermique - Force du couvert de glace (craques, crêtes, etc.)
Rivière Hay	Faible gradient à chenal unique vers un delta	~ 40 ans	Zhao (2012)	- Plusieurs (Réseau de neurones)
Rivière Athabasca	Faible pente à chenal unique (0.06%)	~ 22 ans	Robichaud (2003)	- Conditions de formation de glace - Caractéristiques de la neige - Épaisseur de glace - DJD - Radiation solaire - Niveau d'eau (ruissellement)

Rivière North Albany	Faible gradient vers un delta		Shaw et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> - Pluie et fonte de neige - Q et niveau d'eau - Augmentation de Q - Date
Rivière Thames	Faible gradient à méandre	~ 8 ans	Beltaos (1987)	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau d'eau - Épaisseur de glace
Rivière Thames	Faible gradient à méandre	~ 9 ans	Beltaos (2008) or Beltaos (1997)	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau d'eau - Épaisseur de glace - DJD - Résistance du couvert - Géométrie du chenal - Pente du chenal
Rivière Moose	Faible gradient à chenal unique en transition vers un chenal en tresse (~0.04%)	~14 ans	Beltaos (2008) or Beltaos (1997)	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau d'eau - Épaisseur de glace - DJD - Résistance du couvert - Géométrie du chenal - Pente du chenal
Rivière Grand	Seuils-mouilles (0.2%)	4 ans	Beltaos (2008) or Beltaos (1997)	<ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur du couvert - DJD - Géométrie du chenal - Pente du chenal
Rivière Restigouche	Faible gradient à chenal unique (~0.04%)	~11 ans	Beltaos (2008) or Beltaos (1997)	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau d'eau - Épaisseur du couvert - DJD - Résistance du couvert - Géométrie du chenal - Pente du chenal
Rivière Saint-Jean		36 ans	Galbraith (1981)	<ul style="list-style-type: none"> - DJD - Budget thermique - Pluie et fonte
Rivière Platte	Lit en tresses (0.1%)		White (2008); White (1996)	<ul style="list-style-type: none"> - DJD - Date - Niveau d'eau
Rivière Missouri	Faible gradient à meander avec confluence		Wuebben et al. (1995)	<ul style="list-style-type: none"> - DJG - Q - Date - Niveau d'eau - Épaisseur de neige
Rivière Allegheny	Méandre avec seuils (0.05%)		White (2008)	<ul style="list-style-type: none"> - Q - DJG
Rivière Allegheny	Méandre avec seuils (0.05%)		White and Daly (2002)	<ul style="list-style-type: none"> - Q - Q des tributaires - DJG
Rivière Winooski	Transition de rapides à faible pente avec 2 seuils (~0.3%)	38 ans	Tuthill et al. (1996)	<ul style="list-style-type: none"> - Q - DJG - Date

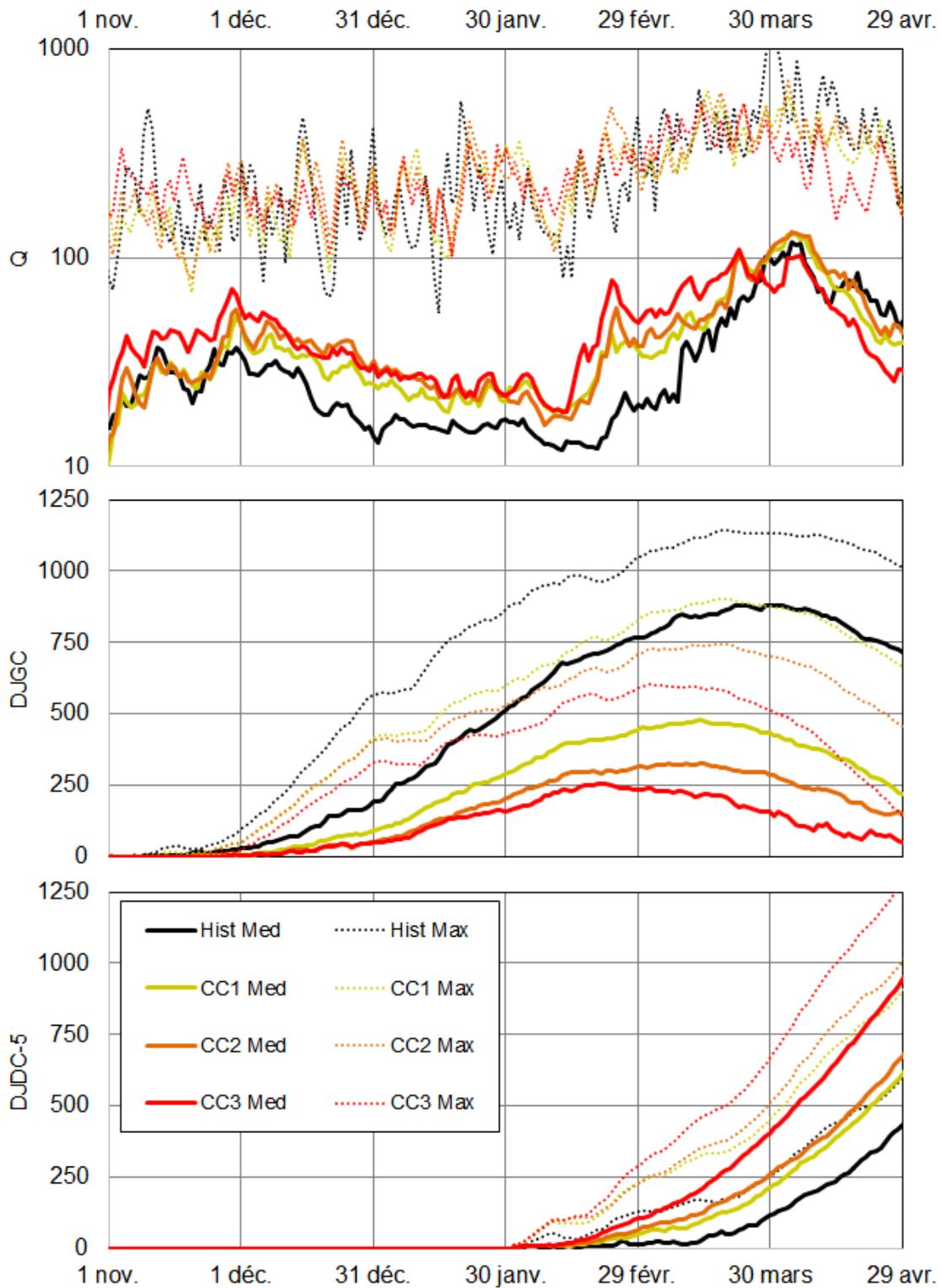
Rivière Mistassini	Faible gradient intercepté de chutes et de rapides	46 ans	Lagadec et coll., 2015	-Q de septembre -Q de mai -Pluie hivernale -Précipitation printanière -DJD
-----------------------	--	--------	---------------------------	--

10. Annexes 2

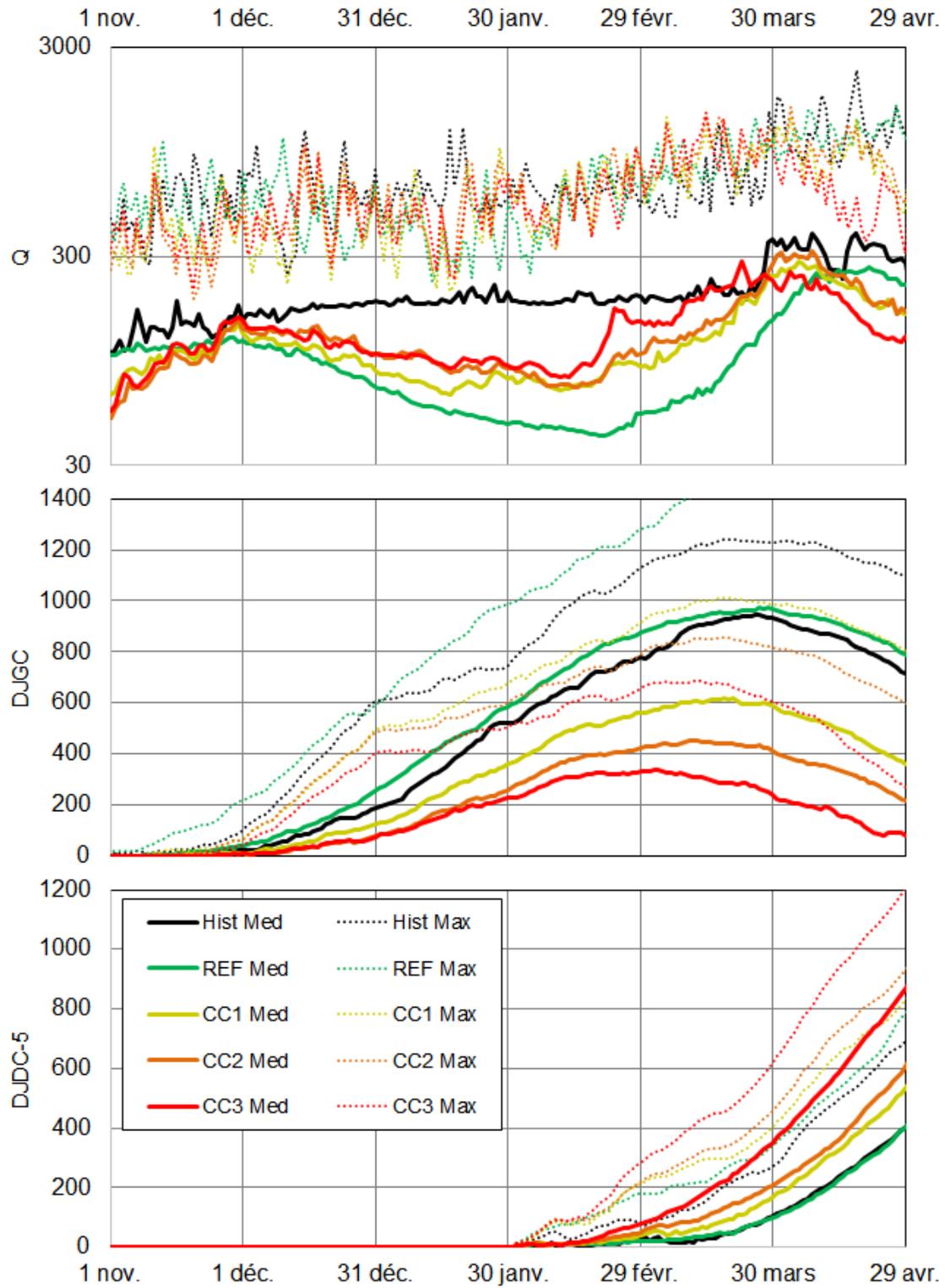
Bilan des données utilisées (médianes et maximums des débits Q , Degrés-jours de gel cumulés DJGC et degrés-jours de dégel cumulés au-dessus de -5°C DJDC-5) pour la rivière L'Assomption.



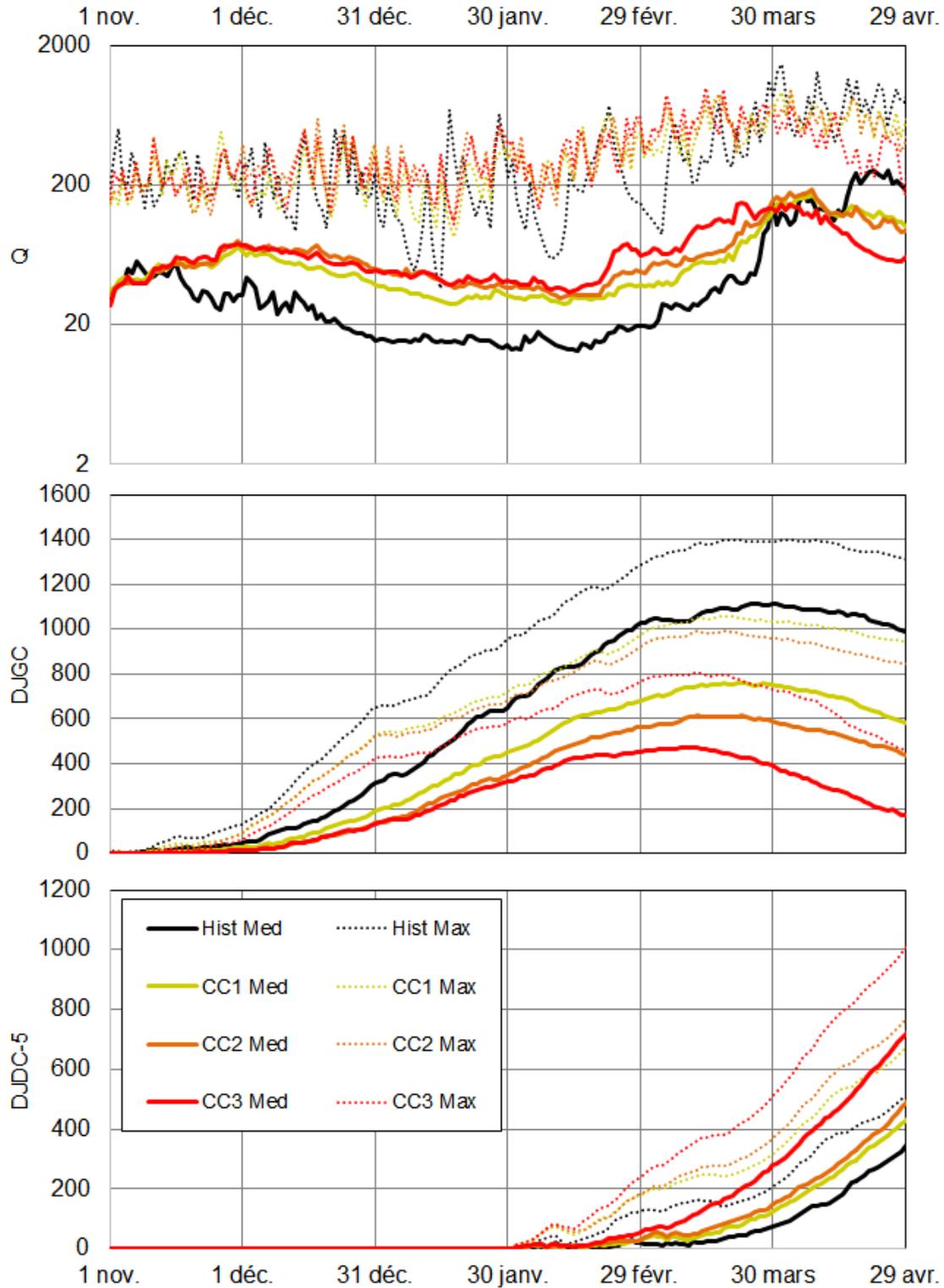
Bilan des données utilisées (médianes et maximums des débits Q, Degrés-jours de gel cumulés DJGC et degrés-jours de dégel cumulés au-dessus de -5°C DJDC-5) pour la rivière Châteauguay.



Bilan des données utilisées (médianes et maximums des débits Q, Degrés-jours de gel cumulés DJGC et degrés-jours de dégel cumulés au-dessus de -5°C DJDC-5) pour la rivière St-François.

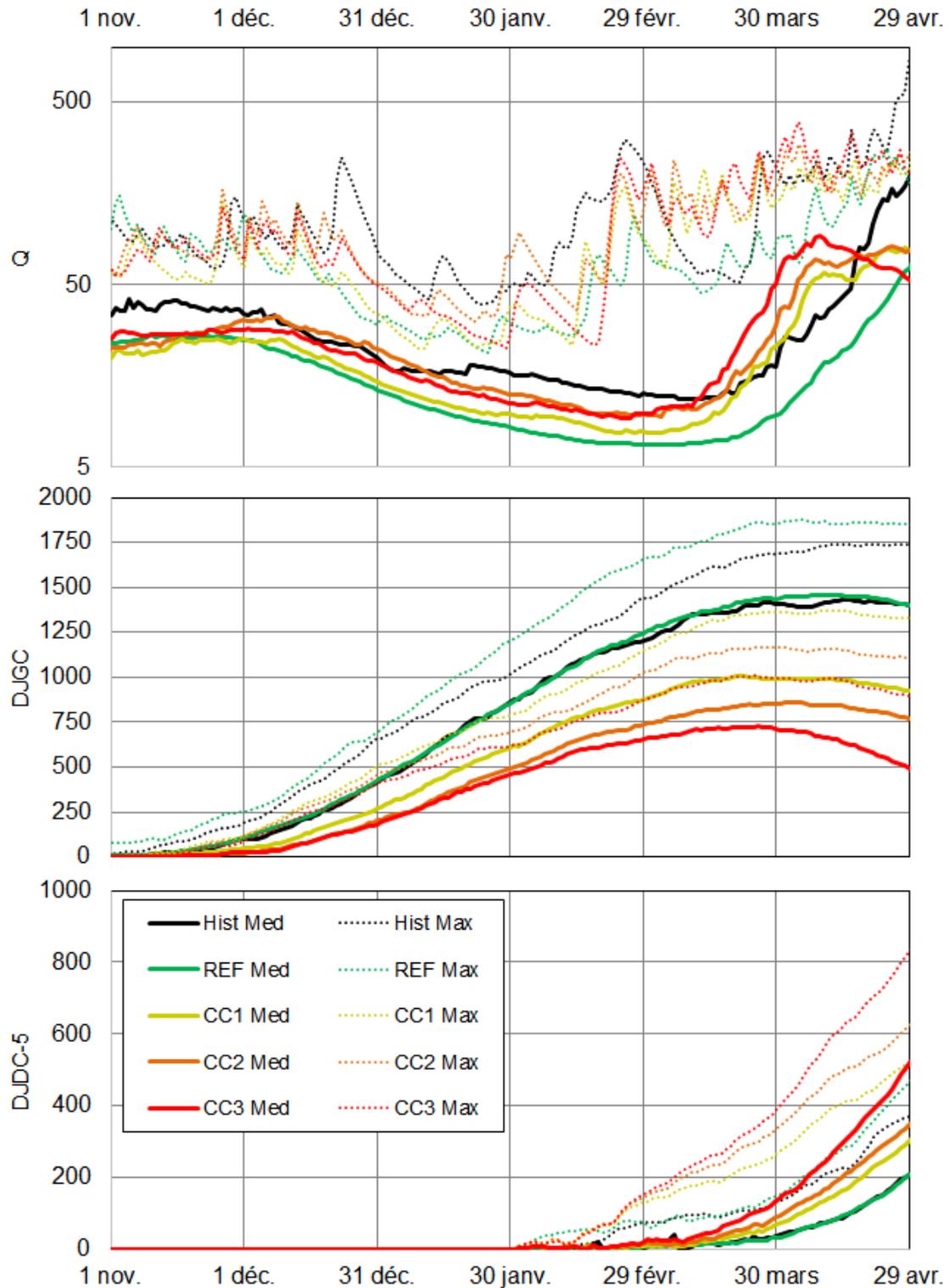


Bilan des données utilisées (médianes et maximums des débits Q, Degrés-jours de gel cumulés DJGC et degrés-jours de dégel cumulés au-dessus de -5°C DJDC-5) pour la rivière Chaudière.

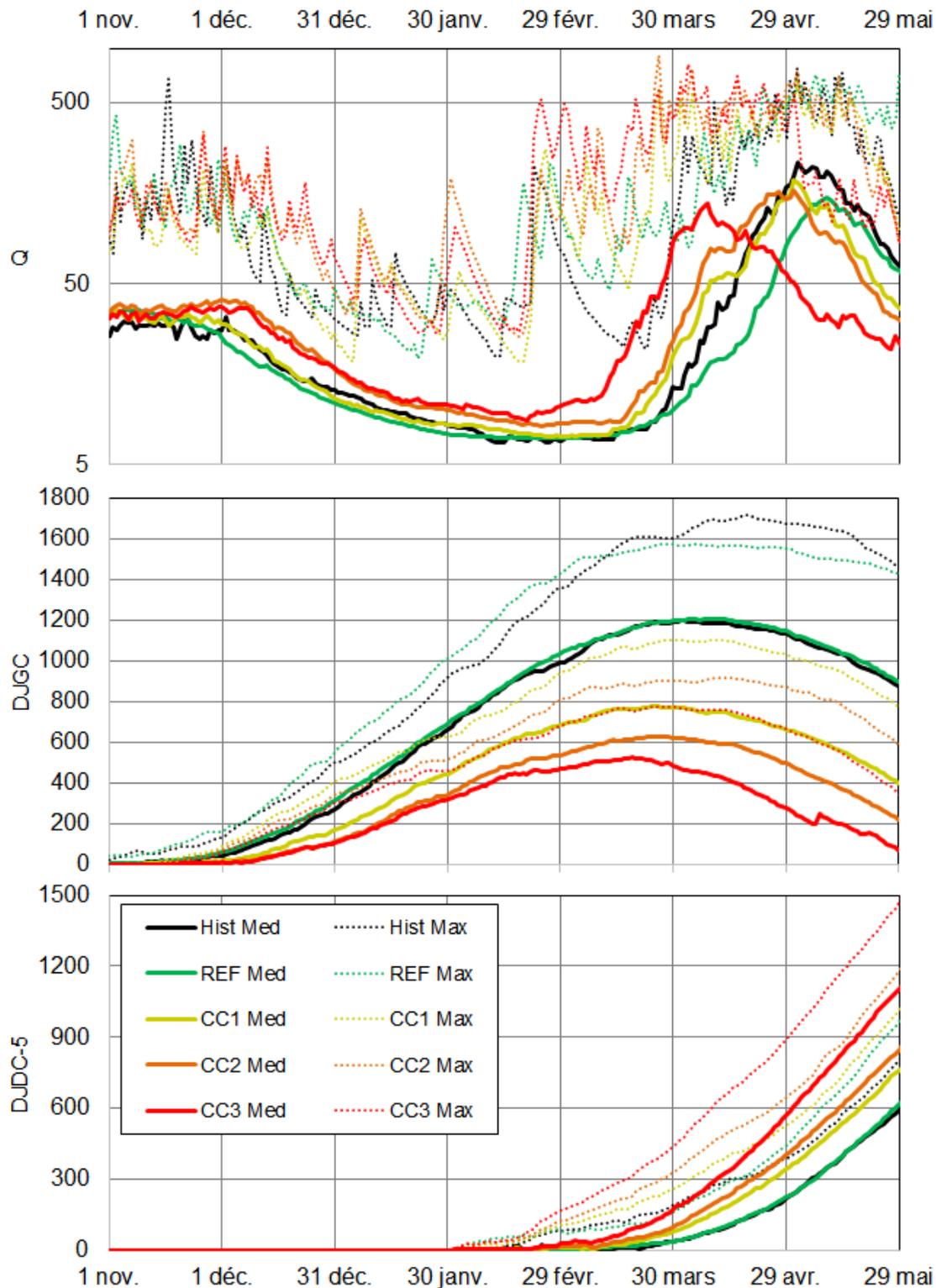


Bilan

Bilan des données utilisées (médianes et maximums des débits Q, Degrés-jours de gel cumulés DJGC et degrés-jours de dégel cumulés au-dessus de -5°C DJDC-5) pour la rivière Matapédia.



Bilan des données utilisées (médianes et maximums des débits Q, Degrés-jours de gel cumulés DJGC et degrés-jours de dégel cumulés au-dessus de -5°C DJDC-5) pour la rivière Matane.



Bilan des données utilisées (médianes et maximums des débits Q, Degrés-jours de gel cumulés DJGC et degrés-jours de dégel cumulés au-dessus de -5°C DJDC-5) pour la rivière Mistassini.

