



Étude sur l'atténuation des catastrophes à Aklavik et à Tuktoyaktuk. Débâcle de la glace de rivière sur le chenal Peel à Aklavik au printemps 2019.

Guide d'orientation des Territoires du Nord-Ouest pour la cartographie des zones inondables causées par des embâcles glaciaires, version 1.0

Préparé par :

Northwest Hydraulic Consultants Itée.

9819, 12^e avenue SW
Edmonton (Alberta)
T6X 0E3

www.nhcweb.com

Personne-ressource du projet de NHC :

Dan Healy, Ph. D., ing.
Directeur

Novembre 2023
Rapport final v.1.0

Document de référence
NHC 1007306

Rapport préparé pour :

Ressources naturelles Canada

560, rue Rochester
Ottawa (ON) K1A 0E4

Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest

CP 1320
Yellowknife (T.N.-O.) X1A 2L9

Mise en garde

Ce document a été traduit par un service tiers. Par conséquent, le sceau d'ingénierie ne peut être apposé sur cette version du document. Pour la version scellée, veuillez-vous référer au document anglais. L'exactitude de cette traduction n'est pas garantie et toute divergence ou erreur de traduction doit être vérifiée par rapport au texte anglais original.

Avis de non-responsabilité

Ce rapport a été préparé par Northwest Hydraulic Consultants Itée pour le compte de Ressources naturelles Canada et du gouvernement des Territoires du Nord-Ouest en vue d'une application définie des orientations fédérales sur la cartographie des zones inondables. Les renseignements et les données contenus dans le présent document représentent le meilleur jugement professionnel de Northwest Hydraulic Consultants Itée à la lumière des connaissances et de l'information dont l'organisation disposait au moment de la préparation et ont été préparés conformément aux pratiques généralement acceptées en matière d'ingénierie et de géosciences.

Sauf si la loi l'exige, le présent rapport et les renseignements et données qu'il contient doivent être traités de façon confidentielle et ne peuvent être utilisés que par Ressources naturelles Canada, le gouvernement des Territoires du Nord-Ouest, leurs dirigeants et leurs employés. Northwest Hydraulic Consultants Itée décline toute responsabilité à l'égard d'autres parties qui pourraient avoir accès à ce rapport pour toute blessure ou perte, ou tout dommage subi par ces parties à la suite de l'utilisation de ce rapport ou à la confiance accordée à ce rapport ou à son contenu.

Crédits et remerciements

Ce guide été financé par le gouvernement du Canada dans le cadre du Programme d'identification et de cartographie des aléas d'inondation.

Les organismes suivants ont fourni des renseignements clés à l'appui de ce travail.

- Ressources naturelles Canada (RNCAN)
- Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest (GTNO)
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC)

Les personnes suivantes ont effectué un examen technique de ce guide.

- Brian Perry — RNCAN
- Tina Lindsay — RNCAN
- Anna Coles — GTNO
- Shawne Kokelj — GTNO
- Melanie Desjardins — GTNO
- Emmanuelle Simms — ECCC
- Joshua Wiebe — ECCC

Ce guide a été rédigés par Dan Healy, Agata Hall et Robyn Andrishak de Northwest Hydraulic Consultants.

Table des matières

Mise en garde.....	ii
Avis de non-responsabilité	ii
Crédits et remerciements	iii
1 Introduction	1
1.1 Usage.....	1
1.2 Aperçu de la méthodologie.....	1
1.3 Terminologie de la cartographie des zones inondables	5
2 Collecte des données	6
2.1 Études, rapports et comptes rendus.....	6
2.2 Données hydrométéorologiques	8
2.2.1 Données hydrométriques	9
2.2.2 Données météorologiques.....	9
2.2.3 Données sur la glace de rivière	9
2.3 Données géospatiales	10
2.3.1 Cartes de base.....	10
2.3.2 Modèle numérique de terrain	11
2.3.3 Imagerie spatiale radar, spatiale optique et aérienne.....	11
2.3.4 Cartographie locale	12
2.3.5 Informations précédentes sur la cartographie des zones inondables.....	12
2.4 Données recueillies sur le terrain	12
2.4.1 Plan d’arpentage	13
2.4.2 Contrôle d’arpentage	13
2.4.3 Géométrie des cours d’eau.....	14
2.4.4 Lignes des hautes eaux et cicatrices de glace	15
2.4.5 Structures hydrauliques	16
2.4.6 Notes de terrain, photographies et vidéos	16
2.5 Savoir traditionnel et savoir autochtone	17
3 Examen et évaluation des données.....	17
3.1 Plan d’assurance qualité	17
3.2 Études, rapports et comptes rendus.....	18
3.3 Données hydrométéorologiques	19
3.4 Données géospatiales	19
3.5 Données recueillies sur le terrain	20
3.6 Évaluation des lacunes.....	20
4 Hydrologie des inondations	21
4.1 Historique des inondations	21
4.2 Régime de glaces.....	21
4.3 Préparation des données	23

4.4	Fréquence du niveau des inondations	24
4.4.1	Méthodes directes	24
4.4.2	Méthodes indirectes	25
5	Hydraulique des crues	25
5.1	Préparation des données	25
5.2	Construction et étalonnage du modèle d'embâcle	26
5.3	Modélisation du profil des inondations	27
6	Cartographie des zones inondables	27
6.1	Préparation de la carte de base	27
6.2	Analyse	28
6.2.1	Étendue des inondations	28
6.3	Cartothèque	28
6.3.1	Cartes de crues d'inondation	28
6.3.2	Cartes des aléas	28
6.3.3	Cartes des risques	29
7	Prise en compte des changements climatiques	29
7.1	Compréhension actuelle	29
7.2	Renseignements sur les changements climatiques	30
7.3	Approche de l'évaluation	32
7.4	Résumé des répercussions des changements climatiques sur les inondations causées par les embâcles de glace de rivière	34
8	Ressources supplémentaires	34
9	Références	35

Liste des tableaux

Tableau 1.	Aperçu de la méthodologie	3
Tableau 2.	Exigences des normes de référence spatiale de RNCan	13
Tableau 3.	Exemples d'études de cas utilisant des modèles climatiques pour analyser les impacts sur les processus de glace de rivière	32
Tableau 4.	Processus d'évaluation des changements climatiques	33

Liste des figures

Figure 1.	Diagramme de flux de la méthodologie	2
-----------	--	---

1 Introduction

Ce guide d'orientation, préparé pour le gouvernement des Territoires du Nord-Ouest (GTNO), fournit des conseils aux responsables de programme et aux spécialistes sur les méthodes de production de cartes des zones d'inondation, des aléas et des risques d'inondation pour les communautés qui sont principalement touchées par des inondations causées par des embâcles glaciaires. Les données existantes varient d'une communauté à l'autre et ce guide d'orientation s'applique aussi bien aux communautés disposant de peu ou pas de données qu'à celles où les données sont abondantes.

1.1 Usage

Historiquement, les inondations dues aux embâcles glaciaires sont le type d'inondation le plus fréquent dans les Territoires du Nord-Ouest (T.N.-O.). Plusieurs collectivités ont connu d'importantes inondations causées par des embâcles en 2021 et de graves inondations ont eu lieu de nouveau en 2022, au moment de la rédaction de ce guide d'orientation. L'accent est mis ici sur les bonnes pratiques pour l'élaboration d'une cartographie d'ingénierie des aléas d'inondation aux endroits où l'inondation causée par les embâcles est le principal mécanisme d'inondation. La méthodologie pour la cartographie provisoire ou préliminaire des inondations historiques n'est pas couverte par ce guide d'orientation.

La méthodologie fournie dans le présent document est complémentaire à la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » (GOF CZI). Les GOF CZI contiennent un ensemble de lignes directrices évolutives portant sur le cadre du programme; l'acquisition de données lidar; les procédures hydrologiques et hydrauliques; la géomatique; l'estimation des dommages causés par les inondations; les changements climatiques; et une bibliographie des meilleures pratiques et des références en matière d'atténuation des inondations. Le lecteur est invité à compléter la méthodologie décrite dans le présent document par celle qui figure dans les GOF CZI.

Les inondations dues aux embâcles sont un phénomène très complexe qui nécessite une expertise spécialisée pour l'analyse et la cartographie; il est conseillé que ce soient les spécialistes expérimentés qui effectuent l'analyse des embâcles. Les objectifs et les exigences des travaux de cartographie des zones inondables sont propres à chaque projet et varient en fonction des besoins de la communauté et du contexte hydroclimatique. Les méthodes d'une étude particulière varieront quelque peu au cas par cas et l'approche adoptée devrait être établie par des spécialistes expérimentés et qualifiés.

1.2 Aperçu de la méthodologie

La méthodologie est organisée en fonction des tâches suivantes nécessaires à la production de cartes de crues d'inondation, d'aléas et de risques.

- Collecte des données
- Examen et évaluation des données
- Hydrologie des inondations
- Hydraulique appliquée aux inondations
- Cartographie des zones inondables
- Prise en compte des changements climatiques

Un aperçu de la méthodologie est fourni dans l'organigramme de la Figure 1. Les tâches décrites dans le diagramme de flux sont détaillées dans le Tableau 1.

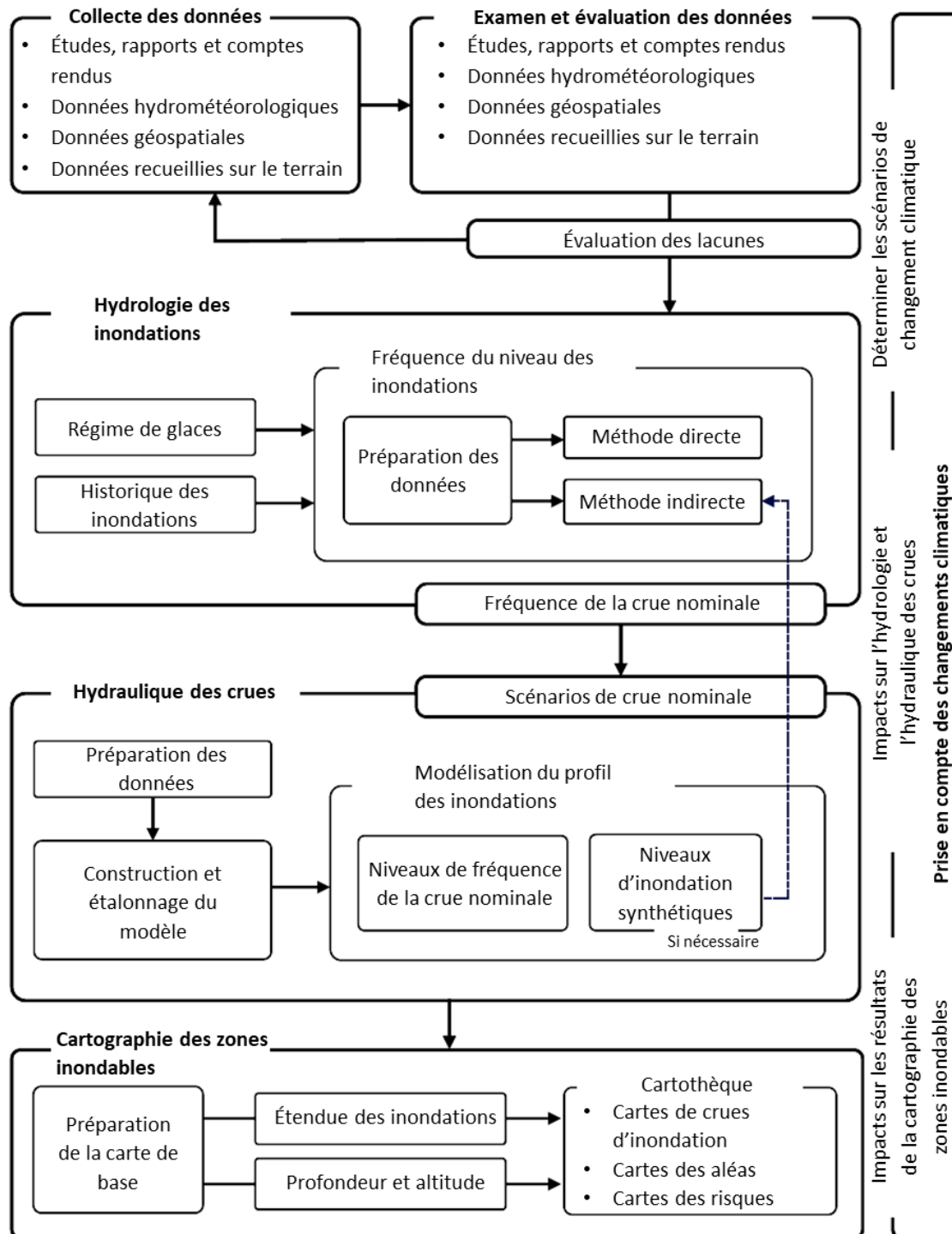


Figure 1. Diagramme de flux de la méthodologie

Tableau 1. Aperçu de la méthodologie

Collecte des données			
<p>Études, rapports et comptes rendus</p> <ul style="list-style-type: none"> • Événements documentés • Études antérieures sur les inondations • Études de planification • Rapports de conception • Études régionales • Modèles hydrologiques et hydrauliques • Savoir autochtone • Récits locaux • Récits des médias • Études sur les changements climatiques • Lignes directrices 	<p>Données hydrométéorologiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Débit d'eau • Niveau du cours d'eau • Mesures de décharge directe • Courbes de tarage • Météorologie • Température de l'eau • Glace de rivière 	<p>Données géospatiales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cartes de base • Mne/lidar • Imagerie aérienne • Imagerie spatiale radar • Imagerie spatiale optique • Cartographie locale • Cartographie précédente des zones inondables • Références et projections 	<p>Données recueillies sur le terrain</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plan d'arpentage • Contrôle d'arpentage • Géométrie des cours d'eau • Lignes des hautes eaux et cicatrices de glace • Structures hydrauliques • Notes de terrain, photos et vidéos • Informations d'observation sur les embâcles glaciaires

Examen et évaluation des données			
<p>Études, rapports et comptes rendus</p> <ul style="list-style-type: none"> • Extraction et collecte des données • Processus dominants de l'embâcle • Confirmer que l'embâcle est le mécanisme d'inondation dominant (par rapport à l'eau libre) 	<p>Données hydrométéorologiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Qualité des données • Périodes des relevés • Événements représentatifs • Représentatif du tronçon d'étude 	<p>Données géospatiales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Couverture • Comparaison des données de levé • Conventions et symbolique • Cartes de base préliminaires et base de données géospatiales 	<p>Données recueillies sur le terrain</p> <ul style="list-style-type: none"> • Contrôle d'arpentage • Aq/cq • Bathymétrie/topographie du fond marin • Structures hydrauliques • Structure de contrôle des inondations • Notes de terrain, photos et vidéos

ÉVALUATION DES LACUNES

- Évaluer la pertinence des données recueillies pour l'hydrologie, l'hydraulique et la cartographie.
- Évaluer la nécessité de poursuivre la collecte de données supplémentaires qui ont été déterminées au cours de l'examen des données (p. Ex., autres travaux publiés, travaux en cours, connaissances locales supplémentaires).
- Évaluer la nécessité de recueillir des données supplémentaires de surveillance, d'observation ou d'arpentage.
- Élaborer une méthodologie permettant de s'appuyer sur des données limitées.

Tableau 1. Aperçu de la méthodologie (suite)

Hydrologie des inondations		
Historique des inondations		
<ul style="list-style-type: none"> • Aperçu de l’historique des inondations dues aux embâcles et des emplacements susceptibles d’être inondés. • Tableau des inondations historiques et observées touchées par la glace (dates, emplacement, ampleur et impacts). • Résumé détaillé des principaux événements documentés avec des renseignements à l’appui, notamment : <ul style="list-style-type: none"> • Séquence d’événements menant à l’évolution de l’épisode d’inondation due aux embâcles. • Description du développement de l’embâcle, de la condition d’inondation maximale et de la décrue de l’embâcle. • Informations recueillies pendant l’événement, y compris les données d’arpentage et les observations au sol (par exemple, profils de niveau d’eau, photos, état des glaces), et les observations aériennes par avion, hélicoptère ou drone (par exemple, étendue du tronçon de rivière et nature des conditions des glaces). • Informations postérieures à l’événement, y compris des données d’arpentage (par exemple, profils de la ligne des hautes eaux, cicatrices de glace, murs de cisaillement), des paramètres de surveillance (par exemple, niveaux d’eau), des données traitées a posteriori (données satellitaires, imagerie aérienne, cartographie des glaces). 		
Régime de glaces		
<ul style="list-style-type: none"> • Identifier les conditions hydroclimatiques caractéristiques du tronçon d’étude. • Examiner la morphologie des cours d’eau et identifier les emplacements intéressants en ce qui concerne les processus de glace, y compris les contrôles hydrauliques, les sections abruptes, les bassins profonds, les courbures prononcées, les caractéristiques géomorphologiques, les empiètements sur les cours d’eau. • Caractériser les différents processus glaciaires en relation avec le tronçon d’étude. • Déterminer les facteurs de causalité de la gravité des embâcles. • Déterminer les caractéristiques typiques de la glace (épaisseur, rugosité, type). 		
Fréquence du niveau des inondations		
Préparation des données <ul style="list-style-type: none"> • Relevés hydrométriques • Données mesurées (lignes des hautes eaux, cicatrices sur les arbres) • Données d’entrée du modèle (où les données résumées sont incluses) 	Méthodes directes <ul style="list-style-type: none"> • Statistiques sur les valeurs extrêmes • Analyse fréquentielle 	Méthodes indirectes <ul style="list-style-type: none"> • Déterminer les principaux facteurs de causalité • Modélisation et synthèse des données • Analyse fréquentielle

Tableau 1. Aperçu de la méthodologie (suite)

Hydraulique des crues			
Préparation des données <ul style="list-style-type: none"> • Géométrie des cours d'eau • Caractéristiques physiques de l'embâcle • Données d'étalonnage • Conditions limites 	Construction et étalonnage du modèle <ul style="list-style-type: none"> • Géométrie du modèle • Paramètres de stabilité de l'embâcle • Rugosité • Étalonnage 	Modélisation du profil des inondations	
		Niveaux d'inondation synthétiques <ul style="list-style-type: none"> • Calculer les niveaux d'inondation pour appuyer l'analyse de la fréquence (au besoin) 	Niveaux de fréquence des inondations <ul style="list-style-type: none"> • Calculs relatifs aux profils de fréquence de la crue nominale
Cartographie des zones inondables			
Préparation de la carte de base <ul style="list-style-type: none"> • Disposition et échelle • Données de référence • Informations sur le modèle • Annotation • Symbologie 	Étendue des inondations (données vectorielles) <ul style="list-style-type: none"> • Étendue des inondations dérivée des profils d'inondation • Améliorations/ajustements 	Profondeur et altitude (données de trame) <ul style="list-style-type: none"> • Créer des grilles d'élévation et de profondeur de surface de l'eau 	Création d'une cartothèque <ul style="list-style-type: none"> • Cartes de crues d'inondation • Cartes des aléas • Cartes des risques
Prise en compte des changements climatiques			
<ul style="list-style-type: none"> • Déterminer les scénarios de changement climatique. • Évaluer les impacts potentiels des scénarios de changement climatique sur l'hydrologie et l'hydraulique des crues. • Évaluer les impacts potentiels des scénarios de changement climatique sur les résultats de la cartographie des zones inondables. 			

1.3 Terminologie de la cartographie des zones inondables

La terminologie de la cartographie des zones inondables utilisée dans les présents guides d'orientation est décrite ci-après. Cette terminologie est conforme à celles utilisées dans les GOFZCI et d'autres compétences, y compris le GTNO.

Inondation : Le recouvrement temporaire par l'eau de terres normalement sèches.

Cartographie des zones inondables : La délimitation de l'étendue et de l'élévation des crues sur une carte de base. Cette carte se présente habituellement sous forme de repères de crue qui indiquent la zone recouverte d'eau ou la hauteur que pourrait atteindre l'eau dans l'éventualité d'une inondation. Dans le cas de scénarios plus complexes, les données indiquées sur les cartes peuvent aussi indiquer les vitesses de ruissellement, la hauteur de l'eau, d'autres paramètres de risques et des vulnérabilités.

Aléa : Phénomène, manifestation physique ou activité humaine susceptible d’occasionner des pertes en vies humaines ou des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l’environnement.

Risque : La combinaison de la probabilité et des conséquences négatives d’un danger spécifié, y compris les impacts économiques, sociaux/culturels, environnementaux et humains potentiels.

Cartes de crues d’inondation : Cartes qui montrent l’étendue des eaux de crue pendant les inondations passées ou qui montrent l’étendue des eaux de crue potentielle pour des inondations de différentes amplitudes. Elles visent à faciliter la gestion des plans d’urgence pour les communautés situées dans les zones inondables et zones à risque d’inondation.

Cartes des aléas de l’inondation : Cartes techniques présentant les résultats des études hydrologiques et hydrauliques, y compris l’étendue d’une crue nominale réglementaire. Ces cartes sont utilisées à des fins de planification réglementaire liées à l’aménagement du territoire et à l’atténuation des inondations.

Cartes des risques d’inondation : Des cartes qui montrent le risque d’inondation ou les délimitations d’inondation ainsi que des valeurs socio-économiques supplémentaires, telles que les pertes potentielles ou les niveaux de vulnérabilité des biens. Ces cartes servent à identifier les conséquences sociales, économiques et environnementales pour les communautés lors d’une inondation potentielle.

2 Collecte des données

Ce qui suit décrit les principaux ensembles de données et les renseignements nécessaires pour documenter l’histoire des inondations, caractériser le régime de glaces, effectuer des analyses et des modélisations de l’hydrologie et de l’hydraulique des inondations, élaborer des cartes des zones inondables et évaluer les impacts des changements climatiques.

2.1 Études, rapports et comptes rendus

Les études, les rapports et les comptes décrivent les informations documentées qui sont pertinentes pour la production de cartes d’inondation spécifiques à une région. Ces données comprennent les inondations passées (événements et comptes rendus documentés), les analyses (modèles, études, rapports) et les documents de référence (études sur les changements climatiques, lignes directrices). Ces données sont importantes, car elles permettront de comprendre le régime des glaces (nécessaire pour l’hydrologie des crues), ainsi que les caractéristiques physiques des embâcles (requis pour les paramètres du modèle des embâcles) et les données d’étalonnage du modèle.

Il est particulièrement important de recueillir des renseignements sur les événements historiques importants ou notables qui sont les plus susceptibles d’être documentés et les documents historiques trouvés. Les données historiques nécessitent un certain effort de collecte et de catalogage, car elles ne sont pas systématiquement stockées et se trouvent dans une étendue de sources de formats variés.

Les données recueillies peuvent être publiées ou non. Les informations non publiées, telles que les événements documentés ou les récits locaux, ne doivent pas être négligées, car elles peuvent contenir

des données et des informations précieuses. Les informations publiées comprennent des publications évaluées par des pairs, des comptes rendus de conférences et des documents, des rapports de recherche, des thèses post-secondaires et des séries ou des bulletins techniques.

Événements documentés : Les événements documentés peuvent inclure des preuves anecdotiques ou basées sur l'observation d'embâcles glaciaires historiques. Ce type de données peut comprendre l'étendue et la hauteur des inondations par rapport à des points de repère connus ou à un point de référence local, la séquence des événements menant à la débâcle et aux inondations, ainsi que les conséquences comme les évacuations et le nombre de maisons touchées. Ces informations peuvent être résumées sous la forme d'un document autonome ou en tant que composant d'un document plus important et peuvent être publiées ou non. Cherchez ces rapports dans les bibliothèques publiques, institutionnelles (p. Ex., les dossiers de la Compagnie de la Baie d'Hudson, les journaux d'église, les journaux de la Gendarmerie royale du Canada) et gouvernementales. La Base de données canadienne sur les catastrophes (Sécurité publique Canada) contient de la documentation sur les catastrophes importantes et une estimation des coûts connexes. La détermination des risques et évaluation des risques des Territoires du Nord-Ouest contient également des renseignements sur les inondations entraînant des répercussions.

Études préalables sur les inondations : Les études antérieures sur les inondations contiennent des données très précieuses et fournissent des sources d'information et de données supplémentaires. Elles permettent de concentrer la recherche de données historiques. Elles peuvent également inclure des données hydrologiques et météorologiques, des données géospatiales et des données de terrain. Des études antérieures peuvent présenter des modèles hydrologiques, des modèles hydrauliques et des données d'étalonnage.

Études de planification : Les études de planification peuvent fournir des informations locales sur le développement et les infrastructures. Ces informations peuvent être utilisées pour la cartographie de base et comme données d'entrée pour l'élaboration de cartes d'aléas ou de risques. Ces études peuvent également présenter des informations générales importantes sur une zone, y compris des détails sur l'historique des inondations.

Rapports de conception : Des rapports de conception décrivant les structures hydrauliques existantes sont requis si les niveaux d'inondation doivent être modélisés. Il convient d'obtenir les plans conformes à l'exécution pour les ponts, les ponceaux, les déversoirs et les ouvrages de protection contre les inondations. Les caractéristiques des données existantes sur la structure se trouvent parfois dans les bases de données d'information des organismes administratifs. Les rapports de conception peuvent également contenir des informations utiles au développement et à l'étalonnage du modèle, comme l'historique des inondations et les informations contextuelles, les données relatives à l'hydrologie, les données de levé, les résultats du modèle hydraulique, les considérations relatives à la conception et les données cartographiques.

Études régionales : Les études régionales comprennent des recherches documentées qui s'étendent au-delà de la zone d'étude locale, éventuellement à l'échelle d'un bassin, ce qui est important pour la cartographie des zones inondables. Cela peut inclure des informations sur la géomorphologie ou la géophysique, en plus des données hydrauliques, hydrologiques ou liées aux glaces de rivière. Les données d'études régionales peuvent faciliter la recherche de données locales, ou elles peuvent s'étendre à l'extérieur des Territoires du Nord-Ouest et inclure des études dans d'autres régions du

Nord. L'analyse des études régionales vise à éclairer la compréhension du régime des glaces, de l'hydrologie des glaces de rivière et de l'hydraulique des embâcles.

Modèles hydrologiques et hydrauliques : Les modèles existants sont plus susceptibles d'être trouvés dans des études ou des rapports antérieurs; il est toutefois possible qu'ils se présentent sous la forme de produits autonomes pouvant être obtenus auprès de chercheurs universitaires ou de spécialistes de l'industrie.

Récits locaux : Des informations utiles peuvent être trouvées dans les récits locaux des inondations historiques. Ces récits peuvent être documentés ou oraux. Les photographies et vidéos historiques prises en charge par des récits locaux sont très précieuses. Le niveau de détail et de précision variera, mais ces données peuvent être essentielles à l'étalonnage et à la validation des modèles. Le plus souvent, les récits d'inondation comprennent des informations sur la séquence, le moment d'exécution et l'étendue de l'inondation pour un événement particulier. Ils peuvent présenter le contexte de l'ampleur relative de différents événements. Les récits des inondations peuvent présenter des informations sur le contexte hydrométéorologique avant et pendant la débâcle. L'ensemble de ces informations fournit des indications précieuses sur le régime des glaces de rivière, y compris les mécanismes dominants de débâcle et d'inondation.

Récits des médias : On peut trouver des informations historiques en consultant diverses sources médiatiques telles que les journaux, la radio et les sites Web. Il peut s'agir d'images aériennes acquises à partir de petits aéronefs volant à basse altitude, d'images provenant de drones et d'informations partagées sur les médias sociaux et d'autres plates-formes de domaine ouvert. Il convient d'examiner attentivement ces données si l'on veut s'y fier. La republication de ces données peut également faire l'objet de considérations particulières en matière de droits d'auteur. Tout support inclus dans les rapports d'étude nécessite une autorisation d'utilisation et une reconnaissance appropriée.

Études sur les changements climatiques : Les études sur les changements climatiques contiennent des données suggérant comment les changements climatiques peuvent affecter l'hydrologie et les régimes de glaces dans les régions nordiques. Cela peut comprendre divers scénarios à prendre en considération et des directives sur les paramètres de modélisation qui peuvent être appliqués dans le contexte de la cartographie des zones inondables.

Guides d'orientation : Les guides d'orientation de diverses compétences (fédérales, territoriales et provinciales) peuvent servir de documents de référence pour la réalisation d'études sur les inondations. Ces données permettent d'obtenir des définitions, des renseignements généraux et un aperçu des processus.

2.2 Données hydrométéorologiques

Les données hydrométéorologiques requises comprennent les données hydrométriques, les données météorologiques et les données sur la glace de rivière. Les données hydrométéorologiques consistent généralement en des séries temporelles de données d'observation qui ont été recueillies, enregistrées et archivées de manière systématique par un organisme public et qui peuvent faire l'objet d'une collaboration avec divers partenaires. Dans certains cas, les données peuvent avoir été recueillies par l'industrie ou les établissements d'enseignement. Ces sources et les renseignements à l'appui de ces ensembles de données doivent être examinés pour documenter les méthodes de collecte de données,

les unités de données, les attributs de données, l'équipement de collecte et l'information décrivant les lacunes en matière de données, l'état des données et la disponibilité des données. Ces données servent principalement à l'analyse hydrologique. Dans certains cas, les dossiers relatifs à des événements historiques précis peuvent être utilisés pour appuyer l'élaboration de modèles hydrauliques.

2.2.1 Données hydrométriques

Les données hydrométriques sont habituellement recueillies et stockées de façon systématique par un organisme comme Relevés hydrologiques du Canada (RHC), ECCC en collaboration avec divers partenaires tels que les provinces, les territoires et d'autres organismes. Ces données comprennent à la fois des données publiées et non publiées. Dans certains cas, les données hydrométriques systématiques peuvent avoir été recueillies par d'autres organismes à des fins de surveillance précises, par exemple à l'appui de la recherche ou de l'exploitation de diverses infrastructures riveraines (prises d'eau en rivière, par exemple).

La plupart des données hydrométriques se présentent sous la forme de niveaux d'eau exprimés dans une référence ou une hauteur de niveau local. Des renseignements additionnels, tels que le débit, sont ensuite dérivés de la hauteur de la jauge. Les attributs supplémentaires qui accompagnent les données sont utiles pour l'analyse. Par exemple, des informations sur les références d'altitude des stations, des indicateurs indiquant l'état ou la qualité des estimations des déversements publiés et des indicateurs indiquant les niveaux d'eau touchés par les glaces.

2.2.2 Données météorologiques

Les exigences relatives aux données météorologiques varient en fonction de la portée de l'étude. Les données peuvent servir à déduire la nature de l'état des glaces au cours de la période touchée par les glaces (période de gel, hiver et débâcle). Les données météorologiques peuvent également aider à élaborer des scénarios d'évaluation des changements climatiques. Les principaux paramètres de données qui importent pour les processus des glaces de rivière comprennent la température de l'air, l'humidité, le vent, le rayonnement solaire, la couverture nuageuse, les précipitations (pluie, neige, total) et possiblement l'évaporation. La plupart des données météorologiques proviendront des ensembles de données fédérales recueillies et stockées par le Service météorologique du Canada (SMC) et ECCC.

2.2.3 Données sur la glace de rivière

Outre les renseignements hydrométriques et météorologiques, les mesures de l'épaisseur de la glace sont très importantes pour la cartographie des zones inondables en cas de présence de glace de rivière ou de risque d'inondation dû à des embâcles. Les données relatives à l'épaisseur de la glace sont parfois collectées par les RHC aux stations de jaugeage hydrométrique à plusieurs reprises au cours de la saison. Ces données ne sont habituellement pas publiées, mais peuvent être demandées à RHC. Les données associées peuvent inclure le niveau d'eau, le débit, la date, l'heure et l'évaluation de la qualité des données. Les mesures d'épaisseur recueillies à la fin de la saison sont particulièrement utiles, car elles aident à quantifier l'épaisseur de la glace avant la débâcle printanière. Il convient de noter que les RHC mesurent généralement l'épaisseur de la glace depuis la surface de l'eau jusqu'au pied de la glace (épaisseur de la glace immergée) et que, parfois, l'épaisseur de la glace peut inclure une couche de frasil.

De plus, des données sur l'épaisseur de la glace de rivière peuvent avoir été recueillies par d'autres organismes, comme des établissements de recherche ou l'industrie, ou à des fins de surveillance spécifique. Des paramètres additionnels tels que la température de l'eau, les profils des embâcles, la hauteur du mur de cisaillement, les lignes de hautes eaux et les cicatrices de glace peuvent également être inclus dans ces paramètres.

Enfin, les informations sur le type de couche de glace de rivière sont également très importantes pour la cartographie des zones inondables. L'imagerie spatiale radar peut être recueillie à partir de diverses sources, comme la mission de la Constellation RADARSAT (MCR) et le Système de gestion des données d'observation de la Terre (SGDOT) et traitée par des spécialistes de la télédétection pour classer la glace de rivière pendant la débâcle. Les cartes de la couche de glace qui en résultent peuvent montrer l'emplacement des eaux libres, de la glace non consolidée/vive et de la glace consolidée/rugueuse. Des photographies de la rive peuvent également être disponibles pour la caractérisation de l'état de la glace de rivière locale.

2.3 Données géospatiales

Les données géospatiales comprennent des renseignements sous forme de points, de lignes, de polygones et de données quadrillées qui sont nécessaires pour produire des cartes des zones inondables. Les types de données utilisées pour la cartographie sont décrits ci-dessous. Le Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables (RNCAN, 2019) donne un aperçu des systèmes de coordonnées et des systèmes de référence qui sont pertinents pour les données géospatiales. Bien que les ensembles de données les plus récents soient recommandés pour la modélisation et la cartographie des zones inondables, des hypothèses peuvent être appliquées lors de l'utilisation d'ensembles de données plus anciens pour obtenir la plus grande valeur à partir des informations disponibles.

2.3.1 Cartes de base

Les cartes de base sont des cartes de référence sur lesquelles les données sur les inondations seront superposées et fournissent un contexte spatial pour les résultats. Les cartes de base sont réalisées à partir des données de base qui sont examinées en détail dans le Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables (RNCAN, 2019). L'échelle des cartes de base doit être sélectionnée pour détailler clairement les étendues cartographiques. La cartographie de base provisoire devrait être développée au début du projet, car le choix de l'échelle et de la mise en page influera sur la façon dont les caractéristiques et les étiquettes sont affichées sur la carte. Les caractéristiques présentées sur la carte de base devraient fournir un contexte pour informer les membres de l'équipe de projet ainsi que les membres du public qui n'ont peut-être pas les renseignements généraux nécessaires pour interpréter des cartes complexes. Les caractéristiques typiques présentées sur les cartes de base sont les suivantes :

- Les limites administratives
- Les moyens de transport tels que les routes et les voies ferrées
- Les infrastructures clés telles que les bâtiments gouvernementaux, éducatifs, communautaires ou de soins de santé
- Les emplacements des stations de surveillance hydrométéorologique
- D'autres points de repère susceptibles d'améliorer le contexte spatial des résultats

Les caractéristiques des cartes de base doivent être étiquetées avec un niveau de détail approprié à l'échelle des cartes. Les plans d'eau sur la carte doivent être étiquetés avec la direction d'écoulement dominante et une flèche vers le nord doit être fournie pour établir l'orientation de la carte.

2.3.2 Modèle numérique de terrain

Les modèles numériques de terrain (MNT) sont un élément clé pour l'hydraulique des crues et la cartographie des zones inondables. Les Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables (RNCAN, 2019) décrivent différents types et formats de MNT, des conseils sur leur utilisation, des renseignements sur les sources de données et la précision des MNT.

Les sources de données MNT comprennent la détection et la télémétrie par ondes lumineuses (lidar), les images stéréoscopiques ou les données interpolées de levés terrestres. La source de données standard est lidar, car elle est capable de fournir un MNT à haute résolution de l'élévation du sol (sol nu). Les images stéréoscopiques ne sont pas en mesure de fournir des élévations de sol nu dans la végétation et ne sont donc efficaces que dans les zones de végétation minimale (p. ex., dépôts de gravier dans des conditions de faible débit). L'interpolation des données de levé au sol nécessite des données de levé au sol à très haute résolution pour répondre aux normes MNT typiques (p. ex., résolution de 1 m), ce qui est généralement limité aux petites zones.

La précision du MNT dépendra de la source des données. Pour un MNT développé à partir de lidar, le Guide d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par lidar aéroporté (2022) stipule que la précision planimétrique du lidar doit être de 0,35 m et que l'exactitude altimétrique pour les surfaces non végétalisées et végétalisées doit être de 0,10 m et 0,30 m, respectivement.

Il est recommandé de collecter les paramètres MNT lorsque le niveau d'eau est bas, car les sources de données d'un MNT ne peuvent pas pénétrer l'eau. Dans des conditions de faible niveau d'eau, les élévations du MNT fourniront une meilleure définition de la transition du canal vers la zone de débordement. Le MNT peut même inclure la formation de bancs le long de la rive ou des îles dans le canal. Les informations du MNT peuvent s'étendre à la bathymétrie du canal au fur et à mesure de l'apparition de nouvelles technologies permettant de s'infiltrer sous la surface de l'eau.

Les contrôles de qualité des élévations MNT doivent être mesurés lors de la collecte des données sur le terrain. Le MNT doit inclure des lignes de rupture topographiques le long des rives et des structures de contrôle des inondations. Si un MNT d'aplanissement hydrologique est généré pour obtenir une surface plus uniforme à travers les plans d'eau, ce qui peut être préférable pour cartographier les étendues d'inondation, le MNT qui n'a pas d'aplanissement hydrologique de sol nu devrait également être obtenu, car il comprend des informations utiles supplémentaires.

2.3.3 Imagerie spatiale radar, spatiale optique et aérienne

Le Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables (RNCAN, 2019) fournit une analyse approfondie de l'importance de la photographie aérienne et de l'imagerie satellitaire pour les études sur les inondations. Celles-ci peuvent présenter une estimation des crues lors des inondations et des changements dans la forme du chenal au fil du temps. Des images montrant l'étendue de l'inondation peuvent aider à l'étalonnage des modèles hydrauliques. Les images peuvent

également servir à définir les caractéristiques de l'occupation du sol dans les berges afin de faciliter l'attribution de valeurs de rugosité des zones de débordement dans les modèles hydrauliques.

Dans le contexte spécifique des études de cartographie des zones inondables dans le nord, l'imagerie spatiale radar, optique et aérienne peuvent servir à suivre les rails de la progression de la débâcle des rivières. Ces images permettent d'observer l'emplacement des embâcles, qui se forment souvent à des emplacements similaires chaque année. Des images de la progression de la débâcle peuvent également être utilisées pour mieux comprendre les changements de niveau d'eau aux stations de jaugeage hydrométrique, ce qui ne serait pas possible sans l'imagerie des conditions. L'imagerie a également été utilisée dans le cadre de dispositifs de préparation aux inondations pour prédire le début de la débâcle et en suivre la progression. L'imagerie satellitaire est particulièrement efficace pour les grandes rivières des T.N.-O., car elle peut couvrir de très grandes zones sur une base régulière à un coût relativement minime. Obtenir la même couverture en utilisant la photographie aérienne n'est possible qu'à un coût important. L'imagerie spatiale radar peut traverser les nuages, ce qui permet la collecte de données pendant les périodes de couverture nuageuse.

2.3.4 Cartographie locale

L'information spatiale peut être fournie par les autorités locales ou dérivée de consultations avec les fournisseurs de données locaux. Il peut s'agir de cartographie pour le tourisme, les sentiers, les parcs, les entreprises locales ou d'autres intérêts particuliers. La cartographie locale peut fournir un étiquetage plus approprié sur les cartes, car les résidents de la région connaissent mieux les caractéristiques locales et les conventions d'appellation locales. Des points d'intérêt et des conventions d'appellation locales devraient également être adoptés pour faciliter les références croisées entre les cartes des inondations et les informations diffusées au public lors de la surveillance de routine et lors des urgences liées aux inondations.

2.3.5 Informations précédentes sur la cartographie des zones inondables

Les données cartographiques tirées d'études antérieures peuvent être un élément d'information important qui devrait être pris en compte et éventuellement inclus dans les cartes d'inondation mises à jour. Cela peut prendre la forme de limites de crue sur une carte qui montre la zone inondée par l'eau, ou l'élévation de l'eau pour un événement précis. Ces données peuvent parfois inclure les vitesses d'écoulement, la profondeur ainsi que d'autres paramètres de risque et des vulnérabilités.

2.4 Données recueillies sur le terrain

Les données de terrain font référence aux données recueillies sur place. Il s'agit notamment de données de levé pouvant servir à construire et à orienter le développement de modèles, ainsi que de données d'observation collectées lors d'un événement à fort débit. Bien que les ensembles de données les plus récents soient recommandés pour la modélisation et la cartographie des zones inondables, des hypothèses peuvent être appliquées lors de l'utilisation d'ensembles de données plus anciens pour obtenir la plus grande valeur à partir des informations disponibles.

2.4.1 Plan d'arpentage

Un plan d'arpentage identifie les emplacements proposés pour la collecte des données, y compris les sections transversales de levés, les structures hydrauliques, les digues, les marqueurs de contrôle publiés et les lignes des hautes eaux. Le plan de levé doit être pris en charge par un examen de la cartographie et des informations géospatiales disponibles (p. ex., imagerie aérienne, données MNE ou lidar) et les données d'arpentage antérieures avec des renseignements sur les marqueurs de contrôle ou les repères publiés. Les informations disponibles sur la ligne des hautes eaux et la marque des hautes glaces (p. ex., les cicatrices sur les arbres) doivent également être examinées. Un plan de sécurité est compris dans le plan d'arpentage. Il est conseillé de planifier une inspection du site avant le programme de collecte de données afin de rencontrer les représentants locaux et de visiter la zone d'étude. Les observations et les renseignements découverts pendant l'inspection du site aideront également à orienter la logistique, la communication et la sécurité du site pour le programme de collecte de données.

2.4.2 Contrôle d'arpentage

Un réseau local de contrôle d'arpentage, constitué d'une série de repères temporaires, semi-permanents ou permanents pour lesquels la position planimétrique et altimétrique est connue, est nécessaire lorsque le domaine d'étude est trop vaste pour effectuer un levé à partir d'un seul emplacement de station de base. Des repères temporaires ou semi-permanents sont généralement déterminés par une équipe d'arpentage avant un levé bathymétrique, à des emplacements accessibles situés à proximité du cours d'eau. Dans la mesure du possible, les nouveaux repères établis pour un levé bathymétrique doivent être rattachés à des repères gouvernementaux permanents situés à proximité de la zone d'étude. Les repères des RHC peuvent également être utilisés comme points de contrôle et leurs altitudes devraient faire l'objet d'un relevé pour établir un lien entre les relevés de niveaux d'eau et le système de référence des relevés du projet. Les données de levé recueillies pour l'étude de cartographie des zones inondables, y compris la bathymétrie des cours d'eau, la ligne des hautes eaux, les niveaux des embâcles (cicatrices des arbres) et la géométrie des structures, seront basées sur le réseau local de contrôle des levés.

Le contrôle d'arpentage devrait être établi selon un système de référence spatiale standard. Les Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables (RNCAN, 2019) fournissent des conseils sur le choix d'un système de référence spatiale approprié pour les projets de cartographie des zones inondables. Les données de référence spatiales normalisées de RNCAN actuellement utilisées sont présentées au

Tableau 2; toutefois, le système de référence altimétrique et planimétrique devrait être précisé dans les exigences du projet par le gouvernement territorial avant le début de l'arpentage sur le terrain. Lorsque le système de référence et le géoïde les plus récents définis par Ressources naturelles Canada ne sont pas utilisés, les raisons de l'adoption d'une solution de rechange devraient être fournies dans le rapport de projet.

Tableau 2. Exigences des normes de référence spatiale de RNCAN

Référence spatiale	Valeur
Système de référence planimétrique	NAD83 SCRS époque 2010
Système de référence altimétrique	CGVD2013
Modèle de géoïde	CGG2013
Projection cartographique	Projection de Mercator transversale (UTM)

Les repères utilisés comme points de contrôle doivent être bien ancrés dans le sol pour éviter le soulèvement et le déplacement dus au gel. Il convient de noter que les coordonnées de référence peuvent être révisées au fil du temps et que de tels ajustements doivent être soigneusement étudiés.

2.4.3 Géométrie des cours d'eau

La collecte de la géométrie des cours d'eau est généralement nécessaire pour élaborer des modèles hydrauliques afin de simuler les niveaux d'eau et de confirmer l'élévation des données géospatiales requises pour produire des cartes des zones inondables. Les sections transversales de cours d'eau sont l'entrée géométrique de base pour les modèles hydrauliques 1-D qui sont le type de modèle prédominant pour la modélisation des embâcles. Les sections transversales sont généralement construites à partir d'une combinaison de données d'arpentage et de données MNT lorsque disponibles. Les données d'arpentage se composent généralement de points de levé au sol sur les rives et dans les eaux peu profondes et de mesures sonar par bateau (bathymétrie) pour la partie immergée de la section transversale. Dans les cas où une série chronologique de sections transversales de rivière existe, le changement morphologique devrait être discuté et considéré.

L'emplacement des sections transversales devrait tenir compte des facteurs suivants pour s'assurer qu'elles sont adéquates pour simuler des conditions d'embâcle :

- Les sections transversales peuvent être espacées par rapport à la largeur typique du canal, mais il est important de saisir les caractéristiques représentatives du canal et de la zone inondable, les changements de pente, les changements de débit, les emplacements de la structure et les voies d'écoulement de surface potentielles. Brunner (2016) et Samuels (1989) fournissent d'autres conseils sur le choix d'un espacement approprié entre les sections transversales pour la modélisation hydraulique en eau libre.
- L'emplacement des profils en travers doit tenir compte de l'alignement dans la zone de débordement, en particulier aux confluences, afin de tenir compte de la cartographie des zones inondables.
- Les sections transversales devraient être examinées à l'emplacement des jauges hydrométriques dans le tronçon d'étude afin de faciliter la comparaison des niveaux d'eau mesurés et simulés.
- Les sections transversales devraient être arpentées au même endroit que toute section transversale historique afin de faciliter la comparaison de la forme des sections transversales au fil du temps. Lorsque des données de relevé transversales sont disponibles sur de nombreuses

années, elles peuvent être examinées pour trouver des indications de changements dans la morphologie des rivières.

- L'arpentage de sections transversales doit être mis à jour lors de l'actualisation des cartes des zones inondables afin de refléter les modifications de la géométrie du chenal. Les changements de géométrie sont les plus importants à la suite d'inondations majeures et les zones où les sédiments se déplacent de façon importante sont susceptibles de subir des changements dans la géométrie du canal.
- Le modèle d'embâcle peut exiger des sections transversales interpolées supplémentaires pour résoudre adéquatement le profil d'embâcle calculé (Beltaos et Tang, 2013; Flato et Gerard, 1986). Il est donc important de localiser les sections transversales manière à saisir les variations de largeur du canal; cela garantit que les largeurs des sections transversales interpolées par le modèle sont plus représentatives des conditions sur place et cela limite la nécessité de recourir à des procédures d'interpolation manuelles.

Les méthodes utilisées pour mesurer la position planimétrique et altimétrique des points sont celles du Système mondial de localisation à cinématique en temps réel (GPS RTK). Un GPS RTK est attaché à une tige d'arpentage pour mesurer les points au sol ou au-dessus d'un échosondeur mesurant la profondeur de l'eau pour les points de levé bathymétrique. La vérification des profondeurs sur le terrain devrait être entreprise pour tenir compte des erreurs potentielles de sondage en profondeur, y compris les effets des débits chargés de sédiments. Le GPS RTK est extrêmement efficace tant que le ciel est dégagé pour permettre le guidage des satellites durant l'arpentage. Dans les cas où le ciel est obstrué par une végétation épaisse, une station totale peut être nécessaire.

2.4.4 Lignes des hautes eaux et cicatrices de glace

Les lignes des hautes eaux sont des preuves physiques du niveau de l'eau, notamment des débris, des dépôts de sédiments, des taches et des dégâts causés par l'eau. Ces marques se trouvent en différents points de la zone inondable, y compris à l'intérieur des bâtiments. Les cicatrices de glace sont des marques laissées sur les arbres par l'enfoncement des radeaux de glace dans les arbres et présentent une indication fiable du niveau maximum de la glace lors de la débâcle (Gerard, 1981). Il faut prendre soin de déterminer si l'élévation des cicatrices représente le niveau d'eau maximal ou s'il s'agit d'un facteur d'empilement et de soulèvement de la glace, qui peut être considérablement plus élevé. L'altitude arpentée des lignes des hautes eaux et des cicatrices de glace peut être utilisée pour estimer le niveau de l'eau lors d'une inondation; cependant, il peut être difficile de déterminer au cours de quelle inondation la ligne des hautes eaux ou la cicatrice de glace s'est produite. Idéalement, les lignes des hautes eaux sont relevées peu de temps après l'inondation afin de réduire considérablement l'incertitude quant à leur cause.

Les cicatrices de glace, comparées aux lignes des hautes eaux, peuvent être visibles sur les arbres pendant des décennies, au cours desquelles plusieurs inondations importantes dues à des embâcles peuvent se produire. L'âge des cicatrices de glace peut être déterminé en prélevant des carottes, des coins et des coupes transversales des troncs cicatrisés, (Smith et Reynolds, 1983) ce qui nécessite un programme de terrain spécialisé. Cette méthode serait plus appropriée pour un site avec un minimum de documentation sur les embâcles de glace historiques et qui nécessite un historique chronologique. Sans datation appropriée, il est très difficile d'attribuer l'élévation des cicatrices de glace à des événements d'inondation spécifiques. Au contraire, elles représentent généralement une enveloppe

supérieure pour les niveaux de glace qui pourraient être attribués à la plus grande inondation jamais enregistrée.

2.4.5 Structures hydrauliques

La collecte de données sur les structures hydrauliques est nécessaire pour la modélisation hydraulique et la cartographie des zones inondables. Les ouvrages hydrauliques désignent les structures situées à l'intérieur du canal, telles que les ponts, les ponceaux et les structures de contrôle des inondations, qui régulent le passage de l'eau dans la zone de débordement du canal. Les structures de contrôle des inondations peuvent également être traversées par des ponceaux qui peuvent avoir une incidence sur l'étendue des inondations.

Des données définissant les ponts et les ponceaux sont requises pour la modélisation hydraulique afin de définir les niveaux d'inondation. Des données de levé peuvent être recueillies pour compléter les dessins d'après exécution des bâtiments et confirmer les changements éventuels intervenus dans les structures depuis leur construction. Les dimensions clés comprennent la définition de l'ouverture hydraulique et de la hauteur de débordement de la structure. Dans le cas d'un ponceau, ces données seront utilisées pour déterminer si le ponceau fonctionne sous contrôle d'entrée ou de sortie à des débits totaux. Dans le cas d'un pont, il s'agit de l'emplacement des culées et des piliers, de la forme et de la largeur des piliers, ainsi que de la membrure basse et haute du tablier du pont. Pour les ponceaux, les paramètres incluraient le radier et la voûte du ponceau aux deux extrémités (ce qui indique la pente), la forme du ponceau et la crête du remblai par lequel le ponceau passe. Ces dimensions clés doivent être collectées lors du relevé de la géométrie des rivières afin de s'assurer que le point de référence des dessins d'après exécution est le même que celui de l'arpentage. Les données d'arpentage peuvent également être utilisées à la place des dessins d'après exécution, mais le niveau d'effort est plus élevé pour parvenir à une définition équivalente de la structure hydraulique à l'aide de l'arpentage.

Les données définissant les structures de contrôle des inondations sont également nécessaires pour la modélisation hydraulique et la cartographie des zones inondables. En raison de l'importance de l'élévation des structures de contrôle des crues, il est recommandé que ces structures soient étudiées pendant la collecte de données sur le terrain. L'arpentage doit comprendre un profil le long de la crête de la structure de contrôle des crues ainsi que des sections transversales périodiques de la structure à intervalles réguliers. Tous les ponceaux ou exutoires d'eaux de ruissellement qui traversent la structure de contrôle des inondations doivent être identifiés et étudiés.

2.4.6 Notes de terrain, photographies et vidéos

Les notes de terrain, les photographies et les vidéos constituent des données d'observation qui peuvent inclure des informations sur l'état des glaces et l'étendue des inondations. Des photographies et des vidéos de l'état des glaces et des crues, des notes descriptives, des transcriptions de récits locaux pris avec des observateurs sur place peuvent tous servir à valider les cartes des zones inondables. Cela peut inclure des informations sur la séquence des inondations, les dommages dans les zones, le débordement des éléments linéaires, l'inondation des maisons et même la direction de l'écoulement de l'eau dans les zones complexes. Les données peuvent être recueillies au sol ou à bord d'un aéronef.

Ces données et informations correspondent généralement à un emplacement tel que fourni comme géolocalisation ou point de passage, un point topographique, une représentation sur une carte, des

photographies, des vidéos ou une description écrite dans le contexte d'un point de repère ou d'une caractéristique physique que l'on peut trouver sur le terrain.

Des conventions sont recommandées pour les métadonnées, la désignation et la classification des données et des types d'information. La terminologie conventionnelle pour les caractéristiques physiques de la glace de rivière est pertinente pour documenter l'information obtenue à partir des connaissances locales.

2.5 Savoir traditionnel et savoir autochtone

Les termes « savoir traditionnel » et « savoir autochtone » sont souvent utilisés de manière interchangeable; toutefois, leur signification diffère. Younging (2018) note que le terme « *savoir traditionnel* » diffère du terme « *savoir autochtone* » en ce sens qu'il n'inclut pas les savoirs autochtones contemporains et les savoirs élaborés à partir d'une combinaison de savoirs traditionnels et contemporains. L'Agence d'évaluation d'impact du Canada (2023) décrit le terme « *savoir autochtone* » comme un *ensemble de systèmes de connaissances complexes fondés sur la vision du monde des peuples autochtones*.

Il est important de reconnaître que les connaissances traditionnelles et autochtones sont détenues et contrôlées par les peuples autochtones. Les spécialistes doivent demander la permission de publier ces renseignements et veiller à ce que les protocoles autochtones soient respectés lors de la publication des savoirs traditionnels (et des savoirs autochtones).

Le Centre de gouvernance de l'information des Premières Nations (CGIPN) énonce les principes de propriété, de contrôle, d'accès et de possession (PCAP^{MD}) des données et de l'information des Premières Nations. Ces principes affirment que les Premières Nations ont le contrôle sur les processus de collecte de données et qu'elles possèdent et contrôlent la façon dont ces renseignements peuvent être utilisés (CGIPN, 2023).

3 EXAMEN ET ÉVALUATION DES DONNÉES

Les données collectées doivent être examinées et évaluées, et un résumé de cet examen et de cette évaluation doit être inclus dans le rapport sur la cartographie des zones inondables. La qualité des données est évaluée et les lacunes potentielles sont identifiées. L'évaluation détermine si les données disponibles appuient adéquatement la production de cartes de crues d'inondation, des aléas et des risques. Lorsque ces besoins ne sont pas satisfaits, des recommandations sont formulées pour la collecte de données supplémentaires afin de combler les lacunes ou d'autres méthodes qui reposent sur les données disponibles.

3.1 Plan d'assurance qualité

L'assurance et le contrôle de la qualité (AQ/CQ) définissent l'ensemble des activités permettant d'*assurer* la qualité du processus d'élaboration des paramètres et de *contrôler* la qualité des produits de données qui en résultent. Le processus d'AQ /CQ variera selon l'information disponible, l'échelle du projet, la nature des données et la source des données, entre autres facteurs. Il est donc recommandé d'élaborer un *plan d'assurance de la qualité* au début d'un projet. Un plan d'assurance qualité ne doit

pas nécessairement être exhaustif — il peut être bref. Néanmoins, un plan réussi établira des objectifs et des critères de qualité qui sont atteints grâce à l'application de méthodes, de processus, d'évaluations ou de mesures spécifiques. Une approche par étapes pour l'élaboration du plan est présentée ci-dessous.

1. Identifier les activités de collecte de données prévues pour l'étude.
2. Pour chaque activité, établir un objectif ou un critère de qualité.
3. Identifier la méthode d'élaboration des données pour répondre à l'objectif ou aux critères de qualité.
4. Identifier les essais et les mesures appliqués pour contrôler la qualité.

3.2 Études, rapports et comptes rendus

Ces données comprennent la documentation des inondations passées, des analyses locales et des documents de référence utiles pour la cartographie des zones inondables. Ces données fourniront un aperçu de l'historique des inondations, une compréhension du régime des glaces, ainsi que des informations sur les propriétés physiques des embâcles et des données d'étalonnage du modèle. L'un des principaux objectifs de la collecte de ces données consiste à confirmer que les embâcles constituent le principal mécanisme d'inondation, par opposition aux inondations en eau libre. De plus, la compréhension des processus d'inondation dominants est essentielle pour le développement, l'étalonnage et la validation des modèles.

Comme il n'est pas toujours stocké systématiquement et qu'il est souvent trouvé dans une gamme de sources dans des formats variés, ce type de données nécessite un certain effort de collecte et de catalogage. Les dossiers historiques sur les inondations peuvent être trouvés dans les bibliothèques et archives publiques, institutionnelles et gouvernementales. Les récits locaux peuvent varier au niveau des détails et en ce qui concerne la quantité d'informations pertinentes. Kriwoken (1983) a classé les sources d'information en fonction de la fiabilité des données dans l'ordre suivant (du plus fiable au moins fiable) : preuves physiques, photographies, documents historiques et souvenirs personnels. Lors de l'accès aux comptes médias, il faut prendre soin de tenir compte du niveau d'exactitude des données déclarées ainsi que des considérations relatives au droit d'auteur.

Les études de planification, les rapports de conception et les modèles peuvent être trouvés dans un éventail de sources, y compris diverses organisations gouvernementales, établissements de recherche ou industrie. Les études respectent généralement un format cohérent qui comprend une certaine forme de données de base, une méthodologie, des résultats et une conclusion ou des recommandations. Ces renseignements sont généralement examinés et peuvent même inclure des études de suivi réalisées sur des périodes plus longues.

Les documents de référence peuvent aider à fournir des définitions, un aperçu de divers processus ainsi que suggérer des méthodes d'analyse lorsqu'il existe des données limitées.

Pour toutes les données contenant des informations sur l'altitude, le système de référence altimétrique doit être examiné, en particulier lors de la comparaison des ensembles de données. Il peut être nécessaire d'effectuer ou d'appliquer des conversions de données afin que les informations soient cohérentes par rapport à une seule référence.

3.3 Données hydrométéorologiques

Les données hydrométéorologiques sont des données d'observation qui ont été recueillies, enregistrées et archivées de manière systématique. Les données collectées par les organisations gouvernementales font souvent l'objet de contrôles de qualité rigoureux et sont assorties d'attributs supplémentaires indiquant le statut, la qualité ou les conditions locales appliquées aux données. La qualité de tout type de données reçues doit toujours être examinée et recoupée avec d'autres données, le cas échéant. Souvent, les organismes responsables de la collecte et du partage des données peuvent être contactés pour fournir plus d'informations si nécessaire.

Puisque les données hydrométriques sont recueillies à des endroits précis, elles doivent être évaluées pour s'assurer que la station utilisée est représentative du tronçon d'étude et que la durée de la période des relevés à la station est respectée. Parfois, plusieurs stations près du tronçon d'étude doivent être prises en considération et plus d'une station est finalement utilisée pour l'analyse. Plusieurs stations peuvent être utiles pour étendre la durée de la période des relevés et remplir les données manquantes. De plus, elles peuvent aider à déterminer les valeurs aberrantes dans les données et à s'assurer que les événements représentatifs ont été saisis. Cela est décrit dans les Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables (RNCAN, 2019).

Pour toutes les données contenant des informations sur l'altitude, le système de référence altimétrique doit être clairement indiqué et toutes les conversions de données requises doivent être appliquées. Comme il a été mentionné précédemment, les élévations des données de référence peuvent être mises à jour ou modernisées au fil du temps, et ces ajustements doivent être soigneusement pris en compte lors de la comparaison des ensembles de données dans le temps.

3.4 Données géospatiales

Diverses formes de données géospatiales sont nécessaires pour produire des cartes des zones inondables. La qualité de tout type de données reçues doit toujours être examinée. Les données disponibles sont souvent accompagnées d'un rapport présentant les informations pertinentes relatives à la collecte des données. Il est également important de prendre en compte l'exactitude des données. Il est possible que les données spatiales aient une haute résolution et une faible précision. Cela peut être déterminé en effectuant une comparaison avec des données de levés qui sont basées sur un système de référence connu. Des ajustements d'élévation ou de reprojection peuvent être requis pour que toutes les données se réfèrent à un seul système de référence altimétrique et planimétrique privilégié.

Les données doivent également être évaluées pour s'assurer que la couverture s'étend sur l'ensemble du tronçon d'étude et inclut les zones de débordement. Lorsque la couverture n'inclut pas les zones de débordement, il est possible d'envisager l'utilisation de données à plus faible résolution dans les zones dépourvues de données. Les métadonnées disponibles confirmeront l'exactitude des données à faible résolution et informeront de tout ajustement ou nouvelle projection requis. Le Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables traite de la combinaison de données d'altitude provenant de sources multiples et recommande une résolution de 1 m de MNT pour les projets de cartographie des zones inondables (RNCAN, 2019).

Lors de l'élaboration des cartes de base, les caractéristiques présentées doivent fournir un contexte aux membres informés de l'équipe de projet ainsi qu'aux membres du public qui n'ont peut-être pas accès

aux renseignements généraux nécessaires pour interpréter des cartes complexes. Cela inclut les conventions d'appellation, le symbolisme et les langues qui peuvent être compris par tous les groupes qui utiliseront ces cartes. Les cartes de base doivent être conformes aux conventions cartographiques standard et aux spécifications des utilisateurs.

3.5 Données recueillies sur le terrain

Les données de terrain sont des données recueillies sur place. Les données propres à un événement à débit élevé sont recueillies pendant ou directement après l'événement, tandis que les données de géométrie qui décrivent le lit du canal sont souvent recueillies dans des conditions de faible débit exemptes de glace et de neige. Ces deux types de données sont très utiles pour la modélisation et la cartographie.

La qualité des données d'arpentage recueillies doit être examinée. Il convient de confirmer que les données ont été recueillies à des endroits représentatifs, qu'un nombre suffisant de points a été collecté pour définir la section transversale du canal, qu'un nombre suffisant de sections transversales ont été étudiées sur l'ensemble du tronçon et que les données s'étendent suffisamment en amont et en aval pour couvrir l'ensemble du tronçon étudié. De plus, des caractéristiques telles que les structures hydrauliques ou les travaux de correction d'un cours d'eau doivent être prises en compte. Les notes de terrain, les photos et les vidéos prises à cette étape peuvent être utilisées pour guider ce processus. Les informations de contrôle des levés doivent être prises en compte, et tout ajustement ou reprojection éventuels peut être requis pour que toutes les données se réfèrent à un seul système de référence altimétrique et planimétrique privilégié.

3.6 Évaluation des lacunes

Chaque projet est unique et les lacunes et les approches proposées pour combler ces lacunes varient. Les collectivités devraient se fier à leur jugement professionnel pour trouver des moyens de combler les lacunes. Lors de l'examen des lacunes potentielles dans les données collectées, il convient d'évaluer les aspects suivants :

- Pertinence des données recueillies pour l'hydrologie, l'hydraulique et la cartographie.
- Nécessité de poursuivre la collecte de données supplémentaires qui ont été déterminées au cours de l'examen des données (p. Ex., autres travaux publiés, travaux en cours, connaissances locales supplémentaires).
- Nécessité de collecter des renseignements additionnels en matière de surveillance, d'observation ou de levé.
- Élaborer une méthodologie permettant de s'appuyer sur des données limitées.

4 Hydrologie des inondations

4.1 Historique des inondations

L'historique des inondations résume les informations sur les inondations historiques trouvées lors de la collecte des données. Cela comprend un résumé des principaux événements, y compris des détails sur les éléments suivants.

- Séquence d'événements menant à l'évolution de l'épisode d'inondation due aux embâcles.
- Description du développement de l'embâcle, de son étendue, de l'emplacement du début et de la fin, de la valeur maximale de l'inondation et de la décrue de l'embâcle.
- Informations recueillies pendant l'événement, y compris les données d'arpentage et les observations au sol (par exemple, profils de niveau d'eau, photos et état des glaces documenté), et les observations aériennes par avion, hélicoptère ou drone (par exemple, étendue du tronçon de rivière et nature des états des glaces).
- Informations postérieures à l'événement, y compris des données d'arpentage (par exemple, profils de la ligne des hautes eaux, cicatrices de glace, murs de cisaillement), des paramètres de surveillance (par exemple, niveaux d'eau), des données traitées a posteriori (données satellitaires, imagerie aérienne, cartographie des glaces).

Les principales inondations devraient être résumées dans un tableau et comprendre des renseignements sur la date et la durée de l'événement, le débit estimé, l'élévation des eaux, l'étendue maximale de l'embâcle (emplacement de la tête, du pied et de la longueur) et l'état de la glace ou le type d'embâcle. Des documents ou des témoignages spécifiques à l'inondation historique peuvent être évoqués.

À partir de l'historique des inondations, il peut être possible de déduire les conditions dominantes d'embâcle de glace associées aux inondations importantes. L'historique documenté des inondations renseignera sur la gravité et l'étendue des inondations dues aux embâcles dans et autour des communautés, ce qui présentera une manière à l'étendue de la cartographie requise par une communauté particulière. Dans la mesure du possible, l'historique des inondations doit présenter une description qui prend en charge les éléments spécifiques ou les hypothèses utilisées pour l'hydrologie ou l'hydraulique de l'inondation due aux embâcles.

4.2 Régime de glaces

Le régime de glaces décrit le comportement caractéristique de la glace de rivière dans les conditions hydroclimatiques et morphologiques dominantes. Cela décrit les processus glaciaires propres au tronçon étudié au cours de la période couverte par les glaces, de la période de gel à la débâcle en passant par l'hiver. Une compréhension claire du régime de glaces simplifie l'hydrologie des crues. La description du régime de glaces doit aborder les aspects énumérés ci-dessous. Les Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables (RNCAN, 2019) doivent également être examinées lors de la préparation de cette description.

Conditions hydrométéorologiques : Les conditions climatiques et hydrauliques dominantes entraînent la formation, la croissance, la décroissance et la débâcle de la couche de glace. Il est important de caractériser les conditions météorologiques et d'écoulement des cours d'eau depuis la période de gel jusqu'à la débâcle. Lorsque la température de l'air descend au-dessous de zéro, l'eau se refroidit et la production de glace commence; peu après, une couche commence à se former. L'évolution de la couche de glace au cours de l'hiver et la débâcle qui s'ensuit au printemps dépendent des facteurs hydroclimatiques dominants, à savoir la température, le rayonnement solaire, les précipitations et l'écoulement total.

Morphologie des cours d'eau : La morphologie des cours d'eau influence le régime de glaces. Pour une condition hydroclimatique donnée, la nature de la glace peut varier en fonction de la largeur, de la pente, du plan, de la rugosité du lit et de l'état des berges. La relation entre le canal, la zone d'inondation et les parois de la vallée peut également avoir une incidence sur le régime de la glace de rivière.

Processus des glaces : Les processus glaciaires dominants et les mécanismes d'inondation qui en résultent dépendent des conditions hydroclimatiques et morphologiques qui varient au cours de la période touchée par la glace et peuvent différer le long du tronçon. Il est conseillé de décrire les processus glaciaires et les mécanismes d'inondation potentiels en fonction de la période de gel, de l'hiver et de la débâcle.

Facteurs de causalité : Les principaux facteurs de causalité des inondations importantes doivent être identifiés. Il peut s'agir d'une condition hydroclimatique précise ou d'une condition indiquant une combinaison de conditions hydroclimatiques. Des conditions spécifiques peuvent survenir en raison d'une augmentation du débit, d'une augmentation de la température, d'une vague d'inondation causée par un dégagement d'embâcle (onde de décrochement d'embâcles) ou d'une condition de glace qui précède la débâcle. Le moment d'exécution relatif de la débâcle entre le cours principal et les affluents peut indiquer une rupture thermique ou dynamique. Les conditions de la période de gel peuvent être indicatives de l'état qui précède la débâcle. Les déclencheurs de débâcle sont un type de facteur causal. Certains facteurs de causalité peuvent être utilisés pour éclairer les méthodes de fréquence des crues indirectes. Dans ces cas, les méthodes de détermination ou de déduction des facteurs de causalité doivent être décrites.

Caractéristiques de la glace : Les caractéristiques de la glace doivent être identifiées et documentées. Les caractéristiques comprennent des informations qui décrivent la composition de la couche de glace en fonction du type et de l'épaisseur de la glace. Les types de glace peuvent comprendre la glace de rive, la glace thermique, la glace de neige, la glace en forme de poêlon ou la bouillie de glace, le frasil, la glace de fond, etc. Il peut être approprié de décrire et de regrouper diverses caractéristiques de la glace selon le type d'accumulation de glace — par exemple, couche thermique simple, couche juxtaposée, couche épaissie hydrauliquement (embâcle étroit), couche consolidée (embâcle large) ou accumulation de frasil (obstruction d'un cours d'eau par le frasil).

Régularisation : Pour les cours d'eau régularisés, les effets de la régulation du débit total doivent être identifiés et documentés. La régularisation modifie les écoulements totaux et les températures de l'eau, ce qui modifie le régime naturel des glaces de rivière. Ces changements influent sur la fréquence d'exécution et l'ampleur des inondations dues aux embâcles. L'ordre et le calendrier des projets de régularisation devraient être décrits afin de mettre en contexte les données historiques.

À tout le moins, le régime de glaces documenté devrait identifier le mécanisme dominant ou le type d'accumulation de glace responsable des plus grandes conditions d'inondation touchées par les glaces. Par exemple, les embâcles de la période de gel, les embâcles d'hiver, les consolidations secondaires, les embâcles de débâcle, les obstructions d'un cours d'eau par le frasil, ou une combinaison de ceux-ci.

4.3 Préparation des données

L'objectif de la tâche de préparation des données est de développer un ensemble de données prêtes pour l'analyse de la fréquence des inondations. L'effort de préparation des données dépend des exigences en matière de données pour le type de carte des zones inondables (inondation, aléa ou risque) et de la disponibilité des données requises. Par exemple, les exigences en matière de données pour les méthodes directes d'analyse de la fréquence des niveaux d'inondation peuvent exiger beaucoup moins d'efforts que les méthodes indirectes.

Les activités de préparation des données peuvent comprendre les éléments suivants :

- Déduire manuellement des données à partir de séries de données « sur papier » ou de données de diagrammes.
- Extraire des données à partir de séries de données électroniques continues.
- Comblent les lacunes dans les données par régression directe (p. Ex., entre les valeurs moyennes et maximales).
- Comblent les lacunes dans les données ou étendent les levés par une analyse régionale.
- Comblent les lacunes dans les données ou étendent les levés par des données synthétisées.
- Synthétiser des levés de données complets.
- Associer les données à des conditions préalables et postérieures lorsque la réglementation est envisagée.

La phase de préparation des données permet de constituer une population de données adaptées aux méthodes utilisées pour estimer la fréquence des inondations. Il peut être nécessaire de combler les lacunes pour fournir un levé suffisamment long et représentatif aux fins d'analyse statistique. Les méthodes pour combler les lacunes dans les données suivent les conventions normales utilisées pour préparer les données pour la fréquence des inondations en eau libre. Pour les méthodes d'analyse directe de la fréquence des inondations, les données de niveau d'inondation sont normalement le paramètre d'intérêt. Pour les méthodes indirectes, la préparation des données sur le niveau des inondations et de débit est nécessaire. Lorsque la synthèse des données est requise, une partie de la préparation reposera sur la modélisation hydraulique. Par exemple, un modèle d'embâcle peut être utilisé pour estimer les données sur les niveaux d'inondation à partir d'une répartition connue des débits de débâcle dans des conditions d'embâcle idéalisées.

Les données sur les niveaux d'eau de crête recueillies à l'aide d'une jauge serviront généralement de base à l'analyse de la fréquence des inondations causées par les embâcles et, étant donné qu'une grande partie de cette information n'est généralement pas publiée, les données pourraient devoir être obtenues à partir de fichiers non publiés. L'extraction du niveau maximal de l'eau pour chaque année peut être effectuée par numérisation ou mise à l'échelle manuelle directement à partir des données du graphique.

Il convient d'être prudent lorsque l'on s'appuie sur des relevés publiés. Ceux-ci peuvent contenir des données incomplètes ou manquantes pour des événements majeurs — la glace peut régulièrement endommager l'installation de surveillance du niveau d'eau. Les valeurs de débit déclarées peuvent également être très inexactes. L'identification et le rapprochement des données manquantes et inexactes nécessitent un examen attentif du relevé hydrométrique publié et potentiellement des dossiers non publiés. Le processus peut être laborieux et nécessite une expertise spécialisée par un ingénieur ayant de l'expérience dans l'examen continu des relevés des niveaux d'eau touchés par la glace.

4.4 Fréquence du niveau des inondations

L'analyse de la fréquence du niveau des inondations causé par les embâcles est la principale composante de l'évaluation hydrologique des cartes des aléas d'inondation. Alors que le *débit* des inondations est le paramètre utilisé lors des inondations en eau libre, le *niveau* des inondations est le paramètre des inondations causées par des embâcles. Contrairement à ce qui se passe en eau libre, il n'est pas possible d'attribuer un niveau d'inondation unique à chaque débit de fréquence d'inondation. Dans le cas d'une inondation causée par un embâcle glaciaire, une gamme de niveaux de crue pourraient être associée à un seul débit, car l'ampleur du niveau de crue résultant d'un embâcle dépend de facteurs autres que le débit — par exemple : épaisseur de la glace, étendue de l'embâcle (tête de l'embâcle et pied de l'embâcle), épaisseur du pied de l'embâcle et rugosité sous la glace. Ainsi, pour analyser la fréquence des inondations causées par les embâcles, il convient d'utiliser le *niveau* d'inondation de l'embâcle. Bien que les approches soient légèrement différentes, les amplitudes de fréquence des crues qui en résultent sont considérées comme techniquement équivalentes.

Il existe essentiellement deux méthodes pour déterminer la fréquence du niveau des inondations : les *méthodes directes* qui dérivent directement la fréquence des niveaux d'inondation à partir d'une population de niveaux observés d'inondation touchés par la glace; et les *méthodes indirectes* qui déterminent la fréquence des niveaux d'inondation à partir d'une population de niveaux synthétisés d'inondation touchés par la glace. La première est une approche plus simple qui nécessite moins d'hypothèses que la seconde, qui repose sur un jugement expérimenté et une expertise spécialisée.

4.4.1 Méthodes directes

Une approche simple et intuitive consiste à examiner les données historiques chaque année afin d'identifier les niveaux d'eau maximums touchés par la glace, puis d'entreprendre une analyse de fréquence simple à l'aide de méthodes similaires à celles utilisées pour l'analyse de la fréquence des inondations en eaux libres. Cette approche ne tient pas compte des facteurs de causalité qui contribuent à l'atteinte de niveaux d'eau maximums, ce qui peut être important, en particulier s'il est nécessaire d'extrapoler à des valeurs au-delà de la plage des valeurs observées. Les distributions statistiques standard qui s'appliquent le plus souvent aux eaux libres ne s'appliquent pas toujours aux distributions de la fréquence des crues causées par les embâcles, en particulier pour les crues de très grande ampleur. Un aspect clé est que l'influence incrémentielle des effets de la glace sur les niveaux d'eau lors de très grandes inondations tend à diminuer. Il existe deux principaux facteurs d'influence : (1) il y a une limite pratique à l'approvisionnement en glace qui peut contribuer à un embâcle et (2) à un moment donné, la plupart des débits des cours d'eau ne sont plus contenus dans les limites de l'embâcle — l'acheminement de l'eau et de la glace dans la zone inondable devient appréciable. Les

courbes de fréquence des inondations causées par des embâcles ont tendance à avoir une forme en S en raison des effets progressifs changeants des conditions de glace sur les niveaux d'eau dans toute la gamme des niveaux d'inondation.

Si les valeurs de fréquence d'exécution souhaitées se situent dans la plage des valeurs observées sans qu'il soit nécessaire de procéder à une extrapolation, il y a lieu d'accepter cette approche plus simple. Si une extrapolation au-delà des données est nécessaire pour estimer les intervalles de récurrence souhaités, une autre approche par des méthodes indirectes mérite d'être envisagée.

4.4.2 Méthodes indirectes

Une autre approche consiste à utiliser une méthode indirecte. Il existe plusieurs méthodes d'analyse indirecte des fréquences et le lecteur est renvoyé à une publication récente de Beltaos (2021) qui présente une vue d'ensemble des méthodes directes et indirectes d'estimation des fréquences d'embâcles.

Une méthode indirecte courante consiste à utiliser des méthodes statistiques pour quantifier les facteurs causaux qui contribuent aux caractéristiques d'un ensemble de données plutôt que d'événements individuels. Cette approche s'apparente à la méthode G-C décrite par Beltaos (2021) qui a été introduite par Gerard et Calkins (1984). Une telle approche est intéressante, car elle tient compte des facteurs physiques qui influencent les niveaux d'eau touchés par les glaces. Les données des événements individuels ne sont pas traitées explicitement, mais sont plutôt regroupées et utilisées pour représenter les distributions statistiques des variables indépendantes (distributions d'entrée) qui sont ensuite transformées en distributions statistiques des variables dépendantes (distributions de sortie). La méthode repose sur des relations niveau-élévation (courbes de tarage) pour différents états des glaces.

5 Hydraulique des crues

5.1 Préparation des données

Les données de terrain doivent être préparées après leur examen afin d'être utilisées pour l'analyse de l'hydraulique des crues. L'ensemble de données de levé utilisé pour produire un modèle hydraulique ne devrait inclure que les points d'élévation du sol pour les sections transversales du modèle. Les points d'arpentage des niveaux d'eau, les lignes des hautes eaux, les cicatrices de glace et les structures hydrauliques doivent être retirés de l'ensemble de données pour utilisation ultérieure. Les données d'arpentage doivent être importées dans l'espace de travail du modèle avec les champs de données critiques tels que la date, l'heure et le code d'arpentage. Le fait de disposer de ces données dans l'espace de travail du modèle facilitera l'interprétation.

Un filtrage supplémentaire des points d'arpentage doit être envisagé selon que des portions de chaque section transversale au-dessus du niveau d'eau étudié seront définies à l'aide des données de levé ou du MNT. Il est préférable d'utiliser les données du MNT pour définir les sections transversales dans la mesure du possible, car la fréquence d'échantillonnage des données est plus élevée pour le MNT que pour les données d'enquête (en supposant que le MNT est suffisamment précis) et fournit une meilleure résolution de la transition du canal et de la zone de débordement de la rivière. La mesure dans laquelle le MNT peut être utilisé pourrait être limitée par le niveau d'eau au moment de la collecte du MNT.

Les données relevées sur le niveau d'eau ainsi que les points les plus élevés en eau libre doivent être compilés aux fins d'étalonnage du modèle. Bien que les embâcles soient la principale cause d'inondation dans la plupart des communautés des T.N.-O., l'étalonnage des eaux libres est toujours requis avant de pouvoir procéder à l'étalonnage des embâcles. Le débit correspondant aux différentes conditions sur le niveau d'eau (par exemple, le niveau d'eau d'arpentage) doit être extrait des levés hydrométriques ou des mesures sur le terrain. Le débit sera utilisé comme condition limite en amont (débit entrant) pour le modèle hydraulique. La condition limite en aval (débit sortant) sera définie par le niveau d'eau relevé à la limite de sortie du modèle.

5.2 Construction et étalonnage du modèle d'embâcle

Les données de base requises par le modèle de glace sont à peu près les mêmes que celles requises par un modèle d'eau libre (c.-à-d. Des sections transversales de rivière le long de longueurs connues de canal, des coefficients de rugosité pour le canal et les zones de débordement à chaque section transversale, un niveau d'eau spécifié ou calculé à la limite du modèle en aval et un débit à toutes les limites du modèle en amont). En plus de ces données de base, le modèle de glace exige à chaque section transversale du modèle : une condition prescrite de couverture de glace; une rugosité sous la glace; et un ensemble de paramètres d'embâcle caractérisant les propriétés de l'embâcle. Ces entrées du modèle de glace servent à résoudre la relation entre l'hydraulique sous la glace et la stabilité de l'embâcle.

Divers modèles avec des capacités similaires sont disponibles pour calculer les niveaux d'inondation des embâcles (Carson, et. Coll., 2011). Toutefois, le modèle le plus courant et le plus souvent utilisé pour la cartographie des zones inondables en eaux libres et par embâcles est le programme informatique Hydrologic Engineering Center River Analysis System (HEC-RAS) du Corps d'ingénierie de l'armée américaine (US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Centre, 2016). Les descriptions suivantes pour le développement de modèles sont écrites dans le contexte de ce modèle.

Idéalement, le modèle des glaces devrait être calibré en fonction des niveaux d'inondation mesurés des embâcles de glace d'une ampleur comparable à celle des événements de conception souhaités (inondations dues aux embâcles de 50 ans, de 100 ans et de 200 ans, par exemple).

Les améliorations suivantes s'ajoutent à un modèle typique en eau libre.

- Ajustements de l'emplacement des stations bancaires pour une meilleure représentation de la « largeur » de l'embâcle, qui est utilisée par le modèle pour résoudre l'équation de stabilité de l'embâcle.
- Sections transversales supplémentaires pour une meilleure stabilité des calculs de l'épaisseur de l'embâcle HEC-RAS et une résolution adéquate du profil d'épaisseur de la glace. L'expérience de modélisation des embâcles par l'auteur et d'autres chercheurs (Beltaos et Tang, 2013) suggère que l'algorithme de solution d'embâcle peut nécessiter des sections transversales supplémentaires pour résoudre adéquatement le profil d'épaisseur de l'embâcle calculé. De plus, le rendement du modèle s'améliore lorsque l'espacement des sections transversales est régulier et que tout changement est progressif. Des sections interpolées supplémentaires pour la modélisation des embâcles devraient fournir une représentation précise de la variation de la largeur du canal.

- Définir les paramètres de stabilité de l'embâcle requis en tant qu'entrée dans le modèle HEC RAS pour résoudre le profil d'épaisseur de l'embâcle, y compris : l'angle de frottement interne de l'embâcle ϕ ; la porosité de l'embâcle (fraction des vides entre les radeaux de glace), p ; et le coefficient de contrainte latérale par rapport à la contrainte longitudinale dans l'embâcle, k_1 . Tous les autres paramètres sont résolus en interne par le modèle. Les niveaux d'eau calculés ne sont pas particulièrement sensibles aux changements de ces valeurs lorsque ceux-ci restent dans la plage acceptable des valeurs citées dans la littérature.
- Étalonner le modèle en fonction des niveaux des hautes eaux et de glace enregistrés en ajustant la rugosité de l'embâcle.

Lorsque les données d'étalonnage ne sont pas disponibles ou sont insuffisantes, il peut être approprié de supposer que les caractéristiques de l'embâcle au site d'étude sont comparables à celles qui se forment à d'autres endroits le long du tronçon. Cela permet d'estimer une valeur typique de rugosité d'un embâcle sur la base d'observations faites sur d'autres tronçons de rivière similaires. L'étalonnage peut être affiné en comparant les valeurs calculées aux courbes de tarage d'embâcle déterminées à l'aide d'une jauge.

5.3 Modélisation du profil des inondations

Dans la plupart des cas, les niveaux de fréquence des inondations sont estimés à un seul emplacement du tronçon étudié (un site de jaugeage de cours d'eau, par exemple). Le profil d'inondation est ensuite étendu à partir de l'emplacement unique sur l'ensemble du tronçon d'étude à l'aide du modèle de glace. Le profil de l'inondation correspond généralement à celui calculé dans l'hypothèse d'un embâcle dans un canal large. Une autre hypothèse est que le profil d'embâcle calculé se développe complètement à un état d'équilibre tout au long du tronçon d'étude. Le raisonnement est le suivant : alors qu'un embâcle entièrement développé s'étendant sur l'ensemble du tronçon d'étude n'est peut-être pas si probable, obtenir une élévation du niveau des inondations d'équilibre pour un niveau de récurrence donné est tout aussi probable tout au long du tronçon d'étude.

6 Cartographie des zones inondables

6.1 Préparation de la carte de base

Des cartes de base doivent être créées aux fins d'exécution des contrôles par l'équipe et les partenaires du projet. Des cartes de base efficaces communiquent le contexte spatial des inondations par rapport aux éléments clés du tronçon d'étude. L'échelle de cartographie primaire doit être sélectionnée pour communiquer efficacement les informations de cartographie des zones inondables. Les cartes de base consisteront en une série de cartes couvrant le tronçon d'étude. L'orientation des cartes peut soit suivre l'alignement du plan d'eau, soit être alignée avec les directions cardinales (par exemple, nord-haut). Bien que moins de cartes soient nécessaires lorsqu'elles sont orientées le long du tronçon d'étude, il faut tenir compte de leur facilité d'interprétation — les cartes alignées sur les points cardinaux sont généralement plus lisibles, en particulier dans un environnement urbain.

L'arrière-plan des cartes de base est généralement une photographie aérienne récente qui montre le niveau actuel de développement potentiellement touché par la cartographie des zones inondables. Des modifications de la couleur et de l'opacité peuvent être nécessaires pour afficher efficacement les

caractéristiques et les étiquettes sur la carte. Les cartes devraient comprendre les limites administratives, les caractéristiques de transport telles que les grandes routes ou les chemins de fer, les infrastructures clés telles que les bâtiments gouvernementaux ou de soins de santé, ou les points de repère clés qui fournissent un contexte spatial aux utilisateurs locaux des cartes des zones inondables.

Les cartes de base doivent être conformes aux conventions cartographiques standard et aux spécifications des utilisateurs. Le Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables présente une symbolique de base standard pour les différents types de cartes des zones inondables. Les différentes compétences peuvent exiger des modifications de la symbolique proposée.

6.2 Analyse

6.2.1 Étendue des inondations

Les étendues d'inondation pour un scénario d'inondation donné sont présentées sur les cartes de base afin de montrer les zones inondées. Élaborer des cartes des zones inondables implique de transférer les niveaux d'eau simulés à partir des sections transversales du modèle sur le MNT afin de déterminer l'étendue de l'inondation. Un réseau triangulé irrégulier (TIN) doit être développé entre les sections transversales du modèle pour permettre l'interpolation de l'eau entre celles-ci. Le TIN doit tenir compte de l'alignement du canal et de l'étendue au-delà de l'étendue maximale des inondations.

Les étendues d'inondation sont déterminées en comparant les élévations de la surface de l'eau du TIN aux élévations du MNT. Pour ce faire, le TIN est converti en une grille d'élévation de la surface de l'eau avec la même résolution que le MNT. La différence entre les deux surfaces est déterminée pour générer une grille de profondeur.

6.3 Cartothèque

6.3.1 Cartes de crues d'inondation

Les cartes de crues d'inondation montrent l'étendue des inondations passées ou potentielles, qui sont généralement définies par la probabilité de dépassement annuelle. Les niveaux d'eau pour les inondations potentielles sont généralement déterminés à l'aide d'un modèle hydraulique 1D. En raison des limites des modèles hydrauliques 1D, certaines zones de l'inondation peuvent nécessiter une attention particulière. Il s'agit notamment de zones de remous où le débit déborde les berges à des emplacements discrets, de la défaillance de structures de lutte contre les inondations potentielles et de zones isolées qui n'ont pas de liaison directe avec le canal principal sur le plan hydraulique ou de l'écoulement de surface. Un traitement séparé de ces zones par un modèle 2D ou la combinaison d'un modèle 2D avec le modèle 1D (modèle couplé 1D/2D) peut être envisagé pour ces zones.

6.3.2 Cartes des aléas

Les cartes des aléas de l'inondation définissent les aléas d'inondation pour les zones inondées pendant la crue nominale. La zone inondable est généralement divisée en deux parties : la zone inondable principale et la zone inondable secondaire. La zone inondable principale transporte la plus grande partie du débit lors de la crue nominale. En eaux libres, il s'agit de la zone où l'écoulement est le plus profond,

le plus rapide et le plus destructeur. Pour l'état des glaces, cela inclut également les zones exposées à la glace en mouvement — il est difficile d'imaginer une situation dans laquelle la glace en mouvement ne serait pas considérée comme dangereuse et destructrice. À des fins pratiques, la zone inondable principale peut être définie par des zones où la profondeur dépasse 1 m ou par des zones où la glace se déplace. Les critères basés sur les vitesses d'écoulement s'appliqueraient rarement ou ne seraient pas pratiques, car les vitesses élevées seraient presque toujours associées à des profondeurs supérieures à 1 m ou à une condition de glace en mouvement.

La zone inondable secondaire représente les zones de la zone inondable situées en dehors de la zone inondable principale. Dans des conditions de glace, la zone inondable secondaire peut ou non être occupée par la glace. Cela dépendra si l'épaisseur de la glace dépasse la profondeur de l'eau dans des zones spécifiques de la zone inondable secondaire.

6.3.3 Cartes des risques

Les cartes des risques d'inondation indiquent la vulnérabilité et l'exposition aux inondations en comparant l'étendue des inondations aux données spatiales des composantes sociales, économiques et environnementales. Les niveaux de risque tiennent compte du coût économique potentiel et de la perte potentielle de vies humaines. Les niveaux de risque varient de faible à élevé et tiennent généralement compte séparément des terres développées et non développées. Dans des conditions de glace, le risque d'impact dû à la glace causera différents types de dommages en plus des inondations qui se produisent lors des inondations en eaux libres et doit être pris en compte lors de l'attribution du niveau de risque.

7 Prise en compte des changements climatiques

Cette section fournit des conseils pratiques sur les méthodes de prise en compte des changements climatiques applicables à la cartographie des zones inondables causées par des embâcles. Le contexte est fourni au sujet des renseignements sur les changements climatiques pertinents aux processus d'embâcle, puis une approche suggérée est fournie pour évaluer les répercussions potentielles des changements climatiques sur la gravité des inondations causées par les embâcles. L'approche proposée s'intègre dans le flux de travail utilisé pour élaborer la cartographie des zones inondables causées par des embâcles, décrite dans le présent document.

L'objectif de ce guide d'orientation est d'offrir une stratégie permettant de créer une évaluation significative des changements climatiques qui nécessite des renseignements avec un niveau de détail et des analyses qui sont proportionnels à ceux utilisés pour élaborer la cartographie des zones inondables causées par des embâcles glaciaires.

7.1 Compréhension actuelle

Bien qu'il y ait eu un nombre considérable de recherches sur la glace de rivière et les changements climatiques au cours des dernières décennies, en pratique, l'évaluation et la quantification des répercussions des changements climatiques sur la cartographie des zones inondables causées par des embâcles sont limitées.

La compréhension actuelle des répercussions des changements climatiques sur les inondations causées par les glaces est fondée sur notre compréhension de la façon dont les changements des variables climatiques pourraient avoir une incidence sur divers processus des glaces. La compréhension des changements potentiels dans les processus des glaces de rivière fournit une justification pour prédire les effets des changements climatiques sur le régime des glaces de rivière. Le travail des enquêteurs précédents offre des conseils pratiques au spécialiste sur une étude de cas particulière. Vous trouverez ci-dessous une liste d'ouvrages pertinents qui vous permettront de commencer à rechercher des informations sur les effets du climat dans les processus de formation de la glace de rivière. Au moment d'écrire ces lignes, plus de 1 000 citations ont été trouvées pour ces publications.

Beltaos, S. Et Prowse, T. D., 2001. Climate impacts on extreme ice-jam events in Canadian rivers. *Hydrological Sciences Journal*, 46(1), p. 157 à 181.

Beltaos, S. Et Burrell, C.-B., 2003. Climate change and river ice breakup, *Revue canadienne de génie civil*, 30 (1), p. 145 à 155.

Burrell, B.C., Beltaos, S. Et Turcotte, B., 2022. Effects of climate change on river-ice processes and ice jams. *International Journal of River Basin Management*, p. 1 à 21.

Chen, Y. Et She, Y., 2020. Long-term variations of river ice breakup timing across Canada and its response to climate change. *Cold Regions Science and Technology*, 176, p. 103091

Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). 2016. Données et scénarios climatiques pour le Canada : Synthèse des observations et des résultats récents de modélisation. *Environnement et Changement climatique Canada, Gatineau (Qc), Canada*

Newton, B. W., Prowse, T. D. Et de Rham, L.P., 2017. Hydro-climatic drivers of mid-winter break up of river ice in western Canada and Alaska. *Hydrology Research*, 48(4), p. 945 à 956.

Prowse, T. D. Et Beltaos, S., 2002. Climatic control of river-ice hydrology : a review. *Hydrological processes*, 16(4), p. 805 à 822.

Prowse, T. D., Bonsal, B. R., Duguay, C.R. et Lacroix, M.P., 2007. River-ice break up/Freeze up : a review of climatic drivers, historical trends and future predictions. *Annals of Glaciology*, 46, p. 443 à 451.

Prowse, T.D., Furgal, C., Wrona, F.J. et Reist, J.D., 2009. Implications of climate change for northern Canada : freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *AMBIO : A Journal of the Human Environment*, 38(5), p. 282 à 289.

Turcotte, B., Burrell, B.C., Beltaos, S. Et She, Y., 2019, mai. The impact of climate change on breakup ice jams in Canada : State of knowledge and research approaches. Dans *Proceedings of the 20th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Ottawa, Canada*.

Turcotte, B., Morse, B. Et Pelchat, G., 2020. Impact of climate change on the frequency of dynamic breakup events and on the risk of ice-jam floods in Quebec, Canada. *Water*, 12(10), p. 2891.

7.2 Renseignements sur les changements climatiques

Les évaluations des changements climatiques s'appuient souvent sur les modèles climatiques mondiaux et les modèles de circulation générale (appelés collectivement ici MCG) comme principale source d'information et de données sur les changements climatiques. Des dizaines de MCG sont disponibles

pour simuler des processus physiques couplés entre l’atmosphère, l’océan, la cryosphère et la surface terrestre. Les modèles reposent sur des hypothèses différentes et utilisent des modèles analytiques et numériques différents pour prédire ces processus physiques. Les scientifiques et les spécialistes tentent souvent de tenir compte de l’incertitude associée au choix du *meilleur* modèle en s’appuyant sur un ensemble de modèles climatiques différents pour prédire les variables climatiques futures.

Les valeurs des paramètres prédites par les MCG peuvent ne pas être fournies à la même résolution que les données requises pour l’analyse. Ainsi, les variables prédites dérivées des MCG peuvent nécessiter une réduction d’échelle pour une résolution plus fine dans le temps et l’espace; ceci est généralement réalisé soit par des modèles climatiques régionaux, soit par une réduction d’échelle statistique. Les modèles climatiques régionaux simulent les processus climatiques dans un domaine régional et s’appuient sur les paramètres du MCG aux limites latérales.

La modélisation du climat ou le développement de modèles régionaux n’est pas prévu dans le cadre de ces guides d’orientation. Cependant, l’évaluation des impacts potentiels de la prévision des variables climatiques sur les processus glaciaires peut s’avérer appropriée. La température est la principale variable climatique prédite par ces modèles qui est d’intérêt pour évaluer les impacts des changements climatiques sur les processus de glace de rivière. D’autres paramètres tels que les précipitations, le rayonnement et l’équivalent en eau de la neige ont également été utilisés.

Le Tableau 3 fournit une liste d’exemples d’études de cas pertinentes évaluant les impacts des changements climatiques sur les processus de glace de rivière. Une grande partie des travaux de ces études est considérée comme de la recherche et le niveau d’analyse peut dépasser la portée appropriée pour la cartographie des zones inondables dues aux embâcles. Ces études fournissent toutefois un aperçu pratique des types de données climatiques (MCG et paramètres climatiques) sur lesquels les chercheurs se fondent pour évaluer les changements climatiques et des directives sur la façon dont les changements dans une variable climatique peuvent influencer sur les divers processus des glaces. Ces informations permettent au spécialiste d’évaluer la manière dont les changements des paramètres climatiques influent sur le régime des glaces du cours d’eau étudié.

Tableau 3. Exemples d'études de cas utilisant des modèles climatiques pour analyser les impacts sur les processus de glace de rivière

Références		
	Modèles et variables climatiques	Analyse
Climatic effects on ice-jam flooding of the Peace-Athabasca Delta. (Beltaos et coll., 2006)	CGCM[1]2 température de l'air, précipitations	Relations analytiques et empiriques
Transferability of a neuro-fuzzy river ice jam flood forecasting model. (Mahabir et coll., 2007)	CGCM température de l'air, précipitations, EEN	Modélisation neurofloue
River-ice break-up/freeze-up : a review of climatic drivers, historical trends and future predictions. (Prowse et coll., 2007)	7MCG température de l'air	Relations analytiques avec analyse des tendances
Simulating the effects of climate change on the ice regime of the Peace River. (Andrishak et Hicks, 2008)	CGCM2 température de l'air	Modélisation hydraulique et de processus de RIVER 1D
Changing spring air-temperature gradients along large northern rivers: Implications for severity of river-ice floods. (Prowse et coll., 2010)	CCSM3[6], CGCM3.1, ECHAM5 et hadgem1 température de l'air	Relations analytiques
Impact of Climate Change on the Frequency of Dynamic Breakup Events and on the Risk of Ice-Jam Floods in Quebec, Canada. (Turcotte et coll., 2020)	9 MCG température de l'air	Modèle HYDROTEL

7.3 Approche de l'évaluation

L'approche de l'évaluation suppose la décision d'intégrer les considérations relatives aux changements climatiques dans le projet de cartographie des zones inondables. Elle présente ensuite des indications sur les points où les considérations relatives aux changements climatiques peuvent entrer dans le flux de travail d'un projet type de cartographie des zones inondables causées par des embâcles. L'inclusion de considérations relatives aux changements climatiques tout au long du projet fournit une évaluation plus réfléchie et assure un processus plus efficace, car la méthodologie pour l'hydrologie et l'hydraulique des inondations influencera les méthodes d'évaluation des changements climatiques.

L'approche de l'évaluation des impacts du changement climatique sur la cartographie des zones inondables causées par des embâcles diffère quelque peu des *considérations sur les changements climatiques* proposées dans les lignes directrices du Guide d'orientation fédéral sur la cartographie des eaux libres. Par exemple, ces guides d'orientation sur la cartographie des zones inondables causées par les embâcles ne suggèrent pas d'utiliser une approche de « revanche » comme type d'évaluation. Cela s'explique par le fait que les modifications apportées aux effets de causalité des différents processus sur les niveaux des inondations sont plus complexes pour les scénarios d'inondation causés par des embâcles que pour les scénarios d'inondation causés par des eaux libres. De plus, l'application d'une « revanche » au niveau des inondations suppose que la gravité des niveaux d'inondations causées par des embâcles de glace ne peut qu'augmenter sous un climat changeant.

Tableau 4. Processus d'évaluation des changements climatiques

Examen et évaluation de la collecte des données	
<ul style="list-style-type: none"> • Examiner les études et les rapports disponibles propres à la recherche sur les changements climatiques. Élargir la recherche pour inclure les grands bassins et les régions pour les études et la recherche sur les changements climatiques. • Rechercher des témoignages locaux ainsi que des savoirs traditionnels et autochtones sur les tendances climatiques et comprendre l'impact de ces tendances sur la gravité des embâcles. • Évaluer les avantages potentiels de collecter un plus grand nombre de nouveaux ensembles de données sur le terrain, comme les données sur les cicatrices sur les arbres ou l'échantillonnage de la sédimentation. • Examiner les informations portées à la connaissance de la population pour y déceler des tendances historiques dans la gravité des inondations causées par les embâcles. 	
Hydrologie des inondations	
Régime de glaces	Fréquence du niveau des inondations
<ul style="list-style-type: none"> • Sur la base de la compréhension du régime de glaces existant, identifier les processus dominants qui sont susceptibles de varier dans un climat changeant. • Identifier les paramètres climatiques clés qui peuvent être utilisés pour informer sur les changements climatiques potentiels. • Déterminer les scénarios de changements climatiques (y compris les MCG applicables, le cas échéant). • Évaluer les impacts des changements climatiques sur le régime de glaces. 	<p>Méthode directe</p> <ul style="list-style-type: none"> • Évaluation directe des données historiques pour déterminer les tendances. • Peut déduire des tendances à partir de données régionales. <p>Méthode indirecte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Évaluer les populations synthétiques adaptées au scénario de changement climatique adopté. <p>Quantification des impacts</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifier les tendances et estimer l'ampleur du changement de la fréquence des inondations causées par des embâcles.
Cartographie des zones inondables	
<p>Scénario de cartographie des zones inondables liées aux changements climatiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lorsqu'il est possible de simuler un scénario de crue nominale lié aux changements climatiques, indiquer le scénario de zones inondables dues aux embâcles liées aux changements climatiques sur une carte des zones d'inondation. Selon les besoins d'une étude particulière, cela peut inclure une carte existante ou faire l'objet d'une carte distincte. 	
Résumé de l'évaluation des changements climatiques	
<ul style="list-style-type: none"> • Fournir un résumé de l'approche d'évaluation des changements climatiques. • Discuter des changements possibles dans le régime d'embâcle. • Fournir une déclaration sur l'effet que les changements climatiques ont sur la gravité des inondations causées par les embâcles. • Identifier le niveau d'incertitude. • Identifier les besoins en matière de renseignements additionnels et d'analyse pour améliorer l'analyse. • Indiquer les hypothèses et les limites. 	

Les méthodes permettant d'évaluer les impacts des changements climatiques sur la cartographie des zones inondables causées par des embâcles commencent par une compréhension du régime de glace de

rivière et par l'identification des processus dominants qui peuvent être caractérisés par des variables climatiques futures. Ensuite, l'influence des futures variables climatiques sur les processus dominants est évaluée. L'influence combinée des différents processus est ensuite évaluée.

Pour la plupart des études, une évaluation qualitative sera possible et viable. Dans certains cas, il n'est pas possible de prévoir un changement quantifiable de la gravité des inondations. Dans certains cas, cela peut être faisable, mais pas viable, car les coûts de l'analyse seraient prohibitifs, ou les répercussions prévues sont faibles ou tendent vers des inondations moins graves.

7.4 Résumé des répercussions des changements climatiques sur les inondations causées par les embâcles de glace de rivière

L'évaluation des changements climatiques doit se terminer par un résumé de la méthodologie et des renseignements recueillis à l'appui de l'analyse. Le résumé devrait identifier les effets des changements prévus dans les variables climatiques sur les processus de glace de rivière ayant une incidence sur les mécanismes d'inondation dominants. Sur la base des résultats, une déclaration concernant l'effet des changements climatiques sur la gravité des embâcles est fournie avec un certain degré d'incertitude. Dans la mesure du possible, les répercussions sur la gravité des embâcles devraient être exprimées en matière de fréquence et d'ampleur des inondations. Indiquer les hypothèses et les limites.

8 Ressources supplémentaires

Les renseignements suivants sont des textes fondamentaux qui offrent une mine d'informations sur la glace de rivière et présentent des pistes pour d'autres sujets pertinents à la cartographie des zones inondables causées par des embâcles glaciaires. Des aspects fondamentaux sur les caractéristiques des embâcles glaciaires peuvent être trouvés dans ces références.

Ashton, G., 1986. River Lake Ice Engineering. Water Resources Publications, LLC. 480 pages

Beltaos, S., 1995. River Ice Jams. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado. 390 pages

Beltaos, S., 2008. River Ice Breakup. Water Resources Publications, LLC. 480 pages

Beltaos, S., 2013. River Ice Formation. Publié par le CPGRE. 552 pages

Beltaos, S. Et Tang, P. (2013). Applying HEC RAS to simulate river ice jams : snags and practical hints. Edmonton, AB. Actes du 17^e atelier sur la glace de rivière, Comité sur les processus de glace de rivière et l'environnement, Edmonton (Alberta), juillet 2013.

Flato, G., et Gerard R. (1986). Calculation of Ice Jam Thickness Profiles. Actes du 4^e atelier sur la glace de rivière, Comité sur les processus de glace de rivière et l'environnement, Montréal, Québec, juin 1986.

Hicks, F.E., 2013. The Weird and Wonderful World of River Ice. Createspace Independent Publishing Platform. 52 pages

Hicks, F.E., 2016. An Introduction to River Ice Engineering. For Civil Engineers and Geoscientists. Createspace Independent Publishing Platform. 10 pages.

Michel, B., 1978. Ice Mechanics, Peeters Publishers & Booksellers, 1978.

Publications du Comité sur les processus de glace de rivière et l'environnement (CPGRE) :
<https://cripe.ca/fr/publications>

9 Références

- Agence d'évaluation d'impact du Canada (AEIC). 2023. Le savoir autochtone. [Ressource en ligne : <https://www.canada.ca/fr/agence-evaluation-impact/programmes/consultation-autochtones-cadre-evaluations-environnementales-federales/initiative-cadr-strategique-savoir-autochtone.html>]
- Andrishak, R. Et Hicks, F., 2008. Simulating the effects of climate change on the ice regime of the Peace River. Canada. *Revue canadienne de génie civil*, 35(5) : p. 461 à 472.
- Beltaos, S. Et Burrell, C.-B., 2003. Climate change and river ice breakup, *Revue canadienne de génie civil*, 30 (1), p. 145 à 155.
- Beltaos, S. Et Prowse, T. D., 2001. Climate impacts on extreme ice-jam events in Canadian rivers. *Hydrological Sciences Journal*, 46(1), p. 157 à 181.
- Beltaos, S., Prowse, T., Bonsal, B., Mackay, R., Romolo, L., Pietroniro, A. Et Toth, B., 2006. Climate effects on ice-jam flooding of the Peace–Athabasca Delta. *Hydrol. Process.* 20(19) : p. 4 031 à 4 050.
- Brunner, G. W., 2016. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center Report CPD-69, février 2016, 547 pages
- Burrell, B.C., Beltaos, S. Et Turcotte, B., 2022. Effects of climate change on river-ice processes and ice jams. *International Journal of River Basin Management*, p. 1 à 21.
- Carson, R., Beltaos, S., Groeneveld, J., Healy, D., She, Y., Malenchak, J., Morris, M., Saucet, J-P., Kolerski, T. Et Shen, H.T. (2011). *Revue canadienne de génie civil*, 38 : p. 669 à 678.
- Centre de gouvernance de l'information des Premières Nations (CGIPN). 2023. Les principes de propriété, de contrôle, d'accès et de possession des Premières Nations (PCAP®). [Ressource en ligne : <https://fnigc.ca/fr/>]
- Chen, Y. Et She, Y., 2020. Long-term variations of river ice breakup timing across Canada and its response to climate change. *Cold Regions Science and Technology*, 176, p. 103091.
- Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). 2016. Données et scénarios climatiques pour le Canada : Synthèse des observations et des résultats récents de modélisation. *Environnement et Changement climatique Canada, Gatineau (Qc), Canada*
- Gerard, R. L. Calkins, D., 1984. Ice-related flood frequency analysis : Application of analytical estimates. Dans *Proceedings of the CSCE Cold Regions Specialty Conference, Montréal, QC, Canada, 4 au 6 avril 1984*; p. 85 à 101.
- Kriwoken, L.A., 1983. Historical flood review : Fort Simpson, Fort Norman, Fort Good Hope, Fort McPherson, Aklavik, Fort Liard, Nahanni Butte. Rapport pour le Comité technique des Territoires du Nord-Ouest, Programme de réduction des dommages causés par les inondations, Yellowknife (T.N.-O.).
- Lindenschmidt, K.E., 2020. *River ice processes and ice flood forecasting*. Springer International Publishing.
- Mahabir, C., Hicks, F. Et Fayek, A.R., 2007. Transferability of a neuro-fuzzy river ice jam forecasting model, *Journal of Cold Regions Science and Technology*, 48(3), p. 188 à 201.

- Newton, B. W., Prowse, T. D. Et de Rham, L.P., 2017. Hydro-climatic drivers of mid-winter break up of river ice in western Canada and Alaska. *Hydrology Research*, 48(4), p. 945 à 956.
- Prowse, T. D. Et Beltaos, S., 2002. Climatic control of river-ice hydrology : a review. *Hydrological processes*, 16(4), p. 805 à 822.
- Prowse, T. D., Bonsal, B. R., Duguay, C.R. et Lacroix, M.P., 2007. River-ice break up/Freeze up : a review of climatic drivers, historical trends and future predictions. *Annals of Glaciology*, 46, p. 443 à 451.
- Prowse, T.D., Furgal, C., Wrona, F.J. et Reist, J.D., 2009. Implications of climate change for northern Canada : freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *AMBIO : A Journal of the Human Environment*, 38(5), p. 282 à 289.
- Ressources naturelles Canada (RNCAN). 2019. Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables. Version 1.0. [Ressource en ligne : https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/rncan-nrcan/m45/M45-114-2019-fra.pdf]
- Ressources naturelles Canada (RNCAN). 2019. Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables. Version 1.0. [Ressource en ligne : https://publications.gc.ca/collections/collecprocédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondablestion_2020/RNCAN NRCAN/m45/M45-113-2019-fra.pdf]
- Ressources naturelles Canada (RNCAN). 2022. Guide d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par lidar aéroporté. Version 3.1. [Ressource en ligne : https://ftp.maps.canada.ca/pub/nrcan_rncan/publications/stpublications_publicationsst/330/330330/gid_330330.pdf]
- Samuels, P. G., 1989. Backwater lengths in rivers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, partie 2, volume 87, p. 571 à 582.
- Turcotte, B., Burrell, B.C., Beltaos, S. Et She, Y., 2019, mai. The impact of climate change on breakup ice jams in Canada : State of knowledge and research approaches. Dans *Proceedings of the 20th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Ottawa, Canada*, disponible à : <https://cripe.ca/fr/publications/proceedings> (dernier accès : 20 juillet 2020).
- Turcotte, B., Morse, B. Et Pelchat, G., 2020. Impact of climate change on the frequency of dynamic breakup events and on the risk of ice-jam floods in Quebec, Canada. *Water*, 12(10), p. 2891.
- US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Centre, 2016. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual, version 5.0, février 2016.
- Yang, X., Pavelsky, T.M. et Allen, G. H., 2020. The past and future of global river ice. *Nature*, 577(7 788), p. 69 à 73.
- Younging, Gregory. 2018. Elements of Indigenous style : a guide for writing by and about Indigenous Peoples. Brush Education Inc. P. 154.