



Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables

Version 2.0

2023

Ressources naturelles Canada

Produit d'information générale 113f

Ressources Naturelles Canada

Environnement et Changement climatique Canada

Sécurité publique Canada

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre des Ressources naturelles, 2023

Lien permanent : <https://doi.org/10.4095/332157>

Pour obtenir des renseignements sur les droits de reproduction, veuillez communiquer avec Ressources naturelles Canada à l'adresse copyright-droitdauteur@nrcan-rncan.gc.ca.



PRÉFACE DE LA DEUXIÈME ÉDITION

La série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » a été établie en 2015 pour résumer des approches de cartographie des zones inondables au Canada. Cette série vise à faciliter le développement et l'application de bonnes pratiques ainsi qu'à accroître le partage et l'utilisation des informations sur les aléas de l'inondation. La première édition de ce document a été publiée en 2019.

Cette deuxième édition des procédures hydrologiques et hydrauliques traite de sujets clés et vise à fournir des orientations améliorées sur les changements climatiques, l'incertitude et sur les inondations des lacs. Plusieurs approches pour intégrer les effets des changements climatiques dans les études de délimitation des inondations sont explorées aux paliers municipal, provincial/territorial ainsi que fédéral. Il est prévu que ces lignes directrices continueront d'être mises à jour régulièrement pour refléter les bonnes pratiques actuelles en matière d'intégration des changements climatiques dans les études de délimitation des aléas d'inondation au Canada. La section sur l'incertitude a été développée dans cette édition pour décrire les approches de gestion de l'incertitude, y compris l'examen périodique et la gestion adaptative. La section sur les inondations côtières a également été réécrite pour se concentrer exclusivement sur les lacs, car un nouveau document d'orientation sur les inondations côtières marines sera publié. La section sur les inondations riveraines fournit des conseils sur les inondations dues au niveau d'eau élevé des lacs, aux ondes de tempête et aux effets des vagues.

Le document a également été réorganisé pour répondre aux besoins de deux publics cibles. Les trois premières sections donnent un aperçu des pratiques générales pour entreprendre des études de délimitations des aléas d'inondation et ont été rédigées pour les gouvernements locaux qui se procurent des études techniques et les individus ou organisations impliqués dans la gestion des inondations. Les six sections qui suivent fournissent un résumé des pratiques techniques acceptées pour définir les débits et les niveaux d'eau extrêmes et sont destinées aux spécialistes. La section 10.0 et l'Annexe A sont nouvelles dans cette édition et décrivent des pratiques suggérées en matière de rapports. Elles peuvent être utiles aux organismes qui réalisent ou qui commandent des études de délimitation des aléas d'inondation. Un tableau de révision est inclus après la table des matières pour aider les lecteurs familiarisés avec la première édition du guide d'orientation.

Plusieurs nouveaux sujets ont été envisagés pour cette édition des lignes directrices, mais ces derniers ont été exclus en raison de contraintes de temps. Les futures versions du guide d'orientation pourraient inclure des suggestions sur : la gestion des eaux pluviales urbaines, les géorisques tels que les coulées de débris et les cônes alluviaux, et les changements géomorphologiques.

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE DE LA DEUXIÈME ÉDITION	i
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES.....	v
TABLEAU DE RÉVISION.....	vii
REMERCIEMENTS	1
AVIS.....	1
CONTEXTE	2
CADRE FÉDÉRAL DE LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES	3
SÉRIE « GUIDES D’ORIENTATION FÉDÉRAUX SUR LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES »	4
RÉSUMÉ DES GUIDES D’ORIENTATION.....	4
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES ACRONYMES	7
1.0 INTRODUCTION ET OBJECTIF	10
1.1 Contexte et histoire.....	11
1.2 Objectifs	11
1.3 Contexte de la prise de décision fondée sur le risque	12
1.4 Note sur la terminologie.....	12
1.5 Norme de diligence.....	15
1.6 Régimes de réglementation au Canada.....	16
1.7 Plan du document.....	17
2.0 PRATIQUES GÉNÉRALES.....	18
2.1 Exigences en matière de portée des travaux.....	24
2.2 Évaluation des crues de conception	25
2.3 L’influence des changements climatiques sur les débits de conception	30
2.4 Modèles hydrauliques numériques	31
2.5 Inondations liées à la glace.....	35
2.6 Inondation de rives des lacs	37
2.7 Incertitudes des résultats de la délimitation des risques d’inondation	37
2.8 Détails du rapport	38
2.9 Résumé des pratiques générales	39
3.0 EXIGENCES EN MATIÈRE DE DONNÉES.....	40
3.1 Gestion de données.....	40
3.2 Données géospatiales	41
3.3 Données hydrométriques.....	43

3.4	Données météorologiques	45
3.5	Données historiques non systématiques.....	46
3.6	Évaluation des données et assurance de la qualité / contrôle de la qualité	48
3.7	Résumé	51
4.0	L'INTÉGRATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	51
4.1	Données d'information sur les changements climatiques.....	55
4.2	Études dans le contexte canadien et mondial.....	57
4.3	Projections des changements du niveau de la mer	57
4.4	Résumé des stratégies pour la prise en compte des changements climatiques.....	58
5.0	PROCÉDURES D'ÉVALUATION DES INONDATIONS DE CONCEPTION.....	58
5.1	Définition des résultats hydrologiques	62
5.2	Exigences en matière de données.....	63
5.3	Sélection de l'approche analytique	70
5.4	Approche d'analyse fréquentielle des crues.....	70
5.5	Modélisation hydrologique	81
5.6	Évaluation des résultats.....	93
5.7	Exigences en matière de rapports	93
5.8	Résumé des procédures hydrologiques.....	93
6.0	ANALYSES HYDRAULIQUES.....	94
6.1	Sélection du modèle	97
6.2	Exigences en matière de données.....	102
6.3	Analyse de sensibilité, calage et validation du modèle.....	107
6.4	Exigences en matière de rapports	109
6.5	Résumé des procédures hydrauliques.....	109
7.0	EFFETS DE LA GLACE.....	110
7.1	Inondations dues à la glace	113
7.2	Évaluation préliminaire des hauts niveaux.....	113
7.3	Inondations dues aux embâcles.....	114
7.4	Analyse des embâcles.....	116
7.5	Effets du contrôle.....	119
7.6	Analyse hydraulique tenant compte des effets de la glace.....	119
7.7	Exigences en matière de rapports	120
7.8	Résumé des procédures relatives aux effets de la glace	121
8.0	INONDATION SUR LES RIVES DES LACS.....	122
8.1	Processus physiques.....	123

8.2	Exigences en matière de données.....	127
8.3	Analyse des données météorologiques	129
8.4	Analyse du niveau statique du lac.....	130
8.5	Analyse des ondes de tempête.....	130
8.6	Analyse des vagues.....	134
8.7	Génération de vagues	135
8.8	Transformation des vagues à proximité du littoral	136
8.9	Analyses de la remontée et du débordement des vagues.....	138
8.10	Cartographie des aléas d'inondation des rives du lac	142
8.11	Considérations relatives aux changements climatiques	144
8.12	Analyse fréquentielle des inondations au bord des lacs.....	145
8.13	Exigences en matière de rapports	148
8.14	Résumé des pratiques pour les inondations riveraines	149
9.0	INCERTITUDE DANS L'ÉVALUATION DES ALÉAS D'INONDATION.....	149
9.1	Quantification de l'incertitude.....	150
9.2	Incertitude des projections des changements climatiques.....	151
9.3	Incertitude dans les évaluations des délimitations des aléas d'inondation	152
9.4	Résumé des incertitudes dans l'évaluation des aléas d'inondation	153
10.0	EXIGENCES POUR LE FORMAT DE RAPPORT	154
10.1	Aperçu.....	154
10.2	Gestion des données.....	156
11.0	CONCLUSION.....	157
12.0	RÉFÉRENCES	158
13.0	BIBLIOGRAPHIE	168
	ANNEXE A : EXIGENCES RELATIVES AUX RAPPORTS TECHNIQUES.....	170

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Pratiques générales de délimitation des aléas d'inondation.....	18
Tableau 2.2 - Application des modèles hydrauliques 1D et 2D.....	34
Tableau 4.1 - Pratiques pour intégrer les changements climatiques dans les études sur les risques d'inondation.	54
Tableau 5.1 - Pratiques hydrologiques.....	59
Tableau 5.2 - Résultat hydrologique ou événement de crue de conception par juridiction au moment de la rédaction du présent document.....	62
Tableau 5.3 - Base de classification des modèles de simulation hydrologique (adapté du Associate Committee on Hydrology 1989).	81
Tableau 6.1 - Pratiques hydrauliques fluviales.	95
Tableau 6.2 - Application de divers modèles hydrauliques.	98
Tableau 7.1 - Pratiques d'inondation en cas d'embâcle.	110
Tableau 8.1 - Procédures d'analyse et de cartographie des aléas d'inondation sur le rivage du lac.....	122

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 - Cadre de la cartographie des zones inondables.....	3
Figure 2.1 - Pratiques générales de délimitation des aléas d'inondation	20
Figure 2.2 - Procédures hydrologiques et hydrauliques du système.....	22
Figure 2.3 - Focus sur les exigences hydrologiques dans la délimitation des aléas d'inondation.....	26
Figure 2.4 - Méthodes de conception hydrologique.....	27
Figure 2.5 - Contraintes de la durée de la période de relevés sur les procédures hydrologiques	28
Figure 2.6 - Cadre de modélisation hydrologique	29
Figure 2.7 - Exigences hydrauliques dans la délimitation des risques d'inondation.	32
Figure 2.8 - Processus typiques menant aux embâcles.	36
Figure 2.9 - Éléments d'incertitude globale.	38
Figure 3.1 - Données requises pour la délimitation des aléas d'inondation	40
Figure 4.1 - Application des changements climatiques.....	53
Figure 5.1 - Procédures hydrologiques.....	61
Figure 5.2 - Procédure de préparation des débits pour l'analyse.....	64
Figure 5.3 - Naturalisation des débits contrôlés.....	68
Figure 5.4 - Procédure pour les analyses fréquentielles des crues.....	71
Figure 5.5 - Approches de modélisation hydrologique.....	83
Figure 5.6 - Modèles hydrologiques déterministes.	84
Figure 5.7 - Exigences relatives à la modélisation hydrologique pour les analyses fréquentielles des crues.	88
Figure 5.8 - Étapes de l'application du modèle.....	91
Figure 6.1 - Procédure de modélisation hydraulique	97
Figure 6.2 - Calage et validation d'un modèle hydraulique	107
Figure 7.1 - Procédure des embâcles	112
Figure 8.1 - Anomalies du niveau d'eau statique du Grand Lac des Esclaves à Yellowknife (1939-2018)	124

Figure 8.2 - Variations à long terme du niveau d'eau du lac Érié.....	125
Figure 8.3 - Estimation des ondes de tempête et des niveaux d'eau statiques à partir de relevés de jauges de niveau d'eau à long terme.....	132
Figure 8.4 - Méthode de Cox-Machemehl pour l'estimation des risques induits par le débordement des vagues.....	142
Figure 8.5 - Définition des aléas d'inondation des rives du lac pour la remontée et le débordement des vagues.....	144
Figure 9.1 - Incertitude de la modélisation hydrologique et hydraulique.	150

TABLEAU DE RÉVISION

Section	Description de la mise à jour
CONTEXTE	Description approfondie des sources d'inondation
CADRE FÉDÉRAL DE LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES	Mis à jour de la figure et de la description
SÉRIE « GUIDES D'ORIENTATION FÉDÉRAUX SUR LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES »	Mis à jour avec les dernières publications des guides d'orientation
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES ACRONYMES	Mis à jour
1.0.0 INTRODUCTION ET OBJECTIF	Déplacement dans l'introduction des sections : Note sur la terminologie, Norme de diligence, Régime de réglementation, Prise de décision fondée sur le risque; ajout d'une section Contexte et historique
1.4 Note sur la terminologie	Mise à jour pour se conformer aux autres documents des guides
1.5 Norme de diligence	Clarification des qualifications des professionnels
1.6 Régimes de réglementation au Canada	Définition corrigée des Offices de protection de la nature de l'Ontario
2.0 PRATIQUES GÉNÉRALES	Réorganisation des sections et développement des descriptions pour un public cible non technique
2.1 Exigences en matière de portée des travaux	Définition des exigences de l'étendue des travaux pour une étude de délimitation des aléas d'inondation
2.2 Évaluation des crues de conception	Ajout d'un aperçu de haut niveau des processus avec des organigrammes
3.0 EXIGENCES EN MATIÈRE DE DONNÉES	Création d'une nouvelle section pour consolider les sous-sections sur les exigences en matière de données dans la version précédente
4.0 L'INTÉGRATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	Déplacement de la section de la fin du document; création de nouvelles figures et explications
4.1 Données d'information sur les changements climatiques	Section révisée et réorganisée

4.4 Résumé des stratégies pour la prise en compte des changements climatiques	Création d'une nouvelle section
5.0 PROCÉDURES D'ÉVALUATION DES INONDATIONS DE CONCEPTION	Section réorganisée et mise à jour
5.1 Définition des résultats hydrologiques	Création d'une nouvelle section
5.2 Exigences en matière de données	Création de nouveaux tableaux, figures et explications sur les analyses de débit
5.3 Sélection de l'approche analytique	Création d'une nouvelle figure et explication
5.4 Approche d'analyse fréquentielle des crues	Section révisée et réorganisée; nouvelle figure et explication
5.5 Modélisation hydrologique	Création de nouvelles figures et explications
5.8 Résumé des procédures hydrologiques	Création d'une nouvelle section
6.0 ANALYSES HYDRAULIQUES	Section réorganisée et mise à jour
6.1 Sélection du modèle	Création de nouveaux tableaux, mise à jour des références
6.2.1 Données géospatiales	Création d'une sous-section sur la topographie et la bathymétrie
6.2.8 Relations niveau-débit	Application clarifiée des courbes de tarage.
6.3 Analyse de sensibilité, calage et validation du modèle	Création d'une nouvelle section
6.5 Résumé des procédures hydrauliques	Création d'une nouvelle section
7.0 EFFETS DE LA GLACE	Ajout d'un diagramme de flux et d'un tableau
7.8 Résumé des procédures relatives aux effets de la glace	Création d'une nouvelle section

8.0 INONDATION SUR LES RIVES DES LACS	Mis à jour de la section sur les inondations des rives des lacs; suppression des informations concernant uniquement les côtes marines
9.0 INCERTITUDE DANS L'ÉVALUATION DES ALÉAS D'INONDATION	Section mise à jour
10.0 EXIGENCES POUR LE FORMAT DE RAPPORT	Création d'une nouvelle section pour les exigences en matière de rapports
11.0 CONCLUSION	Mise à jour pour inclure l'objectif et les limites du champ d'application
12.0 RÉFÉRENCES	Section mise à jour

REMERCIEMENTS

La série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » a été développée sous la direction du Comité de la cartographie des inondations (CCI). Le CCI est un partenariat entre Sécurité publique Canada, Ressources naturelles Canada, Environnement et Changement climatique Canada, le Conseil national de recherches du Canada (CNRC), Recherche et développement pour la défense Canada, les Forces armées canadiennes, Infrastructure Canada et Relations Couronne-Autochtones et des Affaires du Nord. Un groupe de travail technique sur la cartographie des zones inondables formé en 2015 et composé d'intervenants provenant des gouvernements fédéraux et provinciaux ainsi que du secteur privé et du milieu universitaire a également offert de précieux commentaires sur la rédaction des documents de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables ». Enfin, les représentants des gouvernements provinciaux et territoriaux ont aussi fourni une rétroaction indispensable menant à sa publication.

Les documents dans la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » sont destinés à aider les agences municipales, provinciales, et territoriales ainsi que les communautés autochtones qui travaillent sur la délimitation des inondations. Il est reconnu que la gestion des inondations au Canada est règlementée au niveau des gouvernements provinciaux et territoriaux et que les provinces et les territoires se réservent le droit de créer leurs propres guides d'orientation spécifiques à leurs juridictions.

AVIS

Exonération de responsabilité

Le présent document technique a été publié par Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par Ressources naturelles Canada (RNCa). RNCa n'offre aucune garantie et ne fait aucune représentation, expresse ou implicite, légale ou autre en ce qui concerne le document, son efficacité, son exactitude ou son intégralité. RNCa n'assume aucune responsabilité quant aux pertes ou dommages, directs ou indirects, engagés ou subis, en raison de l'utilisation faite du document, y compris la perte de profits, la perte de revenus ou de bénéfices, ou des réclamations par des tiers. En aucun cas RNCa ne sera tenu responsable de pertes de quelque nature que ce soit découlant d'erreurs, d'imprécisions ou d'omissions dans ce document. RNCa n'a aucune obligation, aucun devoir et aucune responsabilité en matière de contrat, de droit civil ou autre, y compris la négligence.

Renseignements supplémentaires

Pour plus de renseignements à propos de ce document, veuillez communiquer avec le Centre canadien de cartographie et d'observation de la Terre de Ressources naturelles Canada à l'adresse suivante : geoinfo@nrcan-rncan.gc.ca.

CONTEXTE

Une communauté atteint un niveau élevé de résilience lorsque ses risques sont gérés de manière proactive, qu'elle est préparée de manière adéquate aux catastrophes connues et potentielles et qu'elle démontre sa capacité à se rétablir après de tels événements. Pour devenir résiliente, les planificateurs des mesures d'atténuation d'une communauté doivent d'abord comprendre les risques et s'assurer de leur capacité à gérer ces risques.

Les inondations sont le risque naturel le plus commun au Canada et représentent la plus grande partie des coûts de rétablissement après une catastrophe sur une base annuelle. (Sécurité publique Canada, 2022). L'atténuation des risques d'inondation est donc essentielle pour accroître la résilience des collectivités touchées. En investissant de manière proactive dans des mesures d'atténuation des risques d'inondation, une collectivité a un impact positif sur sa croissance et sa prospérité futures, en réduisant le risque de coûts importants de rétablissement à la suite d'une catastrophe, de pertes de productivité, de pertes économiques, de destruction de biens culturels non monétaires, de dommages environnementaux, de blessures et de décès.

Une inondation est une submersion temporaire par l'eau de terres normalement sèches et peut se produire sur les côtes marines et lacustres, le long des rivières et dans les zones de faible altitude. Les inondations sont causées par des précipitations extrêmes, la fonte rapide des neiges, des glaces ou des glaciers, des vents violents (ondes de tempête et vagues), l'obstruction des cours d'eau par des embâcles ou des débris, la défaillance d'ouvrages de génie civil, y compris les barrages, les mauvaises caractéristiques de drainage, le niveau élevé des eaux souterraines et d'autres sources. Une cartographie des zones inondables décrivant avec précision les aléas de l'inondation, y compris ceux liés aux conditions futures dues au développement prévu ou aux changements climatiques projetés, est la condition préalable aux mesures d'atténuation et constitue la première étape pour accroître la résilience des communautés face aux inondations. L'établissement d'une approche nationale de la cartographie des zones inondables facilitera l'adoption d'une meilleure pratique nationale commune et augmentera le partage et l'utilisation des informations sur les aléas de l'inondation, améliorant ainsi la base à partir de laquelle d'autres efforts d'atténuation des risques d'inondation peuvent être initiés.

CADRE FÉDÉRAL DE LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES

Le « Cadre de la cartographie des zones inondables » comprend toutes les composantes du processus d'atténuation des inondations, de l'identification des aléas d'inondation à la mise en œuvre des mesures d'atténuation des inondations. La figure 0.1 illustre la relation entre ces différentes composantes.

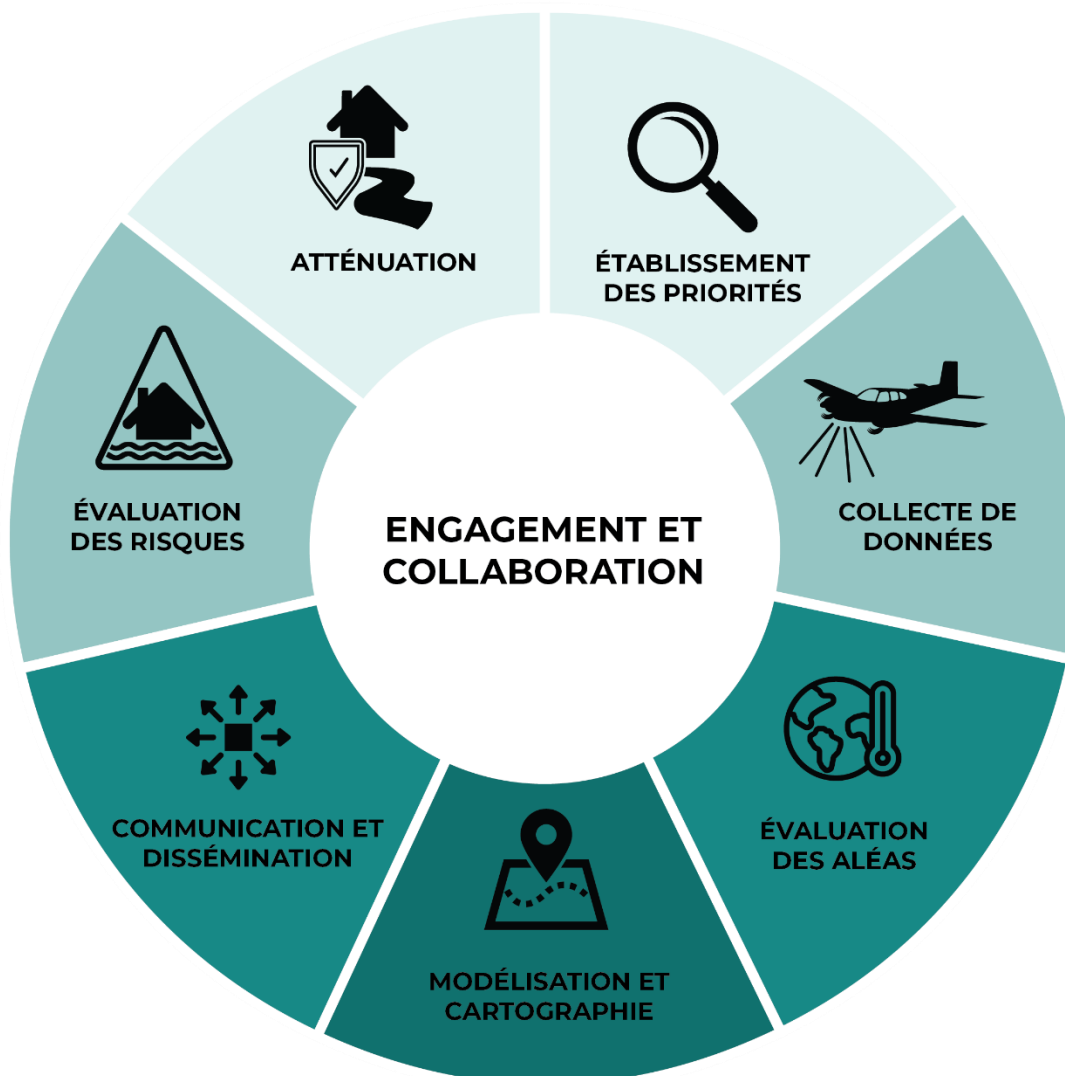


Figure 0.1. Cadre de la cartographie des zones inondables.

SÉRIE « GUIDES D'ORIENTATION FÉDÉRAUX SUR LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES »

Les documents qui suivent ont pour but d'informer toute personne ou tout organisme qui participent à la gestion des inondations au Canada :

1. Cadre fédéral de la cartographie des zones inondables
2. Guide d'orientation fédéral sur le recensement des aléas d'inondation et établissement des priorités
3. Guide d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par lidar aéroporté
4. Études de cas sur les changements climatiques dans la cartographie des plaines inondables
5. **Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables**
6. Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables
7. Guide d'orientation fédéral pour l'évaluation des risques d'inondation
8. Guide d'orientation fédéral sur l'estimation des dommages causés aux bâtiments et aux infrastructures par les inondations
9. Guide d'orientation fédéral de l'aménagement du territoire dans les zones à risque d'inondation
10. Bibliographie des meilleures pratiques et des références concernant l'atténuation des inondations
11. Évaluation des aléas d'inondation côtière pour une analyse basée sur le risque sur les côtes marines du Canada

RÉSUMÉ DES GUIDES D'ORIENTATION

1. Cadre fédéral de la cartographie des zones inondables

Ce document présente l'historique et le contexte de la cartographie des zones inondables au Canada, une vision et des principes pour l'orientation en matière d'inondation, et introduit la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables ». Il fournit un résumé de chacun des documents de la série et explique comment chaque document s'inscrit dans le cadre général en incluant ses rôles dans le processus de la cartographie des zones inondables.

2. Guide d'orientation fédéral sur le recensement des aléas d'inondation et établissement des priorités

Ce document présente les méthodes permettant de déterminer où réaliser la cartographie des zones inondables et comment prioriser les projets de cartographie des zones inondables.

3. Guide d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par lidar aéroporté

Ce document est une ressource pour l'acquisition de données d'élévation de base à partir de données lidar aéroportées entreprises à travers le Canada. Ces lignes directrices fournissent des caractéristiques techniques aux ministères fédéraux, provinciaux et territoriaux, ainsi qu'aux

personnes et aux organisations au Canada qui ont besoin d'information pour comprendre et planifier l'acquisition de données lidar aéroportées.

4. Études de cas sur les changements climatiques dans la cartographie des plaines inondables

Cette collection de documents décrit des projets au Canada où les changements climatiques ont été intégrés au processus de cartographie des zones inondables. Elle fournit des exemples dont les spécialistes peuvent s'inspirer et tirer des leçons de l'expérience des autres et complète les informations et les ressources liées aux changements climatiques incluses dans le document « Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des risques d'inondation ».

5. Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables

Ce document fournit des conseils aux organismes municipaux, provinciaux et territoriaux et aux communautés autochtones qui travaillent à la production de cartes des zones inondables. Il fournit des informations techniques sur les types d'inondations fluviales et lacustres, les pratiques générales, les procédures d'analyses hydrologiques et hydrauliques, les procédures d'intégration des changements climatiques et les bonnes pratiques en matière de rapports.

6. Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables

Ce document contient des informations sur les différents types de cartes de zones inondables et décrit les caractéristiques techniques à prendre en compte lors de l'acquisition, de la gestion et de la diffusion de ces cartes et de leurs données géospatiales associées.

7. Guide d'orientation fédéral pour l'évaluation des risques d'inondation

Ce document fournit des guides d'orientation sur la réalisation d'évaluations des risques d'inondation au Canada.

8. Guide d'orientation fédéral sur l'estimation des dommages causés aux bâtiments et aux infrastructures par les inondations

Ce document fournit des conseils sur la manière d'évaluer les pertes économiques potentielles encourues à la suite d'une inondation, en mettant l'accent sur les bâtiments et les infrastructures.

9. Guide d'orientation fédéral de l'aménagement du territoire dans les zones à risque d'inondation

Ce document fournit des conseils aux communautés pour l'utilisation de méthodologies basées sur le risque aux fins de l'aménagement du territoire en tenant compte des zones inondables.

10. Bibliographie des meilleures pratiques et des références concernant l'atténuation des inondations

Ce document contient des listes de références et d'études de cas canadiennes et internationales portant sur l'hydrologie et l'hydraulique, les changements climatiques, l'évaluation des risques et la cartographie des zones inondables. L'objectif de ce document est de fournir une liste d'ouvrages de référence destinés à servir de ressources supplémentaires aux spécialistes impliqués dans la cartographie des zones inondables.

11. Évaluation des aléas d'inondation côtière pour une analyse basée sur le risque sur les côtes marines du Canada

Ce document fournit des conseils sur les méthodologies d'évaluation des risques d'inondation côtière en utilisant des approches axées sur le risque.

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES ACRONYMES

1D	Une dimension
2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
AAC	Agriculture et Agroalimentaire Canada
ACP	Analyse conjointe de probabilités
AFC	Analyse fréquentielle des crues
AFRC	Analyse fréquentielle régionale des crues
AQ/CQ	Assurance de la qualité/contrôle de la qualité
ASC	Agence spatiale canadienne
BMST	Bases de données Mondiales sur les Sols pour la modélisation des systèmes Terrestres
CaPA	Canadian Precipitation Analysis
CCSC	Centre canadien des services climatiques
CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i> de la NOAA
cm	Centimètre
CMIP	<i>Coupled Model Inter-comparison Project</i> (projet d'intercomparaison des modèles couplés)
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
COG	Centre des opérations du gouvernement (Canada)
CORDEX	<i>Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment</i>
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
DE	Demande de proposition
DHI	<i>Danish Hydraulics Institute</i>
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
EGBC	<i>Engineers and Geoscientists British Columbia</i>
FDP	Fonction de densité de probabilité
FEMA	<i>Federal Emergency Management Agency (USA)</i>
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPS	Système de positionnement global
IDF	Intensité - Durée - Fréquence
INRS-ETE	Institut national de la recherche scientifique – Eau Terre Environnement
km	Kilomètre

km ²	Kilomètre carré
lidar	<i>Light Detection and Ranging</i>
m	Mètre
m/s	Mètre par seconde
m ³ /s	Mètre cube par seconde
MA	Maximum annuel
MCG	Modèle climatique mondiale ou modèle de circulation générale (utilisation interchangeable)
MCR	Modèle climatique régional
MFN	Mécanique des fluides numérique
MISI	Méthode de l'indice de sensibilité à l'incertitude
MNT	Modèle numérique de terrain
mPING	<i>Meteorological Phenomena Identification Near the Ground</i>
MPO	Pêches et Océans Canada
MSM	Méthode de simulation multi-objectifs
MST	Modèle du système terrestre
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)</i>
OMM	Organisation météorologique mondiale
ONG	Organisation non gouvernementale
PCIC	<i>Pacific Climate Impacts Consortium</i>
PDA	Probabilité de dépassement annuel
PICAI	Programme d'identification et de cartographie des aléas d'inondations
PNAC	Programme national d'atténuation des catastrophes
POT	Pointe dépassant un seuil
PRDI	Programme de réduction des dommages causés par les inondations
QI	Débit de pointe instantané
QJ	Débit de crue journalier
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i> (profils représentatifs de l'évolution de concentration)
RCAANC	Relations Couronne-Autochtones et Affaires du Nord Canada
RDRS	<i>Regional Deterministic Reforecast System</i>
RHC	Relevés hydrologiques du Canada
RHN	Réseau hydrographique national
RNCan	Ressources naturelles Canada

RSL	Niveau relatif de la mer
SAC	Services aux Autochtones Canada
SCS	<i>Soil Conservation Service (USA)</i>
SEA	Service Atmosphérique – Environnement
SHC	Service hydrographique du Canada
SIG	Système d'information géographique
SPC	Sécurité publique Canada
TCES	Trajectoires communes d'évolution socio-économique
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
USACE HEC	<i>USACE Hydrologic Engineering Center</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VASP	Véhicule aérien sans pilote

1.0 INTRODUCTION ET OBJECTIF

Ce document, « Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables Version 2.0 », a été rédigé à l'intention des organismes municipaux, provinciaux et territoriaux et des communautés autochtones qui travaillent à la production de cartes des aléas d'inondation. Il donne un aperçu des procédures techniques relatives aux études de délimitation des zones inondables et vise à aider ces organismes à l'attribution de contrats ou à effectuer eux-mêmes les travaux. Comme le décrit le chapitre 3 du « Cadre fédéral de la cartographie des zones inondables version 2.0 »:

« Il est suggéré que les documents de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » s'appliquent aux projets et aux activités de cartographie des zones inondables entrepris au Canada. Ces guides d'orientation visent à fournir des conseils aux provinces et aux territoires dont la responsabilité consiste à fournir des guides d'orientation aux organismes de mise en œuvre ainsi qu'aux particuliers et aux organisations canadiennes qui doivent comprendre et gérer les risques d'inondation ainsi que leurs conséquences sur les communautés. Il peut s'agir de professionnels en gestion des urgences, de gestionnaires des risques d'inondation, de planificateurs en aménagement du territoire et en ressources hydriques, d'hydrologues, d'urbanistes, d'ingénieurs en hydraulique, de géoscientifiques, de géologues, de constructeurs d'infrastructures, de gestionnaires de la régularisation des eaux, de stratèges et de décideurs, travaillant au gouvernement et ailleurs. »

Au Canada, la gestion des inondations est règlementée aux niveaux provincial, territorial et municipal, et les méthodes techniques varient d'une juridiction à l'autre. Des programmes fédéraux existent pour soutenir les communautés autochtones qui entreprennent des études de cartographie des zones inondables. Au moment de la rédaction du présent document, les communautés des Premières Nations situées au sud du 60^e parallèle sont admissibles au financement des études de cartographie des zones inondables dans le cadre du Programme d'adaptation des Premières Nations du ministère Relations Couronne-Autochtones et Affaires du Nord Canada (RCAANC). Le Programme d'aide à la gestion des urgences de Services aux Autochtones Canada (SAC) fournit des fonds aux collectivités des Premières Nations situées sur des terres de réserve pour soutenir les évaluations des risques des aléas qui peuvent inclure la cartographie des zones inondables. De plus, le Programme de préparation aux changements climatiques dans le Nord du RCAANC fournit des fonds aux communautés autochtones et nordiques au nord du 60^e parallèle pour soutenir les évaluations et les cartes des risques des aléas qui peuvent inclure la cartographie des zones inondables.

Ce document est destiné à fournir un sommaire de techniques actuelles utilisées par les professionnels qualifiés œuvrant dans le domaine de la délimitation des zones inondables au Canada. Les responsables des paliers gouvernementaux provinciaux, territoriaux et municipaux ainsi que les communautés autochtones peuvent utiliser ce document pour les aider à déterminer la portée du travail et s'assurer que les professionnels qualifiés suivent des pratiques reconnues et acceptées.

Ces pratiques n'ont pas pour but de remplacer d'autres lois, réglementations, règlements, politiques, normes de programme, ou guides d'orientation fédéraux, provinciaux, territoriaux ou locaux. Les informations et les points de vue présentés dans ce document fédéral ne reflètent pas nécessairement ceux des provinces, des territoires ou des communautés autochtones. Les

méthodes décrites dans ce document reflètent des pratiques techniques actuellement utilisées au Canada et ailleurs.

1.1 Contexte et histoire

Les premières lignes directrices nationales pour la délimitation des risques d'inondation ont été publiées en 1976 dans le cadre du Programme de réduction des dommages causés par les inondations (ECCC, 1976). Ces lignes directrices décrivaient les procédures et les critères techniques à suivre pour les projets financés par le programme. Par la suite, plusieurs provinces ont élaboré leurs propres lignes directrices techniques, fournissant souvent des directives plus détaillées et contraignantes et traitant de problématiques techniques locales.

La création du Programme national d'atténuation des catastrophes (PNAC) en 2015 a permis de renouveler le financement de la cartographie des zones inondables et l'élaboration de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables ». En 2019, une orientation nationale révisée qui résumait les procédures hydrologiques et hydrauliques pour les études de délimitation des risques d'inondation est sortie dans le cadre de cette série fédérale. Des membres d'organismes fédéraux, provinciaux, territoriaux et municipaux, des chercheurs et des spécialistes ont examiné la première version du document.

La version 2 de ce document vise à améliorer la présentation des concepts de la version 1 en utilisant des organigrammes explicatifs, et en réorganisant une partie du contenu. Le tableau de révision qui suit la table des matières détaille les modifications apportées entre les deux versions.

Les collaborateurs de la première version et les experts en la matière du ECCC ont apporté une contribution précieuse à la deuxième version. Les membres des organismes gouvernementaux, provinciaux et territoriaux ont contribué au processus, et il est espéré que ce document réponde à leurs besoins pour la réalisation des études de délimitation des inondations.

1.2 Objectifs

L'objectif de ce document est de fournir un guide d'orientation technique relatif aux procédures hydrologiques et hydrauliques utilisées pour la préparation des cartes des zones inondables dans les juridictions canadiennes. Les objectifs spécifiques de ce document sont de :

1. Décrire le processus attendu de la part des professionnels qualifiés fournissant des services techniques dans le domaine de la cartographie des aléas d'inondation, incluant la gestion de la qualité et la révision technique;
2. Décrire les différents types d'inondations survenant au Canada, incluant, sans s'y limiter, les inondations fluviales (rivières), côtières (rive des lacs) et causées par la glace, seules ou en combinaison. La gestion des eaux pluviales urbaines, les coulées de débris, les cônes alluviaux, les changements géomorphologiques et les événements catastrophiques tels que les ruptures de barrages, de digues ou de levées ne sont pas abordés dans ce document.
3. Guider les professionnels qualifiés dans la réalisation d'analyses hydrologiques et hydrauliques inhérentes aux processus de cartographie des zones inondables; et,
4. Fournir des orientations sur la manière dont les changements climatiques peuvent être intégrés dans les études sur les aléas d'inondation.

Comme mentionné précédemment, la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » est un ensemble de onze documents publiés par le gouvernement du Canada afin de fournir des guides d'orientation aux personnes et aux organisations participant aux activités de cartographie des zones inondables au Canada. Au moment de la rédaction du présent rapport, sept des onze documents ont été publiés. Les autres documents sont en cours de rédaction et devraient être publiés en 2023.

La portée du présent document est axée sur les analyses hydrologiques et hydrauliques; des conseils sur la cartographie et la diffusion des données géospatiales sont fournis dans le document de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » intitulé « Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables ». Des exemples de projets intégrant les considérations relatives aux changements climatiques dans la cartographie des zones inondables sont fournis dans un document distinct de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » intitulé « Études de cas sur les changements climatiques dans la cartographie des plaines inondables ».

1.3 Contexte de la prise de décision fondée sur le risque

Le gouvernement fédéral a reconnu, par le biais des programmes de cartographie des zones inondables antérieurs et actuels, et en tant que signataire du Cadre de Sendai sur la réduction des risques de catastrophes, que les inondations et autres risques naturels doivent être gérés sur la base des principes du risque. Un aléa doit être considéré avec les conséquences négatives des événements qui se produisent. La compréhension de la fréquence et de la gravité des aléas (et des variations de la fréquence et de la gravité au fil du temps en raison des changements climatiques et de l'occupation du sol) est à la base de cette approche et fait l'objet du présent document. Un document complémentaire de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables », intitulé « Guide d'orientation fédéral pour l'évaluation des risques d'inondation », fournira des conseils sur les autres composantes du risque (exposition, vulnérabilité et résilience) lorsqu'il sera publié.

1.4 Note sur la terminologie

Tous les documents de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » appliqueront les définitions suivantes, basées sur la documentation du Cadre de sécurité civile pour le Canada (Ministres responsables de la sécurité civile, 2017) et du PNAC (PNAC, 2021). Il est reconnu que les provinces et les territoires peuvent définir ces termes différemment, et ces définitions ne sont pas destinées à être contraignantes en dehors du contexte des documents de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables ».

Inondation : La submersion temporaire par l'eau de terres normalement sèches.

Cartographie des zones inondables : La délimitation d'une inondation sur une carte de base; habituellement sous forme de repères de crue sur une carte qui indique la zone qui serait recouverte d'eau, ou la hauteur que pourrait atteindre l'eau dans l'éventualité d'une inondation. Les données indiquées sur les cartes peuvent aussi indiquer les vitesses du courant, la profondeur ainsi que d'autres paramètres de risques et vulnérabilités.

Aléa : Un évènement physique, un phénomène ou une activité anthropique potentiellement dommageable qui peut causer la perte de vies humaines, des blessures, des dommages matériels, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement.

Risque : La conséquence d'un danger spécifique, exprimée en termes de probabilité et basée sur des considérations de vulnérabilité et d'exposition.

Les cartes d'inondation sont utilisées à différentes fins, notamment pour identifier les aléas et les risques, l'aménagement du territoire, la planification et l'intervention en cas d'urgence, la sensibilisation du public et la communication. Sous la définition large de « carte des inondations », différents types d'informations géospatiales, hydrauliques et hydrologiques peuvent être présentés pour répondre à des exigences d'évaluation spécifiques. Pour des raisons de cohérence, quatre principaux types de cartes des inondations sont définis dans le « Cadre fédéral de la cartographie des zones inondables ».

Cartes de crues d'inondation : Cartes qui montrent l'étendue des eaux de crue lors d'inondations réelles, ou qui montrent l'étendue potentielle des eaux de crue. Ces cartes peuvent être élaborées à l'aide d'une seule approche ou d'une combinaison d'approches, telles que les relevés de la ligne des hautes eaux, l'imagerie aérienne acquise lors d'une inondation, ou les études hydrologiques et hydrauliques.

Cartes des zones inondables : Cartes qui présentent les résultats d'études hydrologiques et hydrauliques montrant les zones inondées pour des PDA spécifiées ou des pluies de conception. Outre l'étendue des eaux de crue, une carte peut également délimiter les zones inondables (par exemple, zone inondable principale, zone inondable secondaire) sur la base de la profondeur et/ou de la vitesse estimée de l'eau ou d'une PDA spécifiée.

Cartes des risques d'inondation : Cartes qui indiquent les conséquences négatives potentielles associées aux inondations par le biais d'une évaluation des risques ou de l'identification de facteurs y compris, mais sans s'y limiter, les conséquences sociales, économiques, environnementales et culturelles pour les communautés.

Cartes de sensibilisation aux inondations : Cartes de communication qui servent à informer les populations sur l'historique des inondations dans leurs communautés, ainsi que sur le potentiel d'inondations futures et les risques que ces inondations poseraient aux propriétés résidentielles, aux entreprises, aux biens culturels, aux infrastructures et à la vie humaine. Ces cartes interactives sur le Web ou imprimées sous forme d'affiches comprennent une série de types de contenus supplémentaires, tels que des photographies, des textes descriptifs et des graphiques.

Aux fins du présent document, les définitions suivantes s'appliquent également :

Bassin versant : Le bassin de drainage, y compris les bassins tributaires, en amont du site étudié.

Cours d'eau : Un terme général utilisé pour décrire le parcours de l'eau, y compris les ruisseaux et les rivières. Dans le présent document, les termes « cours d'eau » et « rivière » sont utilisés indifféremment.

Cours d'eau à l'étude : Le cours d'eau qui fait l'objet de l'étude des inondations.

Crue de conception ou règlementaire : Une magnitude d'inondation spécifique qui est utilisée pour délimiter les zones inondables.

Délimitation des aléas d'inondation : Les procédures hydrologiques et hydrauliques nécessaires pour définir l'étendue, les profondeurs et les vitesses de la crue de conception ou règlementaire pour la cartographie de la zone d'étude.

Écoulement d'un cours d'eau : Le volume d'eau passant par un point spécifique dans un cours d'eau à un intervalle défini. Souvent appelé débit (p. ex., en mètres cubes par seconde (m^3/s)). Dans ce document, les termes « débit » et « écoulement » sont utilisés indifféremment.

Hydrométrie : Relatif à la surveillance et aux relevés des niveaux d'eau, des vitesses et des débits.

Hydrotechnique: Relatif aux aspects techniques des ressources hydriques (p. ex., les débits, les niveaux, les étendues, les vitesses).

Inondation riveraine/fluviale : Inondation temporaire de terres normalement sèches par l'eau qui s'échappe de la rivière dans la zone inondable adjacente et qui peut être causée par les précipitations, la fonte des neiges, les blocages de cours d'eau, y compris les embâcles, la défaillance d'ouvrages de génie civil, ou d'autres facteurs.

Modèle numérique de terrain (MNT) : Une surface terrestre, exempte de bâtiments et de végétation, représentée sous forme numérique par une grille d'élévation ou des listes de coordonnées tridimensionnelles.

Probabilité de dépassement annuel (PDA) : La probabilité, exprimée en pourcentage, qu'un débit de crue ou un niveau d'eau donné se produise ou soit dépassé au cours d'une année donnée. Les inondations sont généralement exprimées en termes de probabilité de dépassement annuel (PDA) ou de période de retour. Par exemple, une inondation de 1% PDA et une inondation qui présente une récurrence de 100 ans sont équivalentes. Cependant, le concept de période de retour est parfois mal interprété par un public non spécialisé, qui y voit une période de temps entre deux événements (p. ex., 100 ans jusqu'à la prochaine inondation centennale) plutôt qu'une probabilité annuelle.

Site étudié : L'emplacement de la délimitation des aléas d'inondation.

Zone inondable : Zones adjacentes au canal de la rivière, au rivage du lac ou au littoral qui sont soumises aux inondations.

Dans certaines juridictions, la zone inondable est divisée en zone inondable principale et zone inondable secondaire. Dans les juridictions où cette division existe, les termes sont souvent définis comme suit :

Zone inondable principale : Le canal de la rivière et les zones adjacentes où les profondeurs et les vitesses de l'eau sont les plus importantes et les plus dangereuses.

Zone inondable secondaire : Les zones restantes de la zone inondable qui sont en dehors de la zone inondable principale.

1.5 Norme de diligence

Les cartes des zones inondables sont des outils indispensables pour la planification de l'atténuation des catastrophes et la gestion des urgences, incluant la protection de la vie humaine et des propriétés. Également, les cartes des zones inondables sont essentielles pour l'aménagement du territoire, le zonage, les assurances ainsi que pour transmettre l'information liée aux risques d'inondations au public. Le processus de cartographie des zones inondables, incluant les analyses hydrologiques et hydrauliques, doit être mené conformément aux exigences de sécurité et de diligence telles que celles qui sont décrites par les organismes de réglementation provinciaux et territoriaux responsables des géosciences et de l'ingénierie.

Les ingénieurs et les géoscientifiques sont tenus de répondre aux normes de diligence décrites par leurs associations professionnelles d'ingénierie et de géosciences de leur province ou de leur territoire. Les ingénieurs et les géoscientifiques pratiquant dans une juridiction canadienne sont tenus d'être membres d'une association professionnelle et doivent se conformer aux lois, aux réglementations et aux règlements ainsi qu'aux normes de diligence. La législation provinciale ou territoriale régit les fonctions d'octroi de licences de ces associations. Les orientations contenues dans ce document « Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables » sont soumises à toutes les lois, les réglementations et les règlements ou à toutes autres exigences des associations professionnelles d'ingénierie et de géosciences provinciales ou territoriales.

Les exigences spécifiques auxquelles doivent se conformer les ingénieurs et les géoscientifiques dans l'exercice de leur profession pour la préparation de cartes des zones inondables dans les provinces et les territoires du Canada comprennent, sans s'y limiter :

- Accorder une importance primordiale à la sécurité, à la santé et au bien-être du public ainsi qu'à la protection de l'environnement;
- Se conformer aux lois, aux réglementations, aux règlements et aux normes de diligence (p. ex., tel que décrit dans les guides d'orientation publiés par les associations professionnelles d'ingénierie et de géosciences des provinces et des territoires concernés).
- Posséder un niveau de formation et une expérience pertinente à la réalisation de la cartographie des zones inondables dans la zone géographique concernée;
- Consulter les intervenants et les spécialistes lorsque requis; et,
- Mettre en place un mécanisme de vérification et d'évaluation interne qui peut également inclure un processus indépendant d'évaluation par les pairs.

Aux fins du présent document, un « professionnel qualifié » est une personne qui possède les connaissances spécialisées et l'expérience requise pour effectuer des analyses hydrologiques et hydrauliques en vue de la cartographie des zones inondables, et qui est titulaire d'un permis délivré par l'organisme de réglementation de l'ingénierie de la province ou du territoire canadien où se déroule l'étude. Ce document donne un aperçu des méthodologies acceptées pour entreprendre des études de délimitation des aléas d'inondation. Un professionnel qualifié peut utiliser d'autres procédures à condition qu'elles respectent les pratiques d'ingénierie autorisées.

1.6 Régimes de réglementation au Canada

Au Canada, la gestion des inondations est typiquement sous la responsabilité des provinces et des territoires et elle peut être déléguée aux municipalités, aux offices de protection de la nature et aux organismes de bassins versants à travers des lois. Ainsi, certaines des activités de gestion, incluant la cartographie, la planification, la préparation, l'intervention et la réhabilitation, sont réalisées à une échelle déléguée (p. ex., les offices de protection de la nature en Ontario, les districts de conservation du Manitoba) plutôt que provinciale, territoriale ou fédérale. Cependant, les lois provinciales et territoriales comprennent généralement des dispositions exigeant des municipalités ou d'autres organisations responsables qu'elles mettent en œuvre des mesures d'atténuation des inondations et d'intervention en cas d'urgence dans l'intérêt du public. Le pouvoir de fixer la mesure de l'aléa de l'inondation de conception, qu'il s'agisse d'une probabilité unique, de probabilités multiples ou d'un événement de conception extrême, se situe au niveau provincial/territorial.

Des programmes fédéraux existent pour soutenir les communautés autochtones qui entreprennent des études de cartographie des zones inondables. Au moment de la rédaction du présent document, les communautés des Premières Nations situées au sud du 60e parallèle sont admissibles au financement d'études de cartographie des zones inondables dans le cadre du Programme d'adaptation des Premières Nations du ministère Relations Couronne-Autochtones et Affaires du Nord Canada (RCAANC). Le Programme d'aide à la gestion des urgences de Services aux Autochtones Canada (SAC) fournit des fonds aux collectivités des Premières Nations qui vivent sur leurs territoires afin de soutenir les évaluations des risques des aléas qui peuvent inclure la cartographie des zones inondables. De plus, le Programme de préparation aux changements climatiques dans le Nord du RCAANC fournit des fonds aux communautés autochtones et nordiques au nord du 60e parallèle pour soutenir la réalisation des évaluations des risques et des cartes qui peuvent inclure la cartographie des zones inondables.

Trois secteurs généraux relatifs aux inondations sur le territoire canadien sont sous la responsabilité du gouvernement fédéral, chacun d'entre eux impliquant une coordination avec les provinces et, dans certains cas, les municipalités :

1. Surveillance et intervention en cas d'inondation au Canada à travers le Centre des opérations du gouvernement (COG), qui coordonne les réponses du gouvernement fédéral lors d'inondations d'importance nationale;
2. Assistance en cas de catastrophe, incluant les Accords d'aide financière en cas de catastrophe pour les provinces et les territoires afin de remédier aux pertes financières engendrées par les inondations; et,
3. Mise en œuvre des programmes fédéraux de cartographie des zones inondables (p. ex. Programme d'identification et de cartographie des aléas d'inondations [PICAL]), incluant le soutien des activités liées à la cartographie des zones inondables visant à atténuer les risques et les coûts liés aux inondations et à réduire ou à contrer les effets des inondations au Canada.

1.7 Plan du document

Les sections suivantes de ce document sont organisées en deux thèmes. Les sections 2.0 et 3.0 sont destinées à un public sans formation technique et décrivent les procédures hydrologiques et hydrauliques générales et les exigences en matière de données pour entreprendre une étude de délimitation des aléas d'inondation. Ils comprennent les éléments clés suivants :

- Aperçu des procédures hydrologiques et hydrauliques.
- Exigences relatives à l'étendue des travaux à inclure dans une demande de proposition (DP).
- Aperçu de l'analyse fréquentielle des inondations et de la modélisation hydrologique.
- Aperçu des approches et des stratégies pour évaluer les impacts des changements climatiques sur les mécanismes spécifiques d'inondation.
- Aperçu de la modélisation hydraulique.
- Aperçu des inondations liées à la glace et des processus d'embâcles.
- Aperçu des inondations sur les rives des lacs.
- Aperçu de l'incertitude des résultats de la délimitation des aléas d'inondation.
- Résumé des suggestions en matière de rapports.
- Exigences en matière de données.

Les sections 4.0 à 10.0 sont plus techniques et sont rédigées à l'intention des spécialistes qui entreprennent et/ou évaluent les travaux. Ils comprennent les éléments clés suivants :

- Procédures hydrologiques pour les ajustements de débit, les analyses fréquentielles des crues et la modélisation hydrologique.
- Les techniques potentielles spécifiques aux mécanismes d'inondation pour évaluer les effets des changements climatiques.
- Procédures de modélisation hydraulique, y compris la sélection, le développement et la validation des modèles.
- Modélisation des inondations liées à la glace, y compris les analyses hydrauliques et de fréquence des inondations dues à la glace ou aux embâcles.
- Les inondations de lacs, y compris les procédures d'analyse des niveaux d'eau statiques, la modélisation et l'analyse des ondes de tempête, la modélisation des vagues et les analyses de l'écoulement et du débordement des vagues.
- Techniques de quantification de l'incertitude des résultats et suggestions pour traiter l'incertitude.
- Les exigences détaillées en matière de rapports.

2.0 PRATIQUES GÉNÉRALES

Cette section donne un aperçu général des pratiques techniques pour déterminer la délimitation des aléas d'inondation. La section 2.1 décrit les considérations pour l'étendue des travaux généralement utilisés pour les projets de la délimitation des aléas d'inondation. La section 2.2 présente les procédures hydrologiques pour évaluer les débits de conception et/ou les niveaux d'eau. La section 2.2 introduit des approches et des considérations pour évaluer les effets des changements climatiques. La section 2.4 décrit l'application des modèles hydrauliques qui peuvent être utilisés pour déterminer les profondeurs, les étendues et, dans certains cas, les vitesses de la crue nominale du site étudié. La section 2.5 décrit les inondations liées aux glaces et la section 2.6 couvre les inondations riveraines. La section 2.7 décrit des techniques pour évaluer et communiquer l'incertitude des résultats de la délimitation des aléas d'inondation. Finalement, la section 2.8 présente les détails recommandés pour l'établissement des rapports afin de s'assurer que les détails importants des analyses soient documentés.

Un résumé des pratiques générales pour une étude de délimitation des aléas d'inondation est inclus dans le tableau 2.1, qui se présente en trois volets. La figure 2.1 montre une représentation graphique du cadre et décrit la pratique générale.

Tableau 2.1. *Pratiques générales de délimitation des aléas d'inondation.*

	Pratiques générales
Étape 1	Définir les exigences réglementaires en fonction de la législation et de la précision requise en fonction de l'information locale sur l'occupation du sol et les dispositions relatives au zonage pour le cours d'eau à l'étude et la zone environnante.
Étape 2	Déterminer les limites de l'étude : mettre en contexte l'étendue géographique de l'étendue d'eau à l'étude, les impacts à considérer (fluviaux, pluviaux, de glace, littoraux, souterrains, coulées de débris). Déterminer les sources de données géospatiales, hydrométriques, météorologiques et historiques systématiques et non systématiques. Si nécessaire, inclure les sources des données sur la glace et/ou les côtes spécifiques aux impacts sur les inondations du lieu de l'étude. Les rapports historiques sur les inondations et leurs causes, ainsi que les études précédentes, sont indispensables.
Volet A	<p>Déterminer la cartographie de base disponible</p> <ul style="list-style-type: none"> • Photographie aérienne; • Imagerie par satellite; • MNT topographique dérivé du lidar; • Orthographique et topographique avec contrôles horizontaux et verticaux; • Relevés terrain avec contrôles GPS <p>Les détails concernant ces exigences et techniques d'analyse sont couverts dans le « Guide d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par un lidar aéroporté »;</p> <p>Fournir des cartes topographiques à des professionnels qualifiés pour des analyses hydrotechniques.</p>
Volet B-1	Effectuer les analyses hydrotechniques requises en utilisant les compétences et expériences d'un professionnel qualifié, tel que défini dans le présent document.

	Pratiques générales
B-2	Établir et utiliser un mécanisme de vérification et d'examen interne et/ou externe pour chaque projet.
B-3a	Effectuer les analyses hydrologiques de base nécessaires pour déterminer le débit de conception préliminaire ou les niveaux d'eau.
B-3b	Incorporer les considérations non stationnaires futures telles que le climat et les changements d'occupation du sol, si requis, qui pourront avoir un impact sur les débits de conception préliminaires. Tenir compte de la plage d'incertitude associée aux débits ou au niveau d'eau de conception finale.
B-4	Procéder à une analyse hydraulique du débit pour déterminer l'étendue, les profondeurs et, si requis, les vitesses de l'inondation. Considérer la plage d'incertitude associée aux résultats des analyses hydrotechniques.
B	Fournir les résultats de la délimitation des aléas d'inondation pour la cartographie et remplir un rapport de projet.
Volet C-1	Inclure l'engagement des communautés autochtones et allochtones, des parties concernées et des spécialistes dans le cadre des activités du projet pour obtenir leurs commentaires, leurs points de vue ainsi que leurs conseils sur les critères du projet.
C-2	Inclure, dans le cadre des activités du projet, un plan de communication pour diffuser aux communautés autochtones, aux parties concernées et aux spécialistes, les informations sur les aléas d'inondation et les risques d'inondation, conjointement à la cartographie mise à jour.
C-3	Publier des copies papier ou des cartes interactives sur le Web.

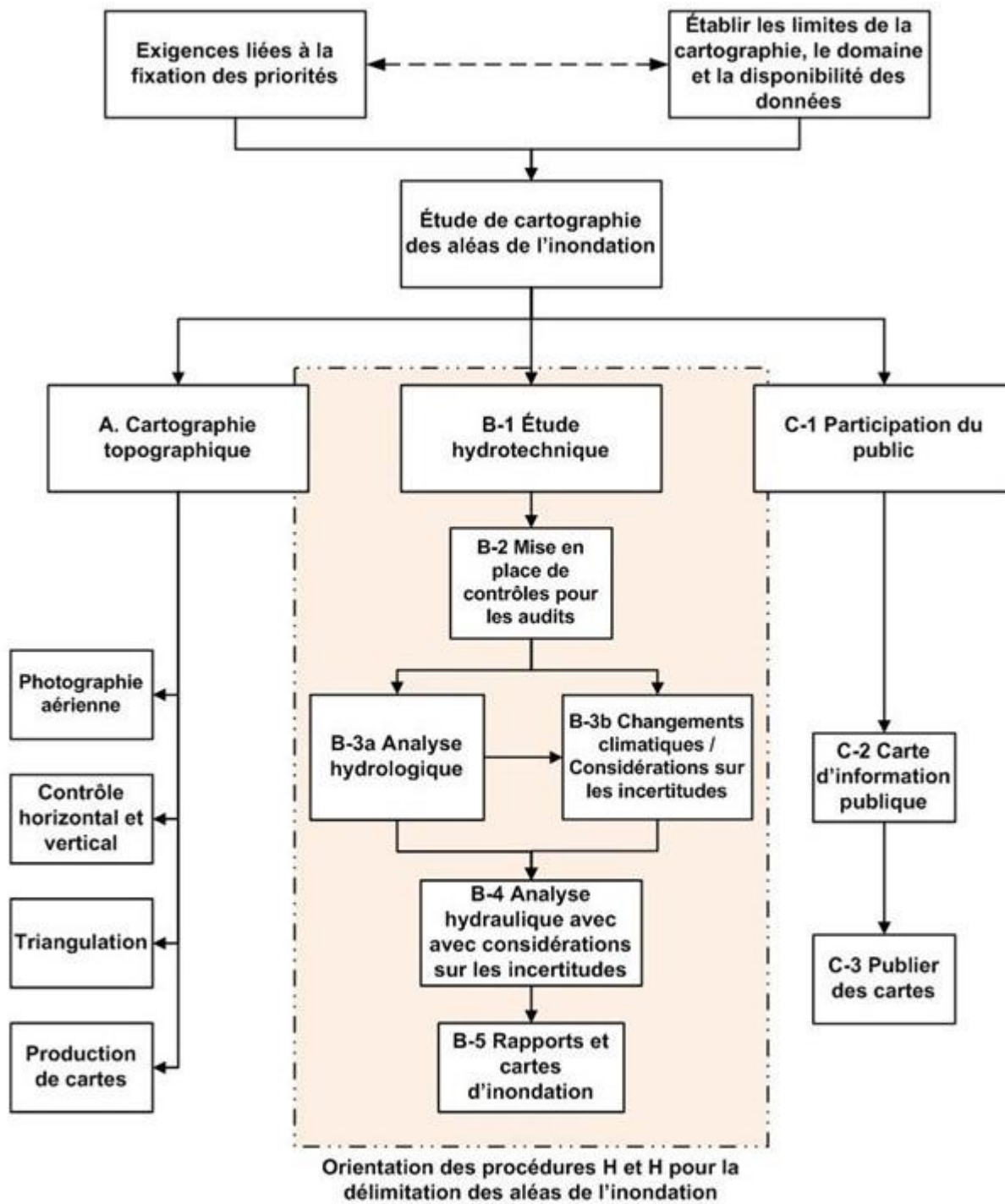


Figure 2.1. Pratiques générales de délimitation des aléas d'inondation

Telle qu'illustrée à la figure 2.1, après avoir défini la portée de l'étude et déterminé les sources de données, une étude de délimitation des aléas d'inondation progresse selon trois volets : A) cartographie topographique; B) étude hydrotechnique, discutée dans ce document; et C) participation du public. Ces trois voies sont interreliées. Dès le début, les parties concernées et les titulaires de droits doivent comprendre le processus de délimitation des aléas d'inondation et son interprétation de manière continue et transparente, car le public peut fournir des informations précieuses pour guider les études sur les risques d'inondation en fonction des connaissances et des priorités locales. L'étude hydrotechnique s'appuie sur les informations tirées du tracé de cartographie topographique. L'évaluation de la crue de conception doit inclure l'occupation du sol actuelle et future et les paramètres météorologiques avant les analyses hydrauliques/hydrodynamiques et l'étude doit tenir compte de la plage d'incertitude.

La dernière étape du processus des études hydrotechniques rapporte entièrement les résultats, comme indiqué sur des cartes qui sont expliquées aux parties concernées, telles que les titulaires de droits, les planificateurs de l'occupation du sol, les responsables des urgences et le public, en lien avec le processus d'engagement du public. Ce troisième volet doit expliquer clairement les méthodes et les limites d'incertitude ainsi que les mesures d'atténuation possibles pour les délimitations des aléas d'inondation afin que tous comprennent. Les sessions d'information publiques, telles que les journées portes ouvertes, les webinaires publics et les ateliers, sont des occasions possibles où les spécialistes peuvent répondre aux questions pour aider à expliquer plus largement le processus de délimitation des inondations et peuvent avoir lieu tout au long de l'étude, et pas seulement à la fin.

Ce document se concentre sur le parcours des études hydrotechniques. Pour obtenir des conseils sur la fourniture et la diffusion des cartes topographiques et de données géospatiales, il est possible de consulter le document de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » intitulé « Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables ». Des conseils détaillés sur l'engagement des titulaires de droits, des parties concernées et du grand public sont disponibles ailleurs.

Les procédures pour les études hydrotechniques sont présentées à la figure 2.2.

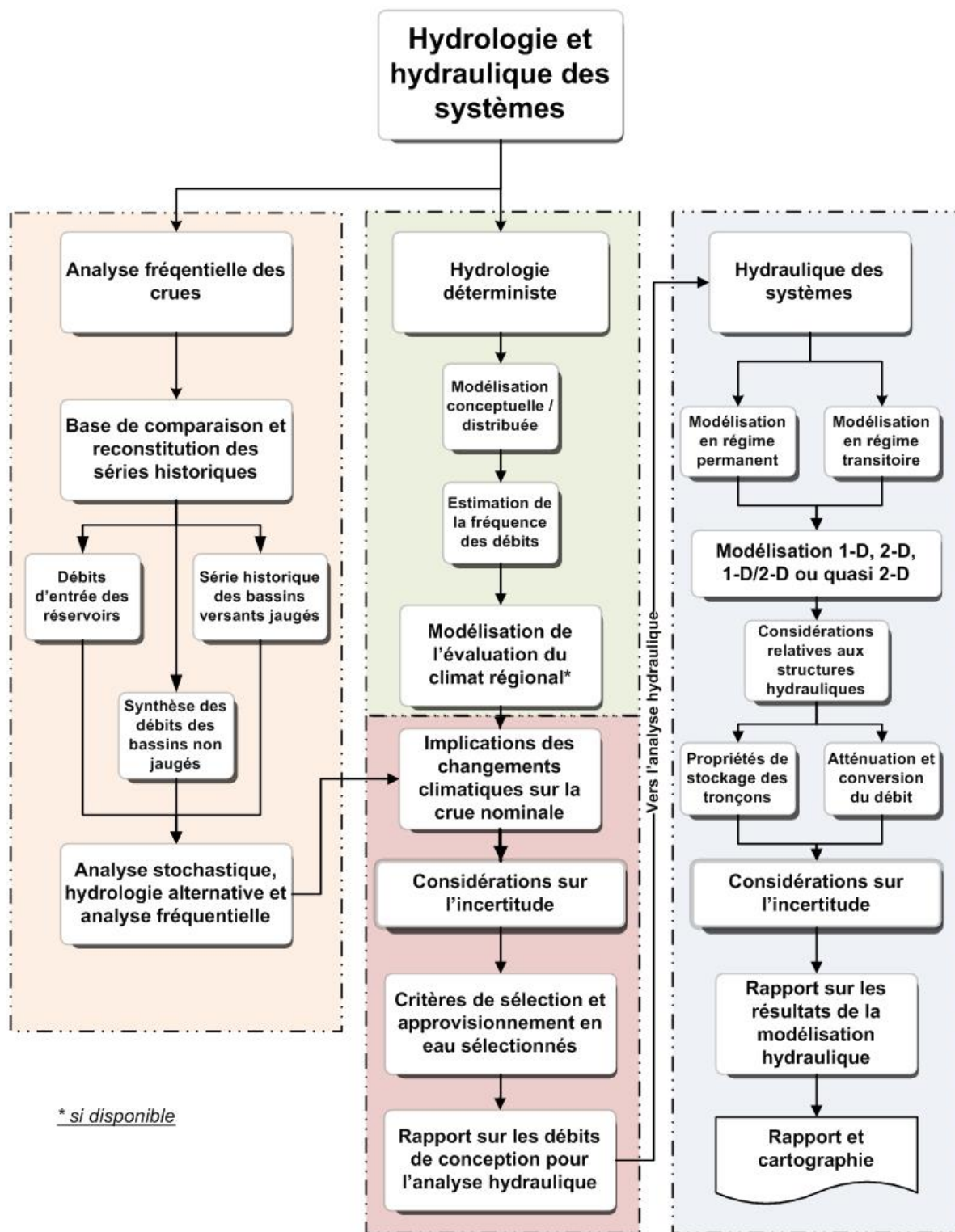


Figure 2.2. Procédures hydrologiques et hydrauliques du système

L'évaluation du débit de conception ou du niveau d'eau suit une analyse fréquentielle initiale des crues (AFC) ou une approche hydrologique déterministe initiale. Il peut utiliser les deux comme vérification des calculs. La plage résultante des débits de pointe de conception ou des

hydrogrammes est utilisée dans les analyses hydrauliques pour déterminer les profondeurs, les vitesses et la plage d'étendue des inondations sur le site étudié en fonction des probabilités de chaque débit de pointe ou hydrogramme. Si nécessaire, l'analyse hydraulique prendra également en compte les effets liés à la glace, les effets du vent et des vagues et/ou les effets géoristiques pour délimiter les aléas d'inondation à cartographier.

L'approche AFC examine les données historiques de débit ou de niveau d'eau, si elles sont disponibles sur le site étudié. Si nécessaire, la démarche synthétise les données du site permettant une analyse de celles-ci. La synthèse pourrait impliquer la suppression des effets des réservoirs de régularisation. Dans les régions non jaugées, il sera nécessaire que l'analyse hydrologique transpose les données historiques du bassin versant au site étudié. Le chemin de l'AFC inclut des analyses fréquentielles et d'incertitude de la série chronologique. La section 4.4 de ce document décrit les différents types d'analyses fréquentielles des crues et les procédures avec plus de détails techniques que ceux donnés à la section 2.2.1. Sur la base des critères de sélection et des données disponibles, cette approche se termine par une évaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur les crues de conception, tels que décrits à la section 4.0. Les résultats de ces analyses peuvent être comparés aux résultats de n'importe quelles études précédentes, à d'autres méthodes de cette approche ou aux résultats de l'autre approche, soit l'hydrologie déterministe.

L'approche hydrologique déterministe utilise une modélisation hydrologique ou une simulation géostatistique pour l'analyse hydrologique. Les deux méthodes peuvent définir un débit de conception ou un ensemble de débit pour différentes probabilités. La section 5.5 de ce document explique l'utilisation de ces procédures de manière plus détaillée qu'à la section 2.2.2.

Les fréquences de débits estimées par le modèle peuvent être comparées à la série de débits estimés avec un modèle régional d'évaluation du climat (section 2.3 ou détails techniques à la section 4.0). Les approches et les procédures visant à prendre en compte les effets des changements climatiques dans l'analyse des aléas d'inondation évoluent. Les professionnels sont encouragés à examiner la littérature scientifique récente pour la région du Canada où ils travaillent. Des approches courantes comprennent des projections climatiques à échelle réduite et une modélisation hydrologique déterministe utilisant un ensemble de simulations, ce qui aidera à déterminer la plage d'incertitude projetée. L'incertitude découle non seulement des conditions climatiques futures variables, mais également des nombreuses sources d'incertitudes du modèle de simulation hydrologique (section 9.0). Comme dans l'approche AFC, un professionnel qualifié est requis et il doit comparer les résultats avec ceux de toutes les études précédentes ou d'autres méthodes et enquêter sur les implications des changements climatiques et de l'incertitude sur les débits de conception.

Les débits de conception résultants sont maintenant prêts à être rapportés avant la prochaine étape d'incorporation dans l'étude hydrotechnique. La prochaine étape consiste à déterminer l'étendue, la profondeur et, selon les critères de certaines juridictions, la vitesse de l'inondation. Un modèle de profil des eaux de surface, soit un modèle dynamique en régime non permanent d'hydrogrammes de débit de conception, simule l'hydraulique des débits de conception. La section 6.0 de ce document explique les modèles hydrauliques avec plus de détails techniques que ceux donnés à la section 2.4.

Le modèle peut calculer les profondeurs d'eau dans une dimension (1D), c'est-à-dire linéairement le long du trajet d'écoulement principal du cours d'eau. Alternativement, le modèle

peut calculer les profondeurs d'eau en tenant compte du débit en deux dimensions (2D). Un jugement professionnel et une compréhension des conditions hydrauliques locales sont nécessaires pour déterminer le type de modèle hydraulique à utiliser.

Dépendamment du site d'étude, l'analyse de délimitation des risques d'inondation peut ensuite considérer les effets des glaces (section 2.5 ou, pour plus de détails, la section 7.0), ou les rives des lacs (section 2.6 ou, pour plus de détails, la section 8.0). L'étude peut alors considérer l'incertitude des résultats : inhérente aux phénomènes naturels, découlant des incertitudes sur les données, les processus analytiques et les paramètres utilisés dans les modèles; afin de déterminer une plage de valeurs pour les résultats, comme expliquée à la section 2.7. La section 9.0 contient plus de détails techniques. Finalement, l'étude produit un rapport et des résultats prêts à être cartographiés, tels que décrits à la section 2.8. La section 10.0 fournit les exigences détaillées pour un rapport qui complète une étude de délimitation des aléas d'inondation dont la qualité est contrôlée.

Les sections et sous-sections suivantes de cette section expliquent les bases de chaque pratique après que la section suivante décrit les exigences en matière de données de manière générale pour les délimitations des aléas d'inondation. Les sections suivantes détaillent les procédures techniques de délimitation des aléas d'inondation.

2.1 Exigences en matière de portée des travaux

Une description de la charge des travaux est incluse ici pour aider les organismes qui contractent des projets de délimitation des aléas d'inondation.

La portée de l'étude doit clairement définir le site de l'étude et l'étendue de la masse d'eau. Il doit donner le critère de crue de projet, tel que défini par la province ou le territoire. Le critère de crue de conception peut être déterminé par une probabilité de dépassement annuel (PDA), une série d'événements PDA ou par un événement historique extrême. La portée devrait également inclure une évaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur les risques d'inondation dans la région et des recommandations sur la manière dont ces impacts devraient être pris en compte dans l'étude. La portée de l'étude doit inclure une évaluation, dans les limites de précision déterminées par les incertitudes de l'étude, de la manière dont le critère d'inondation de conception identifié changera au cours de cette période (p. ex., changement du niveau d'inondation vertical pour un événement PDA de 1%, ou changement de PDA pour un niveau d'inondation vertical fixe. La portée doit considérer des processus d'inondation à l'origine des crues historiques, par exemple si les crues sont dues à la pluie, la fonte des neiges, aux effets du vent et des vagues, aux inondations causées par les embâcles ou à une combinaison de ces événements. Cela définira l'approche pour l'évaluation de l'inondation à des fins de conception.

Dans de nombreuses régions du Canada, les processus menant aux événements d'inondations sont complexes et souvent corrélés, mais cette structure de corrélation peut s'effondrer dans un climat changeant. Par conséquent, dans certains cas, il est essentiel de considérer les probabilités conjointes plutôt que le produit des probabilités individuelles (ce qui entraînerait une sous-estimation des probabilités d'événements réels). La section 5.4.6 couvre les détails techniques des analyses conjointes de probabilité dans le contexte hydrotechnique.

La portée des travaux doit clairement définir les différents rôles de ceux qui sont impliqués.

L'étendue des travaux doit être proportionnée aux fonds disponibles pour entreprendre les travaux. Une étude approfondie nécessitant des données détaillées est coûteuse et les fonds disponibles limités dictent la priorité et la portée des études. L'occupation des sols des zones soumises à des crues historiques et les conséquences économiques potentielles des inondations peuvent définir le niveau d'analyse. Les zones non aménagées peuvent être moins critiques, tandis que les zones résidentielles et industrielles denses peuvent nécessiter une résolution plus fine de la délimitation des aléas d'inondation.

La portée de l'étude doit inclure les objectifs, le contexte et les informations générales. Des informations claires et précises doivent être fournies sur les aspects suivants :

- L'étendue spatiale.
- La résolution spatiale.
- Les données disponibles et besoins de collecte de données (section 3.0).
- Les engagements communautaires.
- Les exigences relatives aux rapports finaux et aux cartes de délimitation des crues.
- Les dates importantes de livraison des composantes de l'étude.

2.2 Évaluation des crues de conception

Après la collecte de données élaborée à la section 3.0, la procédure suivante consiste à évaluer l'évènement de conception (débit pour les cours d'eau libres ou niveau d'eau pour les inondations liées aux glaces ou au bord du lac) pour le critère réglementaire de la juridiction du site étudié. Des procédures hydrologiques sont utilisées pour évaluer l'évènement de conception. La figure 2.3 illustre une séquence de procédures hydrologiques utilisées pour développer des crues de conception fiables et réalistes pour un critère donné, aboutissant à un rapport documentant les analyses hydrologiques qui ont été entreprises.

La première étape de l'analyse hydrologique consiste donc à définir le critère d'inondation, tel que spécifié par la juridiction, comme l'un des suivants :

- Un seul évènement réglementaire de probabilité de dépassement annuel (PDA)
- Une série d'évènements correspondant à une série PDA
- Un évènement météorologique de probabilité donnée (intensité, pluie, durée)
- Un évènement record historique

La section 5.1 discute plus en détail des critères de conception.

La seconde étape consiste à déterminer la technique d'analyse pour déterminer la ou les valeurs de ce critère, comme un modèle de simulation hydrologique déterministe et/ou AFC, soit une station unique ou des agrégats régionaux d'observation. Les sections ultérieures de la section 5.0 abordent les procédures hydrologiques techniques pour évaluer le ou les évènements de conception.

Une analyse des changements climatiques, telle qu'expliquée à la section 4.0, est la considération suivante dans le processus pour obtenir des évènements de conception finaux

qui reflètent à la fois les conditions environnementales présentes et futures. Le rapport hydrologique présente les résultats sous forme d'évènements de pointe à diverses PDA ou sous forme d'hydrogrammes de débit sur une certaine durée (la section 10.0 détaille les exigences du rapport hydrologique).

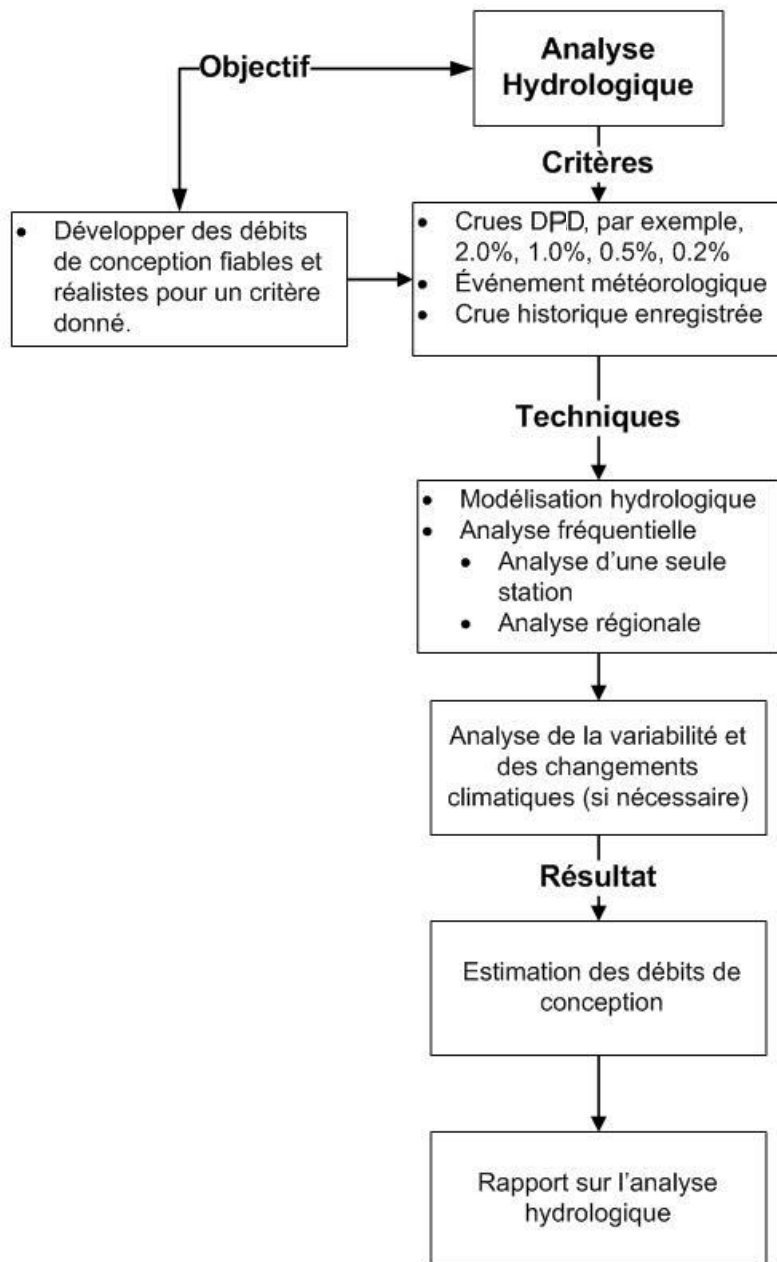


Figure 2.3. Focus sur les exigences hydrologiques dans la délimitation des aléas d'inondation

Le choix de la technique à utiliser (voir la section 5.3), y compris le processus d'identification et de mise en œuvre des procédures hydrologiques qui conviennent, est souvent itératif. Une méthode préférée peut être identifiée, mais découverte plus tard comme étant irréalisable en raison de données insuffisantes ou en raison de facteurs externes affectant l'hydrologie (p. ex.,

des changements de l'occupation/la couverture du sol) pendant la période d'enregistrement. Dans de tels cas, une autre méthode peut devoir être mise en œuvre.

La figure 2.4 résume les considérations lors de la détermination de la technique hydrologique à utiliser en fonction des besoins de l'évènement de conception et des utilisations, ainsi que des données disponibles. La figure indique également les critères de la technique.

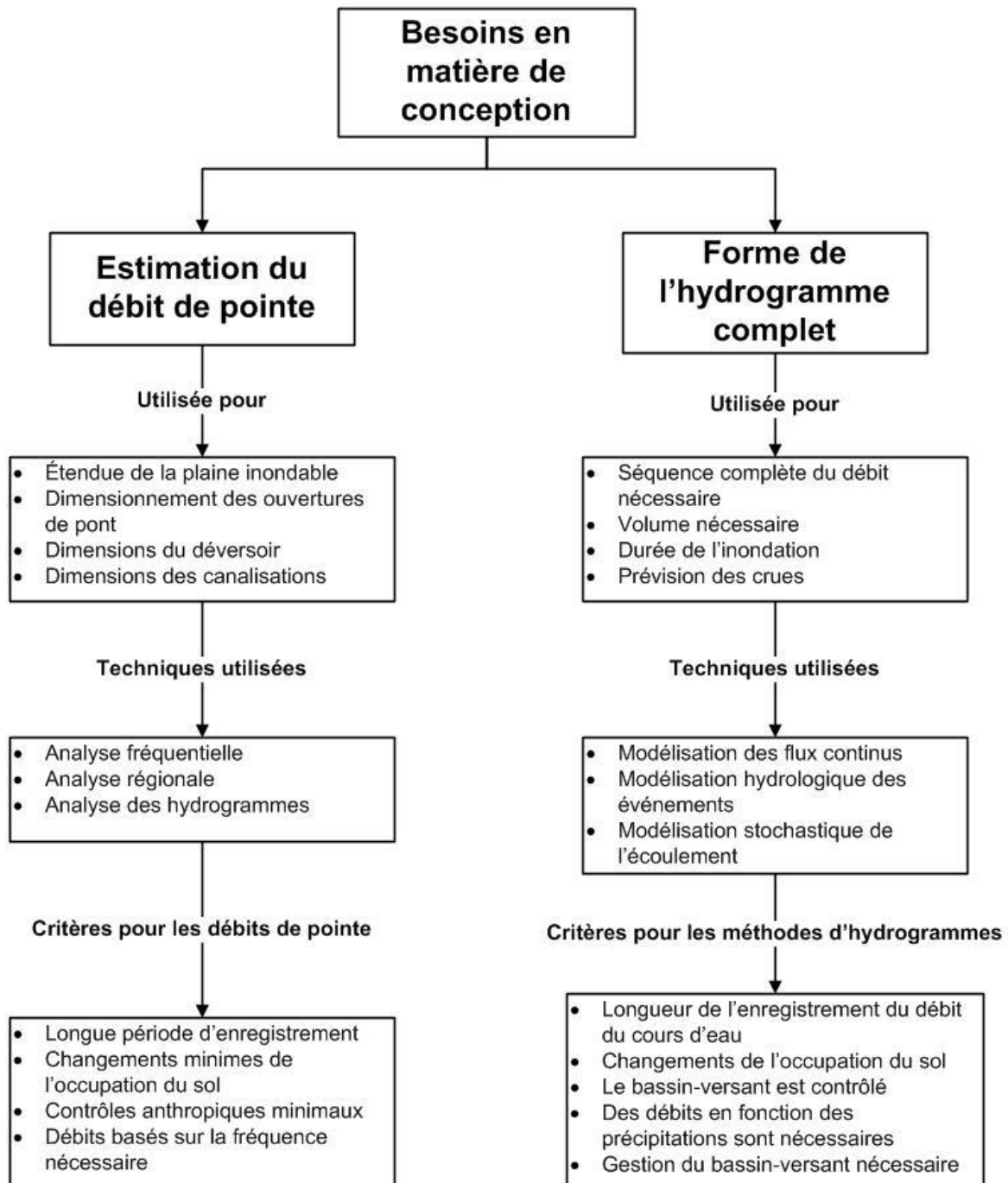


Figure 2.4. Méthodes de conception hydrologique.

Plusieurs procédures peuvent être utilisées pour valider les résultats de l'étude hydrologique de la procédure « préférée ». Par exemple, un débit AEP obtenu à partir d'un modèle hydrologique peut être validé en comparant le débit avec les résultats correspondants d'une analyse fréquentielle d'inondation ou en l'évaluant par rapport à des événements observés connus ou en comparant le débit avec les résultats d'un modèle régional.

2.2.1 Analyse fréquentielle des crues

L'analyse fréquentielle des crues (AFC) utilise des techniques statistiques pour déterminer les probabilités d'une série d'événements observés, qu'il s'agisse de débits instantanés, de débits journaliers ou de niveaux d'eau. La AFC exige de données hydrométriques d'une longueur et d'une fiabilité des données suffisantes. La figure 2.5 présente un cadre potentiel pour l'analyse des fréquences, en fonction de la disponibilité des données.

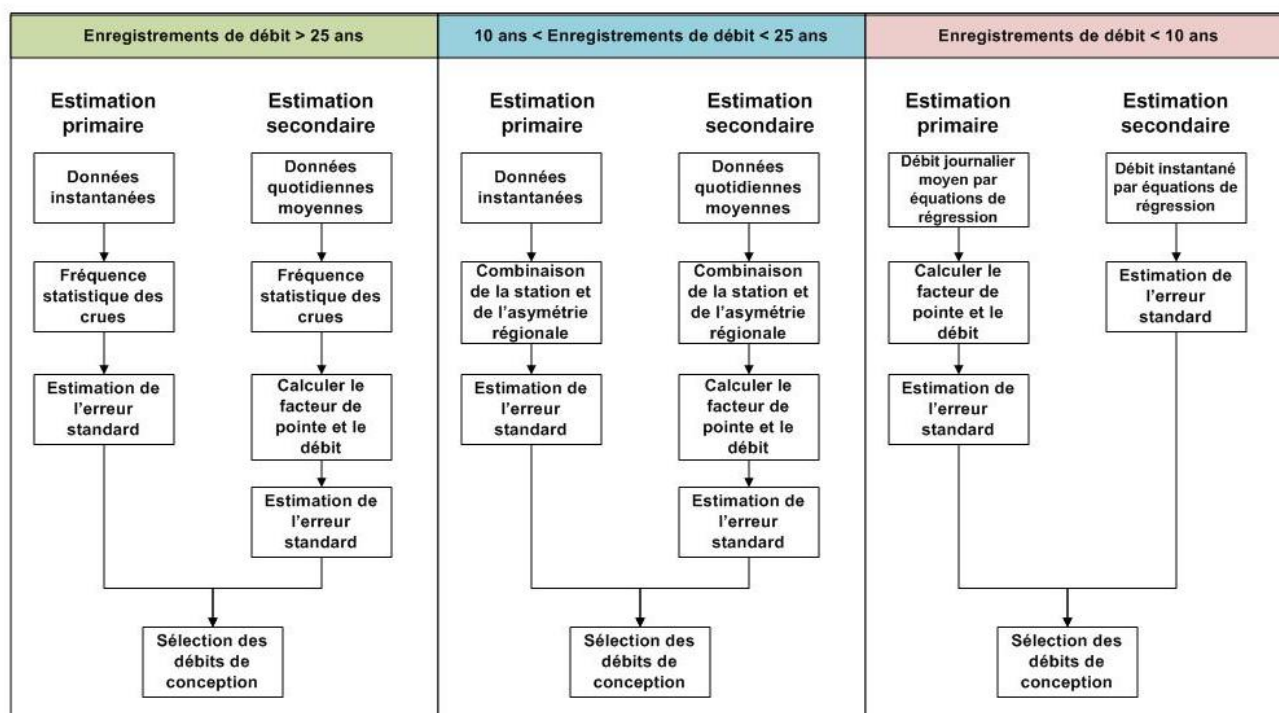


Figure 2.5. Contraintes de la durée de la période de relevés sur les procédures hydrologiques

La figure 2.5 indique les procédures hydrologiques primaire et secondaire qu'un professionnel qualifié utiliserait typiquement en fonction de la longueur des données enregistrées sur le débit (ou le niveau d'eau) disponibles. Lorsque la taille de l'échantillon est trop courte, c'est-à-dire que la durée de la période des relevés est inférieure à celle recommandée à la figure 2.5, la durée peut être prolongée en considérant d'autres données provenant de bassins versants ou d'emplacements similaires, soit dans le bassin versant de l'étude, soit dans la région élargie contenant le bassin versant ou jauges de niveau d'eau à proximité. La section 5.2 décrit certaines approches possibles pour étendre la durée de la période des relevés et le processus de traitement des débits enregistrés contrôlés. La section 5.4 décrit l'analyse fréquentielle des crues, une méthode hydrologique courante pour les débits ainsi que les niveaux d'eau, en détail techniques. La figure 2.5 comprend également l'utilisation d'une analyse fréquentielle régionale

des crues (AFRC) pour déterminer l'évènement de conception du site étudié. Les évènements historiques peuvent être comparés aux résultats de l'analyse pour validation.

2.2.2 Modélisation hydrologique

Une autre méthode hydrologique courante pour déterminer les débits est la modélisation hydrologique. La figure 2.6 illustre le cadre de modélisation hydrologique. Il définit un modèle hydrologique, quand l'appliquer et quelles sont ses utilisations. Un modèle hydrologique est souvent utilisé pour déterminer les débits dans les conditions futures d'occupation du sol et de météorologie ou lorsque les observations sont insuffisantes pour une AFRC. Elle est spécifique à un bassin versant et nécessite des paramètres décrivant le relief physique du bassin versant. La section 5.5 décrit la modélisation hydrologique en détails techniques.

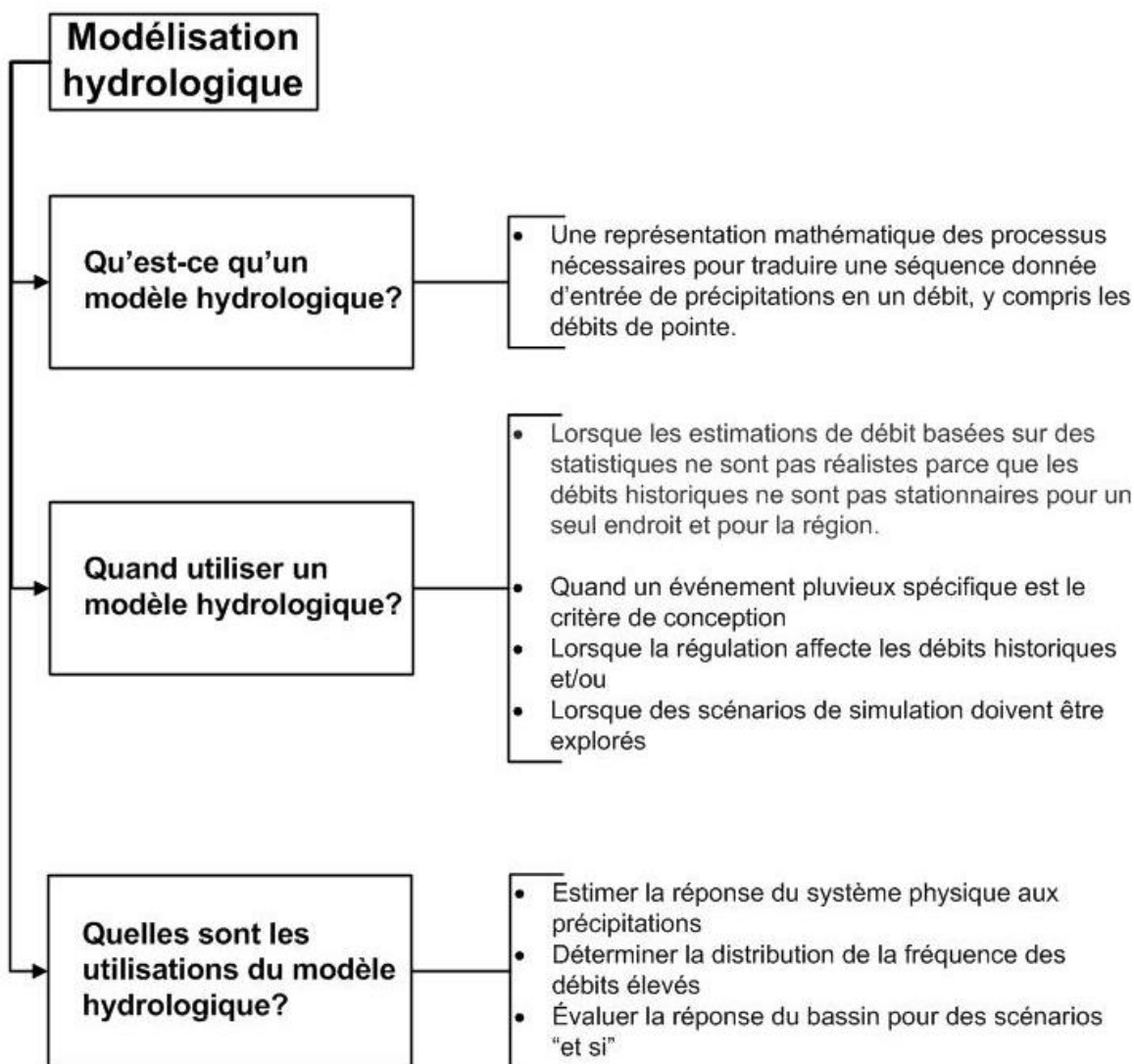


Figure 2.6. Cadre de modélisation hydrologique

Les sections 5.5.2 et 5.5.3 expliquent quand utiliser les différentes formes de ces modèles. Les débits de conception associés à une entrée de pluie de conception peuvent être déterminés à

partir de modèles d'évènement unique ou de modèles de simulation continue. Certains modèles peuvent également être utilisés en mode d'évènement unique ou en mode de simulation continue. La simulation de la fonte des neiges nécessite que le modèle inclue des données sur la température ainsi que sur les précipitations. Le développement de chaque modèle hydrologique nécessite un calage et une validation des ensembles observés d'entrées et de débits pour assurer la meilleure simulation des conditions. Le processus de développement du modèle est détaillé à la section 5.5.5.

2.2.3 Évaluation de l'évènement de conception

Quelle que soit l'approche hydrologique adoptée, qu'il s'agisse d'un AFC à station unique, d'un AFRC, d'un AFC de données produites par un modèle hydrologique ou des données d'un modèle hydrologique d'un évènement de conception, le professionnel qualifié devrait considérer évaluer les résultats en les comparant à ceux d'une différente technique, des relevés historiques et les résultats de bassins similaires à proximité pour déterminer s'ils sont raisonnables. Dans la mesure du possible, un expert externe qualifié devrait réviser les données, les méthodes et les résultats.

Les futurs changements d'occupation du sol modifieront les débits futurs puisque l'infiltration des précipitations dans les sols perméables changera avec l'aménagement des terres. Les taux d'évaporation changent avec les changements de couverture végétale. Ces changements entraînent des différences dans les débits de pointe des rivières. Si ces changements futurs ne sont pas pris en compte, l'autorité responsable doit se rendre compte que la durée de vie de la délimitation des risques d'inondation qui en résultera sera limitée. Un autre cycle de cartographie, commençant par l'évaluation des crues de conception, devrait avoir lieu après des changements majeurs dans l'occupation du sol.

Il est attendu que les changements climatiques transforment certaines précipitations, traditionnellement sous forme de neige, en pluie hivernale, produisent des crues plus précoces et augmentent l'intensité des précipitations. Les dégels au cours de l'hiver augmentent également la probabilité d'inondation par embâcle. Par conséquent, les changements climatiques peuvent également avoir un impact sur l'évaluation des crues de conception.

2.3 L'influence des changements climatiques sur les débits de conception

Les schémas climatiques futurs, y compris ceux qui influencent directement et indirectement les principaux mécanismes nationaux d'inondation, devraient différer considérablement des données historiques. L'« Atlas de la mortalité et des pertes économiques dues aux extrêmes météorologiques, climatiques et hydriques (1970-2019) » (OMM 2021) montre que les évènements météorologiques extrêmes ont augmenté par rapport à 1970. De 1970 à 2019, les aléas météorologiques, climatiques et hydriques ont représenté 50% de toutes les catastrophes, 45% de tous les décès signalés et 74% de toutes les pertes économiques signalées dans le monde. Les taux ont augmenté considérablement chaque décennie au cours de la décennie initiale 1970-1979 à mesure que les impacts des changements climatiques s'intensifiaient.

Le premier rapport publié dans le cadre de « Le Canada face aux changements climatiques : Faire progresser nos connaissances pour agir » (Bush et al. 2019) traite des changements de la température, des précipitations et des océans du Canada, changements qui se sont produits et

qui pourraient se produire à l'avenir. Il explique comment et pourquoi la sécheresse, les feux de forêt et les précipitations extrêmement intenses sont plus susceptibles de se produire à l'avenir.

Deux publications, « *Canada in a Changing Climate: Sector Perspectives on Impacts and Adaptation* » (Warren et Lemmen 2014) et « *Canada's Marine Coasts in a Changing Climate* » (Lemmen et al. 2016) indiquent que l'évolution des régimes de précipitations sous l'effet des changements climatiques peut exposer de nouvelles zones aux effets des inondations et peut augmenter l'ampleur et la fréquence des inondations dans les zones déjà touchées par les inondations. Cependant, tous les endroits au Canada ne verront pas des augmentations de l'ampleur et de la fréquence des inondations fluviales dans certains scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (Gaur et Simonovic 2018).

Il n'existe pas actuellement de pratique d'ingénierie standardisée pour évaluer les impacts des changements climatiques sur les risques d'inondation.

Cependant, les évaluations des risques d'inondation pour les biens et la vie ou la sécurité humaine gagnent à prendre en compte les impacts des futures conditions d'inondation dans un climat changeant à la fois dans les zones intérieures et côtières.

2.4 Modèles hydrauliques numériques

Les modèles numériques hydrauliques simulent les caractéristiques des débits de conceptions telle la profondeur et, dans certaines applications, les vitesses de l'écoulement sur l'étendue du site d'étude.

La figure 2.7 montre les objectifs, les intrants, les techniques et les résultats de la procédure d'analyse hydraulique.

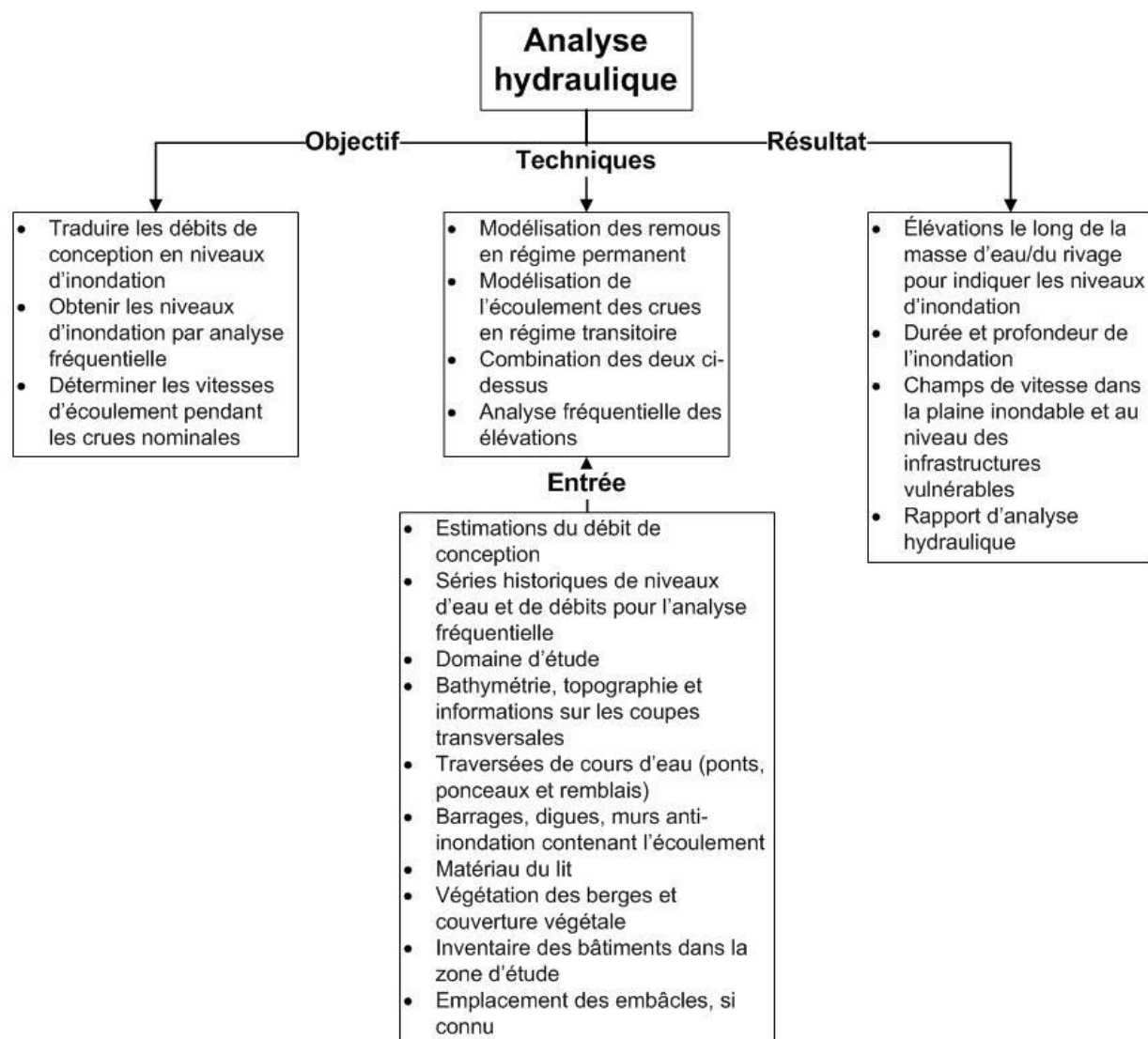


Figure 2.7. Exigences hydrauliques dans la délimitation des risques d'inondation.

2.4.1 Zone inondable secondaire

Un concept important qui a été adopté par certaines juridictions dans le cadre de l'aménagement du territoire dans les zones susceptibles d'être inondées est la division de la zone inondée entre la zone inondable principale et la zone inondable secondaire. Bien que les définitions exactes varient d'une juridiction à l'autre, la zone inondable principale est généralement la zone où les écoulements sont les plus profonds, les plus rapides et les plus destructeurs; la zone inondable secondaire est généralement moins profonde et à des vitesses plus lentes que dans la zone inondable principale. La zone inondable secondaire peut être inondée dans le cadre de l'inondation de conception, mais ne serait pas soumise à des conditions hydrauliques qui rendraient les mesures d'atténuation impraticables ni à des impacts négatifs importants sur les niveaux et les vitesses de l'inondation des zones adjacentes. De nouveaux aménagements dans la zone inondable peuvent être autorisés dans certaines municipalités en fonction des directives locales, qui varient selon la juridiction.

Certaines juridictions au Canada définissent la zone inondable secondaire comme étant les régions de la zone inondable où l'empiètement n'entraînera pas d'augmentation des niveaux d'eau dans la zone inondable principale. Dans d'autres juridictions, la zone inondable secondaire peut être définie comme étant une combinaison de la profondeur et de la vitesse de l'eau. Cette définition ne tient pas compte de l'impact potentiel de l'empiètement sur les niveaux d'eau.

Pour générer les paramètres hydrauliques nécessaires à la définition de la zone inondable principale et de la zone inondable secondaire, il est nécessaire de configurer spécifiquement les modèles hydrauliques utilisés pour produire les cartes d'inondation, comme expliqués à la section 6.0.

2.4.2 Dimensions de modélisation

La plupart des modèles hydrauliques sont basés sur la résolution d'équations par différences finies pour un écoulement de fluide unidimensionnel (1D), bidimensionnel (2D) ou tridimensionnel (3D). Ces équations définissent les principes de la conservation de la masse et de quantité de mouvement dans un fluide. Elles sont parfois simplifiées dans les modèles hydrauliques pour exclure divers termes des équations. Lorsque les calculs considèrent le débit dans une seule direction le long du cours d'eau, le modèle est 1D et peut déterminer les niveaux d'eau de surface à diverses sections transversales du cours d'eau. Lorsque les calculs considèrent l'écoulement dans deux directions horizontales, le modèle est 2D. Bien qu'un modèle 2D puisse déterminer les niveaux d'eau et les vitesses, il nécessite une bathymétrie plus détaillée du canal et de l'espace environnant (p. ex., lidar topographique). Un modèle 3D considère l'écoulement en trois dimensions, les deux horizontales et la verticale.

La plupart des modèles d'inondation fluviale au Canada sont réalisés à l'aide de modèles 1-D. Les modèles 2-D sont utilisés pour des situations plus complexes (p. ex. par exemple, les écoulements de surface, les inondations des rives des lacs, etc.) ou lorsque des informations détaillées sur la vitesse sont souhaitées. Le tableau 2.2 fournit quelques situations générales et des approches recommandées pour la sélection de modèles hydrauliques qui peuvent être considérés pour la cartographie des zones inondables.

Tableau 2.2. Application des modèles hydrauliques 1D et 2D.

Situation	Approche suggérée
Rapport entre la longueur du canal et la largeur de la zone inondable supérieur à 3 : 1.	Modélisation 1D
Les rivières et les zones inondables dans lesquelles les directions et les forces d'écoulement dominantes suivent la trajectoire générale de l'écoulement de la rivière.	
Les cours d'eau à forte pente qui sont fortement influencés par la gravité et présentent de petites zones de débordement.	
Les systèmes fluviaux qui contiennent un grand nombre de ponts/passages de ponceaux, de déversoirs, de barrages et d'autres structures fermées, de levées, de stations de pompage, etc., et dont ces structures ont un impact sur les niveaux et les débits/vitesses calculés du système fluvial.	
Systèmes fluviaux de taille moyenne à grande, où le modèle inclut une grande partie du système (> 150 km).	
Domaines dans lesquels les données de base ne permettent pas de justifier le gain potentiel de l'utilisation d'un modèle 2D.	
Lors de la modélisation d'une zone derrière un système de bermes, de levées ou de digues, et où l'eau peut se déplacer dans de nombreuses directions, non parallèle à la rivière principale, si le système est submergé et/ou rompu.	Modélisation 2D
Baies et estuaires dans lesquels le débit se déplacera fréquemment dans plusieurs directions en raison des fluctuations des marées et des débits fluviaux entrant dans la baie/estuaire à plusieurs endroits et moments.	
Zones et/ou évènements dans lesquels le chemin d'écoulement de l'eau n'est pas complètement connu.	
Cours d'eau fortement sinueux.	
Cônes alluviaux	
Écoulement autour de virages abrupts	
Zones inondables très larges et plates, de sorte que l'écoulement se déverse dans la zone de débordement, l'eau peut emprunter plusieurs voies d'écoulement et avoir des élévations et des vitesses de surface d'eau variables dans plusieurs directions.	
Applications où il est particulièrement important d'obtenir des vitesses détaillées pour l'hydraulique de l'écoulement autour d'un objet, comme une culée de pont ou piles de pont, etc.	

2.4.3 Évaluation du modèle

Un modèle hydraulique (ou hydrodynamique) comprend la géométrie du canal et/ou du rivage, en plus des structures et des conditions de niveaux d'eau aux limites. De plus, des paramètres variables tels que la rugosité et les coefficients hydrauliques sont intégrés. Les débits, les niveaux d'eau, et les conditions de glace de l'évènement ou des évènements de conception sont les différents scénarios que le modèle simulera.

Comme pour tout modèle (p. ex., hydrologique, climatique, hydraulique ou hydrodynamique) le professionnel qualifié devrait valider les résultats avant d'analyser le ou les événements de conception. Après une analyse de sensibilité des paramètres du modèle, afin de voir quels paramètres ont le changement le plus significatif dans les résultats, le modélisateur doit simuler les événements observés pour les comparer aux conditions observées correspondantes. Les paramètres qui simulent les conditions observées doivent être définis dans le modèle pour la simulation du ou des débits de conception. Tels qu'expliqués à la section 6.3, deux ensembles d'observations définissent un ensemble de calage et de validation qui confirme que les paramètres fonctionnent pour une gamme d'observations. Les deux ensembles devraient contenir des conditions de fort débit, dans la mesure du possible.

La section 6.0 fournit les procédures techniques pour la modélisation numérique hydraulique, y compris les exigences en matière de données, une description plus détaillée des modèles, les méthodes de sélection, les exigences de vérification et de rapport spécifiques au rapport hydraulique.

2.5 Inondations liées à la glace

De nombreuses rivières et rives de lacs au Canada sont sujettes aux inondations liées aux glaces, ce qui nécessite des analyses spécifiques pour ces circonstances dans les délimitations des risques d'inondation. Les changements climatiques peuvent modifier l'incidence des inondations liées à la glace à mesure que les hivers se réchaufferont, que la glace se formera plus tard et se brisera plus tôt. Les dégels au milieu de l'hiver pourront devenir plus probables et la glace pourrait être plus mince et plus susceptible de se fracturer et de se bloquer. La délimitation des aléas d'inondation pour les rivières susceptibles d'embâcles nécessite des modifications des procédures hydrologiques et hydrauliques, détaillées à la section 7.0. La section 8.0 traite des inondations liées à la glace sur les rivages de lacs.

Les analyses des rivières qui ont des antécédents documentés d'inondations liées aux glaces, devraient inclure une évaluation des impacts des embâcles sur les niveaux d'eau et les PDA. Les rivières qui n'ont peut-être pas d'antécédents documentés d'inondations liées aux glaces, mais qui présentent des caractéristiques pouvant entraîner des embâcles, doivent être évaluées pour le risque d'embâcle.

Les conditions qui influencent la formation d'embâcles sont :

- Niveaux d'eau au gel;
- Caractéristiques du canal, en particulier les points de blocage connus;
- Caractéristiques de la couverture de glace;
- Régime de rupture (thermique ou mécanique);
- Caractéristiques de la glace qui flotte; et,
- Débit fluvial

Il y a trois étapes principales dans le cycle de vie de la glace fluviale : la formation de la glace, l'épaississement de la glace et la débâcle. La figure 2.8 identifie le potentiel d'embâcle au cours de chacune des trois étapes différentes.

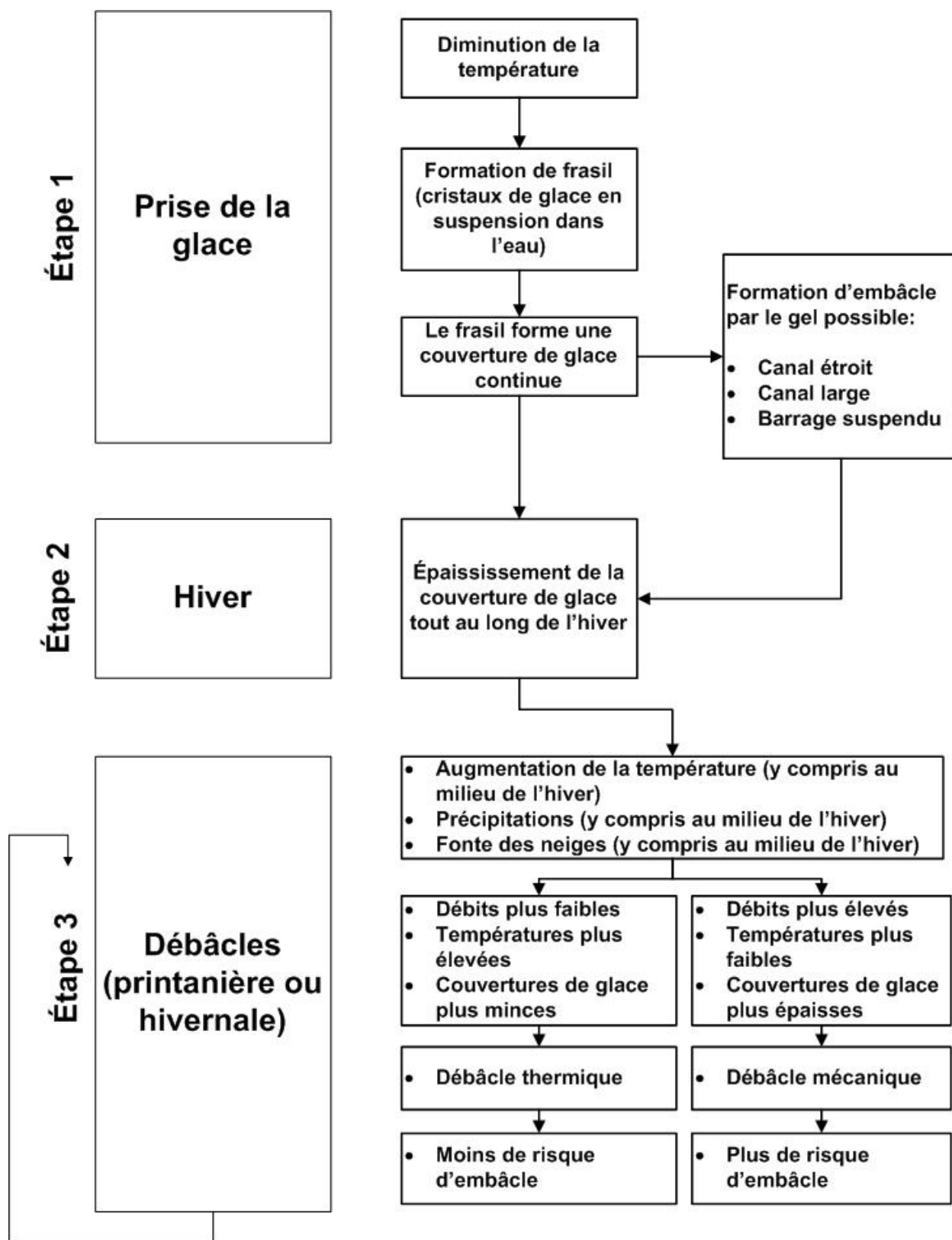


Figure 2.8. Processus typiques menant aux embâcles.

La principale cause des inondations liées aux glaces au Canada est les embâcles, qui peuvent survenir lors de l'englacement, de la débâcle ou du dégel au milieu de l'hiver. La modélisation des inondations liées aux glaces est une discipline technique spécifique, nécessitant l'implication d'experts (Kovachis et al. 2017; Lindenschmidt et al. 2018).

2.6 Inondation de rives des lacs

Les zones situées sur les rives des lacs peuvent être inondées en raison de niveaux élevés d'eau entraînés par des processus hydrologiques (bilan hydrique), des vents forts (ondes de tempête), des effets des vagues et de poussée glacielle. La section 8.0 donne un aperçu des processus de procédures d'analyses des risques d'inondation, de l'intégration des impacts des changements climatiques et de la cartographie des risques d'inondation des rives des lacs. Des conseils sur les procédures applicables aux côtes marines sont fournis dans la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » intitulée « Évaluation des aléas d'inondation côtière pour une analyse basée sur le risque sur les côtes marines du Canada ».

2.7 Incertitudes des résultats de la délimitation des risques d'inondation

Les processus physiques impliqués dans l'évaluation des événements de conception sont intrinsèquement complexes et incertains. De plus, l'incertitude découle des méthodes et des limites associées à l'estimation de l'étendue et de la hauteur des inondations. Par conséquent, les cartes des zones inondables sont sujettes aux incertitudes. Celle-ci découle des quatre catégories de caractéristiques suivantes :

1. Incertitude naturelle ou intrinsèque due au caractère aléatoire et inhérent des processus naturels, variable dans le temps et dans l'espace. Cette incertitude naturelle est difficile à réduire et à quantifier puisque les données sont non reproductibles;
2. Incertitude des données due aux erreurs de mesure, aux erreurs d'instrumentation, aux incohérences et à la non-homogénéité des données, au traitement des données et à la représentativité inadéquate des données dans le temps et dans l'espace. Cette incertitude des données peut être réduite avec de meilleures mesures;
3. Incertitude des calculs due à l'incapacité d'une technique ou d'un modèle mathématique à représenter avec précision le véritable comportement physique, car la technique ou le modèle est peu ou pas du tout adapté, ou le phénomène modélisé présente des instabilités et des non-linéarités qui ne sont pas reflétées dans les approches de modélisation; et,
4. Incertitudes des paramètres dues aux valeurs de paramètres inexacts qui se retrouvent inévitablement dans les données d'essai ou de calage, en raison du nombre limité d'observations et à l'imprécision statistique.

Ces incertitudes doivent être reconnues et, le cas échéant, quantifiées et gérées.

Ces catégories d'incertitudes sont interdépendantes et se chevauchent comme dans le diagramme de Venn, présenté à la figure 2.9 . Le chevauchement résultant des interdépendances réduit l'incertitude globale. Un exemple d'interdépendance est l'impact de l'incertitude naturelle sur la mesure des niveaux d'eau qui, à son tour, réduit les certitudes de l'évaluation des paramètres. Avoir des valeurs incertaines pour les paramètres signifie que le modèle est incertain. Ainsi, la quantification de l'incertitude n'est pas la simple somme ou le produit de l'incertitude de chacun, mais doit également tenir compte de leur interdépendance.

Les résultats de la délimitation des aléas d'inondation sont incertains, en raison du caractère aléatoire de la nature, des incertitudes des mesures des données, des modèles choisis et des approches utilisées pour estimer leurs paramètres.

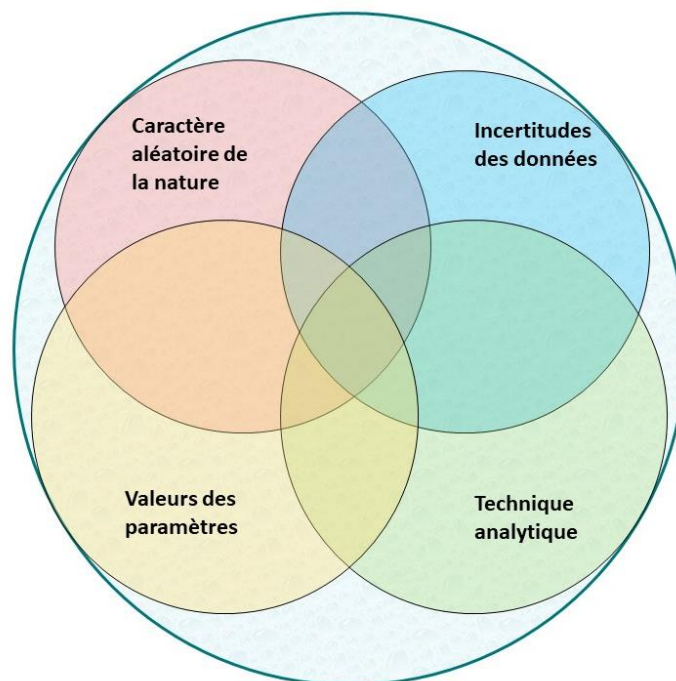


Figure 2.9. Éléments d'incertitude globale.

La section 9.0 décrit certaines approches pour traiter de l'incertitude dans l'évaluation des scénarios d'inondation, en incorporant les changements climatiques et l'utilisation des modèles hydrauliques. La section 9.3 avertit que les changements climatiques et d'occupation du sol peuvent rendre obsolètes les évaluations hydrologiques, hydrauliques, riveraines et des glaces (et les cartes des aléas d'inondation qu'elles appuient). L'examen périodique des hypothèses de modélisation est particulièrement important lorsque les cartes des aléas d'inondation constituent la base de la planification et de la réglementation des risques d'inondation, comme indiqué à la section 9.3. La documentation et la maintenance des données facilitent l'examen périodique de la gestion adaptative. La gestion adaptative nécessite des examens périodiques et permet d'identifier le besoin de procéder à des mises à jour lorsqu'elles s'avèrent nécessaires.

2.8 Détails du rapport

Au fur et à mesure que les travaux sur une étude de délimitation des aléas d'inondation progressent, la documentation devrait suivre. Les rapports techniques pour le site étudié, comme mentionné dans le cahier des charges, peuvent discuter en détail :

- Critère réglementaire;
- Objectif de l'étude (zonage d'occupation du sol, gestion des urgences, etc.);
- Données utilisées;
- Procédures hydrologiques utilisées et les raisons de leur sélection;

- Méthodologie d'évaluation des changements climatiques et recommandations;
- Procédures hydrauliques utilisées et comment elles sont vérifiées;
- Toutes les analyses liées à la glace, à la configuration du vent et aux vagues;
- Incertitude des résultats;
- Référence aux cartes et modèles précédents et à tout changement; et,
- Comment les commentaires des examinateurs ont été traités.

À l'aide des rapports, un autre professionnel qualifié devrait être en mesure de reconnaître les procédures et d'utiliser les données pour reproduire les résultats. Les modèles et les données doivent être fournis afin que lorsqu'une mise à jour est nécessaire, les nouvelles données puissent être intégrées pour mettre à jour la délimitation des aléas d'inondation. La section 10.0 énumère les exigences relatives aux données de base et de sondage, à l'hydrologie, à l'hydraulique, à la glace, au vent et aux effets des vagues.

2.9 Résumé des pratiques générales

En résumé, une étude de délimitation des aléas d'inondation commence par un objectif et un critère réglementaire défini et clairement compris. Les travaux techniques ne seront pas réalisés indépendamment de la communication avec les parties intéressées, les titulaires de droits autochtones, les communautés et le public. La communication est établie dans un premier temps pour aider à définir l'objectif, puis dans un deuxième temps pour la collecte des données, l'explication des procédures et des résultats. Les professionnels qualifiés, conformément à un cahier des charges définissant l'étendue, les critères et les exigences en matière de rapports, utiliseront des procédures hydrologiques pour évaluer les événements de conception, en tenant compte des effets potentiels des changements climatiques. Les procédures hydrodynamiques définiront les aléas d'inondation pour les événements de conception. Les procédures hydrotechniques pourront nécessiter de prendre en compte les effets liés à la glace ou les effets côtiers (vent et vagues) sur certains sites étudiés qui subissent ces impacts d'inondation. Avant le rapport final sur la délimitation des aléas d'inondation, les professionnels qualifiés traiteront de l'incertitude des résultats.

Toutes ces procédures reposent sur la haute qualité des données géospatiales, hydrométriques, météorologiques et non systématiques, comme expliquées dans la section suivante sur les exigences en matière de données.

3.0 EXIGENCES EN MATIÈRE DE DONNÉES

L'étude de délimitation des aléas d'inondation s'appuie essentiellement sur de nombreuses sources de données. Cependant, la disponibilité de celles-ci limitera le type d'analyse possible. Les données informent sur l'approche à adopter à chaque étape de l'analyse, de l'évaluation de l'événement de conception à l'analyse de l'écoulement hydraulique, en passant par les considérations relatives aux effets de la glace, du vent et des vagues et autres facteurs influençant les aléas d'inondation. La qualité des données affecte celle des résultats. Cette section détaille les différentes données requises pour les procédures hydrotechniques qui appuient une étude de délimitation des aléas d'inondation (voir la figure 3.1). Les sections suivantes fournissent des sources de données géospatiales, hydrométriques, météorologiques et non systématiques, ainsi que de brèves explications sur la façon dont ces données sont utilisées dans l'analyse. Chaque section consacrée à une procédure particulière explique plus en détail quelles sont les données requises pour celle-ci et comment elles sont utilisées.

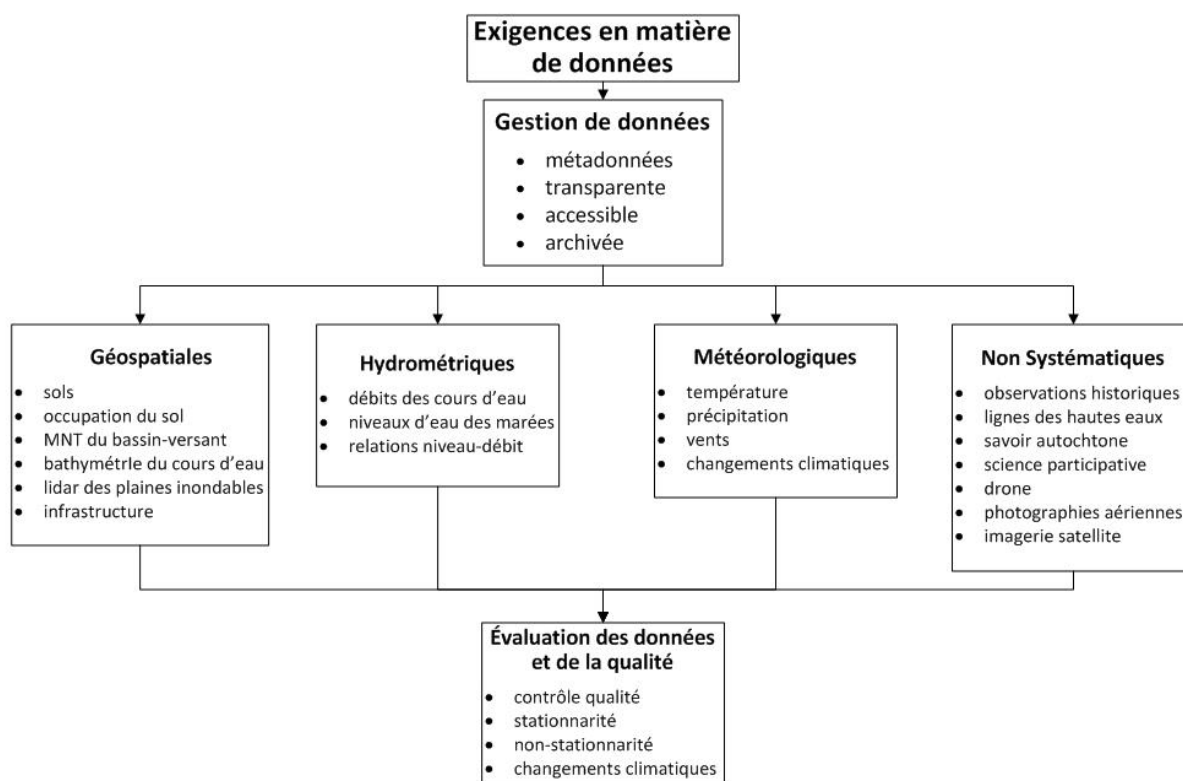


Figure 3.1. Données requises pour la délimitation des aléas d'inondation

3.1 Gestion de données

La gestion des données fait partie intégrante des procédures de délimitation des aléas d'inondation. Non seulement les données doivent être de haute qualité, mais les participants à l'étude et les parties concernées doivent connaître la source et les méthodes de collecte, appelées métadonnées. Dans la mesure du possible, les données doivent être accessibles et transparentes afin que chacun puisse avoir accès aux données, au moins à partir des sources originales. (Le savoir autochtone doit être recueilli, protégé, utilisé et partagé conformément aux principes de propriété, de contrôle, d'accès et de possession des Premières Nations (PCAP ®) –

voir la section 3.5.2). La collaboration entre les Premières Nations, les Inuits, les Métis, le milieu universitaire, les autres organismes gouvernementaux et les consultants augmente lorsque les données sont facilement transférables et accessibles. L'archivage des données est également important pour maintenir la durée de vie et la reproductibilité des résultats de délimitation des aléas d'inondation dans le futur. Les archives de l'étude doivent conserver une copie des données réelles utilisées dans l'étude de délimitation des aléas d'inondation. Les données permanentes détenues par d'autres organismes, telles que les données hydrométriques nationales, peuvent être citées, en reconnaissant que les liens de données peuvent changer au fil du temps, tout comme les données des processus dynamiques. La section 10.0 décrit les détails à inclure dans le rapport sur la collecte et la maintenance des données pour l'étude de délimitation des aléas d'inondation.

3.2 Données géospatiales

Les procédures hydrotechniques nécessitent des données géospatiales, notamment les superficies des bassins versants, les réseaux d'eaux de surface, les données topographiques, les pentes des bassins versants, les pentes des cours d'eau, la bathymétrie, les sections transversales des cours d'eau ou la bathymétrie, les zones lacustres, la couverture de l'occupation du sol, les infrastructures et d'autres caractéristiques hydrologiques. Les systèmes d'information géographique (SIG) peuvent conserver les données dans des couches facilement accessibles liées à des tableaux de données. L'exactitude et la précision des cartes des aléas d'inondation dépendent fortement de la qualité des données géospatiales utilisées.

3.2.1 Réseau d'eaux de surface

La délimitation des réseaux d'eau de surface et des bassins versants peut utiliser le modèle de données du Réseau hydrographique national (RHN) de RNCAN (RNCAN, 2019) pour fournir des données numériques géospatiales sur les lacs, les réservoirs, les rivières et les cours d'eau.

3.2.2 Données pédologiques

Les données pédologiques du bassin versant à l'étude, en particulier la perméabilité du sol, jouent un rôle important à la fois dans les modèles hydrologiques et dans l'analyse fréquentielle régionale des crues (AFRC) afin de pouvoir les transposer à des bassins versants similaires. Les classifications générales des sols sont disponibles dans les couches SIG, telles que les Bases de données Mondiales sur les Sols pour la modélisation des systèmes Terrestres (BMST), ou des cartes imprimées par les organismes agricoles provinciaux. La classification des sols peut aider à déterminer le taux d'infiltration de la fonte des neiges et des précipitations dans chaque zone du bassin versant.

De plus, les matériaux du lit d'un canal ou d'une étendue d'eau affecteront l'hydrodynamique de l'écoulement, de sorte que le professionnel qualifié devra connaître les matériaux du lit : sable grossier ou fin, limon, graviers ou pierres. Les données sur les sols sont également indispensables pour les analyses géomorphologiques étudiant le déplacement des lits des cours d'eau et pour les études de géorisques analysant les risques d'éboulements, de glissements de terrain et de coulées de débris.

3.2.3 Données sur l'occupation du sol

Les données sur l'occupation du sol, qui indiquent la couverture terrestre prédominante dans le bassin versant, qu'il s'agisse de développement à haute densité, de construction à faible densité, de végétation, de forêts ou d'activités industrielles telles que les mines à ciel ouvert, jouent un rôle important tant dans l'élaboration de modèles hydrologiques que dans les analyses régionales de la fréquence des inondations afin de pouvoir les transposer entre des bassins versants similaires. En général, les zones à forte densité ayant des surfaces imperméables génèrent plus de ruissellement de façon rapide, puisque moins de précipitations s'infiltrent dans le sol.

En plus de l'occupation actuelle du sol, il est important de prendre en compte l'occupation future du sol et la couverture terrestre probable pour assurer la longévité de la cartographie de délimitation des aléas d'inondation. Les zones de basses terres d'une zone urbaine, développées selon les cartes des aléas d'inondation, peuvent être soumises à des inondations régulières des sous-sols parce que le système d'égouts est maintenant incapable de gérer l'augmentation du ruissellement intense provenant du développement suburbain ultérieur dans les anciennes zones agricoles en amont. Les incendies de forêt, les infestations d'insectes ou les maladies arboricoles peuvent faire disparaître de grandes étendues de forêt, ce qui peut diminuer également la perméabilité, l'infiltration et l'évapotranspiration de cette partie du bassin versant. Il en résulte un ruissellement accru et intense, en plus des risques de coulées de boue et de débris dans les bassins versants escarpés. Une exploitation forestière mal gérée et le défrichage de bandes de terrain dans les bassins versants forestiers peuvent avoir le même effet. D'autres activités industrielles, comme l'exploitation minière, ont également un impact sur le ruissellement et les aléas d'inondation. Le drainage ou la perte de zones humides, de marais et de tourbières peut avoir un impact considérable sur les caractéristiques d'inondation d'un bassin versant, car les zones humides atténuent les débits de pointe, emmagasinant l'eau pour la restituer plus tard, entre autres avantages écologiques.

Les cartes topographiques récentes, les données SIG (p. ex., Commission de coopération environnementale 2020), les photographies aériennes et les données du zonage des villes fournissent des données de haute qualité sur l'occupation du sol à des résolutions fines. L'occupation future du sol intégrée dans les lois municipales, provinciales et territoriales, les plans de développement approuvés et proposés, ainsi que les codes et règlements de zonage sont une source de changements planifiés de l'occupation du sol. Les changements non planifiés de l'occupation du sol, tels que les feux de forêt, les parasites et les maladies arboricoles, sont imprévisibles et introduisent une incertitude dans les délimitations des aléas d'inondation aux endroits où ils se produisent.

3.2.4 Données topographiques et bathymétriques

Le modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant à l'étude est important non seulement pour l'évaluation du débit de conception, mais aussi pour l'acheminement du débit dans le canal d'écoulement, l'estimation du jet de vague sur la rive et la cartographie des zones inondables des rives d'un lac. Le « Guide d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par un lidar aéroporté » (RNCAN et SPC 2018) et le « Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables » (RNCAN et SPC 2019) fournissent des conseils sur la collecte et l'utilisation des données lidar. Les vols lidar qui recueillent des données bathymétriques sur les rivières et les lacs doivent être effectués lorsque le niveau d'eau est le plus bas possible. La bathymétrie peut être collectée par des levés sonar en bateau. Les données

résultant des deux méthodes de collecte doivent s'imbriquer le long du bord de l'eau pour décrire le terrain sous une gamme complète de niveaux d'eau.

La couche SIG du MNT du bassin versant, compilée à partir de cartes topographiques, de SIG locaux, d'orthophotographies et de données lidar disponibles, est importante dans les modèles hydrologiques, car elle définira l'étendue du bassin versant, la pente et le profil des cours d'eau du bassin versant et leur emplacement. Ces paramètres sont également nécessaires pour déterminer la similitude hydrologique des bassins versants en amont des stations de jaugeage.

Les modèles hydrauliques qui estimeront l'étendue, les profondeurs et les vitesses des crues de conception nécessitent une topographie (p. ex., lidar) du littoral et une bathymétrie des lits des canaux et des zones inondables. La disponibilité de ces données déterminera souvent le choix du modèle hydraulique et peut nécessiter des relevés sur le terrain pour obtenir les détails nécessaires pour un géo maillage ou des coupes transversales du canal et des zones inondables.

3.2.5 Données sur les infrastructures

Les infrastructures, telles que les réservoirs, les bassins de résidus, les bassins de rétention d'eaux pluviales, les ponceaux, les ponts, les bermes, les remblais, et les digues, influencent les débits et les niveaux d'eau. Les relations entre le niveau (élévation de l'eau), le volume de stockage et le débit des réservoirs, des bassins de résidus et des bassins de rétention d'eaux pluviales sont nécessaires pour évaluer les paramètres pour le routage des modèles hydrologique ou hydraulique afin de déterminer le débit de conception. Les plans ou les relevés sur le terrain indiquant les dimensions des ponceaux et des piliers de pont, les distances entre les piliers de pont, le revêtement des bermes, les remblais et les digues permettent aux modèles hydrauliques du canal d'écoulement de déterminer l'étendue, la profondeur et les vitesses des inondations.

3.3 Données hydrométriques

Les données hydrométriques sont des données systématiques essentielles pour établir le débit de conception. Elles comprennent les débits instantanés et moyens quotidiens des cours d'eau et les niveaux d'eau mesurés à l'aide de stations hydrométriques.

3.3.1 Débits des cours d'eau et niveaux d'eau

La disponibilité des données hydrométriques est fondamentale pour choisir les procédures hydrologiques qui conviennent et pour établir des débits de conception précis. Les données hydrométriques constituent la base de l'AFC et sont également indispensables pour la vérification des modèles hydrologiques et hydrauliques. Les niveaux d'eau peuvent constituer les conditions limites des modèles hydrodynamiques.

En plus des stations hydrométriques localisées sur le cours d'eau à l'étude, les procédures hydrologiques peuvent utiliser des stations hydrométriques d'une région hydrologiquement similaire; par exemple, les études sur les cours d'eau non jaugés comprendront généralement des données provenant de cours d'eau jaugés voisins dans des bassins versants similaires. Un bassin versant est hydrologiquement similaire lorsqu'il présente des précipitations, une superficie, une pente, une orientation et une couverture terrestre similaires. Un bassin versant avoisinant n'est pas similaire s'il ne répond pas à ces caractéristiques et les données doivent être utilisées avec prudence. Une analyse de régression régionale peut établir une relation avec ces facteurs et les débits jaugés dans la région afin d'estimer les débits des sites non jaugés.

Les données hydrométriques canadiennes sont disponibles via les Relevés hydrologiques du Canada (2023), des organismes provinciaux et d'autres sources telles que les entités responsables des centrales hydroélectriques et les compagnies privées. Les sources potentielles de données hydrométriques devraient faire l'objet de recherches. Les métadonnées sur les stations devraient être enregistrées et inclure les éléments suivants :

- Localisation;
- Durée de la période des relevés;
- Régime hydraulique;
- Période des relevés;
- Système de référence;
- Fournisseur des données;
- Horaire d'opération (p. ex., continu, quotidien);
- Conditions d'écoulement (sous la glace, à la débâcle, affectées par les barrages de castors, végétation, etc.);
- Commentaires (p. ex., les relevés ont été révisés); et,
- Aire de drainage en amont de la station hydrométrique.

3.3.2 Données sur les niveaux d'eau des marées

Des données sur les niveaux d'eau mesurés et les composantes de la marée peuvent être nécessaires pour les études de délimitation des zones inondables près du littoral maritime. Les données sont disponibles auprès du Service hydrographique du Canada (2021b), qui exploite un réseau de stations le long du littoral maritime et des Grands Lacs du Canada. Relevés hydrologiques du Canada exploite également un réseau de stations dans les lacs intérieurs.

Les données sont généralement utilisées pour examiner les ondes de tempête historiques, déterminer le niveau de référence des marées et soutenir les efforts de modélisation numérique. Pour les études sur les inondations riveraines, le niveau de la mer agit comme une condition limite en aval qui influence les niveaux d'eau dans la rivière.

3.3.3 Relations niveau-débit

Les techniciens en hydrométrie développent des relations hauteur-débit lorsque les niveaux d'eau observés (hauteur) sont utilisés pour obtenir des estimations du débit sur un site. En général, lorsque des données de débit d'un cours d'eau sont disponibles, une relation hauteur-débit est également disponible auprès de la même source. La révision des changements dans les relations au fil du temps est utile pour comprendre les incertitudes dans les données de débit, tout comme l'identification du degré d'extrapolation à partir du débit mesuré le plus extrême.

L'établissement d'une nouvelle station hydrométrique ou l'estimation des débits à partir de diverses sources sur les niveaux d'eau (voir la section 5.2) nécessite l'élaboration d'une nouvelle relation hauteur-débit. Les mesures de débits et de profondeurs d'eau, ainsi que « l'ajustement de la courbe » nécessaire au développement de la relation, requièrent des compétences et sont sujettes à des incertitudes.

Les relations hauteur-débit sont généralement spécifiques à l'écoulement en eau libre, et peuvent changer au fil du temps ou devenir non pertinentes dans des conditions d'embâcles, de déplacement des lits, ou de changement des conditions de végétation ou de débris. La relation entre le niveau d'eau et le débit dans des conditions de débit de crue peut être particulièrement

incertaine en raison de l'extrapolation, de la perte ou de l'endommagement des équipements de mesure, du débordement ou de la rupture des protections contre les inondations et dans des cas extrêmes, de l'avulsion qui modifie les trajets d'écoulement dans le canal du cours d'eau ou la zone inondable.

Les procédures d'évaluation du débit de conception, les procédures hydrauliques et les analyses d'embâcles peuvent s'appuyer sur les relations hauteur-débit en eau libre et sous la glace, comme indiqué dans les sections pertinentes.

3.4 Données météorologiques

Les données météorologiques peuvent être requises dans les procédures d'estimation des débits futurs dans le cadre des changements climatiques et pour les méthodes de simulation telles que la modélisation hydrologique et les modèles d'ondes de tempête et de la glace. Les données météorologiques incluent des données sur la pluie, la chute de neige, la pression barométrique, la température, l'évaporation, le nombre de jours au-dessus/en dessous de zéro, le vent et d'autres données. Des données météorologiques fiables sont nécessaires pour les analyses hydrotechniques.

3.4.1 Données historiques de température et de précipitations

Les données météorologiques historiques sont disponibles pour téléchargement à un pas de temps horaire, quotidien ou plus long auprès du ECCC pour 8737 stations à travers le Canada, incluant approximativement 1566 stations actives (ECCC 2021a). D'autres sources de données météorologiques qui ne sont peut-être pas intégrées à la base de données du ECCC peuvent comprendre les gouvernements provinciaux, les municipalités locales et régionales, les autorités/districts de conservation, organismes de bassins versants et autres entités de gestion de l'eau, les organisations environnementales non gouvernementales (ONG) et les citoyens scientifiques.

Des produits hybrides intéressants peuvent être le produit de CaPA (Canadian Precipitation Analysis). Ces données peuvent être utilisées comme conditionnement météorologique pour des modèles hydrologiques à plus grande échelle et fournissent un produit interpolé robuste.

Les données pluviométriques radar sont utiles pour identifier la distribution spatiale des événements pluvieux. Cela peut être particulièrement utile lors du calage ou de la validation des modèles hydrologiques à l'aide d'événements pluvieux spécifiques. Les données sur la couverture de neige, notamment l'épaisseur, la masse volumique et l'équivalent en eau de la neige, sont souvent nécessaires pour la modélisation hydrologique. Les réseaux de mesure actuels sont relativement rares en raison du coût et de la complexité d'utilisation des instruments in situ couramment utilisés, bien que cette situation puisse s'améliorer avec la venue de nouvelles technologies de télédétection à faible coût (voir section 3.5).

Le but de l'utilisation d'un événement de pluie historique dans le calcul des inondations est de générer un débit simulé pour un événement spécifique. Plusieurs distributions d'événements de pluie et de précipitations peuvent également être développées pour générer un débit simulé, comme expliqué à la section 5.5.

3.4.2 Réseau de surveillance des changements climatiques et données de modélisation

ECCC maintient un réseau de surveillance climatique multi-décennal et a participé à des exercices de modélisation climatique coordonnés qui ont permis de produire des scénarios de changements climatiques pour le Canada et à l'échelle mondiale. Récemment, ECCC a créé le Centre canadien des services climatiques (CCSC) afin de faciliter l'accès aux informations, données et outils climatiques régionaux qui peuvent être utiles pour soutenir les procédures de délimitation des aléas d'inondation. D'autres informations climatiques régionales proviennent de sources telles que Ouranos, ClimateWest et le Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC), ainsi que des universités et consultants régionaux.

3.4.3 Courbes intensité-durée-fréquence

Les courbes intensité-durée-fréquence (IDF) fournissent des données d'entrée aux modèles hydrologiques, dont la plupart dans un contexte urbain, en reliant la distribution locale des pluies à une PDA de conception. Les courbes IDF pour plusieurs sites sont disponibles auprès de l'ECCC et sont dérivées des données de précipitations récentes (ECCC 2021b). Les courbes IDF pour les périodes de relevés précédentes peuvent être ajustées pour refléter les changements d'intensité des pluies due aux changements climatiques en utilisant des procédures établies (CSA 2019, ClimateData.ca 2022).

3.5 Données historiques non systématiques

Les relevés historiques fournissent des détails sporadiques qui peuvent être utilisés pour augmenter la période de relevés hydrométriques systématiques (voir la section 5.2.4) et fournir des données coïncidentes pour la vérification des modèles hydrologiques, hydrauliques, de glace et d'ondes de tempête. Dans de nombreux endroits, les niveaux d'eau historiques deviennent la ligne de risque d'inondation réglementaire. Dans certaines juridictions au Canada, l'ensemble des zones inondables est défini et le développement guidé, selon des lignes d'inondation basées sur l'historique. De plus, il existe des programmes informatiques qui permettent la saisie d'informations non systématiques pour ajuster les analyses de débit basées sur la fréquence. Les documents historiques comprennent des journaux et des comptes médias vidéo, des documents d'églises, de la GRC, des responsables des urgences municipales et des journaux archivés officiels de la Baie d'Hudson. De plus, d'autres sources de données non systématiques sont également disponibles, comme indiqué dans les sous-sections suivantes.

3.5.1 Lignes des hautes eaux

Les lignes des hautes eaux sont des preuves physiques de l'étendue des inondations, y compris les débris, les dépôts de sédiments, les taches, les cicatrices sur les arbres et les dégâts des eaux. Les équipes d'arpentage peuvent documenter ces preuves physiques pour déterminer l'étendue et la profondeur approximatives de l'inondation. Cependant, il n'est pas toujours possible de déterminer le moment précis de l'inondation maximale ou le débit maximal correspondant. Dans certains cas, les lignes historiques des hautes eaux sont devenues les lignes réglementaires des hautes eaux.

3.5.2 Savoir autochtone

Pour de nombreux bassins versants, les communautés autochtones ont connaissance des crues, des processus de formation des embâcles et des relations entre le débit et l'occupation du sol.

Lors de la collaboration avec les communautés autochtones, toutes les données ou informations sur les communautés autochtones doivent être collectées, protégées, utilisées et partagées conformément aux principes de propriétés, de contrôle, d'accès et de possession des Premières Nations (PCAP ®) (Centre de gouvernance de l'information des Premières Nations, 2022). Si les connaissances autochtones sont communiquées par le biais du projet à un public plus large, la communication doit s'aligner sur les souhaits des communautés autochtones.

3.5.3 Science citoyenne

Les téléphones portables produisent des photographies à haute résolution qui sont généralement horodatées et géoréférencées. Les citoyens peuvent photographier et enregistrer des vidéos des zones inondées, qui peuvent être interprétées par les spécialistes pour délimiter l'étendue des inondations. L'utilité des données dans les procédures hydrologiques dépendra de la capacité à traduire les observations en estimations du niveau d'eau. Les rivières et les rives peuvent être des zones très dangereuses, en particulier lors d'inondations. Les citoyens sont donc encouragés à rester à une bonne distance des rives, des structures riveraines et des ponts.

Plusieurs initiatives au Canada mobilisent des citoyens scientifiques, principalement en recueillant et en soumettant des données environnementales et écologiques via les téléphones mobiles et Internet. Des exemples actuels comprennent des rapports sur les tremblements de terre par l'intermédiaire de Ressources naturelles Canada (RNCAN 2017) et le Rapport sur les impacts agroclimatiques d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC 2017).

Aux États-Unis, le projet d'identification des phénomènes météorologiques près du sol (*Meteorological Phenomena Identification Near the Ground* [mPING]) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (NOAA 2017) a produit une application mobile qui permet aux citoyens scientifiques de soumettre des rapports sur les événements météorologiques et physiques, y compris la pluie, la neige, la coulée de boue et les inondations. Les données sont ensuite filtrées et utilisées pour des observations satellitaires de confirmation au sol.

Les autres sources de données utilisables comprennent les publications sur les réseaux sociaux et le partage de photos ou de vidéos sur les inondations et autres catastrophes. Il existe également des initiatives visant à corrélérer la prévalence de certains mots, termes et balises à la progression des conditions sur le terrain. Cependant, séparer les signaux légitimes des signaux invalides est un défi nécessitant des méthodes d'assurance qualité robustes. Des estimations précises du niveau d'eau et du débit doivent pouvoir être dérivées pour que les données soient utiles dans les procédures hydrotechniques.

Les mesures de profondeur de neige avec une précision comparable à celle des instruments de la station météorologique sont désormais systématiquement dérivés d'images de caméras Web à distance de règles placées dans des manteaux de neige. Ce concept de mesure permet un grand nombre de mesures à partir d'emplacements éloignés et peut tirer parti des réseaux de

caméras utilisés à d'autres fins de surveillance telles que la sécurité, l'habitat, les loisirs et le transport.

3.5.4 Véhicules aériens autonomes et télécommandés

Les véhicules aériens autonomes et télécommandés sont des aéronefs à voilure fixe ou à voilure tournante qui volent sans pilote à bord et sont également communément appelés véhicules aériens sans pilote (VASP) et drones. Ces véhicules aériens peuvent être pilotés à l'aide d'un comportement préprogrammé, ou par un pilote pilotant l'avion à distance à vue ou aux instruments. Les drones sont d'excellents outils pour surveiller les conditions d'inondation et fournir des images à haute résolution, horodatées et géoréférencées pour le calage des modèles post-inondation et la détermination de l'étendue des inondations. Ils sont également utiles à d'autres fins de collecte de données, telles que l'identification de l'occupation du sol dans les bassins versants et la création de cartes à haute résolution spatiale des changements de profondeur.

3.5.5 Photographies aériennes

Les photographies aériennes et l'orthophotographie sont un autre outil précieux dans la préparation des données à utiliser dans la modélisation hydrologique et hydraulique (p. ex., l'identification de l'étendue des différents types d'occupation du sol). De nombreuses provinces et territoires ont survolé des parties de leur territoire à des moments périodiques et des photographies aériennes peuvent être disponibles pour le lieu à l'étude sur une période de plusieurs décennies. De plus, la Photothèque nationale de l'air de RNCan contient plus de 6 millions de photographies aériennes couvrant tout le Canada, certaines datant des années 1920.

Les changements morphologiques visibles sur les photographies aériennes fournissent une approximation de la sensibilité de l'aggravation ou de l'érosion des sédiments aux événements de débit de pointe. Les photographies aériennes peuvent également être utilisées pour identifier les changements géomorphologiques des cours d'eau au fil du temps. L'orthophotographie aide à identifier l'étendue des inondations pour les événements réels afin de dériver les niveaux d'eau associés aux débits à utiliser dans le calage du modèle hydraulique.

3.5.6 Imagerie satellite

L'analyse d'images satellitaires est un moyen pratique de déterminer l'étendue des eaux de crue à différents moments et l'occupation du sol. Le satellite canadien RADARSAT-2 est capable de fournir une résolution spatiale de 1 m et les données sont disponibles via Macdonald, Dettwiler et Associates Geospatial Services (2021) pour les clients commerciaux et l'Agence spatiale canadienne (ASC) pour les clients du gouvernement fédéral (ASC 2021). Les images satellites peuvent être acquises, reçues, traitées et livrées en fonction des besoins du client. Les données RADARSAT-2 sont excellentes pour délimiter l'étendue des inondations afin de fournir des points de calage du modèle.

3.6 Évaluation des données et assurance de la qualité / contrôle de la qualité

Les résultats de l'application des procédures de délimitation des aléas d'inondation sont tributaires des données géospatiales, hydrométriques, météorologiques et non systématiques

utilisées. La qualité des données et l'incorporation de procédures et de jugements bien fondés sont tous des éléments essentiels pour obtenir des résultats valables et utilisables. Une évaluation minutieuse de la qualité des données avant leur utilisation est nécessaire en raison des grandes variations de qualité qui existent, et qui dépendent de la source des données, des conditions dans lesquelles ces données ont été recueillies et de nombreux autres facteurs.

Toutes les données systématiques doivent faire l'objet d'un processus d'assurance et de contrôle de la qualité (AQ/CQ) qui comprend, au minimum, un contrôle des éléments suivants :

- Les données manquantes;
- Les données aberrantes ou suspectes;
- Les sauts de données ou les lignes brisées; et,
- Les indicateurs de données.

Une description de la manière dont les données manquantes ou non fiables ont été gérées doit être incluse dans le rapport d'étude. Des informations supplémentaires sur l'AQ/CQ sont incluses à la section 5.4.3.

Les données historiques et autres données non systématiques peuvent être incluses dans les analyses en utilisant une approche de seuil de sensibilité, décrite à la section 5.2.4. Il faut être prudent, car la fiabilité des données peut être incertaine. Cependant, les données permettent de déterminer la plage des limites possibles de la délimitation de l'aléa de l'inondation.

3.6.1 Stationnarité

Pour de nombreuses analyses statistiques, telles que les analyses fréquentielles des inondations, les données doivent être homogènes (p. ex., tirées de la même population), stationnaires (sans variation et saut) et sans tendance, pour que les probabilités résultantes soient valides. Le niveau de stationnarité des ensembles de données hydrotechniques est généralement affecté par la construction de réservoirs, la suppression de barrages, les changements de l'occupation du sol, le développement (p. ex., urbanisation, déforestation), l'érosion/aggradation, les effets des changements climatiques ou d'autres facteurs. Par conséquent, pour évaluer les données, il faut connaître les conditions du bassin au fil du temps et procéder à une évaluation visuelle et statistique de la stationnarité des données au début de toutes les procédures hydrotechniques. De nombreux tests statistiques existent pour évaluer l'homogénéité et la stationnarité des données.

Les spécialistes qualifiés ayant une expertise dans les méthodes avancées d'analyse fréquentielle statistique des inondations et qui traite des données hétérogènes et non stationnaires peuvent utiliser ces outils analytiques pour réaliser une analyse fréquentielle des inondations. Un processus avancé pour les données hétérogènes consiste à subdiviser les données, à effectuer des analyses fréquentielles distinctes pour chaque composante avant de recombinaison les probabilités.

Les effets des changements climatiques peuvent également avoir un impact sur la stationnarité, et sont décrits plus en détail ci-dessous.

3.6.2 Changements d'occupation des sols, développement et non-stationnarité de la morphologie

Les changements dans l'occupation et le développement des sols qui peuvent affecter la stationnarité des données sur le débit des cours d'eau et les inondations comprennent :

- Des nouveaux développements urbains, y compris les égouts, le pavage et la construction.
- Un développement de nouveaux réseaux de drainage agricole.
- De nouvelles mesures ou des modifications aux mesures d'atténuation des inondations, y compris les barrages (et leur fonctionnement), les digues, les bermes et les voies de communication.
- Des changements dans le tracé du cours d'eau, y compris les ponceaux et les ponts et les changements morphologiques tels que l'érosion, l'aggradation et le déplacement du tracé du cours d'eau.
- Des changements anthropiques de la couverture terrestre qui peuvent modifier l'interception, l'infiltration, l'évapotranspiration, le ruissellement, l'érosion et la sédimentation (p. ex., la récolte du bois, le drainage des zones humides et les mines à ciel ouvert, etc.).
- Des processus naturels, notamment les effets des feux de forêt, des parasites et des maladies sur la végétation.

Les changements morphologiques affectent le lit et les berges du cours d'eau, de même que les berges de plus grands plans d'eau. L'érosion continue modifie progressivement les facteurs hydrodynamiques qui influent sur la délimitation des aléas d'inondation, tandis que l'érosion catastrophique, causée par les niveaux d'eau élevés d'une inondation, peut avoir un impact considérable sur la délimitation des aléas d'inondation. L'alluvionnement, c'est-à-dire le dépôt de sédiments dans les sections où l'eau s'écoule plus lentement, forme progressivement des bancs de sable puis des plages. La géométrie du cours d'eau ou de l'escarpement de la rive du lac influence la dynamique du débit de référence. Lorsque la géométrie change, les profondeurs et l'étendue de l'inondation changent également. Ces impacts morphologiques peuvent influencer de manière significative la stationnarité des données.

3.6.3 Non-stationnarité des changements climatiques

Les changements climatiques entraînent des modifications des conditions météorologiques observables à l'échelle mondiale et régionale, et ces changements vont persister. Par conséquent, les changements climatiques se reflètent et se reflèteront de plus en plus à l'échelle locale dans les conditions climatiques liées aux inondations. Par exemple, les changements dans les modèles spatiaux et saisonniers de température, de précipitations et d'autres variables climatiques peuvent augmenter ou diminuer l'ampleur et la fréquence des inondations et exposer à des inondations des zones historiquement peu exposées à celles-ci (Warren et Lemmen 2014). En outre, les effets des changements climatiques comprennent la réduction de la couverture glaciaire dans les lacs et les océans, la fonte des glaciers et le dégel du pergélisol (Warren et Lemmen 2014).

Les effets des changements climatiques peuvent être difficiles à détecter dans les données historiques de référence sur les débits ou dans les données relatives aux inondations en raison des périodes relativement courtes de collecte des données et du haut degré de variabilité naturelle des variables hydrologiques. Les analyses hydrologiques doivent tenir compte de la non-stationnarité des changements climatiques lorsque des tendances sont détectées. Qu'une tendance ou un signal climatique ait été détecté ou non, une marge de précaution peut être recommandée (EGBC 2017) et les analyses peuvent utiliser les projections de changements climatiques (voir section 4.0).

3.7 Résumé

En résumé, la qualité de l'étude de délimitation des aléas d'inondation ne peut être de meilleure qualité que celle des données utilisées dans l'analyse. La recherche et la collecte de données de bonne qualité sont primordiales. Une approche rigoureuse de gestion de données est nécessaire pour maintenir les données géospatiales, hydrométriques, météorologiques et non systématiques dans un environnement accessible et transférable entre les partenaires et les parties concernées. Toute analyse effectuée doit pouvoir être répétée avec ces mêmes données. Le contrôle des données garantit la qualité des données, et les données archivées doivent respecter les exigences en matière de rapports énumérées à la section 10.0.

4.0 L'INTÉGRATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Le croisement entre les changements climatiques et l'identification des zones d'aléa d'inondation est une question en évolution. Plusieurs aspects doivent être abordés de manière stratégique en séparant les implications politiques des procédures techniques. Un domaine qui pourrait émerger au-delà de ces lignes directrices est la gestion du risque accru et de la zone limite d'inondation entre les zones inondables actuelles et celles influencées par les changements climatiques. Ces lignes directrices se limitent toutefois à l'examen des procédures techniques.

Un autre aspect clé de l'intégration des changements climatiques dans le développement des futures cartes d'aléas d'inondation, est l'approche pour y faire face. Les procédures actuelles de cartographie des aléas d'inondation peuvent s'appliquer à des bassins ou sous-bassins de petite et moyenne taille, comme la cartographie de petits mais importants tronçons d'un cours d'eau, des zones de croissance potentielle, etc. Pour les mêmes zones, ces procédures d'évaluation de l'impact induit par le climat ne sont pas recommandées. Il est recommandé de prendre en considération l'étude régionale/provinciale sur les changements climatiques qui permettra d'établir les estimations des valeurs de delta induites par le climat qui sont cartographiées pour l'ensemble de la région.

L'intégration des conditions climatiques futures dans la délimitation des aléas d'inondation est un défi qui a été appliqué dans de multiples juridictions au Canada et dans d'autres pays en utilisant différentes approches qualitatives (p. ex., l'ajout de « franc-bord », une distance verticale appliquée pour tenir compte de l'incertitude) et quantitatives (p. ex., la modélisation). Le premier volume des « Études de cas sur les changements climatiques en cartographie des plaines inondables » a été publié en 2018 dans le cadre de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » (RNCAN 2018). Ce document comprend trois approches quantitatives utilisées dans différentes juridictions au Canada pour intégrer les projections des changements climatiques dans la délimitation des aléas d'inondation. Un

deuxième volume d'études de cas qui intègrent les effets des changements climatiques dans la délimitation des aléas d'inondation est en cours de planification.

Le rapport intitulé « *An Inventory of Methods for Estimating Climate Change-informed Design Water Levels for Floodplain Mapping* » (Khaliq 2019) propose plusieurs façons de quantifier les impacts du climat futur sur les aléas d'inondation au Canada.

Avec chaque nouvelle édition des résultats du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les projections de changements climatiques sont continuellement mises à jour, révisées et renforcées. Ces changements entraînent un ajustement à la hausse ou à la baisse des estimations du débit et du niveau des crues. Avec l'amélioration des techniques, l'incertitude calculée liée à l'impact des changements climatiques sur les niveaux de crue peut diminuer avec le temps. L'une des façons de quantifier l'incertitude associée à divers scénarios et modèles de changements climatiques de manière probabiliste est d'utiliser une approche d'ensemble.

Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) maintient un réseau de surveillance du climat depuis plusieurs décennies et effectue une modélisation climatique qui permet de produire des scénarios de changements climatiques dans le cadre d'une collaboration mondiale. De même, des consortiums régionaux, tels qu'Ouranos au Québec (<https://www.ouranos.ca/en/>), et le Pacific Climate Impact Consortium (PCIC) en Colombie-Britannique (<https://pacificclimate.org/>), ont également développé des versions régionales et corrigées des biais des résultats des modèles climatiques mondiaux. Récemment, le ECCC a créé le Centre canadien des services climatologiques (CCSC) pour donner accès à des informations, des données et des outils climatiques régionaux adaptés qui peuvent être utilisés pour soutenir les procédures de délimitation des aléas d'inondation.

La figure 4.1 donne un aperçu des considérations relatives à l'intégration des changements climatiques dans les études sur les aléas d'inondation.

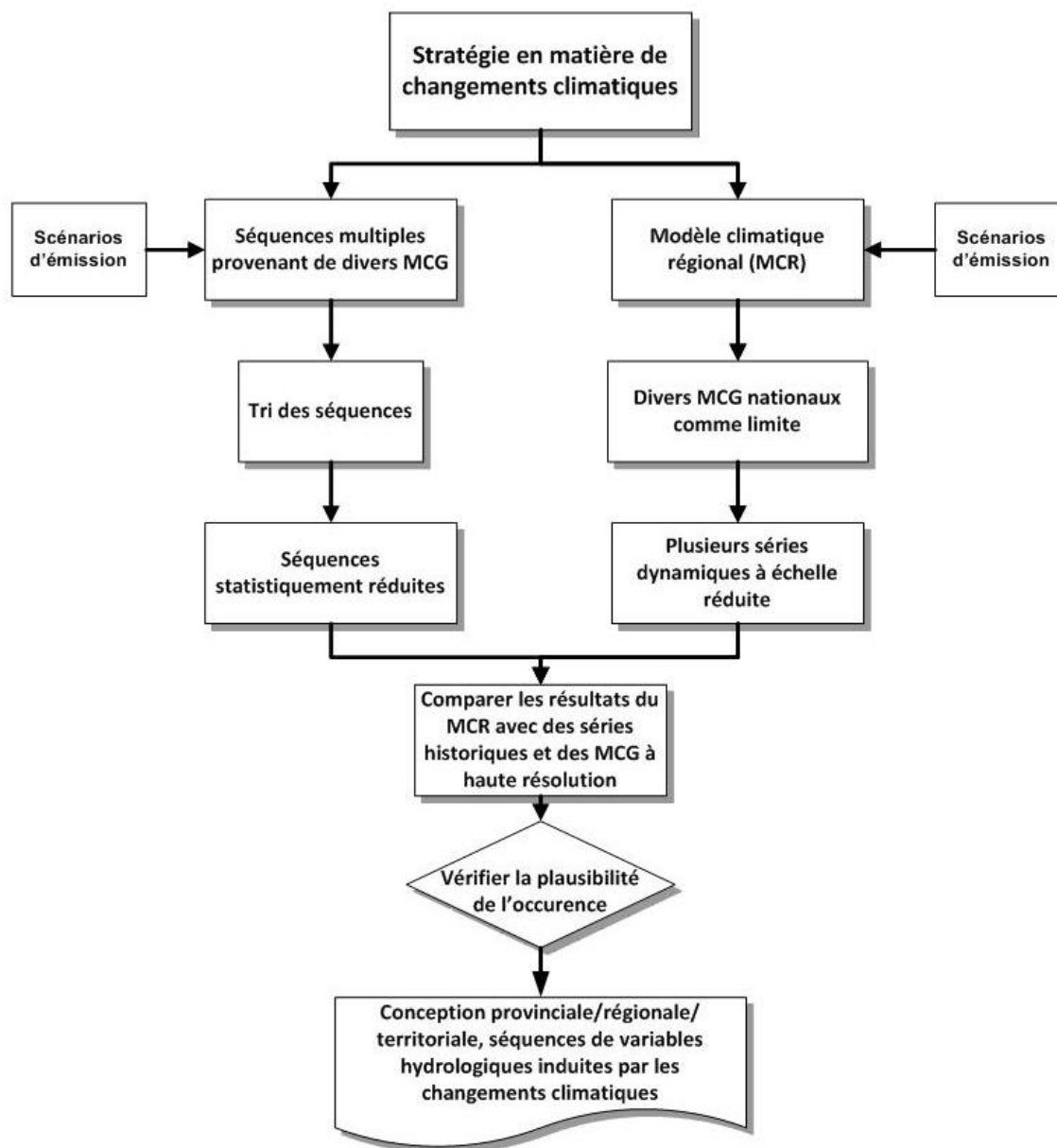


Figure 4.1. Application des changements climatiques

Une stratégie pour l'application des changements climatiques à la cartographie des aléas d'inondation suivra une approche d'ensembles nécessitant soit une réduction d'échelle statistique, soit une approche par modèle climatique régional utilisant une réduction d'échelle dynamique (voir section 4.1). Les deux approches nécessitent la sélection de scénarios d'émissions (section 4.1.2). Ceux-ci peuvent être sélectionnés selon l'approche la plus plausible ou en fixant des limites supérieures et inférieures aux délimitations des aléas de l'inondation. Les ensembles à échelle réduite ou les modèles climatiques régionaux sont disponibles pour tout le Canada auprès du CCSC ou directement auprès de l'organisme d'origine. Dans de nombreux cas, les paramètres météorologiques futurs projetés sont publiés pour être inclus dans des modèles hydrologiques vérifiés, développés comme décrits à la section 5.5 ou dans

des analyses de régression statistique comme décrits à la section 5.4.9. Le professionnel qualifié peut commencer avec ces paramètres météorologiques futurs pour la région du site d'étude.

Les deux approches, qu'il s'agisse d'un modèle ou d'une analyse de régression, nécessitent une comparaison avec les séries historiques et les modèles des changements climatiques mondiaux pour s'assurer que les résultats soient raisonnables. Les résultats sont donc des séquences de facteurs climatiques qui influenceront les débits des cours d'eau en fonction des climats futurs.

Les pratiques liées aux changements climatiques sont présentées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Pratiques pour intégrer les changements climatiques dans les études sur les risques d'inondation.

	Pratiques pour intégrer les changements climatiques dans les études sur les aléas d'inondation
Étape 1	Sélectionner les scénarios d'émission à partir des possibles profils d'évolution représentatifs de concentration.
Étape 2	Sélectionnez le modèle de circulation générale pour la réduction d'échelle statistique ou l'approche climatique régionale.
Étape 3a	Approche de réduction d'échelle statistique : Examiner les modèles climatiques, les désagréger spatialement et les comparer aux données historiques afin de déterminer toute correction de biais nécessaire pour établir un générateur de conditions météorologiques ayant un impact sur les débits élevés et les niveaux d'eau des lacs. Les composants du générateur météorologique peuvent être liés aux débits et niveaux d'eau futurs par régression linéaire. Le CCSC peut développer certains composants d'un générateur météorologique à échelle réduite lorsque le besoin est justifié pour des études régionales.
Étape 3b	Approche climatique régionale : Le CCSC peut être sollicité pour produire des séquences d'approvisionnement en eau corrigées des biais à partir de modèles de réduction d'échelle dynamique disponibles sur son site web.
Étape 4	Comparer avec les séries historiques et d'autres modèles de changements climatiques mondiaux pour s'assurer que les résultats sont raisonnables, afin de vérifier la vraisemblance des occurrences.
Étape 5	Évaluer la délimitation des aléas d'inondation avec les débits qui résultent des séquences de facteurs climatiques et d'un modèle hydraulique vérifié (voir section 6.0).
Étape 6	Considérer la gamme de valeurs de l'ensemble des résultats pour quantifier l'incertitude.
Étape 7	Cartographier la délimitation des aléas d'inondation et faire un rapport sur le processus en suivant les exigences de la section 10.0.

Tout d'abord, les scénarios d'émission (section 4.1.2) à appliquer sont sélectionnés, en fonction des scénarios de gaz à effet de serre prévus dans le futur. Ensuite, la boîte à outils de l'agence à utiliser est choisie pour générer l'ensemble des paramètres climatiques futurs (section 4.1.3) qui se refléteront dans les débits et les niveaux d'eau des lacs à partir d'une série de scénarios d'émissions ou d'une perturbation des paramètres d'entrée. Il est également possible de sélectionner une série de modèles pour générer des ensembles de paramètres climatiques et

les débits et niveaux qui en résultent. Les sections 4.1.4 et 4.1.5 traitent de l'étape suivante, à savoir la réduction d'échelle dynamique ou statistique et la désagrégation spatiale, afin d'appliquer les résultats du modèle au site d'étude. Une fois que les sorties du modèle ont été ajustées pour tenir compte des biais, les valeurs météorologiques sont comparées aux données historiques. Elles sont appliquées au modèle hydrologique sélectionné pour produire l'influence des changements climatiques sur les débits de conception.

Lorsqu'une approche fréquentielle régionale des crues est disponible pour les débits de conception actuels sur la base d'une analyse de régression incluant des données météorologiques, les facteurs modifiés par les modèles de changements climatiques peuvent maintenant être utilisés pour générer de nouveaux débits basés sur les conditions météorologiques dans les équations de régression en tant que futures projections de PDA.

4.1 Données d'information sur les changements climatiques

4.1.1 Modèles climatiques mondiaux et modèles de circulation générale

Les termes « modèle climatique global » et « modèle de circulation générale », tous deux abrégés en MCG, sont généralement utilisés de manière interchangeable pour décrire des modèles numériques qui représentent des processus physiques couplés dans l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et la surface terrestre. Le développement de la dernière génération de MCG a mis l'accent sur la représentation des cycles biogéochimiques, en particulier la représentation explicite du cycle du carbone. C'est pourquoi ces modèles globaux sont souvent appelés modèles du système terrestre (MST). Les MCG et les MST sont actuellement les outils les plus avancés utilisés pour simuler la réponse du système climatique mondial à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Ils ont généralement une résolution horizontale de 100 à 250 km avec des pas de temps internes typiques de quelques heures et des périodes de simulation pouvant atteindre des milliers d'années (Charron 2014).

4.1.2 Scénarios d'émissions

Les projections des changements climatiques futurs nécessitent des projections des facteurs de changements externes, tels que les concentrations de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols, qui sont utilisées comme entrées dans les MCG. Avec chaque nouveau rapport du GIEC, la méthodologie des trajectoires a changé. Les trajectoires sont des scénarios normalisés de forçage radiatif et des séries chronologiques associées aux gaz à effet de serre, aux aérosols atmosphériques et aux changements d'occupation du sol, désigné par exemple par RCP2.6 (trajectoire à faible forçage radiatif), RCP4.5 et RCP6.0 (trajectoire à forçage radiatif modéré) et RCP8.5 (trajectoire à fort forçage radiatif). Plus le RCP est élevé, plus les concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols dans l'atmosphère future de la Terre sont importantes. Compte tenu de la production mondiale actuelle de GES, il serait prudent d'inclure le RCP8.5 dans toute analyse. Avec la nouvelle version des scénarios TCES, ces directives hydrologiques et hydrauliques seront mises à jour dans la prochaine version.

4.1.3 Ensembles

Comme tous les autres modèles hydrométéorologiques, les MCG sont des représentations sophistiquées, mais imparfaites de la réalité et contiennent différentes hypothèses sur la meilleure façon de représenter des processus physiques complexes, en particulier ceux qui

opèrent à des échelles spatiales et temporelles qui ne sont pas explicitement résolues dans le modèle. Il existe des dizaines de MCG qui ont réalisé des projections du climat futur, chacun avec des hypothèses et des méthodes d'analyse différentes. En raison du niveau élevé d'incertitude associé à l'approvisionnement net du bassin d'un seul MCG, le spécialiste devrait utiliser un ensemble de MCG pour projeter les variables climatiques futures. Le *Pacific Climate Impacts Consortium* (PCIC 2021) utilise un ensemble de 12 MCG différents pour effectuer une réduction d'échelle statistique afin de projeter les variables climatiques futures. D'autres scénarios sont disponibles au Canada (p. ex., auprès du Centre canadien des services climatologiques, du PCIC, d'Ouranos, etc.) et à l'échelle internationale (p. ex., le *Coupled Model Inter-comparison Project* (CMIP)). En outre, la plupart des fournisseurs disposent d'ensembles de modèles pilotés par différents scénarios d'émissions de GES (voir la section 4.1.2).

4.1.4 Réduction d'échelle dynamique par les modèles climatiques régionaux

La réduction d'échelle dynamique implique l'exécution d'un modèle climatique physique, appelé modèle climatique régional (MCR), qui fonctionne à une résolution plus élevée, généralement de 10 à 50 km, sur un domaine limité. Les simulations du climat passé et futur dans la génération du MCR exigent que celui-ci soit piloté à ses limites latérales par la sortie d'un MCG. En raison de la résolution accrue, cette approche permet de saisir une variabilité plus locale de la couverture terrestre, de la surface de l'eau, de la topographie et d'autres caractéristiques physiques, y compris les rétroactions locales, mais le MCR héritera également des erreurs et des biais qui peuvent être présents dans le MCG. Dans certains cas, les résultats de la réduction d'échelle dynamique peuvent ne pas fournir d'informations plus utiles que le MCG. Les avantages et les coûts (y compris la puissance de calcul potentiellement élevée) de la réduction d'échelle dynamique doivent être évalués au stade initial de l'évaluation des changements climatiques. Comme les MCG, les MCR sont développés dans de nombreuses institutions à travers le monde, et la plupart participent à CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*). Le CCSC dispose d'un inventaire de MCR à une réduction d'échelle dynamique pour les diverses régions du Canada. Ces modèles sont continuellement mis à jour et, à mesure que la résolution augmente, les rétroactions atmosphériques de la surface terrestre peuvent être mieux représentées. Par exemple, la convection n'est pas résolue dans la plupart des MCR, ce qui peut être problématique pour l'analyse des événements extrêmes. Des schémas permettant la convection sont lentement développés pour ces modèles de nouvelle génération. Il est important d'être très précis sur la version et la source des modèles de changements climatiques utilisés dans l'étude.

4.1.5 Réduction d'échelle statistique et ajustement des biais

Il existe de nombreuses méthodes de correction des biais, allant des « approches delta » relativement simples appliquées aux sorties des modèles météorologiques ou hydrologiques globaux. Habituellement, les extraits des MCG et des MCR sont corrigés des biais systématiques à l'échelle du bassin. Par conséquent, les données des MCG et des MCR relatives aux inondations nécessitent généralement un post-traitement, comme de nombreux efforts similaires, pour produire des estimations fiables. Une réduction d'échelle supplémentaire des sorties des MCG ou des MCR à une résolution spatiale plus élevée peut également être nécessaire, dans quel cas les méthodes de réduction d'échelle statistique peuvent être appliquées séparément ou en combinaison avec la correction des biais.

La réduction d'échelle statistique implique la combinaison de projections de modèles climatiques et d'observations locales ou régionales pour fournir des informations climatiques plus détaillées sur le plan spatial. Différentes approches peuvent être utilisées, notamment les régressions, les générateurs météorologiques stochastiques et les algorithmes d'apprentissage automatique. En plus de contribuer à la résolution, la réduction d'échelle permet de dériver d'autres variables nécessaires à la cartographie des zones inondables

Le *Pacific Climate Impacts Consortium* (PCIC 2021) a produit un ensemble statistiquement réduit de MCG, accessible au public, à une taille de grille approximative de 10 km. Il existe un certain nombre d'outils de réduction d'échelle statistique accessibles au public (p. ex., Wilby et al. 2002, Hessami et al. 2008). Cette approche est généralement plus rapide et nécessite moins de puissance de calcul que la réduction d'échelle dynamique. Cependant, elle ne tente pas de reproduire les processus physiques de l'atmosphère, mais se base sur les relations statistiques entre les sorties du modèle climatique et les observations locales ou régionales. Les approches de réduction d'échelle statistique (p. ex., les méthodes basées sur la régression) supposent la stationnarité des relations statistiques ainsi qu'une simulation crédible de la variabilité à plus grande échelle par le modèle climatique.

Bien que la réduction d'échelle statistique fournisse plus de détails spatiaux, il n'est pas certain, pour de nombreux endroits, que les résultats de la réduction d'échelle soient plus précis que l'utilisation de données à la résolution des modèles climatiques. La phase initiale d'une évaluation des changements climatiques doit évaluer les avantages et les coûts de la réduction d'échelle statistique. Des méthodes plus graduelles sont en cours d'évaluation et feront partie de la prochaine version de ce document.

4.2 Études dans le contexte canadien et mondial

Le document de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables », « Études de cas sur les changements climatiques en cartographie des plaines inondables » (RNCAN 2018), fournit trois exemples où les impacts des changements climatiques ont été évalués pour des études sur les aléas d'inondation. D'autres exemples d'études de cas sont prévus pour les futures versions de ce document.

D'autres exemples de l'application des projections de changements climatiques aux bassins versants canadiens sont fournis dans Khaliq (2019), Rajulapati et al. (2020), et Zaerpour et al. (2021). Un article récent (Wasko et al. 2021) présente les approches pratiques de l'intégration des changements climatiques dans les évaluations des débits de crue dans une perspective mondiale.

4.3 Projections des changements du niveau de la mer

Il peut être nécessaire d'intégrer les projections de changement du niveau de la mer dans les études de délimitation des inondations fluviales. La procédure générale consiste à examiner les conseils de RNCAN (James et al. 2021) sur le changement relatif du niveau de la mer spécifique au site, et à sélectionner des scénarios et des horizons de planification basés sur le risque acceptable et la durée de vie de la conception (p. ex., Lemmen et al. 2016). Les projections de changement relatif du niveau de la mer sont ensuite utilisées comme conditions limites en aval pour la modélisation fluviale (hydraulique). Lorsqu'une probabilité d'inondation donnée est estimée sur une longue période dans le futur, le spécialiste peut utiliser des techniques

probabilistes cumulatives pour tenir compte des probabilités d'inondation collectives dues à l'augmentation du niveau de la mer.

Le niveau relatif de la mer (RSL) fait référence à la variation relative du niveau de la mer sur le littoral et est une combinaison de l'élévation globale du niveau de la mer et du mouvement vertical des terres. Les analyses et la cartographie des aléas d'inondation qui tiennent compte du RSL doivent utiliser des scénarios actualisés issus de rapports scientifiques nationaux (p. ex., James et al. 2021; Lemmen et al. 2016; Han et al. 2016). Le soulèvement des terres contribue à la baisse relative du niveau de la mer, tandis que la subsidence des terres ajoute à la hausse relative du niveau de la mer. Au Canada, une source dominante de mouvement vertical du sol est la réponse à retardement de la terre solide au poids des couches de glace, un processus appelé ajustement isostatique glaciaire ou rebondissement postglaciaire. Bien que ce processus entraîne un soulèvement des terres dans la majeure partie du Canada continental, il provoque un affaissement des terres dans de nombreuses régions côtières. RNCan met régulièrement à jour les changements projetés du RSL (p. ex., James et al., 2021).

4.4 Résumé des stratégies pour la prise en compte des changements climatiques

En résumé, la première étape consiste à décider du ou des scénarios d'émission et de l'horizon temporel à prendre en compte pour la délimitation des aléas d'inondation sous les climats futurs. La décision peut être dictée par la juridiction. Ensuite, un ensemble de modèles régionaux ou un ensemble de modèles à échelle réduite déterminera les facteurs qui influencent les paramètres météorologiques futurs pour l'évaluation du débit de conception. Le professionnel qualifié peut évaluer les changements dans l'évaluation du débit futur à partir de la moyenne et de la plage des prédictions de l'ensemble. Un examen approfondi par des examinateurs qualifiés non impliqués dans le projet devrait précéder la publication du rapport d'évaluation du débit de conception couvrant les analyses des changements climatiques, comme indiqué à la section 10.0.

5.0 PROCÉDURES D'ÉVALUATION DES INONDATIONS DE CONCEPTION

Une description de l'évaluation des crues de conception ou réglementaire, des procédures hydrologiques et soutenant la délimitation des aléas d'inondation sont incluses dans cette section. Ces procédures peuvent inclure à la fois des estimations du débit de pointe et des volumes de crue de conception si le cours d'eau se déverse dans un petit lac dont les niveaux dépendent des volumes de débit. Les événements de débit de conception et de niveau d'eau sont généralement exprimés en termes de période de retour ou de probabilité de dépassement annuel (PDA). Par exemple, un événement de débit avec une PDA de 1 % et un événement de débit avec une période de retour de 100 ans sont équivalents. Comme noté à la section 1.4, le concept de périodes de retour peut être trompeur pour un public non spécialisé. Par conséquent, ce document utilise le terme « PDA » au lieu de « période de retour ». Dans certaines juridictions, un événement météorologique extrême historique est utilisé pour définir l'événement de débit de conception. Ces procédures recommandent que les provinces et les territoires établissent un débit de conception ou réglementaire à au moins un débit équivalent à une PDA de 1 %.

Le tableau 5.1 explique les procédures hydrologiques qui sont nécessaires pour estimer des débits de conception fiables et réalistes. Celles-ci sont référencées sous forme de tableau et illustrées à la figure 5.1 .

Tableau 5.1. *Pratiques hydrologiques.*

	Pratiques hydrologiques
Étape 1	Définir le résultat hydrologique selon les critères d'inondation de conception de la juridiction (section 5.1).
Étape 2	Recueillir des données (section 5.2) : Identifier toutes les sources de données pertinentes et d'informations historiques dans la région hydrologique définie. Inclure les données hydrologiques et météorologiques qui répondent aux principales exigences en matière de données. Documenter les sources d'informations et de données historiques sélectionnées. Utiliser le relevé d'inondation disponible dont la durée est maximale.
Étape 3	Enquêter sur les non-stationnarités et l'homogénéité (section 5.2) : Effectuer une vérification de l'assurance et du contrôle qualité des données hydrologiques, y compris la vérification de la stationnarité et de l'homogénéité. Identifier les effets de du contrôle du débit et de la dérivation sur les données hydrologiques pour s'assurer qu'ils sont correctement pris en compte par la procédure hydrologique sélectionnée.
Étape 4	Sélectionner une approche analytique (section 5.3).
Étape 5	Mener une analyse fréquentielle des crues (AFC) (section 5.4) : Mener une AFC à station unique si des informations historiques et des données de débit collectées systématiquement sont disponibles. Les spécialistes doivent être conscients des incertitudes de cette approche et confirmer que les données répondent aux hypothèses sous-jacentes. Lorsque suffisamment de données ne sont pas disponibles pour prendre en charge une AFC à une seule station, effectuez une AFC régionale (AFRC) pour une région hydrologiquement homogène ayant un nombre suffisant de relevés de débit et de durées adéquates de la période des relevés.
Étape 6	Mener une analyse déterministe (section 5.5) : Il s'agit de l'approche privilégiée lorsque les débits de conception sont basés sur une pluie historique ou une pluie de conception synthétique, qu'un hydrogramme de crue est requis ou lorsque le bassin versant a subi des changements d'occupation du sol.
Étape 7	Incorporer l'impact sur les événements d'inondation de conception de la non-stationnarité future causée par des facteurs tels que les changements climatiques, les occupations alternatives du sol, la réglementation et les changements morphologiques. Les détails concernant l'évaluation et la prise en compte des changements climatiques sont fournis à la section 4.0.
Étape 8	Déterminer les débits de crue ou les niveaux d'eau de conception. Des modèles déterministes de simulation continue sont utilisés lorsque des données météorologiques à long terme sont disponibles pour générer des séries de débits à long terme. Les méthodes AFC peuvent être appliquées à des relevés historiques ou à la sortie de modèles hydrologiques pour calculer les débits de conception pour des PDA spécifiques. Des modèles hydrologiques déterministes à événement unique sont utilisés pour les régions qui nécessitent des pluies historiques ou des pluies de conception synthétiques ou dans les cas où les données sont insuffisantes pour prendre en charge la modélisation par simulation continue. L'AFC sur les niveaux d'eau peut déterminer les niveaux d'eau de PDA spécifiques.

	Pratiques hydrologiques
Étape 9	<p>Évaluer les résultats par rapport aux critères de l'inondation de conception de l'étape 1. Vérifier et documenter les résultats de l'étude. Dans la mesure du possible, vérifiez les résultats d'une procédure hydrologique choisie (AFC, AFRC ou modélisation hydrologique) en comparant les résultats avec une ou plusieurs procédures alternatives. Les crues maximales connues à partir des connaissances paléontologiques, historiques ou autochtones en dehors des données observées systématiquement peuvent fournir un contexte pour des résultats, compte tenu des conditions variables. Un examinateur externe qualifié peut évaluer les données, les méthodes et les résultats de l'analyse.</p>
Étape 10	<p>Documenter tous les aspects de la sélection, de la mise en œuvre, des tests, de la vérification, des résultats, de la sensibilité, de la répétabilité et de l'incertitude associée à la procédure sélectionnée. Indiquer comment la communauté a participé à l'étude et ses résultats. Reportez-vous à la section 10.0 pour un aperçu des exigences en matière de rapports.</p>

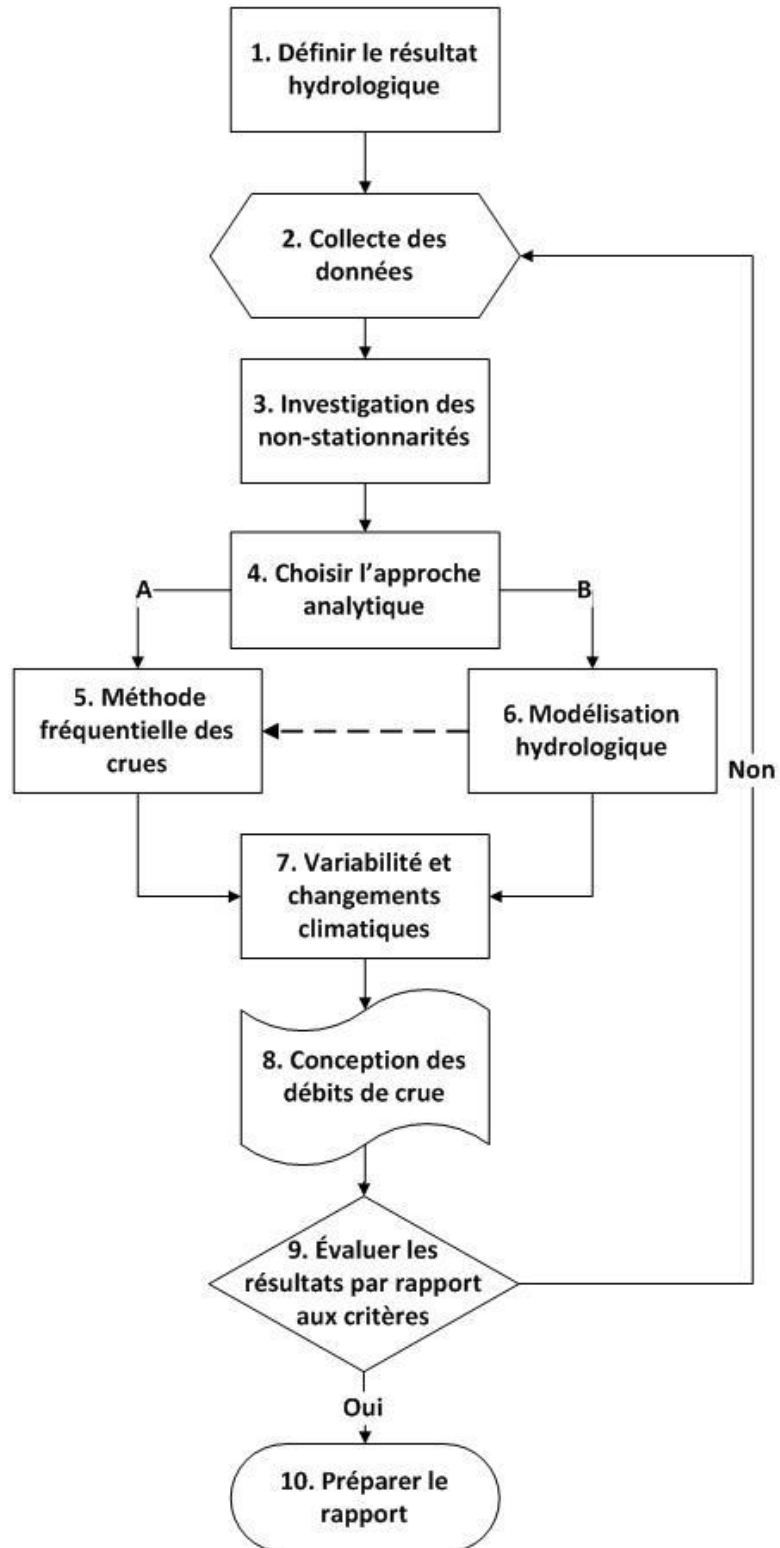


Figure 5.1. Procédures hydrologiques.

5.1 Définition des résultats hydrologiques

La première étape de toute procédure hydrologique consiste à définir le résultat à l'emplacement du site étudié. Pour une délimitation des aléas d'inondation d'un bassin versant particulier, le résultat sera défini par la juridiction compétente. Il peut s'agir d'un débit (ou d'un niveau d'eau) correspondant à une PDA spécifique (1 %, 0,5 %), d'inondations correspondant à plusieurs PDA (p. ex., 5 %, 1 %, 0,5 %) ou d'un débit généré par un événement météorologique extrême historique. Le résultat devrait intégrer les impacts des changements climatiques et l'occupation future connue du sol. Le résultat hydrologique ou la crue de conception, comme montre la figure 2.2 de la section 2.0, sera utilisé dans le modèle hydraulique pour déterminer l'étendue et la profondeur de la délimitation des aléas d'inondation. La définition d'une zone inondable secondaire peut nécessiter la détermination des vitesses sur toute l'étendue.

Tableau 5.2. Résultat hydrologique ou événement de crue de conception par juridiction au moment de la rédaction du présent document.

Provinces et territoires	PDA de conception	Conception historique Évènement pluvial	Franc-bord
Alberta	1 %	-	-
Colombie-Britannique	0,5 %	-	-
Manitoba	0,5 %	-	-
Nouveau-Brunswick	1 %	-	-
Terre-Neuve-et-Labrador	1 %	-	-
Nouvelle-Écosse	1 %	-	-
Territoires du Nord-Ouest	-	-	-
Nunavut	-	-	-
Ontario	1 %	Tempête de l'ouragan Hazel (1954) Tempête Timmins (1961)	-
Île-du-Prince-Édouard	1 %	-	0,65 m
Québec	1 %	-	-
Saskatchewan	0,2 %	-	0,5 m
Yukon	-	-	-

La sélection des procédures adéquates dépend du type de « problème » hydrologique à l'étude et de la disponibilité des données nécessaires pour le résoudre. Par exemple, dans certaines juridictions, des crues de conception spécifiques ou différentes nécessitent une évaluation (p.

ex., PDA de 5 %, PDA de 1 %, PDA de 0,5 %, etc.). Si des données de débit suffisantes sont disponibles, des procédures telles qu'une AFC à une seule station ou une AFRC peuvent permettre de déterminer les crues de conception d'une PDA spécifique. Les analyses des crues de conception basées sur les niveaux d'eau, telles que les inondations liées aux glaces et les inondations des rives des lacs, peuvent également s'appuyer sur les procédures AFC. Cependant, d'autres juridictions définissent l'évènement de crue de projet par la transposition d'un évènement de pluie historique sur le bassin versant du site étudié. Dans ces cas, des modèles de simulation hydrologique sont utilisés. De plus, les changements importants d'occupation du sol en amont du site étudié, dont les plans futurs sont connus, nécessitent un modèle hydrologique pour simuler les conditions futures.

5.2 Exigences en matière de données

Les évaluations du débit de conception nécessitent au minimum l'emplacement précis de la jauge, les relevés des niveaux d'eau ou hydrométriques ainsi que des informations hydrologiques régionales telles que AFRC ou les données de transposition des pluies. Si une modélisation hydrologique est nécessaire, elle nécessitera également des informations sur le forçage météorologique et les données géospatiales pertinentes.

5.2.1 Préparation des données et remplissage des lacunes

Le débit ou le niveau d'eau enregistré à une jauge est considéré comme la meilleure estimation de toutes les méthodes hydrologiques. Ceci découle de la compréhension que les données enregistrées sont l'intégrateur de tous les processus hydrologiques dans le bassin versant. Par conséquent, la meilleure approche pour calculer les évènements de conception pour les estimations basées sur la fréquence garantit que les séries de données sont obtenues avec toute la précision requise. Il existe deux scénarios de base pour la manière dont les données enregistrées sont utilisées, un, si le projet de cartographie ou l'emplacement où les débits de conception qui sont souhaités coïncident avec l'emplacement de la jauge, et deux, où les informations nécessaires sont loin de l'emplacement de la jauge. Il arrive que les niveaux ou les débits enregistrés ne soient pas disponibles ou ne soient pas fiables à cause des inondations, par exemple lorsque les stations de jaugeage sont détruites lors de l'inondation. Les débits déterminés sur toute la durée de la période des relevés utilisables doivent alors être utilisés avec les valeurs de pointe obtenues par des moyens indirects.

La figure 5.2 illustre les différentes approches et étapes de la reconstruction des données manquantes et de l'extension des relevés à partir des bassins versants et des bassins régionaux de référence et voisins, hydrologiquement similaires. Il convient de noter que les approches régionales décrites ici concernent le débit journalier. Les séries de données générées au cours de ces étapes constituent la base de toutes les analyses fréquentielles des crues. Les procédures d'analyse régionale des estimations d'inondation sont décrites à la section 5.5 ultérieure. Comme montre la figure 5.2, il existe cinq approches potentielles, étiquetées A à E dans les cases, et dont l'incertitude augmente au fur et à mesure des lettres. Celles-ci sont brièvement décrites ci-dessous.

- A. Si l'ensemble de données est exempt de contrôle des eaux et provient d'un relevé complet, il peut être directement utilisé pour des tests supplémentaires afin de garantir son utilisation grâce aux tests statistiques paramétriques et non paramétriques pour établir le débit de conception.

- B. Lorsque la série chronologique est influencée par la présence d'un ouvrage de contrôle des eaux, la série naturalisée est calculée par l'une des méthodes de routage inverse. Ceux-ci peuvent inclure des ajustements des changements de l'évaporation quotidienne si le lac ou le réservoir se trouve dans une zone d'évaporation nette (Section 5.2.7).
- C. Si la série est partielle et qu'une station de référence est disponible pour étendre les données, l'approche suggérée est l'extension du maintien de la variance ou *MOVE-1* ou une technique équivalente.
- D. Si la série est partielle et qu'aucune station de référence n'est disponible, l'approche suggérée est la méthode de la courbe de durée du débit (Hughes and Smakhtin, 1996).
- E. Au point d'intérêt, s'il n'y a pas de données disponibles, une méthode d'aire de drainage régionale est suggérée. Dans de tels cas, les données synthétisées doivent être vérifiées par d'autres approches (Section 5.2.3).

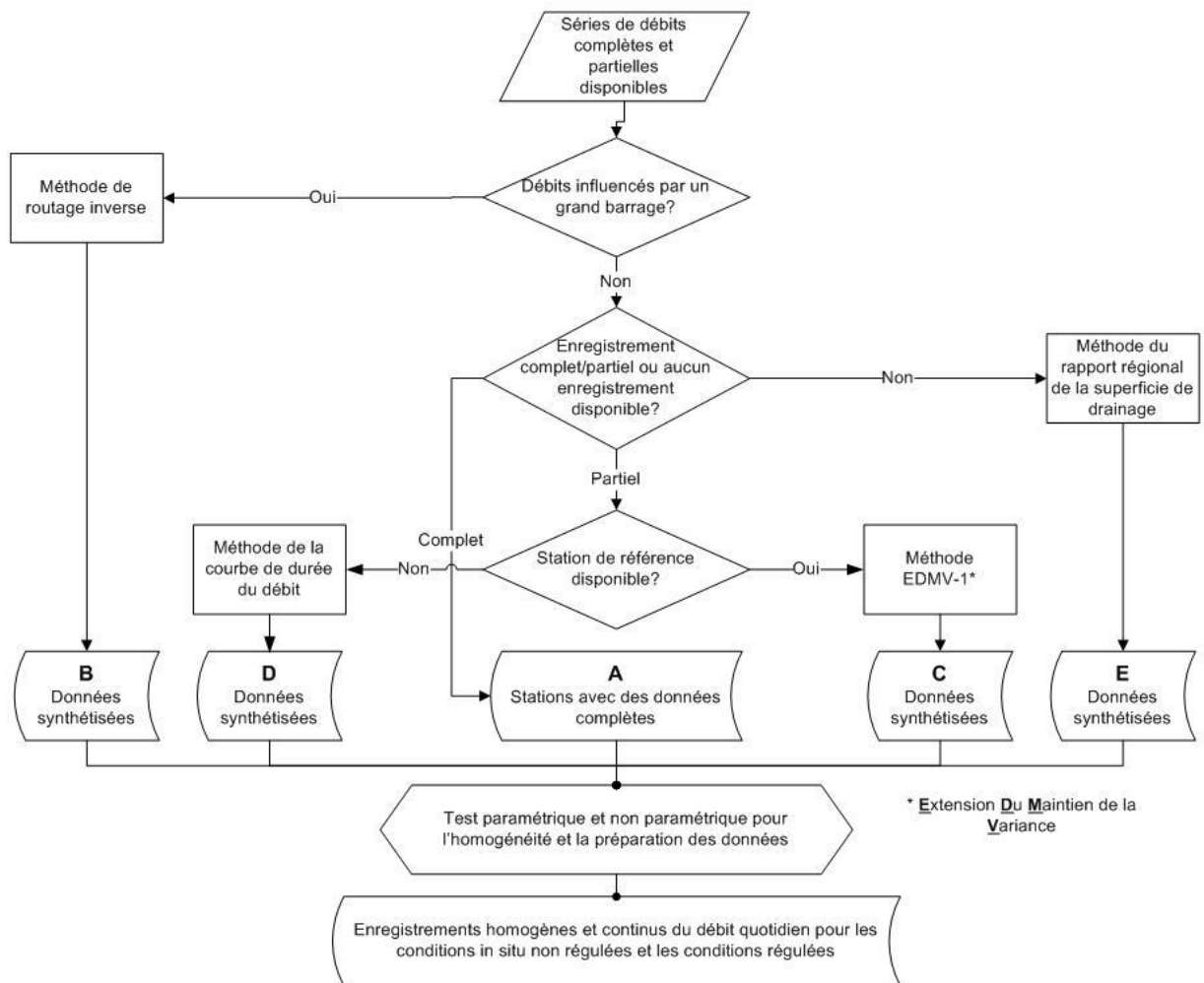


Figure 5.2. Procédure de préparation des débits pour l'analyse.

5.2.2 Extension des relevés de débits instantanés sur site

Dans de nombreux cas, les juridictions peuvent exiger l'utilisation de données annuelles maximales de débit de pointe instantané (QI) lors de la mise en œuvre de procédures hydrologiques telles que la AFC à une seule station. Souvent, la durée de la période de relevés

du QI à une jauge est inférieure à la période des relevés des débits de pointe journaliers maximums annuels (QJ). Dans ces cas, le relevé des données QJ peut être utilisé pour étendre l'ensemble des données QI.

Il existe plusieurs approches pour calculer le débit de pointe instantané lorsque les débits journaliers maximaux sont disponibles.

1. En utilisant la période de relevés lorsque les deux types de données se chevauchent, la relation suivante peut être développée dans laquelle « a » et « b » sont des variables décrivant la relation entre QI et QJ :

$$QI = a \cdot QJ^b$$

2. La méthode de Fuller (Fuller, 1914) pourrait également être appliquée pour calculer les valeurs de débits de pointe instantanés. Dans ce cas, la zone de drainage « A » du bassin s'est avérée importante, plus la zone de drainage est grande, plus le facteur de pointe est petit et vice-versa pour les bassins plus petits. Sous une forme générique, les variables « c » et « d » sont estimées à partir d'une analyse régionale :

$$QI = QJ \cdot (1.0 + c \cdot A^{-d})$$

3. La méthode de 3 jours est une technique plus dépendante des données développée par Sangal (Sangal, 1981) et appliquée à plus de 560 bassins en Ontario par Moin et Shaw (1985). Cette méthode repose sur un hydrogramme triangulaire et la formule suivante où les variables sont le débit journalier moyen de trois jours consécutifs, désignés QJ1 la veille, QJ2 le jour du débit journalier maximal et QJ3 le lendemain.

$$QI = \frac{(QJ_1 + QJ_3)}{2} + \frac{(2 \cdot QJ_2 - QJ_1 - QJ_3)}{(1 - 2 \cdot \alpha)}$$

Quand $\alpha = 0$

$$QI = \frac{(4 \cdot QJ_2 - QJ_1 - QJ_3)}{2}$$

4. Fill et Steiner ont développé des équations régionales basées sur l'approche de Sangal pour les bassins versants du Brésil (Fill et Steiner, 2003). La formulation a pris la forme suivante;

$$QI = \frac{0.8 \cdot QJ_2 + 0.25 \cdot (QJ_1 + QJ_3)}{0.4561 \cdot (QJ_1 + QJ_3) + 0.362}$$

Des relations similaires pourraient être développées pour d'autres régions sur la base des informations disponibles.

5. Plusieurs techniques plus récentes sont disponibles en utilisant les réseaux de neurones artificiels et systèmes d'inférence neuro-floue adaptatif (Nayak et al., 2004).

Dans toutes ces méthodes, il faut s'assurer de tenir compte de la taille des bassins lorsque de telles équations sont développées. Ces plages doivent être respectées. Le résultat peut ensuite être appliqué à la période où seuls les débits de pointe moyens maximums annuels existent pour estimer les débits de pointe instantanés équivalents. Bien entendu, les procédures sont appliquées aux deux séries de données lorsque les deux pointes proviennent du même événement.

5.2.3 Transposition à partir des bassins versants hydrologiquement similaires

Cette section décrit brièvement les approches mises en évidence dans les approches « C » et « E ». La méthode la plus courante pour étendre ou compléter des relevés de débit manquants pour un cours d'eau à l'étude consiste à transposer les relevés de débit d'une jauge de

caractéristiques hydrologiques similaires avec une période de relevés plus longue que le cours d'eau à l'étude dans le bassin versant à l'étude ou à partir d'un bassin versant jaugé à proximité. Si les périodes de relevés se chevauchent, un modèle de corrélation croisée spécifique au site peut être dérivé et appliqué (approche « C »). Sinon, une relation plus générique, possiblement physiographique, peut être utilisée (p. ex., une relation basée sur le rapport des aires de drainage à une puissance égale ou inférieure à 1, selon les caractéristiques régionales) (approche « E »). Une approche classique est présentée dans les travaux récents réalisés dans le cadre de la reconstruction hydrologique de Souris, USACE (2019).

5.2.4 Inondations pré-enregistrées (informations historiques)

L'incertitude dans l'analyse fréquentielle des crues hydrologiques peut être réduite par intégration des crues historiques, qui se sont produites avant la collecte systématique des données hydrométriques (crues pré-enregistrées) et peuvent ne pas être saisies dans l'ensemble de données. Ces inondations peuvent être associées à des preuves physiques, photographiques ou autres preuves utiles pour estimer l'ampleur de l'inondation. Les niveaux d'eau historiquement observés (p. ex., disponibles à partir des marqueurs d'inondation) peuvent être utilisés pour dériver le débit et appliqués dans les procédures hydrologiques.

Des preuves d'inondations historiques et pré-enregistrées peuvent être trouvées dans les journaux, les dossiers municipaux, les universités, les bibliothèques, les photographies historiques, les connaissances autochtones et d'autres sources. L'utilisation d'inondations pré-enregistrées dans une AFC peut réduire l'incertitude associée aux événements d'inondation de grande ampleur et peut mieux aligner l'ensemble de données sur l'expérience locale de la communauté touchée par ces événements d'inondation.

Les données historiques doivent être validées dans la mesure du possible et idéalement corroborées à partir de plusieurs sources (p. ex., article de journal décrivant les zones inondées correspondant à une photographie avec des points de repère identifiables).

La prise en compte des « niveaux de perception » est importante dans l'évaluation des inondations pré-enregistrées. Des recherches devraient être menées pour déterminer le seuil minimal d'évènement d'inondation qui a été enregistré par les personnes qui ont subi l'inondation. Des conseils sur les seuils de perception sont inclus dans USGS (2019), Gerard et Karpuk (1979) et Associate Committee on Hydrology (1989).

5.2.5 Profils paléontologiques

Il est possible de recueillir des informations sur les inondations qui se sont produites avant la collecte de documents historiques grâce à la collecte de données physiques, géomorphologiques, dendrochronologiques et autres.

Les paléoinondations sont des événements d'inondation qui se sont produits avant la collecte de données hydrologiques, ils comprennent les inondations qui se sont produites il y a plusieurs milliers d'années. Les preuves géographiques et physiques des paléo-inondations comprennent des alcôves rocheuses avec des séquences de dépôts d'eau stagnante, des cicatrices sur les arbres, des dépôts de bancs de gravier, des cicatrices d'érosion et des sols excavés (Jarrett et England, 2002). Une expertise spécifique en géomorphologie, en géologie ou dans une science connexe, est requise pour identifier et dater ces éléments. En plus de l'identification des

événements de paléo-inondations, il est possible d'identifier une absence d'évènements de paléo-inondation, ce qui augmente le niveau de confiance dans l'ensemble de données hydrométriques existantes (c'est-à-dire, un degré raisonnable de confiance est acquis que le dossier hydrométrique n'omet pas par erreur des crues importantes).

Les informations botaniques sont également utiles pour « étendre » les relevés de débit en examinant les sédiments déposés autour des troncs d'arbres, en examinant les modèles de cernes des arbres et d'autres méthodes. Une expertise spécifique est requise pour ces types d'analyses.

L'intégration directe des estimations de débits basées sur les paléo-inondations dans un ensemble de données hydrologiques utilisées pour l'analyse de fréquence doit être utilisée avec une extrême prudence. Une vérification qualitative des résultats est justifiée lors de l'utilisation de ces données ainsi que lors de l'exécution d'une analyse plus conventionnelle de la fréquence des crues. Dans de nombreuses régions, l'impact du redressement isostatique glaciaire doit être pris en compte dans l'analyse.

5.2.6 Évaluation du contrôle des débits

Il y a plus de 900 grands barrages au Canada et des milliers de petits barrages. La plupart des grands barrages au Canada sont utilisés pour la production d'énergie hydroélectrique, bien que d'autres utilisations comprennent l'approvisionnement en eau, l'irrigation, le contrôle des inondations et les loisirs. Le contrôle du débit modifie la forme de son hydrogramme, y compris le moment et la forme des pointes. Ceci peut entraîner des données historiques de débits en aval non homogènes (avant ou après la construction du barrage ou des changements partiellement ou totalement non corrélés aux mécanismes d'inondation de l'environnement naturel avec la politique de régulation au fil du temps), ce qui doit être pris en compte lors de la réalisation d'une AFC ou analyse AFRC (voir section 5.4). Une technique possible est la dérégulation des données, dans laquelle le routage inverse est utilisé pour estimer les débits « naturels » en amont du contrôle. De plus, si le contrôle des eaux se fait au moyen d'un ouvrage fixe avec peu de stockage par rapport au volume de crue, la donnée maximale annuelle peut possiblement être considérée comme non influencée par le contrôle.

Des méthodes d'évaluation des impacts de la réglementation sur les petits bassins versants ont été proposées (par exemple, Moin et Shaw (1985, 1986), López et Francés (2013)). La pertinence de ces méthodes, ou d'autres, varie considérablement en fonction de la région, des processus de génération des inondations et de l'échelle du bassin versant. La méthode la plus appropriée pour faire face à la réglementation devrait être évaluée par un professionnel qualifié.

5.2.7 Méthode de naturalisation des débits contrôlés

L'objectif de la naturalisation du débit, comme montre la figure 5.2, est d'obtenir les valeurs du débit du cours d'eau qui auraient été obtenues si le barrage n'avait pas retenu le débit, provoquant une atténuation du débit de pointe et une évaporation supplémentaire, et si aucun détournement n'avait réacheminé le courant vers le cours d'eau ou à l'écart de celui-ci pour différentes raisons. La figure 5.3 montre comment naturaliser les débits enregistrés lorsqu'un stockage, un détournement ou une évaporation considérable s'est produit en amont du point d'intérêt. Le professionnel qualifié aura besoin des entrées comme indiqué sur la figure 5.3 pour suivre les étapes de calcul mentionnées ci-dessous.

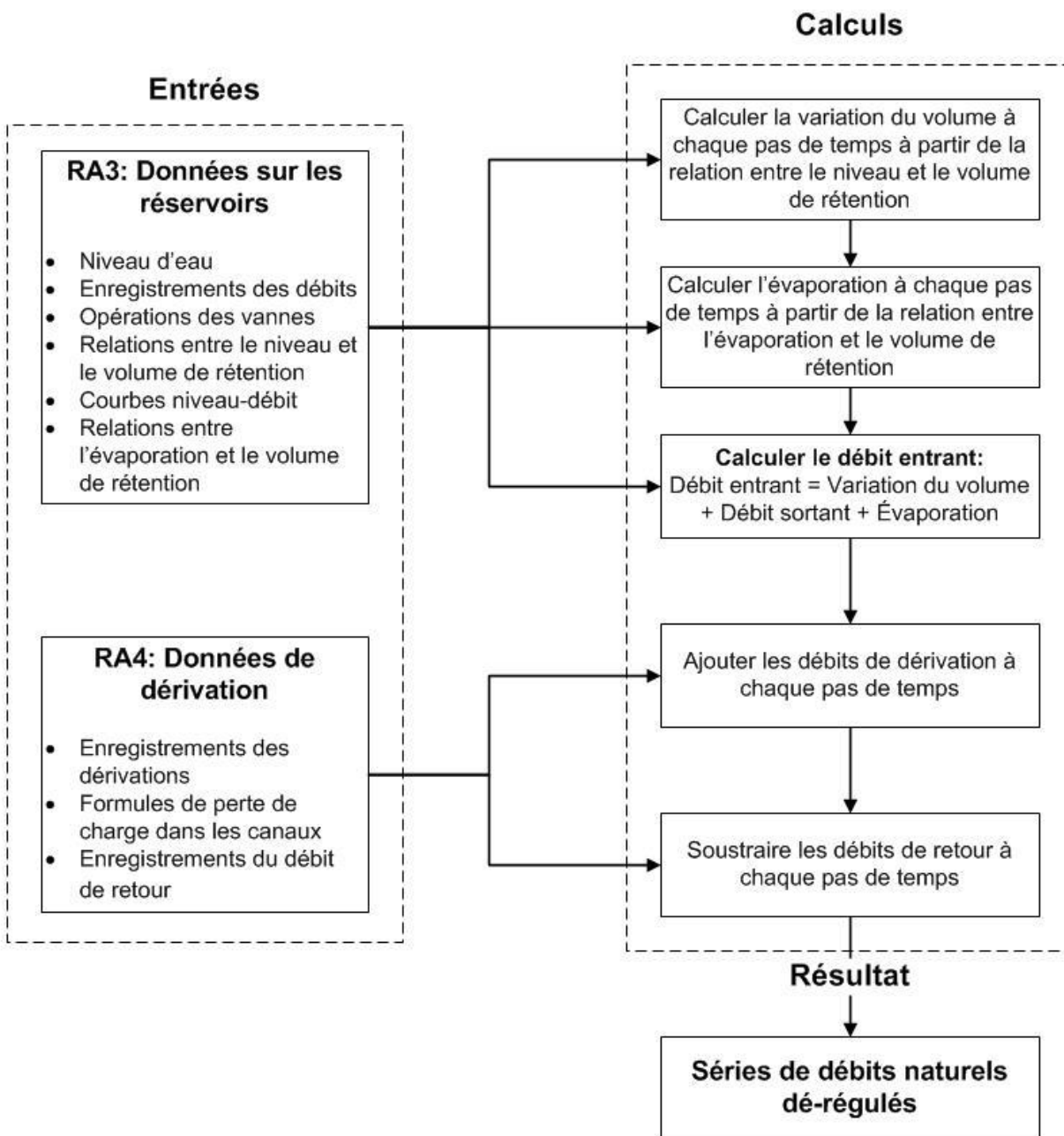


Figure 5.3. Naturalisation des débits contrôlés.

Les intrants nécessaires pour obtenir le débit naturel là où un réservoir a interrompu l'écoulement sont les suivants :

- Les données du niveau d'eau et du débit du barrage, soit mesurés directement, soit dérivés des données de fonctionnement des vannes, soit des courbes de niveau-stockage-débit pour déterminer le débit sortant;
- Relevés de tous les débits déviés, vers ou hors du réservoir;
- Relations niveau-stockage-superficie pour calculer la surface et les volumes de stockage à partir de l'évolution des niveaux d'eau; et,

- Relations évaporation-superficie, où le réservoir se trouve dans une zone d'évaporation nette, c'est-à-dire de faibles précipitations. Il faut veiller à respecter les unités de mesure de l'évaporation, généralement en mm et de la surface du réservoir, généralement en km² ou en hectares. Les données d'évaporation et de précipitations des sites météorologiques à proximité peuvent être appliquées, ou lorsque l'évaporation n'est pas disponible, des formules d'évaporation standard basées sur les données de température et de vent.

Le professionnel qualifié peut alors utiliser ces données pour calculer l'apport naturel au réservoir et ce qui aurait coulé sans atténuation ni évaporation significative. Pour la comparaison des modèles hydrologiques déterminant les débits élevés ou pour les AFC, il faut utiliser un petit pas de temps ne dépassant pas une journée :

1. Calculer le débit dans les réservoirs à partir de l'augmentation du niveau d'eau et du taux de relâche du réservoir, en utilisant les relations niveau-stockage-débit ou les données de débit;
2. Ajouter les débits déviés;
3. Soustraire les débits entrants; et,
4. Ajoutez toute eau évaporée, telle que calculée à partir des relations de stockage lors des calculs d'entrée, le cas échéant.

La dérivation du débit consiste à déplacer l'eau hors des cours d'eau et est beaucoup moins courante que le contrôle des barrages au Canada. Cependant, toute dérivation dans le cours d'eau modélisé et dans la zone d'étude doit être identifiée et les données sur l'eau déviée obtenue, y compris les procédures d'exploitation. Les données d'entrée requises sont les relevés de détournement mesurés pour l'irrigation, ou d'autres utilisations, et les relevés de tout retour de débit. Lorsque l'eau est dérivée à l'extérieur d'un réservoir ou d'un cours d'eau, le débit est ajouté et les débits de retour sont soustraits.

Si les données de dérivation se trouvent au point de dérivation, en amont de toute perte dans le canal, aucune tolérance pour l'infiltration ou l'évaporation n'est requise. Sinon, les estimations de l'eau perdue par infiltration et évaporation du canal entre le point de détournement et le point de mesure doivent être ajoutées aux données de l'eau détournée. Encore une fois, il faut utiliser un petit pas de temps d'un jour ou moins pour les études de débit élevé.

La modélisation peut être appliquée pour comprendre à la fois les débits non contrôlés et contrôlés. Si les modes opératoires sont clairement définis et quantifiables, ils peuvent être appliqués directement dans les modèles hydrologiques. La prudence est requise lors de la dérégulation du débit en présence de changements de niveau d'eau induits par le vent qui peuvent entraîner des erreurs et des débits négatifs potentiels.

5.2.8 Analyse de la qualité des données de débit

La dernière étape après la collecte et la synthèse des données consiste à effectuer un examen de contrôle de la qualité. Le professionnel qualifié doit soumettre les données à une analyse visuelle et à des tests statistiques pour évaluer l'homogénéité des relevés de débit quotidien continu non contrôlés résultant pour les jauges ayant des périodes de données contrôlées. Les données de débit peuvent être testées pour la non-stationnarité avant de décider de l'approche à utiliser pour évaluer le débit de conception.

5.3 Sélection de l'approche analytique

Deux types d'approches hydrologiques sont utilisées pour déterminer les événements de conception. La première approche utilise des données de débit mesurées pour effectuer une AFC à une seule station ou une AFRC à plusieurs stations. Cette approche est justifiée lorsque suffisamment de données hydrométriques fiables sont disponibles. La deuxième approche, la modélisation hydrologique, simule la réponse du bassin versant soit à une séquence continue d'événements météorologiques, soit à un événement pluviométrique de conception unique. Ceux-ci génèrent soit une série de débits synthétiques qui peuvent être utilisés pour effectuer une AFC à une seule station, soit un seul hydrogramme de débit variant dans le temps pour l'évènement de conception. La modélisation hydrologique est utilisée pour analyser les impacts des changements climatiques, lorsque des changements importants de l'occupation du sol en amont du site étudié sont prévus (p. ex., développement futur, etc.) ou ont changé depuis la période des données historiques sur le débit.

Souvent, le professionnel qualifié peut commencer par la première approche pour évaluer le débit de conception ou le niveau d'eau, mais si les données sont insuffisantes, s'il y a une non-stationnarité dans les données enregistrées sur le débit ou le niveau d'eau ou s'il s'aperçoit que des changements importants dans l'occupation du sol sont à prévoir, le professionnel peut avoir besoin d'une méthode alternative et des analyses supplémentaires seront nécessaires.

Dans tous les cas, plusieurs procédures doivent valider les résultats de toute procédure « privilégiée ». Une évaluation et une comparaison rigoureuses des résultats et des observations historiques, combinées à un jugement professionnel expérimenté, devraient évaluer les résultats. Enfin, toute analyse hydrologique doit être documentée et reproductible, avec toutes les hypothèses clairement énoncées, y compris le logiciel, le modèle et les versions.

5.4 Approche d'analyse fréquentielle des crues

Les analyses fréquentielles des crues utilisent les propriétés statistiques des données de débit ou de niveau d'eau observés, historiques ou dérivés pour définir une relation entre l'ampleur du débit (ou le niveau d'eau) et la PDA sur un site donné. La relation est utilisée pour estimer le débit (ou le niveau d'eau) pour une ou plusieurs fréquences d'inondation souhaitées. Cette section décrit les techniques du processus (voir aussi Khaliq 2017).

La figure 5.4 montre les différentes procédures qui se produisent dans le cadre d'une méthode AFC, soit pour une seule station, soit pour AFRC.

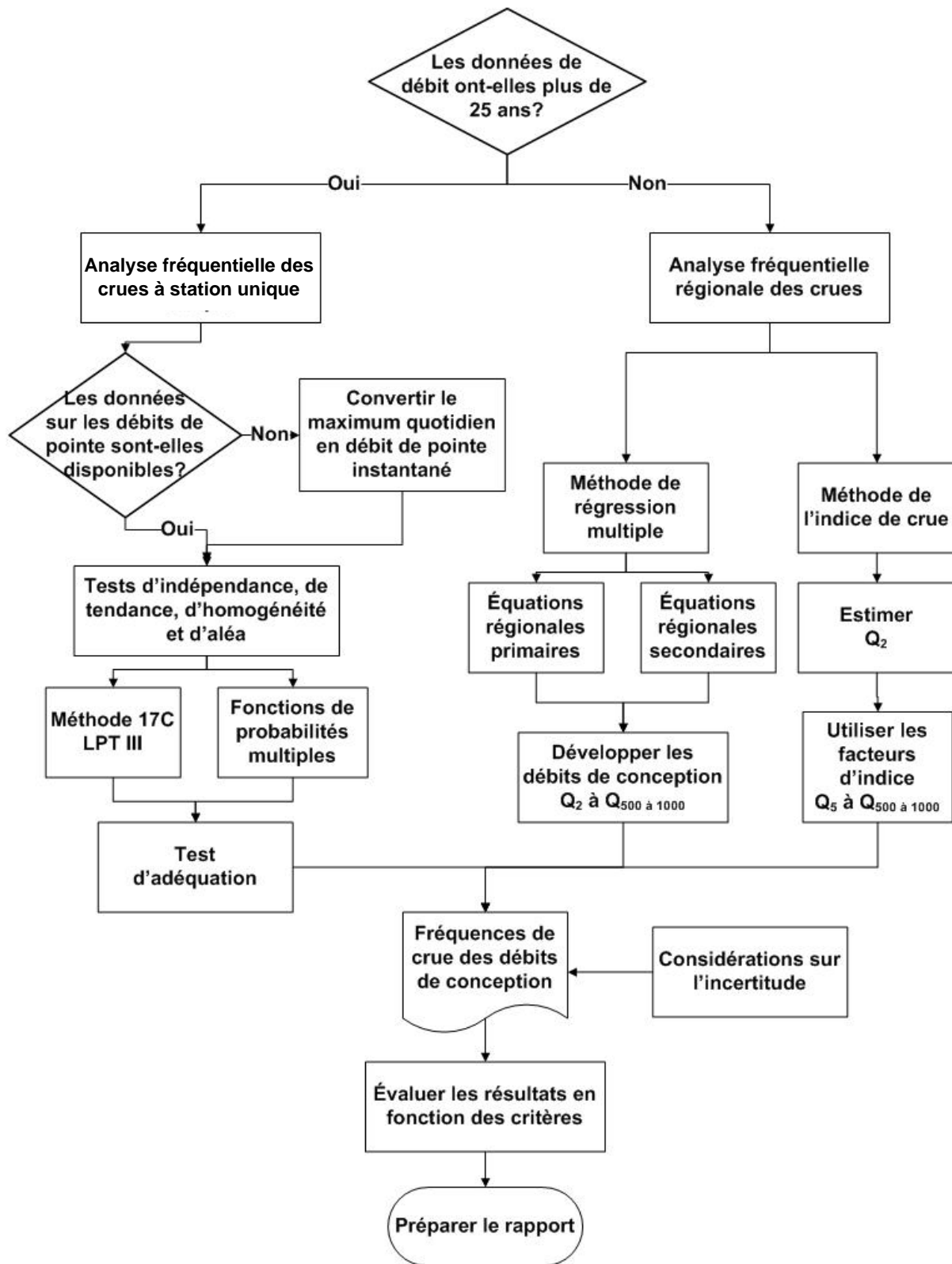


Figure 5.4. Procédure pour les analyses fréquentielles des crues.

Lors de l'analyse à une seule station, des professionnels qualifiés analyseront la fréquence des crues pour les débits de pointe instantanés enregistrés ou synthétiques. Les débits de pointe synthétiques sont estimés à partir du débit quotidien moyen annuel maximal (MA) à l'aide d'équations de régression ou d'autres méthodes, comme expliqués à la section 5.2.2. Les professionnels qualifiés détermineront quelle distribution décrit le mieux les données de débit, une distribution statistique USGS 17C Log-Pearson Type III (voir exemple, USGS 2019) ou une parmi plusieurs fonctions de probabilité, comme décrite en détail plus loin dans cette section. Dans le cadre de ce processus, le professionnel qualifié peut évaluer le degré d'influence des débits nuls ou des faibles débits potentiellement influents qui peuvent affecter négativement l'ajustement de la distribution dans la zone d'intérêt – les plus grandes inondations. En cas de débits nuls ou lors de l'identification et du traitement des zéros et des faibles débits potentiellement influents dans les AFC, et jusqu'à ce qu'un logiciel qui convienne et ayant des distributions multiples soit développé, il est recommandé d'utiliser les méthodes décrites dans le bulletin USGS 17C. Après avoir déterminé la qualité de l'ajustement de la distribution sélectionnée, ils détermineront les probabilités des débits. L'ajustement des fonctions de probabilité aux séries de débit est appelé AFC et est décrit dans les sections 5.4.1 à 5.4.7.

Lors d'une AFRC, des professionnels qualifiés analyseront la fréquence des inondations soit par une méthode de régression multiple, soit par une méthode d'indice d'inondation (Moin and Shaw, 1985, 1986). Une méthode de régression multiple permet de vérifier la validité des corrélations entre un certain nombre de facteurs causaux potentiels et de facteurs météorologiques dans une région hydrologique et une série de pointes d'inondation PDA. Il en résulte des équations régionales primaires d'une plus grande précision et des équations régionales secondaires qui affinent les débits prédits pour les débits enregistrés dans des stations similaires de la région (voir section 5.4.8). À partir de ces équations, appliquées aux caractéristiques du bassin versant et aux facteurs météorologiques du cours d'eau à l'étude, le professionnel qualifié dérive les débits de conception pour diverses probabilités de dépassement annuelles (PDA).

Une méthode d'indice de crue utilise une analyse de stations hydrologiquement similaires dans une région pour déterminer les facteurs d'indice qui relient le débit annuel moyen aux différents pourcentages de débits de pointe PDA. Pour le cours d'eau étudié, le professionnel qualifié détermine le débit annuel moyen (voir la section 5.4.11) et applique les facteurs d'indice de la région pour déterminer les débits de conception pour diverses probabilités de dépassement annuel.

Une fois les débits de conception déterminés et vérifiés, le professionnel qualifié peut intégrer les changements climatiques (section 4.0) et décrire les incertitudes (section 9.0). Un examinateur qualifié qui n'a pas travaillé sur le projet devrait examiner les analyses avant que le rapport final (section 10.0) ne présente le débit de conception selon les critères de délimitation des risques d'inondation de la juridiction.

Les inondations d'intérêt pour la délimitation des aléas d'inondation, comme la PDA de 1 %, sont souvent beaucoup plus importantes que toute inondation enregistrée au cours de la période relativement courte couverte par les relevés systématiques au Canada. L'extrapolation d'un modèle statistique simple de la durée de la période des relevés limitée d'un processus physique complexe introduit une incertitude dans l'estimation des crues de projet. Dans de telles situations, les procédures d'analyse fréquentielle régionale des crues sont recommandées pour compléter l'AFC à une seule station. Cela comprend également l'incorporation d'ajustements au biais de la station unique et la combinaison d'estimations indépendantes des

débites de conception améliore la dérivation du quantile d'inondation et réduit son incertitude (USGS 2019).

Bien que cette discussion se concentre sur l'analyse fréquentielle conventionnelle des crues du débit de pointe, de nombreux concepts sont également applicables aux analyses de la durée et de la fréquence des crues (p. ex., Cuderlik et al. 2007) et aux analyses des volumes de crue, des niveaux d'eau, des débits de pointe saisonniers et d'autres phénomènes naturels, y compris les précipitations.

5.4.1 Principales hypothèses de l'approche d'analyse fréquentielle des crues

L'utilisation de l'AFC suppose que les relevés des inondations observées peuvent être traités comme des variables aléatoires indépendantes tirées d'une population homogène et représentative qui reste inchangée dans le temps. Une variété de tests statiques existe pour aider les professionnels qualifiés à déterminer dans quelle mesure un relevé de débit de pointe répond à chacune de ces hypothèses préalables pour une AFC. Un plus grand écart par rapport à ces hypothèses nécessite une prudence accrue et une explication des causes lors de l'évaluation des résultats et augmente l'importance des contrôles indépendants. Dans certains cas, il est possible d'améliorer la fiabilité de l'AFC en procédant à une analyse supplémentaire de données. Dans d'autres cas, la consultation et la contribution de spécialistes dans des domaines connexes peuvent être nécessaires.

5.4.2 Durée de la période des relevés

L'extrapolation contribue de manière significative à l'incertitude des résultats de l'AFC. Le moyen le plus efficace d'atténuer cette incertitude consiste à maximiser la longueur et la représentativité de la période de relevés disponibles. Les approches couramment adoptées pour ce faire passent d'une analyse à une seule station à une analyse qui inclut des ajustements des paramètres ou des moments basés sur des informations régionales, à la combinaison d'une estimation indépendante du quantile d'inondation. L'apport de ce processus est la quantification de l'incertitude des estimations.

Bien qu'il existe un certain nombre de « règles empiriques » suggérées sur la base de certaines méthodes dépassées et d'autres plus récentes, celles-ci permettent d'étendre les informations. Les spécialistes utilisent différents seuils pour passer d'une station unique à l'utilisation d'informations régionales, comme indiqué ci-dessous. L'AFC à site unique ne devrait être menée que dans les cas où la période de relevés est supérieure à 10 ans (England et al. 2017). Cependant, l'obtention de résultats fiables à partir d'une AFC à site unique nécessite une période de relevés qui dépasse considérablement la PDA d'intérêt (p. ex., Klemeš 1987). Cela n'est pas pratique dans le contexte canadien compte tenu de la durée relativement courte des relevés dans la plupart des stations individuelles. L'approche traditionnelle adoptée consistait à obtenir une estimation basée sur une durée de la période des relevés « raisonnable » proportionnelle à la PDA souhaitée.

Par exemple, le FDRP Canada-Ontario, basé sur une analyse régionale approfondie, a proposé une procédure illustrée à la figure 2.5. La limite suggérée était une durée minimale de relevés de 25 ans. Dans d'autres régions, ce seuil pourrait être ajusté en fonction des données disponibles. Une règle courante a été d'éviter d'extrapoler des PDA pour plus du double de la durée de la période des relevés disponible (p. ex., en limitant l'extrapolation d'un relevé de 50 ans à l'inondation PDA de 1 %, ce qui équivaut à une période de retour de 100 ans).

Certaines références ont fourni des recommandations spécifiques. Par exemple, Coulson (1991) a proposé des durées de la période des relevés minimaux spécifiques pour estimer divers événements d'inondation de PDA en Colombie-Britannique.

Ces critères minimaux pourraient être insuffisants si la période de relevés correspond à une période d'activité de crue anormalement élevée ou faible. Les relevés d'une courte période nécessitent une validation en consultant des sources historiques d'informations ou de données provenant de stations hydrométriques avec des conditions hydrologiques similaires et avec des relevés plus longs. Les sections 5.2.2 à 5.2.5 décrivent les approches pour prolonger la période d'analyse en transposant les données d'autres jauges hydrologiques similaires, en incorporant les crues et le débit historique, les informations botaniques et paléos antérieures aux relevés systématiques.

Lors de la compilation des relevés, il est nécessaire de déterminer si l'analyse sera basée sur des données de débit de pointe instantanée ou moyennes quotidiennes. Si le dossier comprend des inondations hivernales, y compris des événements liés à des embâcles, le professionnel qualifié doit également déterminer si l'analyse tiendra compte des années civiles ou des années hydrologiques. Ces considérations peuvent affecter la quantité de données disponibles.

5.4.3 Qualité et exhaustivité des données

Les données de débit de pointe sont généralement sujettes à une grande incertitude. Étant donné que l'AFC est sensible à un petit nombre d'observations de débits élevé et faible, il faut faire attention de bien comprendre les incertitudes qui sont implicites dans le processus de mesure. De plus, les données manquantes dans les relevés erronés et incomplets doivent être remplies dans la mesure du possible.

Une fois sélectionné et examiné pour la qualité, le professionnel qualifié doit tracer et examiner l'ensemble des données pour déterminer la probabilité de produire une AFC satisfaisante. Les valeurs aberrantes, les changements progressifs, les ruptures de pente et le moment où les inondations se sont produites pourraient indiquer que différents processus générateurs d'inondations peuvent être présents. Les faibles valeurs aberrantes qui pourraient influencer l'AFC (p. ex., les années à débit nul et les faibles débits potentiellement influents) doivent être examinées et supprimées à l'aide d'un test statistique tel que le test multiple de Grubbs-Beck (Cohn et al. 2013; England et al. 2017). Les procédures décrites dans le Bulletin 17C (USGS 2019) peuvent être appliquées pour traiter de telles situations. Une fois supprimée, leur occurrence doit encore être reflétée dans l'analyse globale.

Les crues extraordinaires (valeurs aberrantes élevées) peuvent être identifiées à l'aide d'un processus similaire, mais sont généralement retenues en raison de l'importance des débits élevés pour la prévision des crues de conception. Les valeurs aberrantes élevées peuvent être le résultat d'un différent processus générateur de crues, nécessitant une analyse plus complexe, comme indiqué à la section suivante (5.4.4). De même, les informations historiques observées, lorsqu'elles sont connues, devraient être incorporées dans l'analyse, en notant que leur intégration se refléterait également dans la position du graphique.

Les implications politiques de la régulation et des détournements entre bassins doivent être prises en compte, puisque l'AFC doit être appliquée à une série de débits de pointe « naturalisés ». La section 5.2.6 explique comment gérer les relevés de débits contrôlés. Le professionnel qualifié doit déterminer s'il convient de contrôler à nouveau le débit de pointe

résultant en fonction des procédures d'exploitation prévues et des critères de risque acceptés par les parties prenantes.

5.4.4 Structure d'analyse

Pour une AFC à site unique, il y a trois critères clés à considérer en termes de structure d'analyse (chacun est décrit ci-dessous dans cette section) :

1. Maximum annuel (MA) versus pointes dépassant un seuil (POT);
2. Population combinée versus population unique; et,
3. Si l'analyse doit tenir compte de la non-stationnarité.

Le terme MA fait référence à la création d'une série d'inondations historiques qui comprend uniquement le débit de pointe le plus élevé de chaque année. Cette méthode convient lorsque les débits annuels les plus importants se produisent pendant la crue printanière. Dans de tels cas, il peut n'y avoir qu'un ou deux débits de pointe indépendants se produisant au cours d'une année donnée. Pour les emplacements (p. ex., les bassins versants urbanisés, les zones à faible accumulation de neige, etc.) qui connaissent des débits élevés pendant différentes saisons ou à partir de différents facteurs de causalité (p. ex., la fonte des neiges, la pluie sur la neige, différents types de systèmes provoquant des précipitations), une approche MA peut ne pas capturer des informations importantes sur l'origine et le comportement des inondations, en particulier pour les relevés de courte durée. Par exemple, certaines années peuvent avoir plusieurs grandes inondations indépendantes tandis que pour d'autres années, il n'y a qu'un seul événement significatif. Pour résoudre ce problème, toutes les pointes au-dessus d'un seuil sélectionné sont incluses dans une analyse POT, également appelé analyse de « série de durée partielle ». Les analyses POT sont plus complexes que les analyses MA et l'identification d'un seuil adéquat peut être compliquée. Les résultats POT sont asymptotiquement comparables aux résultats MA pour les PDA inférieures (p. ex., 1 %). Cependant, il peut y avoir de grandes différences pour des PDA plus élevées (p. ex., 50 %, 20 %, 10 %) (Bezak et al. 2013). De plus, l'analyse POT peut entraîner une variance d'échantillonnage des événements de débit de conception inférieure à celle fournie par l'analyse MA pour une PDA $< 0,10$ lorsque la série POT contient une taille d'échantillon supérieure ou égale à $1,65 N$, N étant le nombre d'années de la collecte systématique des données (Cunnane, 1973).

« En général, une série chronologique d'estimations annuelles de débit de pointe peut être considérée comme un échantillon aléatoire de variables aléatoires indépendantes et distribuées de manière identique. La série chronologique des débits de pointe est censée être un échantillon représentatif de la population des crues futures. Cette hypothèse dépend de la réalisation d'une analyse exploratoire des données et d'une connaissance physique approfondie du système. Essentiellement, le processus stochastique qui génère les inondations est [aussi] censé être stationnaire ou invariant dans le temps » (USGS, 2019).

Les analyses de données exploratoires et la connaissance des propriétés physiques qui sont à l'origine des inondations sont à la base de la manière de procéder à une AFC et de la sélection des approches pour sa réalisation. De plus, il peut y avoir des preuves que différents mécanismes générateurs de crues causent des problèmes dans les fonctions de densité unique correspondant à la série maximale annuelle. Ceci peut être visible lors de la visualisation du graphique de fréquence et peut se présenter sous la forme de courbes à ligne brisée ou lorsque les crues observées les plus extrêmes s'écartent de la distribution de fréquence théorique.

La plupart des AFC ont eu tendance à se baser sur une analyse de « population unique » de la MA où l'échantillon d'observations est censé être tiré d'un processus stationnaire, ou supposé stationnaire, et homogène. Dans certains cas, la connaissance des propriétés physiques des mécanismes générant une inondation peut indiquer qu'il peut y avoir deux ou plusieurs processus différents (potentiellement stationnaires) qui contribuent à l'ampleur de l'inondation, telle que les embâcles, la fonte des neiges et les précipitations résultant de différents événements météorologiques responsables (p. ex., ouragans, dépressions froides stationnaires, mésocyclones).

Lorsqu'il est prouvé que la série MA n'est pas tirée d'une population homogène (unique) et que procéder à une AFC traditionnelle peut entraîner une incapacité à décrire avec précision la relation fréquence-amplitude, le spécialiste peut explorer l'utilisation de modèles de fréquences plus complexes. Une approche consiste à adopter l'utilisation d'un modèle qui permet la séparation des crues fortes et faibles dans l'ajustement des paramètres de la courbe de fréquence à la série MA, comme la distribution de Wakeby. Ceci se fait en sachant que différents facteurs de causalité sont en jeu et aggravent l'analyse et qu'il se peut qu'il n'y ait pas d'informations et de données adéquates pour soutenir une analyse de fréquence « combinée ».

« En théorie... il y aurait motif à traiter la plupart des séries canadiennes comme étant composées de deux ou plusieurs échantillons provenant de populations différentes. En pratique, cependant, un tel traitement complique considérablement la préparation d'une analyse fréquentielle, et il n'y a guère de raison de le faire, à moins que le traitement en tant que population unique ne produise une forme particulière de la courbe de fréquence ou qu'il y ait des raisons de déterminer des inondations de conception séparées des deux types [ou plus] de population. » (Associate Committee on Hydrology, 1989)

Lorsque les conditions justifient son utilisation, une analyse de population combinée est recommandée. Une analyse de population combinée, également connue comme un événement d'impact composé, crée une AFC distincte pour chaque processus et combine les résultats en une seule relation composée amplitude-fréquence ou niveau-fréquence. Tel que mentionné précédemment, une analyse de population combinée est plus complexe qu'une analyse de population unique. L'approche la plus complexe n'est généralement envisagée que pour les situations dans lesquelles :

- Il existe des mécanismes distincts évidents dans les données historiques (c'est-à-dire que les débits de pointe observés montrent la présence de deux sources de population ou plus) et il semble que ces différences influenceront considérablement l'estimation des débits de conception à la PDA souhaitée;
- Il est nécessaire de saisir les implications des changements climatiques ou du changement d'occupation des sols pour chacun des différents mécanismes d'inondation dominants et leurs populations; et,
- Il y a suffisamment d'informations et de données disponibles pour chacun des principaux mécanismes générateurs d'inondations pour soutenir une analyse de fréquence combinée.

Dans la plupart des projets d'AFC utilisant des outils traditionnels, il est supposé qu'il y ait stationnarité ou que la variable est invariante dans le temps. Cependant, des outils AFC plus récents offrent la possibilité de tenir compte de la non-stationnarité (p. ex., El Adlouni et al., 2007; Razmi et al., 2017). Ces nouveaux outils d'AFC non stationnaires sont plus complexes

que les outils d'AFC traditionnels. Le spécialiste doit déterminer si la complexité supplémentaire est requise. Par exemple, il peut être plus efficace de tenir compte des changements climatiques en appliquant les facteurs régionaux établis par l'analyse des changements climatiques (section 4.0) aux résultats d'une AFC stationnaire.

5.4.5 Progiciel

Bien qu'il existe une variété de logiciels permettant d'effectuer des analyses fréquentielles à une station unique, les présentes lignes directrices n'en incluent que quatre, une révision complète étant nécessaire dans un cas. Il s'agit, sans ordre particulier, de *Consolidated Frequency Analysis* du ECCC (Pilon et Harvey 1993), de *HEC-SSP* (USACE 2019), et de *FloodnetRFA* du CRSNG (2020). HyFran (El Adlouni et Bobee, 2015) est un produit commercial qui effectue des distributions multiples tout en ajustant les données par plusieurs méthodes.

La plupart des progiciels offrent le choix entre plusieurs distributions de probabilités, bien que tous les programmes n'offrent pas les mêmes options. Des progiciels spécifiques pour l'AFC doivent être choisis en fonction de considérations sur les données d'entrée, les méthodes de calcul, les sorties et l'application des résultats. Il est important de documenter les raisons du choix du modèle. Une revue des outils logiciels d'AFC sélectionnés est disponible dans Khaliq (2017).

5.4.6 Distributions de probabilités

Certaines distributions de probabilité sont bien adaptées à l'AFC sur la base de critères théoriques. Par exemple, la distribution *Extreme Value Type I* (communément appelé « Gumbel ») a une base théorique solide pour les applications MA, tandis que la distribution *Generalized Pareto* est préférée pour les analyses POT. Dans d'autres cas, une distribution « institutionnelle » est adoptée pour définir une norme de pratique commune. Par le biais du *US Geological Survey Bulletin 17C* (England et al., 2017), les États-Unis ont adopté la distribution Log-Pearson de type III comme distribution institutionnelle. Au Canada, de nombreuses études d'AFC considèrent au moins une distribution tirée de chacune des familles de distribution normale, généralisée des valeurs extrêmes et de Pearson. D'autres distributions avec plus de paramètres (p. ex., la distribution de Wakeby à cinq paramètres) conviennent mieux à celles où une analyse fréquentielle combinée peut être justifiée, mais les données disponibles peuvent être insuffisantes pour soutenir une telle analyse. Cependant, les spécialistes doivent utiliser leur jugement pour évaluer la performance et la justification de la sélection d'une distribution particulière pour leurs recherches.

Une fois qu'une distribution a été sélectionnée, elle doit être « ajustée » aux données d'inondation observées. La simplicité, la variété et la nature objective de l'ajustement mathématique des courbes ont relégué la méthode autrefois populaire d'ajustement graphique à de rares circonstances atténuantes.

Il existe de nombreuses méthodes mathématiques pour ajuster les paramètres de distribution, y compris la méthode des moindres carrés, la méthode des moments, la méthode des moments pondérés et des moments-L ainsi que les méthodes du maximum de vraisemblance et du maximum de vraisemblance généralisé. Certaines méthodes d'ajustement des paramètres sont mieux adaptées que d'autres à des distributions particulières. Des approches statistiques plus spécialisées telles que l'*Expected Moments Analysis* (Cohn et al., 1997) sont nécessaires lorsque les séries de données sont coupées, brisées ou incomplètes, ou lors de l'incorporation

d'informations historiques sur les inondations, y compris des observations. La comparaison des coefficients d'asymétrie est parfois utilisée pour sélectionner des distributions à deux et trois paramètres aux valeurs théoriques et régionales. Il peut également être utile dans l'estimation de la PDA en incluant des informations régionales. Le choix de la distribution de probabilité est généralement plus important que la méthode d'ajustement de la distribution. Cependant, les deux devraient être considérés en tenant dûment compte de l'incertitude globale des résultats de l'AFC (Alberta Transportation, 2001).

Certains progiciels fournissent une analyse de probabilité bayésienne et des systèmes d'aide à la décision pour aider les utilisateurs à déterminer si une distribution donnée convient. Bien que les mesures statistiques de l'ajustement soient utiles, elles peuvent également fournir des conclusions biaisées ou trompeuses. Par exemple, la statistique de Kolmogorov-Smirnov est encore parfois utilisée à tort pour évaluer la pertinence d'une distribution paramétrique (p. ex., comme il est décrit dans Crutcher, 1975). Le jugement d'expert joue toujours un rôle important dans la détermination de la manière d'interpréter, de classer et de sélectionner le meilleur choix parmi les distributions alternatives.

En l'absence d'une norme de pratique bien définie, certaines approches utilisées par les professionnels pour sélectionner les résultats d'AFC « finaux » comprennent :

- Utiliser les résultats d'une seule distribution « mieux ajustée », où le « meilleur ajustement » est apparent.
- Utiliser une moyenne ou une moyenne pondérée de toutes les distributions raisonnables.
- Utiliser le résultat le plus conservateur d'un ensemble de distributions « acceptables ».
- Fournir des intervalles de confiance pour les estimations des différentes PDA.

Quel que soit le choix final pour la AFC, le spécialiste doit documenter et justifier le choix des méthodes d'analyse, les données utilisées pour dériver la distribution la mieux adaptée et la méthode utilisée pour développer les paramètres du modèle.

Il est important de comparer les résultats avec ceux d'autres méthodes et emplacements, pour donner confiance dans le choix des débits de conception. Même lorsque l'estimation des débits de conception est effectuée à l'aide d'une AFC à station unique avec de longues séries de données, des estimations alternatives utilisant, par exemple, les méthodes régionales doivent être appliquées.

5.4.7 Évaluation des résultats selon les critères d'utilisation

Il convient de vérifier les résultats de l'AFC par rapport aux estimations indépendantes du débit de pointe, en particulier dans les analyses qui impliquent une extrapolation significative d'une courte période de relevés historiques. Les sources de données indépendantes peuvent inclure des études précédentes, des comptes rendus historiques non systématiques, des estimations régionales (voir la section 5.4.8) ou des résultats de modèles hydrologiques (voir la section 5.5). Les résultats de l'AFC doivent être comparés aux informations sur les inondations observées à des fins de cohérence. Par exemple, les résultats doivent être réévalués si l'inondation d'une PDA de 1 % est dépassée plusieurs fois au cours d'un relevé de 100 ans ou si elle a une ampleur plusieurs fois supérieure à celle de l'évènement observé le plus important.

Les résultats de toute vérification indépendante doivent être inclus dans la documentation de l'évaluation de l'inondation de conception pour le rapport de délimitation des aléas d'inondation.

5.4.8 Analyse fréquentielle régionale des crues

La section précédente décrivait l'AFC dans le contexte d'une application à site unique où des « données de débits bien arrondies » existent; ce qui signifie de longues périodes de relevés, capturant à la fois les événements importants et faibles. Cependant, l'AFC joue également un rôle clé dans la réalisation d'analyses fréquentielles régionales des crues. Une AFRC peut être utilisée pour estimer les débits de pointe pour les emplacements non jaugés et pour les emplacements où les relevés d'inondation disponibles ne peuvent pas prendre en charge une analyse fiable d'un seul site. Une AFRC peut également fournir une évaluation indépendante précieuse du débit de conception pour les PDA d'intérêt et peut être utilisée pour développer un estimateur amélioré des PDA en utilisant la combinaison d'évaluations indépendantes (voir USGS, 2019). Il peut également être utilisé pour vérifier les résultats d'une analyse sur un seul site, même lorsque les données sur le site sont bien arrondies.

Une autre forme d'analyse régionale consiste à calculer le biais de station d'un certain nombre de stations avec de longues séries de données et à développer une couche cartographique avec des isolignes de biais. Cela aidera à améliorer les estimations de probabilité en regroupant les données nécessaires des jauges dans la région hydrologiquement homogène. Cette mise en commun des données, par définition, génère une taille d'échantillon plus grande. De plus, ceci fournit des paramètres plus cohérents pour la région (Hardison, 1974). Les procédures décrites dans le Bulletin 17C (USGS, 2019) peuvent être suivies pour réaliser cette étape.

Le processus d'AFRC augmente la quantité de temps qui est normalement disponible pour une analyse fréquentielle à une seule station en regroupant les données provenant d'emplacements hydrologiques similaires. Les groupes sont généralement définis sur la base de similitudes hydrologiques, météorologiques ou physiographiques et validés à l'aide de statistiques d'homogénéité (p. ex., Hosking et Wallis, 1997). L'incorporation de plusieurs sources de données signifie que l'étendue des travaux et le niveau d'effort requis pour une AFRC sont considérablement plus élevés que pour une AFC à site unique bien que les résultats soient applicables à tous les cours d'eau hydrologiquement similaires de la région et puissent être très utiles pour réduire l'incertitude associée à l'AFC à site unique.

Il existe des sources d'incertitude similaires dans les AFRC et les AFC à site unique, y compris les hypothèses statistiques pour les séries d'inondations de chaque emplacement, le choix et l'ajustement des distributions de probabilité et l'extrapolation de courtes séries de données. L'effort supplémentaire nécessaire pour entreprendre l'analyse régionale entraînera une réduction de l'incertitude résultant de l'utilisation de données provenant de plusieurs sites et de la possibilité de combiner ces estimations avec celles de l'analyse d'un seul site (à condition qu'elles soient suffisamment indépendantes). Les deux principales approches de l'AFRC (analyse de régression multiple et analyse d'indice de crue) sont décrites dans les sections suivantes.

5.4.9 Analyse fréquentielle régionale des crues – Analyse de régression

La réalisation d'une analyse de régression d'une AFRC implique de développer des relations directes entre les amplitudes du débit de pointe, pour des PDA spécifiques estimées à partir d'un certain nombre d'AFC à une seule station, de bassins versants avec des caractéristiques

hydrologiques et météorologiques dans une région hydrologiquement similaire. Les résultats sont généralement une suite d'équations de régression (p. ex., pour différentes PDA), uniques à chaque région. L'approche de régression multiple est largement utilisée aux États-Unis, où les équations standardisées sont largement disponibles (Beard, 1974). De même, il existe des équations acceptées disponibles pour de nombreuses régions du Canada qui utilisent la régression des moindres carrés généralisés (p. ex., Moin et Shaw, 1986; Chang et al., 2002).

Les variables indépendantes, ou descriptives, utilisées dans les équations de régression comprennent généralement des caractéristiques physiographiques clés, telles que la superficie du bassin versant et la pente du canal, ainsi qu'un certain nombre de caractéristiques météorologiques, telles que la température printanière moyenne, les précipitations printanières et les jours sans gel. D'autres caractéristiques physiographiques et météorologiques peuvent également être prises en compte, telles que la forme du bassin versant, l'orientation dans les régions montagneuses, la superficie des lacs et des marécages et les précipitations annuelles moyennes, à condition que les caractéristiques individuelles ne soient pas trop corrélées entre elles dans le modèle proposé. Les transformations, telles que les logarithmes, sont souvent nécessaires pour répondre aux hypothèses de régression de normalité et de linéarité. En général, il est préférable d'utiliser le nombre minimum de variables qui sont statistiquement significatives et peuvent fournir une description acceptable du comportement. Cependant, les variables peuvent être regroupées en équations primaires et secondaires pour obtenir des estimations plus précises (p. ex., Moin et Shaw, 1986).

Le professionnel qualifié peut appliquer ces équations de régression régionale au bassin versant du site étudié pour obtenir les PDA recherchées, les probabilités de débits ou de niveau d'eau. Bien entendu, le bassin versant doit se situer dans la région hydrologique où les équations ont été élaborées. Plus les coefficients de régression sont statistiquement significatifs pour les équations régionales, meilleurs sont les résultats prédictifs. Si l'analyse de régression incluait des indicateurs météorologiques forts, les mêmes relations peuvent s'appliquer aux indices météorologiques résultants des modèles de changements climatiques.

5.4.10 Analyse régionale de la fréquence des crues – Analyse de l'indice des crues

Les analyses d'indice des crues supposent que les sites de chaque région hydrologiquement similaire partageront une « courbe de fréquence » commune qui relie la fréquence des crues à leur ampleur sans utilisation d'unités. Les importances des inondations sans dimension sont obtenues en divisant les résultats d'AFC par une « crue d'indice » commune. Les AFC à station unique doivent d'abord être menées pour la région.

L'inondation moyenne annuelle, débit pour la PDA 50 %, est souvent utilisée pour représenter la crue d'indice, mais d'autres débits représentatifs peuvent également être utilisés. L'indice de crue doit être estimé indépendamment pour chaque site, souvent sur la base d'une régression multiple, ce qui est expliqué dans la sous-section précédente.

La combinaison d'une crue d'indice spécifique au site avec la courbe de fréquence régionale génère les débits de pointe pour diverses PDA pour le site étudié.

5.4.11 Données publiées sur la fréquence des crues régionales

Les études complètes d'AFRC qui couvrent de plus grandes juridictions sont parfois résumées dans une carte ou un atlas (p. ex., Coulson et Obedkoff, 1998), ou documentées dans un

rapport régional accessible au public. Les résultats d'études plus récentes peuvent être disponibles via des applications de cartographie en ligne.

Ces outils sont extrêmement utiles pour les évaluations de sélection préliminaires et pour les vérifications indépendantes des résultats spécifiques à un projet. Ils sont également utiles pour diminuer l'incertitude de l'évaluation des sites jaugés. Puisque ces études sont à grande échelle et complètes, elles ne sont généralement pas bien adaptées directement aux applications de délimitation des aléas d'inondation, des analyses spécifiques au projet seront généralement nécessaires.

5.5 Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique consiste à estimer le débit à un emplacement spécifique à l'aide de données sur les précipitations et d'autres données météorologiques, telles que la température, qui se sont produites sur le bassin versant. Les données météorologiques peuvent couvrir un certain nombre d'années à des fins de simulation continue ou les données peuvent provenir d'un événement historique extrême (comme l'ouragan Hazel, Ontario 1954 ou Buffalo Gap, Saskatchewan 1961). Ces modèles peuvent également être utilisés pour estimer le débit associé aux précipitations maximales probables (OMM, 2009) ou aux pluies plus fréquentes et aux distributions de précipitations associées aux pluies de conception. L'application de modèles hydrologiques pour éclairer les considérations de conception hydrologique peut être regroupée en trois catégories :

- Évènements enregistrés en continu sur plusieurs années.
- Analyse des pluies de conception qui comprend les distributions des pluies de conception et la hauteur des précipitations pour un événement historique (p. ex., l'ouragan Hazel) ou correspondant à une probabilité de dépassement des précipitations spécifique pour une durée spécifique, telle que résultant d'une courbe Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et distribuée en utilisant une distribution d'hyétogrammes de pluie de conception (p. ex., la pluie de type Chicago décrite dans « *Hydrology of Floods* », Associate Committee on Hydrology (1989)).
- Les précipitations maximales probables, qui prennent en compte les précipitations théoriques les plus importantes possibles, combinées à d'autres conditions climatologiques (p. ex., l'accumulation de neige) pour dériver la crue maximale probable, celles-ci n'étant associées à aucune PDA spécifique.

Les modèles hydrologiques peuvent être des modèles numériques simples ou complexes et peuvent être classés de plusieurs façons (voir le tableau 5.3).

Tableau 5.3. Base de classification des modèles de simulation hydrologique (adapté du Associate Committee on Hydrology 1989).

<i>Base de classification</i>	<i>Classification</i>
Nature du bassin	Urbain ou rural
Durée de saisie	Évènement ou continu
Description de l'entrée et/ou du processus	Groupé ou distribué

Selon le type de modèle utilisé, la simulation hydrologique peut avoir diverses entrées telles que les précipitations, la température, l'humidité du sol, la couverture terrestre, les effets de la glace, les sections transversales des cours d'eau et la bathymétrie, les données numériques de terrain (p. ex., MNT, lidar), le stockage du lac, l'évaporation, les coefficients de ruissellement saisonniers, etc.

La figure 5.5 fournit plus de détails sur la classification potentielle des modèles hydrologiques et élargit les types de modélisation pour inclure les modèles déterministes ou conceptuels par rapport aux modèles stochastiques. Les modèles conceptuels sont des représentations empiriques d'un système hydrologique permettant une quantification du cycle hydrologique. Les modèles physiques sont plus explicites et appliquent des équations d'origine physique adaptées pour résoudre les relations entre les facteurs météorologiques et de terrain afin d'obtenir des estimations de débit. Dans cette section, la modélisation hydrologique fait référence à l'utilisation de méthodes conceptuelles ou physiques dans la modélisation numérique qui résout les bilans hydriques des bassins pour estimer les séries chronologiques de débit. Celles-ci peuvent être continues sur une période de temps (années) ou pour un événement unique (une pluie de conception), regroupées ou distribuées, rurales ou urbaines, comme l'explique la figure 5.5. La modélisation stochastique tend à s'appuyer sur des analyses statistiques des seules caractéristiques hydrologiques historiques.

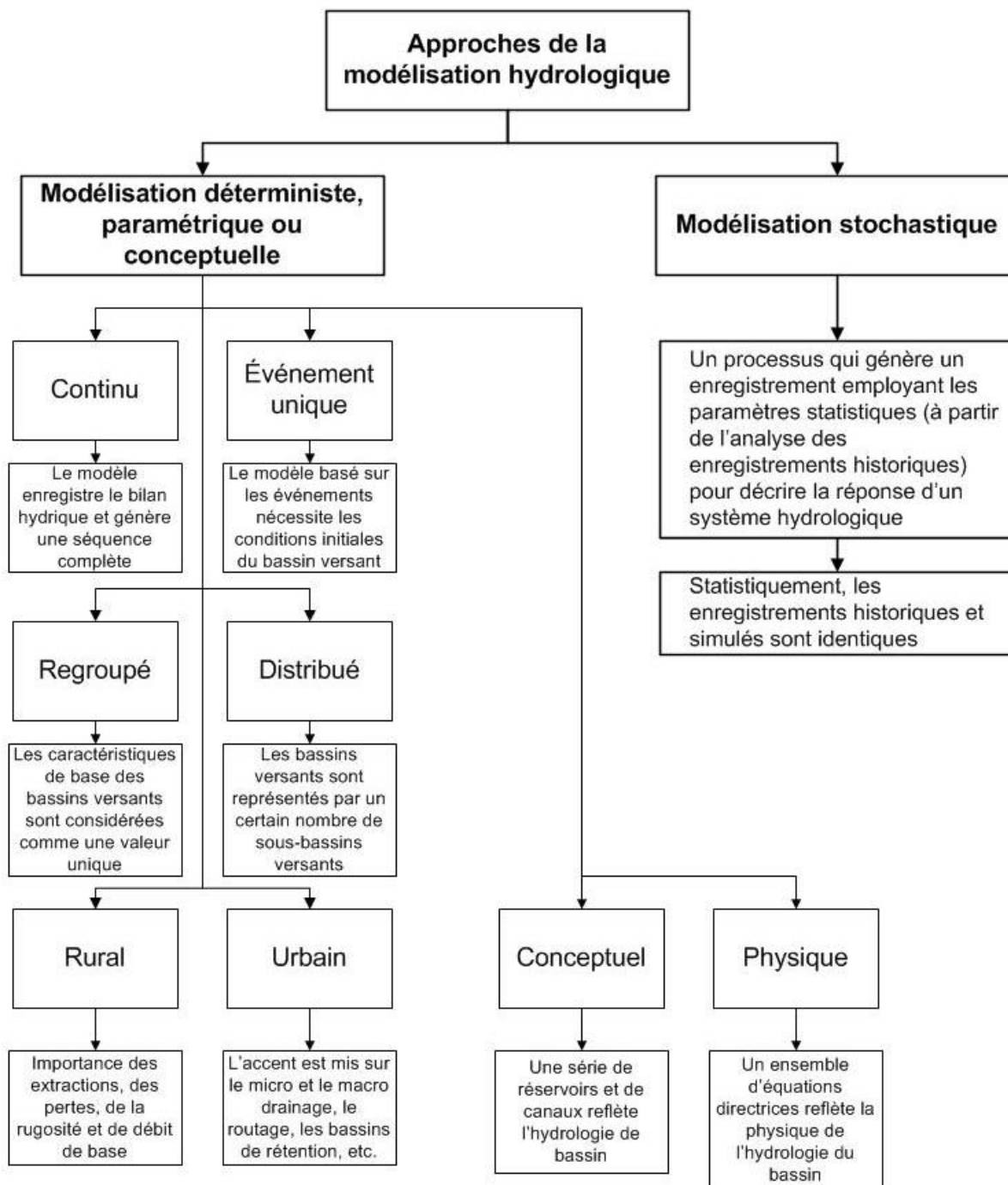


Figure 5.5. Approches de modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique déterministe permet de construire un système de relations basées sur la physique qui sont utilisées pour simuler le bilan hydrique dans un bassin et estimer les débits. Ces modèles sont généralement utilisés pour générer un certain résultat (par exemple, le débit) pour un ensemble défini de conditions initiales et un forçage météorologique spécifié. Comme l'indique la figure 5.5, la sélection d'un modèle dépend des processus à simuler, de la disponibilité des données, des critères de conception, des caractéristiques du bassin et du type

de configuration du bassin. Une fois l'approche de modélisation et le modèle sélectionnés, les étapes suivantes illustrées à la figure 5.6 sont détaillées à la section 5.5.4.

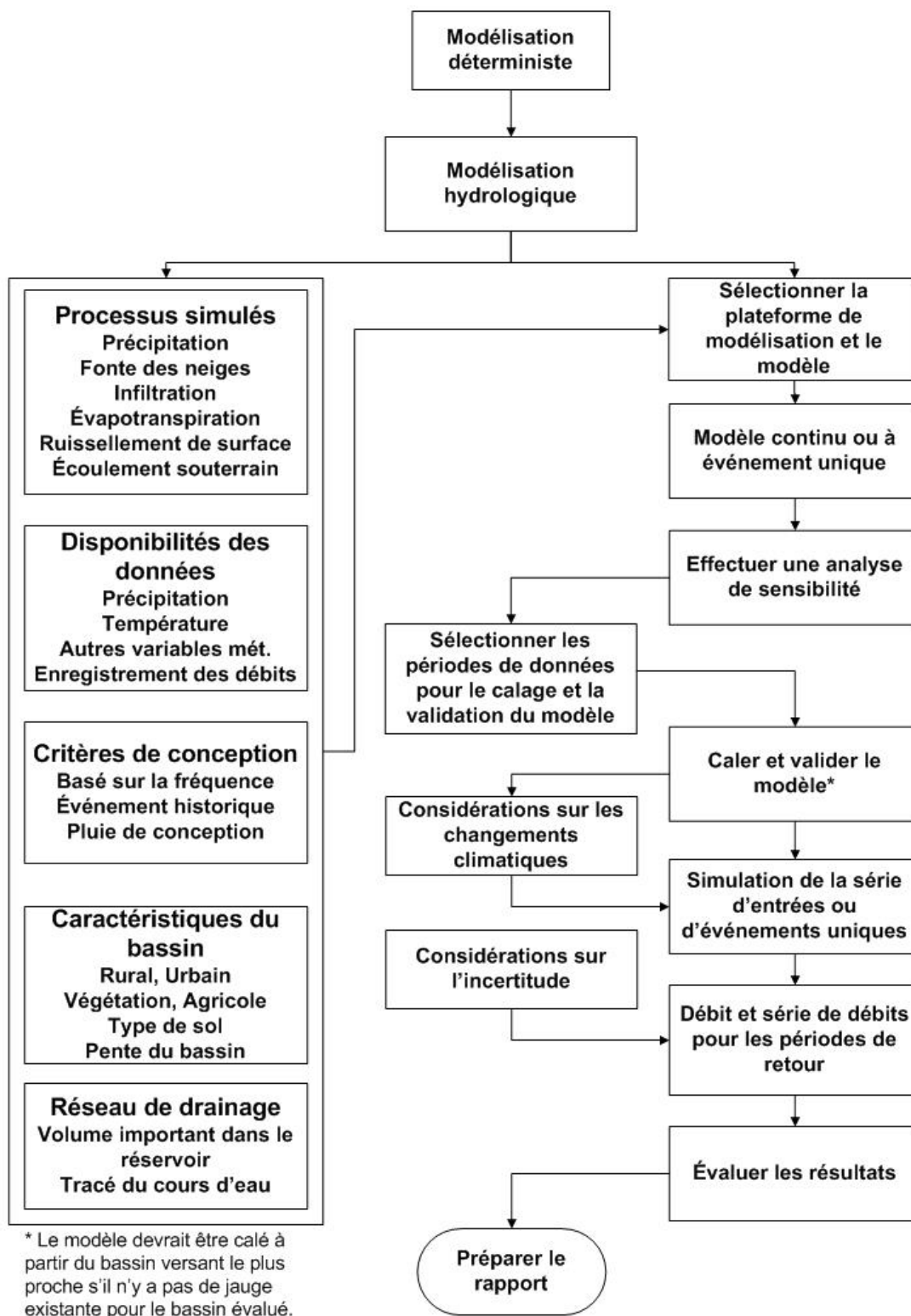


Figure 5.6. Modèles hydrologiques déterministes.

Les débits de conception résultant d'une entrée de pluie de conception peuvent être déterminés à partir de modèles d'évènement unique ou de modèles de simulation continue. Certains modèles déterministes disponibles peuvent également être utilisés en mode évènement unique ou simulation continue. La plupart des modèles hydrologiques pour l'estimation des débits de conception nécessitent un calage et une validation à l'aide de séries d'observations des débits permettant de configurer les paramètres du modèle du bassin. Ce processus aide à fournir les meilleurs résultats de simulation possibles et il est détaillé à la section 5.5.4.

Les modèles hydrologiques de simulation continue génèrent des données de débit « synthétisées ou modélisées » de longue durée pour un bassin versant en utilisant divers types de relevés météorologiques à long terme comme entrées. Le résultat est ensuite soumis à une AFC à station unique.

Des modèles ou techniques probabilistes ou stochastiques peuvent être utilisés pour générer un ensemble de résultats avec des probabilités associées pour une gamme de conditions d'intrants possibles. Ce type de modèle est souvent exécuté comme une simulation de Monte Carlo, dans laquelle les probabilités de résultats sont calculées sur la base d'un nombre élevé d'exécutions du modèle (p. ex., plus de 1 000). Les modèles probabilistes peuvent quantifier l'incertitude dans les conditions d'intrants et sont des outils puissants pour les situations où les variables d'intrants sont incertaines. Cependant, ces modèles ne sont pas actuellement aussi largement utilisés dans les évaluations hydrologiques que les modèles déterministes. Vogel (2017) illustre comment les modèles hydrologiques déterministes peuvent utiliser des séries météorologiques stochastiques pour générer des ensembles de débits futurs potentiels qui peuvent également fournir des estimations de sa variabilité. De tels ensembles pourraient être générés pour refléter les changements climatiques anticipés et peuvent éclairer les évaluations des risques d'inondation.

5.5.1 Choix du modèle à utiliser

Les modèles hydrologiques doivent être choisis sur la base d'une évaluation de la pertinence, y compris des considérations sur les données d'intrants disponibles, les méthodes de calcul et les résultats souhaités. Il peut être nécessaire d'utiliser une combinaison de modèles pour une tâche spécifique. Les modèles hydrologiques doivent également être d'une complexité adéquate pour saisir les processus dominants et sensibles dans le système modélisé. L'échelle est également une considération importante dans les applications de modèles hydrologiques. D'autres considérations incluent les approches distribuées ou groupées et les méthodes de routage du bassin versant (hydrologiques ou hydrauliques) dans le cadre de modélisation. Les modèles qui ne sont pas adaptés au régime ou à l'échelle considérés peuvent introduire des niveaux élevés d'incertitude. Les raisons du choix du modèle doivent être documentées.

5.5.2 Modélisation de simulation continue à l'aide de données météorologiques de longue durée

Des modèles hydrologiques de simulation continue sont utilisés pour générer des estimations synthétiques de débit de longue durée pour un bassin versant en utilisant des données météorologiques à long terme comme intrants. Ils peuvent varier en complexité, mais tous suivent l'état d'un bilan hydrique dans un bassin au fil du temps. Lorsqu'un évènement de pluie ou de fonte des neiges se produit, ces modèles utilisent des variables d'état telles que les conditions d'humidité antérieures et calculent la quantité de volume résultant de l'évènement.

Certains modèles utilisent un indice de précipitation antécédent simple et continuellement mis à jour pour suivre l'état du bassin versant entre les événements. D'autres modèles utilisent un modèle complexe de stockage d'interception, de l'humidité du sol, des eaux souterraines, etc. De même, certains modèles ne nécessitent que des données d'entrée limitées telles que les précipitations et la température, tandis que d'autres nécessitent de nombreux types de données météorologiques d'entrée (p. ex., les précipitations, la température, l'évaporation, la transpiration, la vitesse du vent, le point de rosée, la couverture nuageuse, le rayonnement solaire, etc.).

En supposant que le modèle fournit une bonne représentation des caractéristiques du bassin versant modélisé et qu'il a été vérifié de manière satisfaisante, c'est-à-dire calé et validé, les débits synthétisés peuvent être utilisés comme s'il s'agissait de débits observés pour une analyse plus approfondie. Par exemple, ils peuvent être utilisés dans une AFC à station unique pour obtenir des débits de conception pour diverses PDA ou utilisés dans une analyse fréquentielle régionale qui est difficile à quantifier, car le modèle ne sera jamais une représentation parfaite des caractéristiques du bassin versant ou des processus de la nature.

Une utilisation plus limitée d'un modèle de simulation continue simple consiste à générer des estimations d'humidité antécédente pour un modèle d'évènement unique détaillé. Cela peut également être appelé une approche de « simulation quasi-continue ».

5.5.3 Modélisation d'évènement unique à l'aide de pluies historiques et de pluies de conception

Les modèles à évènement unique utilisent généralement un intrant de précipitations distribué dans le temps, appelé hyétogramme, pour générer un résultat de débits distribués dans le temps, ou hydrogramme. L'hyétogramme d'intrants sera généralement soit une pluie historique observée, soit une pluie synthétique utilisant une distribution de précipitations typique avec un volume correspondant à une probabilité (p. ex., PDA de 1 %) et à une durée (p. ex., 6 heures) spécifiques.

Les pluies historiques sont des pluies extrêmes enregistrées qui sont utilisées comme données d'intrants dans les modèles hydrologiques. Ces pluies sont des événements dynamiques qui se déplacent à travers les bassins versants. L'étendue géographique des pluies historiques et leur mouvement sont des considérations importantes dans la modélisation.

Les pluies historiques dépassent souvent les critères de conception minimaux (p. ex., une PDA de 1 %) dans une juridiction particulière et pour laquelle des données sur les précipitations sont disponibles. Dans certaines juridictions canadiennes, les pluies historiques sont utilisées à des fins réglementaires au lieu d'inondations de conception. Des exemples sont l'ouragan Hazel dans la région de Toronto et la tempête de Timmins dans certaines parties du nord de l'Ontario.

Les pluies de conception ont des hyétogrammes de précipitations générés par l'analyse des données climatiques historiques. Ils sont généralement appliqués uniformément sur toute une zone d'étude sans tenir compte de la variation spatiale des caractéristiques géographiques du bassin. Compte tenu de la nature de cette approche, son application est généralement limitée à de petits bassins (NRCC, 1989).

Les pluies de conception peuvent être synthétisées pour des bassins versants et des zones spécifiques à l'aide de courbes IDF locales (Intensité-Durée-Fréquence). L'exemple le plus courant serait la « pluie de type Chicago », qui combine des intensités à toutes les durées pour

une fréquence commune. D'autres distributions synthétiques des pluies sont disponibles pour différentes régions du Canada. Les exemples les plus courants incluent la série de pluie de type *Natural Resources Conservation Service (NRCS)*, anciennement *Soil Conservation Service (SCS)*, et la série de pluie de type *Service Atmosphérique – Environnement (SEA)*. Ces pluies sont basées sur des observations historiques appliquées sur une durée particulière (p. ex., les précipitations sur 24 heures pour les pluies SCS) et peuvent ne pas correspondre à la courbe IDF à toutes les durées. Il faut faire preuve de prudence pour s'assurer que l'intensité des précipitations aux durées critiques soit représentée de manière convenable.

Une pluie de conception avec une PDA particulière ne produira pas nécessairement un hydrogramme de crue avec la même PDA, parce que différentes conditions initiales ou antérieures (p. ex., l'humidité du sol et les niveaux d'eau) produiront des réponses différentes à l'inondation. La modification des conditions hydrologiques initiales peut entraîner des débits de conception radicalement différents (Adams et Charles, 1986). Une hypothèse concernant la condition initiale est nécessaire pour dériver les débits de la pluie de conception et ceux-ci sont parfois définis par la juridiction. Il peut être difficile de confirmer et reproduire ces conditions initiales ou antécédentes lors de la modélisation.

5.5.4 Considérations de modélisation

La figure 5.7 indique que les procédures de modélisation hydrologique sont les mêmes, quel que soit le cadre temporel du modèle :

- La simulation est un évènement unique où l'hypothèse selon laquelle la PDA du débit de pointe résultant est le même que la PDA de l'évènement;
- La simulation est sur une période continue, de sorte qu'une AFC utilise les pointes annuelles résultantes ou supérieures à un seuil; ou
- La simulation est une série de pluies, nécessitant également une AFC des pointes résultantes.

Les étapes de la procédure pour toutes les options doivent être celles de l'encadré inférieur de la figure 5.7.

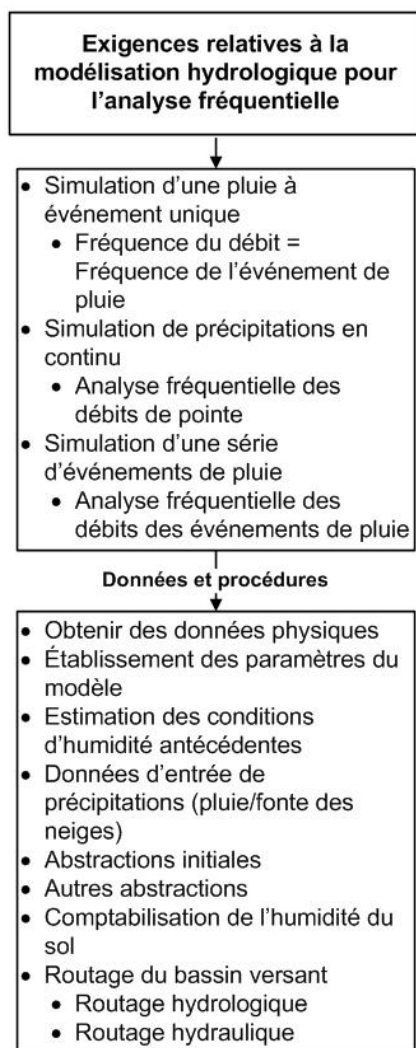


Figure 5.7. Exigences relatives à la modélisation hydrologique pour les analyses fréquentielles des crues.

Les considérations dans la sélection du modèle doivent suivre les éléments de la figure 5.7 et inclure :

- L'occupation du sol, y compris les zones imperméables et les effets de la déforestation, du drainage des zones humides et de l'urbanisation. La couverture terrestre a un impact significatif sur les taux d'infiltration et le temps de réponse hydrologique. Si l'occupation prévue ou future du sol diffère considérablement de l'occupation actuelle, ceci produira un résultat de débit de conception différent;
- La discrétisation adéquate du bassin versant en sous-bassins versants pour saisir les variations d'occupation des sols, les types de sols, les pentes, etc., ainsi que le nombre de points de calcul de débit souhaités;
- Le rôle que joue la fonte des neiges dans l'hydrologie et la capacité du modèle à simuler le ruissellement dû à la neige;

- Les pertes et gains du système modélisé, y compris les entrées et les sorties d'eau souterraine ou les transferts entre bassins. Ceux-ci doivent être modélisés au niveau de complexité nécessaire pour refléter de manière adéquate les processus hydrologiques influençant l'estimation du débit de conception requis;
- Le routage des débits des sous-bassins versants amont vers l'aval à travers les sous-bassins versants du modèle;
- Les zones de stockage telles que derrière les ponceaux, les barrages ou dans les bassins de gestion des résidus et des eaux pluviales nécessitant des volumes, des courbes de débit entrant et sortant; et,
- Les pas de temps du modèle, qui sont choisis pour permettre une progression raisonnablement régulière des débits et doivent être suffisamment courts pour capturer les pointes. Pour le routage du canal et le routage du réservoir, les pas de temps doivent être suffisamment courts pour répondre aux critères de stabilité numérique pour le modèle donné. Cependant, des pas de temps trop courts augmenteront le temps de calcul sans augmenter sensiblement l'exactitude ou la précision.

Lors de la sélection du modèle hydrologique qui conviendra, la disponibilité des données est une considération primordiale.

5.5.5 Évaluation du modèle

Un modèle hydrologique est une représentation mathématique simplifiée des processus physiques qui peut être utilisée pour prédire l'ampleur et le débit d'eau d'un bassin. Pour être utile, un modèle hydrologique doit produire des résultats acceptables basés sur le calage du modèle (voir la section 5.5.4), de la procédure d'évaluation du modèle et de l'utilisation prévue des sorties du modèle.

Un modèle numérique est considéré « vérifié » pour l'usage auquel il est destiné s'il représente fidèlement les concepts visés et s'il peut produire des résultats raisonnables et reproductibles. Les modèles vérifiés ne sont pas nécessairement les meilleurs ou les plus utiles. Ils sont plutôt jugés applicables à l'objectif de modélisation auquel ils sont destinés en étant généralement vérifiés à l'aide d'observations existantes. Cependant, dans certains cas, il n'existe pas d'observations enregistrées correspondant au débit et aux conditions météorologiques. Dans ces cas, le modèle peut être vérifié avec un bassin versant de référence ayant des caractéristiques hydrologiques similaires afin de déterminer les paramètres du modèle à utiliser pour le site étudié.

La figure 5.8 résume les étapes utilisées pour assurer l'acceptabilité des résultats d'un modèle hydrologique. La première étape consiste à examiner les données utilisées pour caractériser le bassin versant à travers une analyse de sensibilité, afin de déterminer quels paramètres affecteront le plus le débit du modèle. La deuxième étape consiste à séparer les données de débit en ensembles de calage et de validation. L'ensemble de calage des données de débit sera comparé aux débits du modèle au fur et à mesure que les paramètres sont ajustés, tandis que l'ensemble de validation vérifiera que les paramètres ajustés reproduisent toujours bien des débits enregistrés. La troisième étape consiste à déterminer la sensibilité du modèle à la variation des paramètres du modèle autour des valeurs moyennes supposées. Sachant quels paramètres sont les plus sensibles, il est possible d'ajuster ces paramètres pour caler le modèle. Il est possible de vérifier l'ensemble du modèle avec l'ensemble de données de débit

servant à la validation en utilisant les valeurs des paramètres du calage. Les résultats de cette simulation doivent répondre aux critères d'évaluation établis au début de la phase de modélisation. Il existe plusieurs critères d'évaluation des modèles hydrologiques, tels que :

1. Dans quelle mesure le bilan de masse est préservé au cours d'un événement, c'est-à-dire que le volume des précipitations moins les pertes doit être égal au volume de ruissellement, converti dans les mêmes unités.
2. Dans quelle mesure le débit de pointe observé et les débits de pointe calculés se comparent.
3. Dans quelle mesure le moment du débit de pointe calculé se compare-t-il au moment du débit de pointe observé, qu'il soit devancé ou retardé.

Selon les objectifs de l'étude, deux des trois critères notés peuvent suffire. Si l'objectif est la prévision des inondations, le moment de pointe et un seuil d'inondation sont les principaux objectifs. Pour la conception des ouvrages hydrauliques, les conduites de drainage, les débits de pointe et le volume de l'évènement de conception sont probablement des paramètres importants. Alors que pour délimiter les zones inondables, les critères de base sont les débits de pointe pour fournir l'étendue maximale de l'inondation à des fins de contrôle.

Il faut exécuter le modèle entièrement validé avec la série de précipitations de conception et les paramètres optimisés du bassin versant pour produire les débits de conception ou en utilisant les paramètres météorologiques climatiques futurs projetés, décrits à la section 4.0, et les conditions futures connues de l'occupation du sol pour permettre l'incorporation de ces non-stationnarités. À ce stade, il ne reste qu'à analyser et interpréter les débits résultants pour les fréquences de conception à inclure dans le rapport hydrologique, comme décrit à la section 10.0. Les analyses hydrauliques peuvent simuler les débits de crue de conception résultants dans un modèle hydraulique pour déterminer l'étendue des aléas d'inondation.

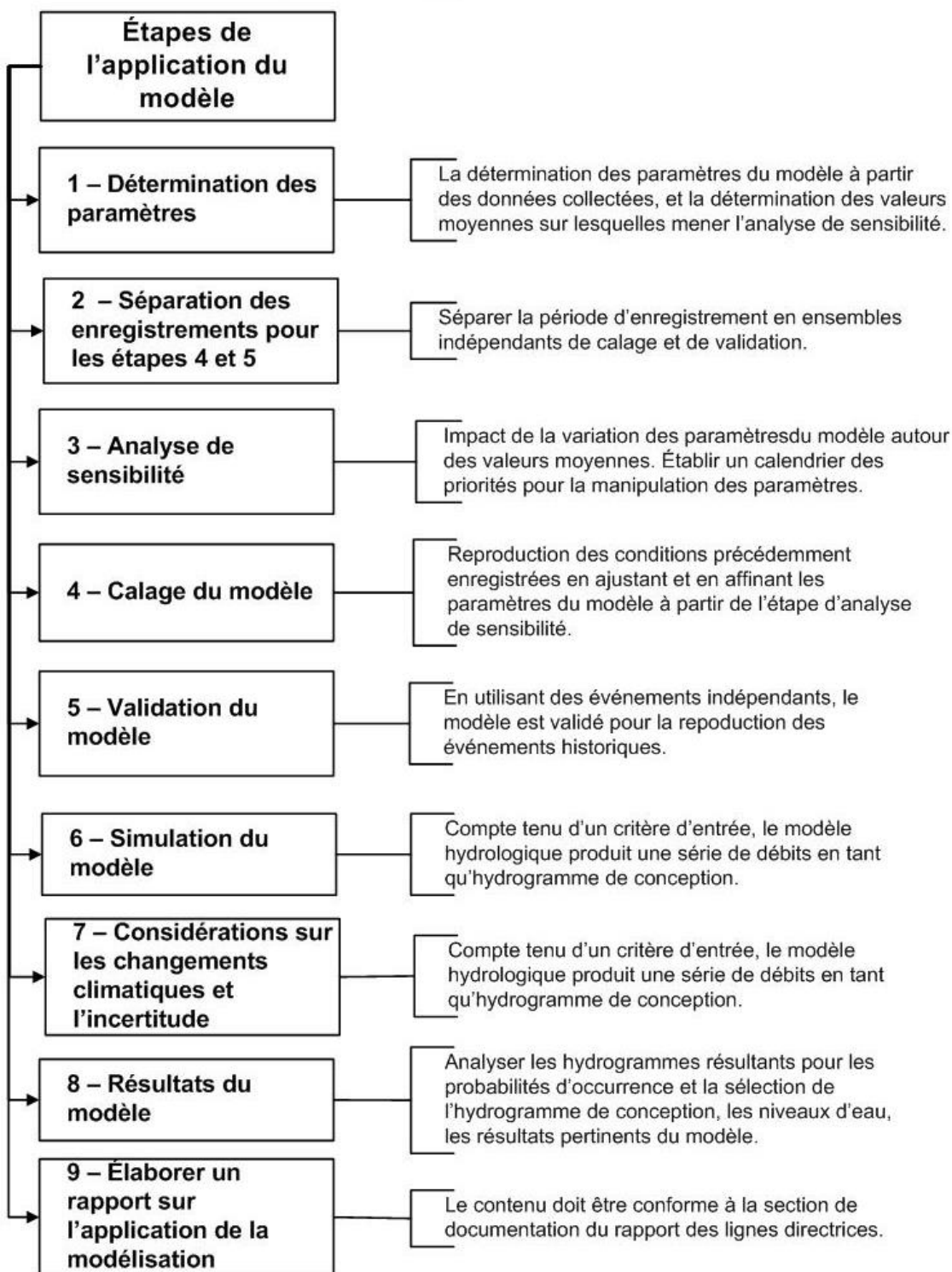


Figure 5.8. Étapes de l'application du modèle.

Des détails supplémentaires sur les étapes décrites à la figure 5.8 sont fournis ci-dessous :

1. Détermination des paramètres : sur la base du modèle proposé pour générer les débits de conception, il faut décider quels paramètres des modèles sont fixes et ceux qui sont variables afin de définir le cadre du processus de vérification, en commençant par la séparation de la période de relevés et de l'analyse de sensibilité (voir l'étape 2 ci-dessous). Toute hypothèse formulée à cette étape devra être justifiée dans le rapport.
2. Partition des données : les ensembles de calage et de validation doivent chacun contenir différents hydrogrammes de débits élevés pour comparer les hydrogrammes observés avec ceux simulés par le modèle hydrologique. Toutes les données d'entrée et de sortie ne doivent pas être utilisées pour le calage; un sous-ensemble de données doit être mis de côté pour validation. L'organisation météorologique mondiale (OMM) a fourni des indications sur la quantité de données qui devrait être utilisée pour le calage des modèles de simulation continue par rapport à celle qui devrait être réservée à la validation (OMM, 2011). D'autres organisations ont également affiné ces lignes directrices pour définir le nombre d'évènements à utiliser pour le calage des modèles basés sur les évènements.
3. Analyse de sensibilité : les paramètres du modèle interne, y compris les coefficients de ruissellement, les facteurs de fonte des neiges et d'autres variables, à travers une gamme d'entrées de valeurs raisonnables afin de déterminer la sensibilité du modèle à ces paramètres. Les paramètres qui montrent un haut niveau de sensibilité sont choisis en utilisant des méthodes robustes et documentées ou des valeurs attribuées suggérées dans la documentation du modèle en l'absence de telles méthodes.
4. Calage du modèle : les modèles sont calés à l'aide de données d'entrée et de sortie connues. Par exemple, si les apports de précipitations et les débits en aval sont connus, les paramètres du modèle interne, tel que les coefficients de ruissellement et les facteurs de fonte des neiges peuvent être ajustés pour réaliser le calage du modèle. Les efforts de calage de modèles individuels peuvent ne pas correspondre exactement aux pointes et aux volumes pour chaque évènement, et il est peu probable que des efforts de calage uniques aboutissent à des modèles calés qui capturent avec précision les inondations dérivées de différents mécanismes d'inondation (p. ex., la crue printanière ou les inondations pluviales de courte durée). Au début, il est nécessaire de décider quel aspect de la simulation est le plus important à obtenir avec précision.
5. Validation du modèle : le modèle calé est validé pour son ou ses objectifs prévus en exécutant le modèle calé à l'aide des données d'entrée de validation mises de côté pour comparer les données de sortie modélisées et celles mesurées pour le deuxième ensemble en considérant les aspects de la simulation pour lesquels le modèle a été calé.
6. Simulation du modèle : utiliser l'entrée météorologique du critère de conception (p. ex., une pluie de conception pour une PDA définie ou une pluie historique) ou transmettre une longue période de données météorologiques à travers le modèle pour obtenir des données de débit synthétiques comme entrée pour une AFC afin d'obtenir le débit de conception.
7. Analyse des changements climatiques et de l'incertitude : application des paramètres météorologiques futurs déterminés à la section 4.0 qui tient compte des changements climatiques. Comme expliqué plus en détail à la section 9.0, l'analyse de l'incertitude comprend une évaluation des sources potentielles d'incertitude, y compris celles associées aux valeurs des paramètres, aux constantes hydrologiques, aux données

d'entrées et aux méthodes. Cette analyse peut être effectuée à l'aide d'une modélisation numérique ou plus qualitativement en tenant compte des résultats de l'analyse de sensibilité, de la représentativité des données d'entrée et de la qualité de l'ajustement pour le calage et de l'AFC du modèle.

8. Résultats du modèle : évaluer les résultats de l'application de l'AFC à la série de simulations d'une longue série de données météorologiques pour déterminer l'évènement de fréquence de conception, la simulation de la météorologie des changements climatiques ou la simulation d'une pluie de conception pour déterminer le ou les hydrogramme(s) de conception à utiliser dans l'analyse hydraulique (section 6.0).
9. Rapport : Comme dans chaque travail, ce n'est pas fini tant que la paperasse n'est pas terminée. La section 10.2 énumère les éléments nécessaires à la documentation complète des procédures de modélisation hydrologique utilisées pour évaluer le débit de conception.

Le professionnel qualifié doit évaluer la performance d'une simulation de modèle hydrologique qui utilise ces étapes avec des comparaisons aux débits dérivés par d'autres méthodes. Cette évaluation nécessite un bon jugement professionnel et une approche robuste. Un examinateur indépendant peut effectuer l'évaluation.

5.6 Évaluation des résultats

Il est important de s'assurer que le débit de conception recommandé pour délimiter la zone inondable est fondé sur des vérifications supplémentaires et tierces au moyen de méthodes alternatives. Par exemple, si le débit de conception est calculé par modélisation hydrologique, des estimations alternatives à partir des méthodes régionales doivent être obtenues. De même, si l'AFC est la technique de base, les estimations régionales obtenues à partir des méthodes d'indice et de régression multiple fourniront des estimations alternatives. L'étape de l'interprétation et de l'analyse sera importante à ce stade. C'est l'équivalent de la technique de triangulation utilisée en topographie pour minimiser l'erreur à la fermeture.

5.7 Exigences en matière de rapports

Le professionnel qualifié doit documenter entièrement le processus d'évaluation du débit de conception ou du niveau d'eau, comme indiqué à la section 10.0. Ce document expliquera les données d'entrées, pourquoi certaines procédures ont été choisies plutôt que d'autres, le logiciel utilisé, les difficultés rencontrées et comment les surmonter ainsi que le processus de révision. Le rapport présentera l'évaluation du débit de conception ou du niveau d'eau qui en résulte.

5.8 Résumé des procédures hydrologiques

L'estimation des débits de conception est un intrant de l'analyse hydraulique qui génèrera l'étendue, la profondeur ainsi que les vitesses de l'inondation. Par conséquent, la validité de la délimitation de l'aléa d'inondation est tributaire de l'estimation des débits de conception. Les procédures hydrologiques décrites dans cette section doivent fournir les meilleurs débits de conception possibles, que ce ne soit pas une AFC ou une AFRC de débits ou de niveaux d'eau enregistrés historiques adéquats, ou un modèle hydrologique calé et validé. Un examen approfondi des méthodes utilisées par un examinateur qualifié devrait précéder le rapport

hydrologique documentant les données utilisées, le choix de l'approche analytique ainsi que l'évaluation et les incertitudes des résultats.

6.0 ANALYSES HYDRAULIQUES

Le but des analyses hydrauliques est de simuler les effets des débits, des vents, des conditions de glaces et d'autres facteurs hydrométéorologiques et physiques sur les niveaux d'eau d'un plan d'eau, de sa zone inondable environnante ainsi qu'à l'interface eau-terre. En conséquence, les modèles hydrauliques produisent les données nécessaires pour développer des cartes d'inondations, pour illustrer les profondeurs, les vitesses et l'étendue des inondations.

Ce processus peut être plus sophistiqué par rapport à ce qui était possible lors des programmes de délimitations des aléas d'inondation menés dans les années 1970 et 1980. En effet, ceci est dû aux progrès de la recherche hydrodynamique et du développement de modèles numériques et également puisque les ordinateurs sont devenus plus puissants, ce qui permet de calculer des aspects plus complexes de la dynamique des fluides. De plus, des progrès significatifs dans la disponibilité et la fiabilité des données de relevés topographiques peuvent fournir une image beaucoup plus détaillée et précise du canal ainsi que de la surface de la zone inondable. Ces données de relevés topographiques comprennent la collecte de données bathymétriques, de modèles numériques de terrain (MNT) par des technologies basées sur le sonar et des informations sur l'élévation et l'occupation du sol à l'aide de données lidar et d'autres formes de télédétection.

La complexité de l'analyse hydraulique doit être proportionnée aux données disponibles et aux objectifs du projet. Une plateforme de modélisation plus complexe n'augmentera pas nécessairement la précision des résultats s'il y a des limites dans les estimations des débits ou d'autres variables hydrométéorologiques ou encore dans les données topographiques utilisées pour construire le modèle. Il en résultera plutôt plus d'incertitudes. Si le projet couvre des zones densément développées, une modélisation plus complexe sera nécessaire en comparaison avec les projets définissant la cartographie des zones inondables pour les zones non développées.

La section 6.1 explique plus en détail les techniques de modélisation en contexte fluvial—à la fois avec une analyse en régime permanent, qui simule des débits constants pour déterminer l'étendue et les vitesses de l'inondation, et également avec une analyse en régime non permanent, qui peut simuler des hydrogrammes de débit et des niveaux d'eau variables dans le temps et dans l'espace, et qui peut, en outre, déterminer la durée de l'inondation. La section 6.2 traite des intrants des modèles hydrauliques, tandis que la section 6.3 traite du calage et de la validation des modèles.

Une description des procédures hydrauliques fluviales est incluse dans cette section, les tâches individuelles sont décrites dans le tableau 6.1 et elles renvoient à l'organigramme fourni à la figure 6.1.

Tableau 6.1. *Pratiques hydrauliques fluviales.*

	Pratiques hydrauliques
Étape 1	Déterminer les objectifs de modélisation, les étendues spatiales, les facteurs hydrométéorologiques pertinents ainsi que les contraintes de précision en fonction des mandats municipaux, provinciaux ou encore territoriaux et des politiques d'aménagement et de développement du territoire. Définir la zone inondable principale et la zone inondable secondaire en utilisant les lignes directrices adéquates dans chaque juridiction.
Étape 2	Assembler et réviser les données hydrométriques et topographiques existantes. Identifier les données hydrauliques de toutes les sources dans la zone d'étude définie qui répondent aux exigences en matière de données. Documenter les sources de données. Effectuer une vérification AQ/CQ sur toutes les données hydrauliques utilisées dans l'analyse.
Étape 3	Choisir une plateforme pour la modélisation numérique. Le choix des méthodes et des modèles d'analyse dépend des données d'entrée disponibles, de l'analyse à effectuer et des données de sortie requises ainsi que du jugement professionnel, de l'expertise et de la disponibilité des modèles.
Étape 3. a	Utiliser des modèles 1D lorsque le canal et l'écoulement de surface sont uniformes et que la vitesse peut être raisonnablement supposée comme étant parallèle aux canaux des cours d'eau.
Étape 3. b	Il est également possible d'utiliser la modélisation d'écoulement constant 1D dans des tronçons uniformes combinés à la modélisation 2D, où les restrictions et les courbes du canal rendent l'écoulement plus complexe, avec certaines vitesses perpendiculaires au canal du cours d'eau.
Étape 3.c	Il est également possible d'utiliser la modélisation 2D et quasi-2D lorsque l'écoulement du canal est relativement complexe, lorsque d'autres facteurs hydrométéorologiques (p. ex., les vents) sont présents, lorsque les vitesses ne sont pas supposées être perpendiculaires aux sections transversales du cours d'eau et pour modéliser les zones de débordement complexes. Ce modèle comprend les zones urbaines, les zones dotées de digues et d'autres mesures de protection contre les inondations, et les zones où différents scénarios seront modélisés (p. ex., rupture de digue).
Étape 4	Identifier les lacunes dans les données ainsi que la collecte de données requise. Les données sur le débit et le niveau d'eau serviront à caler le modèle, les données topographiques aux ponceaux, ponts, digues et zones inondables définiront mieux l'hydraulique des débits.
Étape 5	Sélectionner des périodes de données de débit et de niveau d'eau variés, mais généralement élevés, pour le calage et la validation du modèle. Utiliser deux ensembles distincts de débits et de niveaux d'eau correspondants, un pour le calage et le second pour la validation. Tenir compte de la fiabilité des données, y compris leur exactitude, la période pendant laquelle elles ont été recueillies et les facteurs externes qui peuvent avoir une incidence sur leur homogénéité et leur applicabilité à des événements futurs potentiels.
Étape 6	Conceptualiser, effectuer des analyses de sensibilité, caler, exécuter et valider le modèle.

	Pratiques hydrauliques
	<ul style="list-style-type: none"> • La conceptualisation implique la configuration du modèle avec des conditions aux limites (section 6.1), des sections transversales pour les modèles 1D (section 6.2.2) ou une grille/maillage pour les modèles plus complexes (section 6.2.3) et des coefficients de friction/rugosité initiaux (section 6.2.4). • Les analyses de sensibilité impliquent la permutation des paramètres de portée pour voir où se produit la plus grande sensibilité afin de faciliter le calage. • Le calage du modèle implique l'exécution du modèle conceptualisé avec les niveaux d'eau observés pour au moins deux événements d'inondation connus afin de caler les valeurs de coefficients de perte de charge (section 6.3.2). • La validation des valeurs finales implique l'exécution du modèle avec au moins une crue supplémentaire (section 6.3.3).
Étape 7	Calculer les profondeurs, les étendues et les vitesses des crues à partir de la modélisation hydraulique des événements de conception sur la base d'une analyse hydrologique. Exécuter le modèle avec les différents débits de PDA de conception et les débits futurs intégrant les changements climatiques.
Étape 7. a	Évaluer les résultats en comparant, dans la mesure du possible, avec les lignes des hautes eaux enregistrées, les crues historiques et les relevés de débit. Refaire des analyses si les résultats sont insatisfaisants. Demander à des professionnels qualifiés non impliqués dans le projet d'examiner l'analyse.
Étape 8	<p>Transférer les niveaux d'eau calculés sur des cartes. Les cartes peuvent montrer de façon statique l'étendue de l'inondation de conception selon la PDA et des changements climatiques, ou peuvent montrer de façon interactive les probabilités d'aléas d'inondation, les profondeurs et les vitesses.</p> <p>Les dérivés de ces cartes peuvent expliquer la délimitation des aléas d'inondation de façon transparente et permettre au public d'en prendre connaissance.</p> <p>Produire un rapport complet. Expliquer les résultats aux intervenants publics. Présenter un rapport sur les résultats finaux conformément aux exigences.</p>

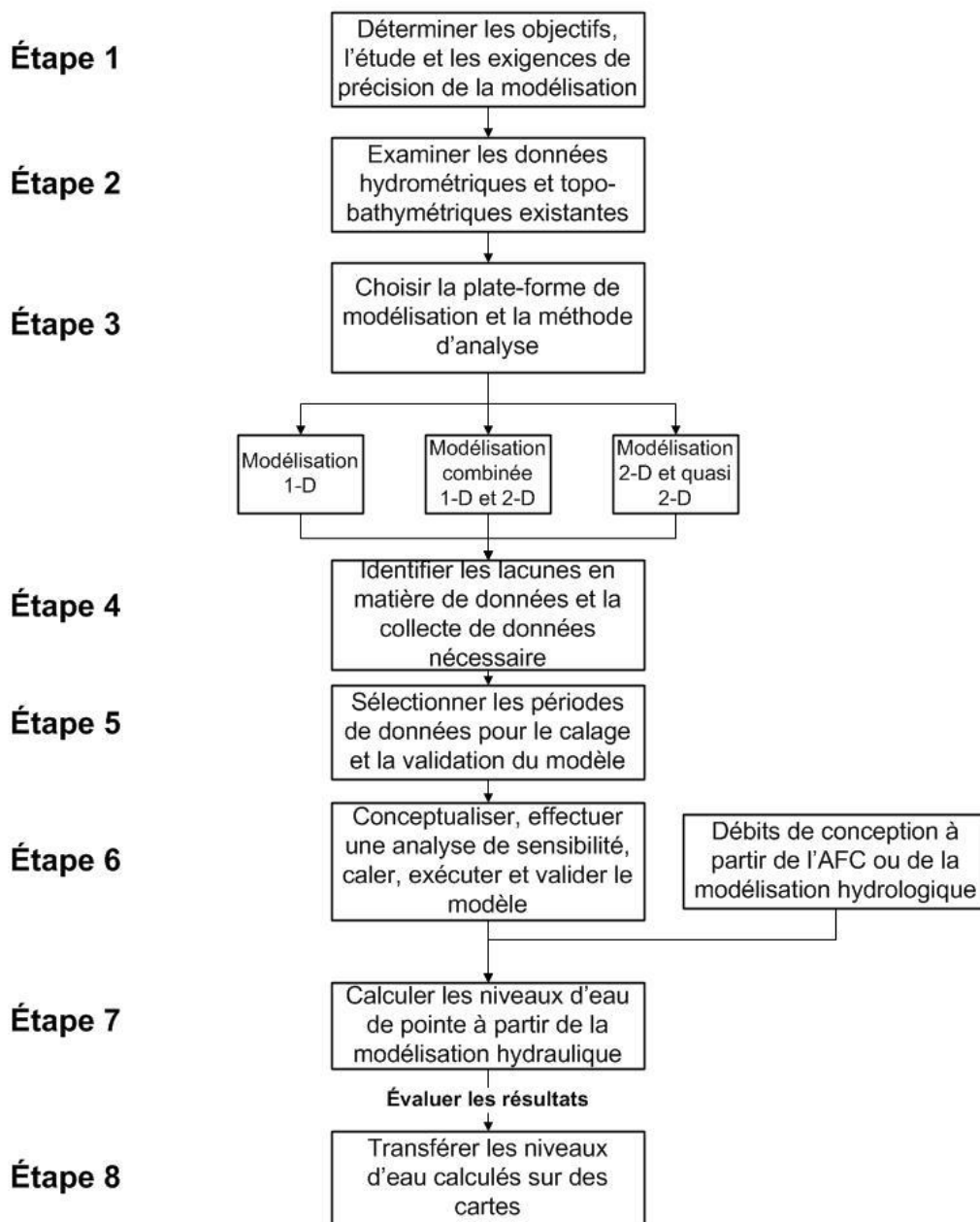


Figure 6.1. Procédure de modélisation hydraulique

6.1 Sélection du modèle

En général, les modèles hydrauliques fluviaux pour la délimitation des aléas d'inondation incluent la modélisation du canal principal et de la zone inondable. Cette section détaille les différentes configurations de modèles hydrauliques que les spécialistes pourraient choisir pour identifier la meilleure option permettant de répondre aux objectifs du projet. Par exemple, le tableau 6.2 fournit un cadre de la capacité des modèles hydrauliques pour diverses applications.

La plupart des modèles hydrauliques sont basés sur la méthode des différences finies des

équations de Saint-Venant pour les équations unidimensionnelles (1D) ou les équations en eaux peu profondes pour l'écoulement bidimensionnel (2D). Ces équations définissent les principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement dans un fluide. Comme indiqué précédemment, ils sont parfois simplifiés dans les modèles hydrauliques pour exclure divers termes dans les équations. Une comparaison entre les modèles hydrauliques 1D et 2D est fournie dans le tableau 6.2 (adapté de Pender, 2006).

Tableau 6.2. Application de divers modèles hydrauliques.

Méthode	Description	Application	Résultats
État stable 1D	<ul style="list-style-type: none"> • Solution des équations d'eau peu profond 1D 	<ul style="list-style-type: none"> • Écoulement principalement gravitaire; • Écoulement naturel et canalisé; • Les cours d'eau où les données topographiques, hydrographiques et/ou hydrologiques sont limitées; 	<ul style="list-style-type: none"> • Hauteur d'eau, débit, vitesse moyenne et répartie de la section transversale, à chaque section transversale; • Étendue de l'inondation si les zones inondables font partie du modèle 1D, ou par projection horizontale du niveau d'eau.
État non permanent 1D	<ul style="list-style-type: none"> • Approche 1D plus une cellule de stockage pour la simulation de l'écoulement des zones inondables 	<ul style="list-style-type: none"> • Cours d'eau à faible gradient présentant des différences hydrauliques significatives entre les branches montantes et descendantes de l'hydrogramme et pour lesquels il n'existe pas de courbe de tarage unique / de relation entre le débit et le niveau d'eau; • Écoulement avec des effets de stockage significatifs; • Conditions d'écoulement variables dans le temps, par exemple, conditions aux limites influencées par les marées et autres conditions aux limites similaires; • Situations dans lesquelles des scénarios de défaillance sont modélisés et une dissipation horizontale significative de l'onde de crue n'est pas attendue. 	<ul style="list-style-type: none"> • Identique aux modèles 1D, plus les niveaux d'eau et l'étendue de l'inondation dans les cellules de stockage des zones inondables.
Quasi 1D	<ul style="list-style-type: none"> • 2D moins la loi de conservation de la quantité de mouvement pour l'écoulement de la zone inondable 	<ul style="list-style-type: none"> • Généralement utilisé pour les cours d'eau complexes, sinueux ou anastomosés, mais pas pour modéliser les zones complexes hors canal; • Modélisation à grande échelle et applications où les effets d'inertie ne sont pas importants. 	<ul style="list-style-type: none"> • Étendue de l'inondation; profondeurs d'eau

Méthode	Description	Application	Résultats
2D	<ul style="list-style-type: none"> • Solution des équations 2D de l'eau peu profonde 	<ul style="list-style-type: none"> • Schémas d'écoulement complexes à l'intérieur et à l'extérieur du canal d'écoulement principal; • Inondations urbaines lorsqu'il existe suffisamment de données topographiques de qualité 	<ul style="list-style-type: none"> • Étendue de l'inondation; • Profondeurs d'eau; • Vitesses moyennes en profondeur.
1D et 2D combinés	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle 1D pour canal d'écoulement défini couplé à un modèle 2D pour les zones complexes de débordement 	<ul style="list-style-type: none"> • Les situations nécessitant une optimisation pour réduire les besoins en puissance de calcul tout en capturant les modèles d'écoulement dans les zones inondables; 	<ul style="list-style-type: none"> • Étendue de l'inondation; • Profondeurs d'eau; • Vitesses moyennes en profondeur; • Empiètements du canal.

Les modèles hydrauliques couramment utilisés au Canada comprennent (par ordre alphabétique) :

- Modélisation fluviale 1D : HEC-RAS, MIKE11;
- Modélisation fluviale + urbaine 1D : Infoworks, MIKE+;
- Modélisation fluviale combinée 1D et 2D : HEC-RAS, MIKE Flood;
- Modélisation fluviale 2D : HEC-RAS, H2D2, Infoworks 2D, MIKE21, SOBEK, TELEMAC, TUFLOW;
- Modélisation 2D littorale/lac : ADCIRC, Delft3D, MIKE21/3, TELEMAC.

HEC-RAS est disponible auprès de l'USACE (2021). MIKE11, MIKE+, MIKE Flood, MIKE21 et MIKE21/3 sont disponibles auprès de DHI (2017). Infoworks dans les deux versions est disponible auprès d'Autodesk (2020). SOBEK et Delft3D sont disponibles auprès de Deltares (2020). TUFLOW est disponible auprès de TUFLOW (2020) et TELEMAC est disponible auprès de TELEMAC-MASCARET (2021). Luetlich et Westerink (2016) gèrent le modèle ADCIRC. H2D2 est disponible auprès de l'INRS-ÉTÉ (Leclerc et al. 1998).

Les approches de modélisation comprennent des modèles permanents et non permanents 1D, 2D, quasi 2D, 1D et 2D combinés et, dans les cas spécialisés, des modèles 3D. Les modèles hydrodynamiques utilisés pour les zones côtières sont décrits à la section 8.0.

6.1.1 Modélisation d'écoulement en régime permanent 1D

L'utilisation de la modélisation 1D en régime permanent est répandue et est une pratique courante dans les activités de modélisation/cartographie des crues depuis des décennies. Il est destiné au calcul des profils de surface de l'eau pour un écoulement en régime permanent, c'est-à-dire lorsqu'on peut supposer que les débits changent progressivement et que le profil hydraulique peut être calculé avec précision en utilisant des écoulements qui changent dans l'espace, mais pas dans le temps.

La procédure de calcul pour ce type de modèle est basée sur la solution de l'équation d'énergie 1D. Les pertes d'énergie sont évaluées comme la somme des pertes par frottement, contraction et d'expansion. L'équation de la quantité de mouvement peut également être utilisée dans des situations où le profil de la surface de l'eau varie rapidement, comme aux ouvertures de ponts et lors de l'évaluation des profils aux confluences de cours d'eau.

Un modèle numérique 1D est basé sur les hypothèses suivantes (Cunge et al., 1980) :

- L'écoulement est largement confiné et unidimensionnel en direction du canal principal;
- L'écoulement est perpendiculaire aux sections transversales du canal.
- Les niveaux d'eau à travers les sections transversales au canal sont uniformes et ne varient pas;
- Les accélérations verticales sont négligeables;
- Les effets du frottement aux limites et de la turbulence peuvent être pris en compte à l'aide de lois de résistance analogues à celles des conditions d'écoulement stable; et,
- La pente moyenne du lit du canal est faible;

Ce type de modèle est relativement simple à configurer et à exécuter, ne nécessite pas de processeurs informatiques puissants, nécessite moins de données que des alternatives plus complexes et est capable de générer efficacement des résultats précis pour les débits qui répondent aux critères énumérés lorsqu'il est appliqué par un spécialiste expérimenté. Ces modèles ne nécessitent pas de bathymétrie complète du cours d'eau et sont particulièrement efficaces pour modéliser les caractéristiques du cours d'eau, notamment les ponceaux, les ponts, les déversoirs, les barrages et d'autres structures hydrauliques.

L'échelle des résultats est adaptée à la conception sur une étendue du canal de l'ordre de dizaines à centaines de kilomètres.

En général, la modélisation d'écoulement stable 1D nécessite les intrants suivants :

- Débit de pointe pour le profil en régime permanent;
- Hydrogrammes d'entrée et de débit transversal;
- Informations sur la forme de la section transversale du débit (élevations);
- Emplacement des berges;
- Informations sur l'ouvrage hydraulique;
- Coefficients hydrauliques (p. ex., expansion et contraction);
- Coefficients de friction du canal (p. ex., la rugosité de Manning);
- Courbes de tarage; et,
- Conditions aux limites.

6.1.2 Modélisation d'écoulement non permanent 1D

Les applications de la modélisation d'écoulement non permanent 1D, également connue sous le nom de modélisation hydrodynamique 1D, des situations de modélisation avec des changements de stockage, des inversions d'écoulement, des conditions limites variables, des variations rapides de l'écoulement et des vagues (par exemple, ruptures de barrage, crues éclairs), et la nécessité de comprendre l'interaction avec des écoulements variant dans le temps provenant d'affluents. Ce type de modélisation a été moins courant que la modélisation 1D en

régime permanent dans le passé, mais est utilisé plus fréquemment aujourd'hui grâce aux calculs plus rapides et à la nécessité de modéliser des phénomènes plus complexes tels que des débits variables le long d'un canal qui résultent du stockage de celui-ci et de l'atténuation des ondes de crue. L'échelle des résultats est adaptée à un tronçon de canal de l'ordre de quelques dizaines à centaines de kilomètres. Si seules quelques données transversales sont disponibles, le modèle hydrodynamique ne fournira que des résultats à grande échelle.

Les exigences en matière de données pour la plupart des modèles hydrodynamiques 1D sont similaires à celles des modèles 1D en régime permanent, à l'exception du besoin de conditions aux limites et d'hydrogrammes adéquats variant dans le temps, qui indiquent la variation du débit.

6.1.3 Modélisation quasi-2D

La modélisation quasi-2D consiste à lier plusieurs modèles 1D pour tenir compte des écoulements de surface séparément des écoulements principaux. Bien que cette méthode puisse impliquer la mise en place de plusieurs modèles distincts, les modèles individuels sont généralement simples et les sorties de modèle des segments en amont sont utilisées comme entrées pour les segments en aval. Il a été démontré que cette méthode nécessite moins de puissance de calcul et qu'elle a une précision similaire à la modélisation 2D lorsqu'elle est correctement configurée. Son application est limitée à la modélisation à grande échelle.

6.1.4 Modélisation 2D

Dans certaines situations pratiques, l'interaction des champs d'écoulement du canal et de la zone inondable est assez complexe, y compris dans les cas où les berges du cours d'eau sont mal définies, l'atténuation de l'écoulement et le stockage de la zone inondable sont importants et les propriétés d'écoulement sont complexes, par exemple le long des rues et entre les développements. Pour ces applications, les modèles hydrauliques 2D sont généralement préférés (Horritt et Bates, 2002; Hunter et al., 2008).

Les modèles 2D utilisent des équations de Navier-Stokes à profondeur moyenne, communément appelés les équations de Saint-Venant, qui permettent la simulation des composantes horizontales de la vitesse d'écoulement dans deux directions et qui peuvent produire des résultats plus réalistes pour des situations d'inondation complexes si elles sont correctement configurées et qu'elles comprennent suffisamment de données. Ces modèles sont particulièrement adaptés lorsque des informations détaillées sur les vitesses et les profondeurs d'écoulement sont nécessaires, lorsque les risques liés à la profondeur d'écoulement et aux vitesses locales pour les personnes et les biens sont grands, et lorsque la variation latérale des élévations de la surface de l'eau est importante. Les critères d'utilisation de la modélisation 2D sont également répertoriés dans le tableau 2.2.

La plupart des modèles 2D sont généralement plus complexes et nécessitent plus de temps et d'expérience pour être développés, calés et validés que les modèles 1D. Ces modèles nécessitent des temps de simulation plus longs que les modèles 1D, mais grâce à l'amélioration constante des ressources informatiques, les exigences en matière de temps et de coût de la modélisation 2D diminuent.

En termes d'exigences en matière de données, des modèles numériques d'élévation détaillés, tels que ceux issus des données lidar et d'une bathymétrie complète pour les canaux de cours

d'eau (plutôt que des sections transversales de cours d'eau) sont généralement nécessaires pour prendre en charge la modélisation 2D. Les exigences en matière de données peuvent limiter l'échelle des résultats à une portée de l'ordre de dizaines de kilomètres. Les données et la résolution de la grille peuvent également être un facteur limitant. Par exemple, une grille spatiale d'élévation grossière est utilisée, un modèle hydrodynamique 2D ne pourra fournir que des résultats à grande échelle.

6.1.5 Modélisation combinée 1D et 2D

Une solution potentielle aux exigences de calcul et aux exigences de données plus importantes de la modélisation 2D implique l'utilisation d'une modélisation combinée 1D et 2D. Cela implique généralement l'utilisation de modèles 1D pour le canal d'écoulement défini couplés à un modèle 2D dans les zones complexes de débordement. Il existe un certain nombre de progiciels de modélisation hydraulique qui permettent le couplage de modèles 1D et 2D. L'avantage d'utiliser un modèle combiné 1D et 2D est que le modèle est plus simple, plus rapide à exécuter et permet d'appliquer les avantages de la modélisation 1D et 2D, le cas échéant et selon les besoins. Cependant, cela se fait au prix d'exigences accrues en matière de données, d'une complexité accrue des modèles, de ressources plus importantes pour les développer et les caler ainsi que de temps de simulation plus longs par rapport à la modélisation 1D.

6.1.6 Modélisation 3D

En plus de la composante de vitesse horizontale obtenue à l'aide de modèles 2D, les modèles 3D incluent une composante de vitesse verticale. Ces modèles sont généralement utilisés pour les études sur la qualité de l'eau, telles que les prises d'eau et les exutoires, où la stratification de la densité (p. ex., en raison des gradients de salinité, de température ou de concentration des sédiments en suspension) affecte le mouvement et le mélange de l'eau.

L'utilisation de modèles 3D est peu courante dans les études d'aléas d'inondation. Dans certains cas spécialisés, des modèles 3D complexes, appelés modèles de mécanique des fluides numériques (MFN), peuvent modéliser l'écoulement à travers ou autour d'un ouvrage d'art (par exemple, un déversoir de barrage, des vannes, etc.).

6.1.7 Modèles physiques

Les modèles physiques étaient généralement utilisés par les organisations ayant des besoins techniques spécifiques pour évaluer des conditions qui peuvent ne pas être bien représentées par des modèles informatiques et pour utiliser des simulations afin d'obtenir des données empiriques sur les processus du monde réel. Un niveau élevé d'expertise et de ressources est nécessaire pour concevoir des expériences qui tiennent correctement compte de la mise à l'échelle.

6.2 Exigences en matière de données

6.2.1 Données géospatiales

L'exactitude et la précision des analyses hydrauliques et des cartes des aléas d'inondation dépendent fortement de la qualité des données d'entrées géospatiales utilisées. Le « Guide

d'orientation fédéral sur l'acquisition de données par lidar aéroporté » (NRCan et PSC, 2018) et le « Guide d'orientation fédéral en géomatique sur la cartographie des zones inondables » (NRCan et PSC, 2019) fournissent des conseils sur l'approvisionnement et l'utilisation des données géospatiales pour la cartographie des zones inondables.

Les données géospatiales peuvent inclure des sections transversales de cours d'eau (généralement pour prendre en charge la modélisation 1D) ou des modèles d'élévation numériques continus détaillés et la bathymétrie (généralement pour prendre en charge la modélisation 2D).

6.2.2 Sections transversales des cours d'eau

Les coupes transversales du cours d'eau sont les données d'entrée de base des modèles 1D. Elles sont généralement collectées à partir de levés au sol et/ou extraits d'une combinaison de levés bathymétriques continus et lidar. Les coupes transversales doivent être représentatives de la topographie typique et de la zone de coupe transversale disponible pour un tronçon particulier. Elles doivent être prises perpendiculairement à la direction de l'écoulement et sur toute la largeur de l'inondation potentielle, sans se croiser. Certains modèles suggèrent qu'elles soient courbées dans les zones de débordement pour maintenir la section transversale perpendiculaire à l'écoulement. Cette approche doit être utilisée de manière adéquate pour éviter une surestimation de la zone d'écoulement et pour maintenir la longueur du canal.

Les sections transversales doivent être localisées pour capturer les changements significatifs dans les caractéristiques du canal, tels que la largeur et la pente du lit, et pour définir les changements brusques qui résultent des déversoirs, des ponts, des ponceaux et d'autres structures hydrauliques. Prenez des sections transversales au-dessus et au-dessous des ouvrages hydrauliques et des apports importants (p. ex., affluents, sorties d'égouts pluviaux, etc.).

6.2.3 Bathymétrie et modèles numériques de terrain

Une caractérisation continue et plus détaillée de la topographie du canal et de la berge est requise pour les modèles 2D et, si elle est disponible, peut également être utilisée pour extraire des sections transversales 1D d'un canal. Cela comprend généralement une combinaison de données bathymétriques et lidar dans le canal principal ou des informations d'enquête sur le terrain pour les zones de débordement, qui sont utilisées pour créer un modèle continu du lit de la rivière et de la surface terrestre, c'est-à-dire un modèle numérique de terrain (MNT).

Ces données topographiques sont représentées sous la forme d'une grille régulière ou irrégulière en trois dimensions. La grille est décrite par des nœuds, dont l'emplacement est saisi sous forme de coordonnées cartographiques horizontales avec des élévations correspondantes déterminées à partir de la bathymétrie du canal ou de la topographie des zones de débordement pour toute l'étendue de la masse d'eau modélisée. Les informations sur l'étendue des inondations précédentes peuvent fournir des indications sur l'étendue spatiale du MNT requis, mais il convient de tenir compte des événements d'inondation potentiellement plus importants lors d'évènements futurs.

La résolution de grille requise dépend de l'application. En effet, plus la grille est fine, plus les exigences de calcul sont importantes. Cependant, un maillage plus grossier peut ne pas être en mesure de représenter avec précision la turbulence des écoulements à des points complexes

de la topographie. À ces points, comme lors d'un virage serré, d'un écoulement ou d'une culée de pont, la résolution de la grille doit être augmentée.

6.2.4 Coefficients de friction

La plupart des modèles hydrauliques nécessitent la sélection de coefficients permettant de décrire les pertes d'énergie dues à la friction du canal (c'est-à-dire la rugosité ou le frottement). Divers chercheurs ont développé un certain nombre de ces coefficients. Aux fins des présentes lignes directrices, les discussions se limitent à l'utilisation du « n » de Manning dans la modélisation de l'écoulement en canal ouvert.

L'un des coefficients les plus courants est appelé la rugosité de Manning « n », qui dérive de l'équation d'écoulement empirique en canal ouvert bien connu de Manning. Ce coefficient permet de modifier l'acheminement du cours d'eau modélisé en fonction des caractéristiques physiques du canal du cours d'eau et de la zone d'écoulement, telles que le matériau du lit, la végétation, la saisonnalité et d'autres caractéristiques qui sont en contact avec l'eau. Dans les applications de modélisation, les coefficients de rugosité peuvent également représenter les limites et l'incertitude de la représentation d'autres caractéristiques du canal.

Le coefficient de Manning est une valeur empirique qui varie non seulement avec la rugosité physique du cours d'eau, mais également avec sa relation hauteur-débit. Il peut également y avoir des changements saisonniers dans la rugosité, en particulier dans les zones d'écoulement sur les berges. En pratique, plusieurs coefficients de rugosité de Manning différents peuvent être utilisés dans un seul modèle hydraulique, avec des variations potentielles sur des sections transversales individuelles de cours d'eau et à différentes sections transversales. La sélection des valeurs de perte de charge nécessite une compréhension de l'hydraulique des cours d'eau et il convient de veiller à sélectionner des valeurs raisonnables qui tiennent compte à la fois des caractéristiques physiques du système et des exigences d'un modèle hydraulique.

Il est probable que les valeurs initiales des coefficients de résistance seront modifiées au cours du processus de calage, mais ce processus ne doit pas être forcé en choisissant des valeurs en dehors d'une plage de valeurs raisonnable. L'augmentation de la résistance du canal pour un tronçon du cours d'eau diminuera la vitesse d'écoulement et donc augmentera localement le niveau tout en augmentant le temps de parcours des ondes de crue. La relation entre le débit et les niveaux d'écoulement est quelque peu sensible aux changements de résistance du canal et les valeurs adéquates doivent être sélectionnées sur la base d'une compréhension approfondie du modèle et de la manière dont le coefficient est utilisé, d'un examen de la littérature pertinente et de l'expertise hydraulique.

Les coefficients de résistance initiale peuvent être choisis en utilisant l'une des références suivantes :

- Consultation des valeurs de rugosité de Manning publiées (p. ex., Chow, 1959);
- Comparaison des débits similaires avec les valeurs de rugosité de Manning calculées (p. ex., USGS, 2017);
- Équations spécifiquement destinées à relier la rugosité de Manning aux propriétés physiques du cours d'eau (p. ex., Limerinos, 1970); et,
- Utiliser l'expertise technique d'hydrauliciens connaissant bien le cours d'eau étudié.

Dans tous les cas, les procédures de calage et de validation peuvent ajuster les valeurs de rugosité de Manning choisies, mais doivent rester dans les limites énoncées dans les références précédentes.

6.2.5 Structures hydrauliques

Les structures hydrauliques comprennent les déversoirs, les barrages, les ponts, les ponceaux et d'autres éléments situés dans le cours d'eau. Ces structures peuvent modifier de manière significative les caractéristiques de l'écoulement, y compris les vitesses et les niveaux d'eau, et tous les efforts doivent être faits pour les modéliser avec précision. S'il y a des implications réglementaires sur la présence des structures hydrauliques, celles-ci doivent être évaluées et leurs impacts sur la ligne de crue résultante doivent être évalués.

En général, les informations de conception sur les structures hydrauliques sont saisies dans un logiciel de modélisation hydraulique, et les coefficients de pertes de charge sont choisis sur la base des valeurs publiées et du jugement professionnel. Si possible, les pertes de charge au niveau des structures hydrauliques doivent être vérifiées en utilisant une seconde méthode de calcul. Le calage et la validation doivent être effectués sur une large gamme de débits. En général, les modèles 1D sont meilleurs pour la modélisation des structures hydrauliques et des pertes de charge que les modèles à plus haute dimension et ils nécessitent également moins de données et de ressources informatiques.

6.2.6 Dignes et autres mesures d'atténuation des crues

L'analyse hydraulique devrait inclure une évaluation de l'impact des digues et d'autres mesures d'atténuation des inondations sur les niveaux d'eau. Une rivière ou un cours d'eau qui contient d'importants écoulements de surface, où de grandes quantités d'eau sortent de la rivière en un point et rentrent en aval, est un autre exemple nécessitant une analyse minutieuse. En raison de l'impact local sur les niveaux d'eau, ces caractéristiques doivent être prises en compte dans la conceptualisation du modèle (p. ex., les inondations urbaines sur une rivière qui serpente à travers une ville). Semblables aux implications réglementaires notées à la section 6.2.5, celles-ci doivent être évaluées pour une brèche potentielle ou un écoulement autour des digues ou d'autres mesures.

6.2.7 Conditions aux limites

Les conditions aux limites du modèle dépendent de la nature de la modélisation, stationnaire ou non stationnaire. Ces conditions aux limites spécifiées ne doivent pas affecter négativement le processus de simulation. Par exemple, pour une simulation d'écoulement fluvial en régime permanent, la limite en aval du modèle doit être choisie de sorte que les niveaux d'eau simulés dans la zone d'étude d'intérêt ne soient pas sensibles au niveau d'eau en aval, dans la mesure du possible. Cela peut être réalisé en sélectionnant un emplacement suffisamment loin en aval pour avoir une faible sensibilité aux débits en amont (évalué en effectuant une analyse de sensibilité) ou en sélectionnant un point de contrôle auquel le tronçon en amont est hydrauliquement indépendant.

Alternativement, un modèle d'état non stationnaire qui permet de modifier les conditions aux limites pendant la simulation peut être sélectionné afin de produire un profil hydraulique représentatif. Un exemple est la simulation de l'influence des marées sur les niveaux d'eau à

l'aide d'un modèle hydrodynamique où la limite du niveau d'eau en aval peut changer pour représenter les niveaux des océans. Dans ce type de simulation, les conditions aux limites initiales doivent être choisies pour être à la fois physiquement réalistes et pour permettre de faire varier progressivement les débits afin d'éviter les instabilités du modèle. Il est également possible de laisser le modèle se « réchauffer » par une modélisation en régime permanent avant le début de la simulation.

Dans le cas où la condition aux limites en aval est variable, par exemple, lorsqu'elle est contrôlée par un océan, un grand lac ou une rivière beaucoup plus grande (c'est-à-dire, où l'inondation est régie par des processus indépendants), les conditions aux limites doivent refléter des conditions qui sont raisonnablement susceptibles de se produire en même temps que la crue de conception sur le cours d'eau à l'étude (p. ex., les marées hautes ou les niveaux d'eau de pointe saisonniers sur les lacs et les rivières). Il peut y avoir un tronçon transitoire près de la confluence de deux masses d'eau (p. ex., des estuaires côtiers) où l'influence des conditions aux limites sur les niveaux d'inondation devient significative. Une analyse de probabilité conjointe ou une simulation à long terme utilisant des séries de données en continu peut être nécessaire pour établir les niveaux d'inondation dans ces tronçons de transition.

6.2.8 Relations niveau-débit

Les relations de niveau-débit, ou courbes de tarage, décrivent la relation entre le niveau d'eau et le débit à un emplacement spécifique du cours d'eau (p. ex., une station hydrométrique) et sont souvent utilisées comme conditions aux limites dans les applications de modèles hydrauliques. Ils sont généralement utilisés pour estimer le débit à partir d'un niveau d'eau mesuré.

Ces relations sont généralement obtenues par :

- La réalisation des mesures de débit sur le terrain à une gamme de niveaux d'eau, en traçant ou en ajustant la courbe de relation aux données mesurées et en dérivant l'équation associée; ou,
- La réalisation des mesures de la section transversale des cours d'eau pour déterminer les profils des cours d'eau à des endroits précis; ou,
- La réalisation d'une modélisation hydraulique à l'aide d'un logiciel.

L'estimation du débit d'un cours d'eau à une station hydrométrique en fonction du niveau d'eau mesuré permet de développer un hydrogramme de débit qui peut être utilisé comme entrée d'un modèle hydraulique ou pour estimer les hauts débits historiques en dehors de la période de relevés où seules les lignes des hautes eaux sont connues pour les étapes de calage et de validation. Les débits et/ou les niveaux d'eau mesurés par des citoyens et obtenus selon des méthodes scientifiques peuvent également être reliés à l'aide de relations niveau-débit applicables.

La glace ou la végétation dans le canal, les blocages en aval et les modifications de la section transversale du lit modifieront la relation niveau-débit. Les événements d'inondation peuvent également modifier la relation niveau-débit et constituent une considération supplémentaire dans les activités de cartographie et de modélisation des zones inondables.

6.3 Analyse de sensibilité, calage et validation du modèle

Un modèle hydraulique, aussi simple ou compliqué qu'il soit, doit être calé et validé avant de pouvoir être utilisé de manière fiable. Le calage s'effectue en ajustant certains paramètres du modèle, comme la rugosité de Manning, afin que les niveaux de la surface de l'eau modélisés correspondent le plus possible aux niveaux observés sur une période de temps ou une série d'événements.

Une fois le modèle calé, une série distincte d'événements de débit non utilisés pour le processus de calage est utilisée pour vérifier l'exactitude prédictive du modèle (voir la figure 6.2).

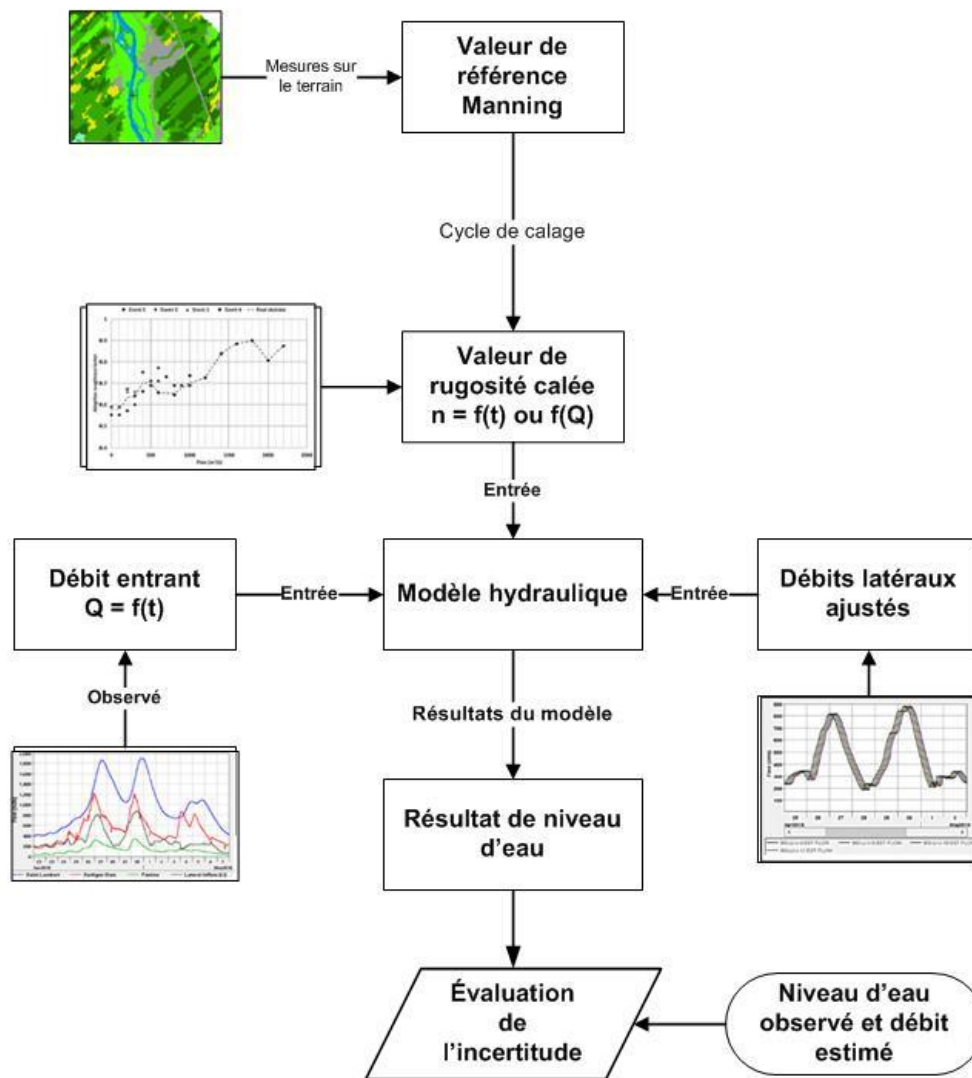


Figure 6.2. Calage et validation d'un modèle hydraulique

6.3.1 Analyses de sensibilité

La première étape du calage et de la validation complète d'un modèle hydraulique fluvial consiste à déterminer où les résultats sont les plus sensibles à partir des valeurs initiales évaluées par des observations sur le terrain, des manuels d'utilisation des modèles et des

exemples dans les manuels. Une liste des paramètres potentiels du modèle doit être préparée. Les valeurs initiales moyennes sont choisies en augmentant ou en diminuant un paramètre et les modifications sont répertoriées en maintenant tous les autres paramètres constants. Une fois que tous les paramètres du modèle sont choisis, la liste est préparée avec le paramètre des modifications maximales des niveaux/débits d'eau en premier, prête pour l'étape de calage décrite ci-dessous. Les paramètres très sensibles seront modifiés en premier lors du calage du modèle. L'analyse de sensibilité peut également déterminer le meilleur emplacement pour les conditions aux limites.

6.3.2 Calage du modèle

Le spécialiste devrait exécuter le modèle en utilisant les niveaux d'eau observés pour caler le modèle. En choisissant les tronçons d'étude où les résultats du modèle sont les plus sensibles aux coefficients de rugosité et de perte hydraulique, le professionnel qualifié doit ensuite ajuster ces paramètres à l'intérieur des gammes publiées pour d'autres projets similaires afin d'obtenir des niveaux d'eau simulés qui sont raisonnablement proches des niveaux observés pour des conditions d'écoulement similaires. Une proximité raisonnable, par exemple, correspond à 5 cm des niveaux d'eau observés ou à 10 % du débit calculé.

S'il n'est pas possible d'obtenir des niveaux d'eau qui correspondent aux observations en utilisant des paramètres qui se situent dans des limites raisonnables, cela peut indiquer qu'il y a des problèmes avec les données topographiques ou sur les conditions aux limites. La tolérance pour la différence entre les résultats du modèle et les valeurs observées doit être indiquée dans la phase objective initiale de l'étude.

Pour le calage des modèles hydrauliques, il convient de tenir compte de la liste et des procédures suivantes développées par l'USACE HEC (Brunner et al., 2020) :

- Paramètres de rugosité hydraulique;
- Coefficients de contraction et d'expansion;
- Extensions des zones d'écoulement inefficaces et hauteurs de seuil.
- Coefficients de structure hydraulique;
- Coefficients de perte de courbure (parfois appelés pertes mineures);
- Informations sur les conditions aux limites, telles que les pentes d'énergie ou même potentiellement les valeurs de courbes de tarage;
- Information sur le blocage des débris aux structures;
- Dimensions de rupture de digue et valeurs temporelles.

Une liste similaire à celle-ci résulte d'une analyse de sensibilité qui donne la priorité à l'importance d'un paramètre du modèle sur la sortie.

Les paramètres de modélisation les plus sensibles à l'étape précédente (généralement la rugosité de Manning et les coefficients de pertes aux ouvrages hydrauliques) sont ajustés lors de l'étape du calage du modèle. La valeur de la rugosité de Manning est souvent plus faible avec des profondeurs plus importantes associées à des débits plus élevés. De préférence, dans un premier temps, le professionnel qualifié doit utiliser des débits observés plus élevés pour trouver le coefficient de rugosité de Manning qui donne les résultats du modèle les plus semblables aux profondeurs et étendues d'inondation observées correspondantes.

6.3.3 Validation du modèle

Une fois que les résultats simulés se situent dans les limites de tolérance définies, l'étape suivante, lorsque les données sont disponibles, consiste à valider le modèle avec un deuxième ensemble de données indépendant pour s'assurer que les valeurs calées produisent des résultats acceptables. Les critères initiaux de la procédure devraient définir comment évaluer l'acceptabilité des résultats du modèle : que ce soit par une plage de tolérance, un pourcentage de profondeur et sur quelle durée, le débit de pointe ou l'ensemble de l'hydrogramme. Une analyse statistique peut définir l'ajustement requis pour valider entièrement le modèle hydraulique. De plus, la comparaison des niveaux d'eau observés avec ceux simulés permet d'évaluer la précision du modèle. Les procédures décrites dans le manuel de l'utilisateur HEC-RAS (USACE HEC, 2022) sont de bonnes ressources à examiner pendant les étapes de calage et de validation du modèle.

6.3.4 Modèle entièrement validé

Une fois calé et validé pour les valeurs des coefficients de rugosité et de pertes avec les deux ensembles de niveaux et de débits observés, le modèle hydraulique fluvial entièrement validé peut simuler les crues de conception pour déterminer les étendues, les profondeurs et les vitesses des aléas d'inondation.

6.4 Exigences en matière de rapports

La documentation de l'analyse porte sur le choix du ou des modèles et des données utilisées dans les procédures d'analyse hydraulique fluviale. Il doit inclure des tableaux des valeurs des paramètres après l'analyse de sensibilité, les étapes de calage et de validation, et les résultats correspondants comparant les débits, les niveaux d'eau et les vitesses observés et simulés, et qui décrivent la précision du modèle. La section 10.0 couvre les exigences détaillées du rapport.

6.5 Résumé des procédures hydrauliques

La définition de l'objectif du modèle hydraulique pour une délimitation des aléas d'inondation, et dans une certaine mesure, les données disponibles, guidera la méthode d'analyse à utiliser. Le modèle hydraulique le plus simple est susceptible d'expliquer un pourcentage élevé de la variabilité des résultats. Les modèles plus complexes nécessitent des exigences accrues en matière de données et de paramètres. Les modèles hydrauliques nécessiteront l'utilisation d'un ou plusieurs débits de conception, soit sous la forme d'un débit de pointe constant (état stable), soit sous la forme d'un hydrogramme (état non permanent). Ces modèles nécessiteront également des données sur la bathymétrie du canal et la topographie de la rive, soit sous forme de sections transversales bidimensionnelles normales aux lignes de courant (pour les modèles 1D), soit sous forme de grille tridimensionnelle ou de points de maillage (pour les modèles 2D). Les coefficients de friction sont des valeurs obtenues empiriquement utilisées pour décrire les caractéristiques de rugosité des matériaux du canal et de la berge ainsi que les coefficients de perte hydraulique de l'infrastructure, bien qu'en pratique, ils puissent également tenir compte d'autres sources d'incertitude du modèle. Ces coefficients peuvent être affinés lors de l'élaboration et du calage du modèle. La validation complète du modèle incorporant ces coefficients, comprenant des analyses de sensibilité, un calage et une validation, avec des valeurs observées de profondeur et de l'étendue de l'inondation pour les débits élevés

enregistrés, est nécessaire pour garantir la fiabilité des résultats du modèle simulé. Ensuite, le modèle peut être utilisé pour simuler les effets du débit de conception sur les niveaux et les vitesses d'eau ainsi que pour délimiter l'étendue de l'inondation et les aléas qui y sont associés.

Un examinateur qualifié qui n'est pas directement impliqué dans le projet devrait examiner l'analyse et les résultats. Les résultats finaux du modèle sont prêts à être présentés sur des cartes d'inondation pour informer le public et présentés dans un rapport, tel qu'indiqué à la section 10.0.

7.0 EFFETS DE LA GLACE

Les inondations liées à la glace sont des processus physiques complexes qui se produisent dans de nombreuses régions du Canada. À ce titre, les effets de la glace doivent être pris en compte lors des évaluations hydrologiques et hydrauliques visant à soutenir la délimitation des aléas d'inondation aux sites étudiés riverains et lacustres. La principale cause des inondations fluviales liées à la glace au Canada est la formation d'embâcles, qui peuvent se produire au moment du gel, de la débâcle printanière ou lors d'une débâcle déclenchée par un dégel au cours de l'hiver. La modélisation des inondations liées aux glaces est une discipline technique spécifique qui nécessite la participation d'experts (Kovachis et al. 2017; Lindenschmidt et al. 2018).

Une description des procédures permettant de prendre en compte les effets de la glace dans l'analyse hydraulique est incluse dans cette section. Toutefois, il faut noter qu'il existe plus d'une méthode potentielle pour évaluer les probabilités et les processus physiques d'inondation par embâcle. Il est donc nécessaire de faire appel à un professionnel qualifié pour effectuer l'analyse des effets de la glace. La figure 2.8 présente un résumé des processus menant à la formation d'embâcles. Les tâches individuelles potentielles pour l'analyse de l'impact des glaces sont incluses dans le tableau 7.1 et font l'objet de références croisées à la figure 7.1.

Tableau 7.1. *Pratiques d'inondation en cas d'embâcle.*

	Pratiques d'évaluation des inondations dues aux embâcles
Étape 1	Évaluer le site étudié pour voir s'il a subi des embâcles ou s'il présente des caractéristiques typiques des embâcles afin de déterminer si une procédure d'évaluation des crues d'embâcle est nécessaire (section 7.3).
Étape 2a	Si des données sur les niveaux d'eau pour une période de 25 ans ou plus sont disponibles, procéder à un examen des lignes des hautes eaux influencées par la glace pour aider à déterminer la ligne des hautes eaux de référence (section 7.4.2).
Étape 2b	Si les données disponibles sont insuffisantes pour permettre une évaluation directe, effectuer une analyse fréquentielle des épisodes de glace synthétique à l'aide de données synthétiques générées par la mécanique des embâcles (section 7.4.3).
Étape 3	Vérifiez la stationnarité.
Étape 4	Déterminer les probabilités d'apparition des niveaux de crue à partir des embâcles pour les données enregistrées ou synthétiques (ou combiner les données) afin de sélectionner les niveaux (hauteurs d'eau) associés aux PDA de conception (section 7.4). Évaluer les impacts des changements climatiques pour le site étudié. (Section 7.3.3)

Pratiques d'évaluation des inondations dues aux embâcles	
Étape 5	<p>Lorsqu'un modèle hydraulique sera utilisé pour déterminer les débits et les vitesses bidimensionnels des embâcles selon la PDA de conception, estimer les débits probables qui correspondent aux hauteurs sélectionnées selon la PDA de conception, en utilisant des relations spécifiques entre les hauteurs et les débits affectés par la glace, basées sur les conditions d'embâcle pertinentes enregistrées sur le site étudié.</p> <p>Développer un modèle hydraulique adapté au site en présence de glace, à partir des nombreux modèles disponibles, en calant et en validant avec des ensembles séparés d'évènements de crue enregistrés dans des conditions d'embâcle, après une analyse de sensibilité. Effectuer les évaluations des incertitudes (section 7.6).</p>
Étape 6	<p>Effectuer une analyse hydraulique bidimensionnelle des débits de conception selon la PDA pour déterminer les effets de remous à l'aide du modèle hydraulique en tenant compte de la glace (section 7.6). Cette analyse est complexe et devrait faire appel à un spécialiste possédant l'expertise pertinente. Un examen indépendant des données, des procédures et des résultats devrait être effectué.</p>
Étape 7	<p>Cartographier les étendues d'inondation dans des conditions d'eau libre et de glace pour les PDA sélectionnées. Documenter la procédure dans un rapport complet.</p>

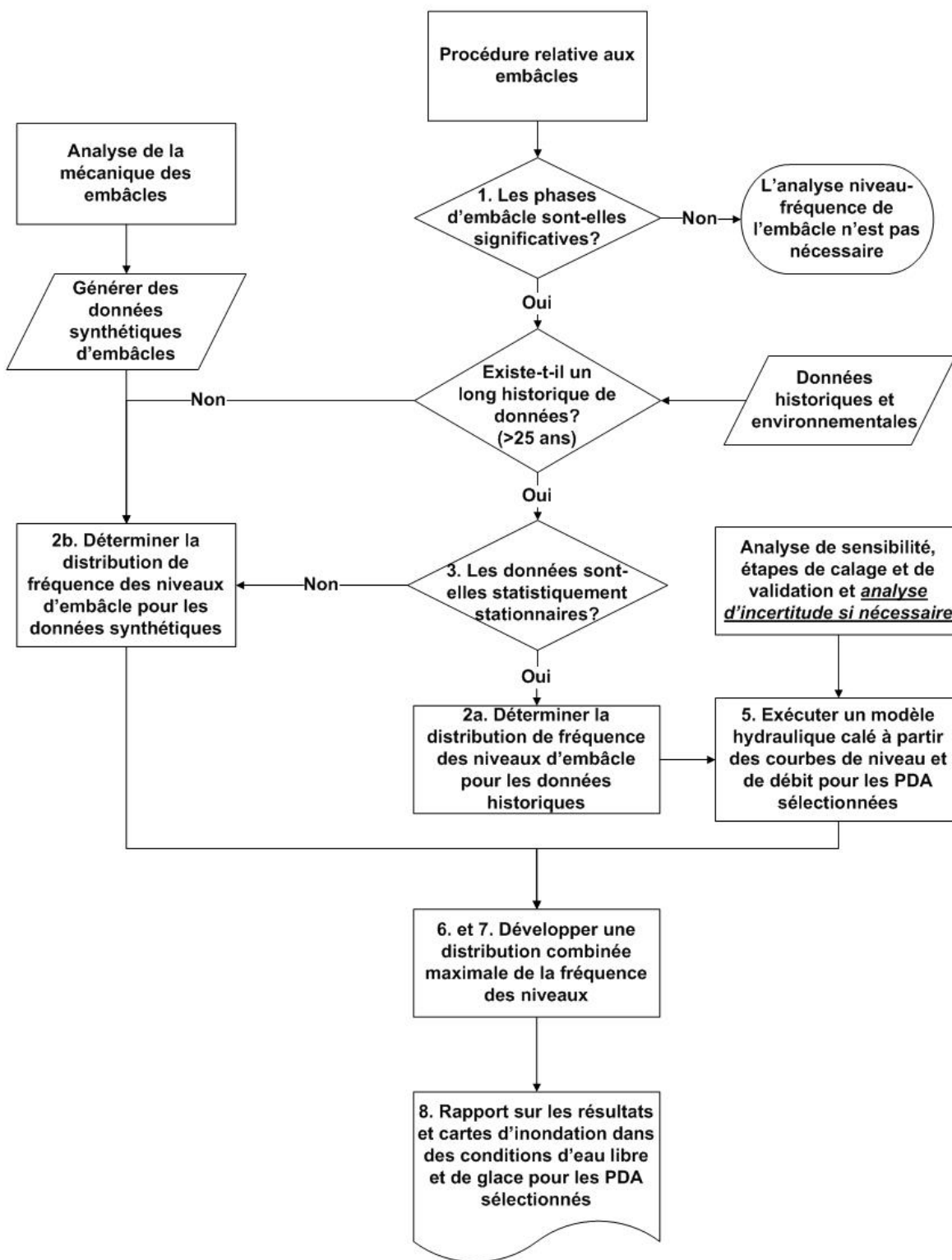


Figure 7.1. Procédure des embâcles

7.1 Inondations dues à la glace

Il existe actuellement deux méthodes standards pour intégrer les impacts liés à la glace dans l'analyse fréquentielle des inondations (AFI) :

- L'analyse conventionnelle, qui utilise une intégration directe des inondations provoquées par la glace à l'aide d'une analyse fréquentielle de niveau avec des ensembles de données à long terme qui comprennent plusieurs inondations provoquées par la glace bien documentée; et,
- La génération de courbes de fréquence synthétiques, basée sur une compréhension de la mécanique de la glace de rivière et des applications de concepts probabilistes simples (Beltaos 2012) ou des simulations de Monte Carlo pour différents événements définis liés à la glace.

Le niveau d'eau maximal annuel lié à la glace peut résulter de la rugosité de la couverture de glace épaisse, d'une libération soudaine d'eau en amont (une onde de décrochement d'embâcles connu sous le nom « *jave* ») ou, plus probablement, d'un embâcle. Celui-ci joue un rôle prédominant la plupart des années où se produisent de hautes eaux liées à la glace. Bien que les embâcles aient tendance à se reproduire sur des tronçons spécifiques de certains cours d'eau, la probabilité qu'un embâcle se produise, le moment et l'effet de celui-ci sont difficiles à déterminer. Dans la mesure du possible, les données hydrométriques relatives aux événements liés à la glace doivent être utilisées directement pour créer une courbe de fréquence des inondations causées par la glace. Lorsqu'il n'y a pas suffisamment de données liées à la glace pour calculer directement les PDA et les extrapoler à des événements rares, il est possible d'utiliser des méthodes de génération de courbes de fréquence synthétiques, bien qu'elles comportent une plus grande incertitude que l'analyse classique. Dans les cas où une analyse moins détaillée convient, une évaluation préliminaire des hauts niveaux peut fournir une estimation grossière des niveaux maximaux prévus liés à la glace.

7.2 Évaluation préliminaire des hauts niveaux

Dans bien des cas, une analyse simplifiée des niveaux d'eau liés à la glace est entreprise pour fournir une estimation raisonnable des niveaux maximaux prévus liés à la glace parce qu'elle n'est pas jugée importante, qu'elle soit supposée que les conditions d'eau libre régissent ou qu'il n'y ait pas de suffisamment de données pour justifier une analyse approfondie. Dans ces situations, une procédure adéquate serait la suivante (Associate Committee on Hydrology 1989) :

1. Évaluer le potentiel de formation d'embâcles ou d'accumulations importantes de glace en fonction des caractéristiques géomorphologiques (changements de pente, rétrécissement des canaux, coudes prononcés, etc.) évidentes sur les cartes ainsi que sur les photographies aériennes et satellitaires;
2. Consulter l'imagerie spatiale et d'autres données télédéteçtées pour suivre les conditions de glace sur une base saisonnière afin de caractériser les processus dominants localement et à une échelle adaptée;
3. À partir de l'inspection des sites, identifier les caractéristiques végétales et morphologiques qui pourraient indiquer la hauteur de l'action de la glace [mais être conscient des mises en garde relatives à de telles preuves, selon Associate Committee on Hydrology (1989)];

4. Recueillir des articles de presse pertinents, des preuves anecdotiques et l'histoire orale sur l'état des glaces à partir des connaissances autochtones et auprès des résidents et des autorités afin de les mettre en corrélation avec les indicateurs végétaux et morphologiques;
5. Évaluer le potentiel d'atténuation des zones inondables et des zones de grand courant pour limiter la hauteur de l'action de la glace;
6. Estimer la gravité des écoulements liés à la glace d'un point de vue régional, si nécessaire; et,
7. Estimer la pente et les dimensions du canal au niveau de la berge (une carte de la pente et une représentation rectangulaire du canal conviennent) et calculer la hauteur prévue d'une accumulation de glace en utilisant les relations hydromécaniques adéquates ou leur approximation graphique (Beltaos 1983).

7.3 Inondations dues aux embâcles

Certains tronçons de rivière au Canada sont plus susceptibles d'être inondés par les glaces que d'autres. Les analyses des sites étudiés qui ont des antécédents documentés d'inondations dues aux glaces devraient inclure une évaluation des impacts des embâcles sur les niveaux d'eau et les PDA. Les sites qui n'ont pas d'antécédents documentés d'inondations dues aux glaces, mais qui présentent des caractéristiques pouvant mener à des embâcles, devraient être évalués pour le risque d'embâcle.

Il y a trois étapes principales dans le cycle de vie de la glace de rivière : la formation, l'épaississement et la rupture de la glace. La figure 2.8 de la section 2.0 identifie le potentiel d'embâcle au cours de chacune des trois étapes différentes et les sous-sections suivantes décrivent plus en détail ces étapes.

7.3.1 Formation et épaississement de la glace

La couverture de glace qui se forme au moment du gel peut généralement être traitée comme des embâcles ou des accumulations de glace, dont il existe deux types : juxtaposée et consolidée. Une accumulation juxtaposée se forme par la juxtaposition de floes, une couche épaisse de glace, lorsque la vitesse d'approche est suffisamment faible pour empêcher les floes d'être entraînés sous la bordure avant d'une couverture de glace précédemment formée. Une couverture juxtaposée peut également se former entre des bandes de glace de la rive (ou de la bordure). Dans ces cas, la stabilité interne est développée par la congélation entre les floes des couvertures de glace, connue sous le nom de congélation interstitielle (Andres 1999). La résistance interne de l'accumulation relativement mince formée par la congélation interstitielle est suffisante pour résister aux forces de cisaillement et de gravité croissantes sur l'accumulation qui s'allonge.

Une couverture de glace consolidée se forme si une couverture de glace juxtaposée ne peut pas se former, soit parce que les floes sont attirés sous la bordure avant, soit parce que le gel interstitiel est insuffisant pour maintenir la stabilité (Beltaos 2013b). Les couvertures de glace consolidées peuvent être considérées comme des structures granulaires (Beltaos 1995), qui se forment par différents mécanismes, à savoir :

- Sur le plan hydraulique, selon le critère de stabilité des embâcles à canal étroit (Pariset et al. 1966), où l'accumulation est suffisamment épaisse pour que sa bordure avant ne soit pas submergée. À moins d'être renforcés par les effets du gel ou que la largeur du

canal soit très faible, ce type d'embâcle est instable et se transforme en un embâcle plus épais, comme décrit ci-après.

- Sur le plan hydromécanique, par le critère de stabilité de l'embâcle « à large canal » où l'épaisseur de l'accumulation est contrôlée par l'équilibre entre les forces externes appliquées et sa résistance interne dérivée de la friction intergranulaire. Ce type d'embâcle est beaucoup plus fréquent que le type étroit, notamment lors de la débâcle des rivières non contrôlées.

En général, le critère de stabilité du « canal large » produira les niveaux d'eau les plus élevés, suivi du critère du « canal étroit » et la couverture de glace juxtaposée produira les niveaux d'eau les plus faibles. Si une couverture de glace juxtaposée ou consolidée est déstabilisée et se brise, la couverture de glace peut s'épaissir davantage. Ces embâcles peuvent provoquer une hausse spectaculaire des niveaux d'eau, en particulier sur les rivières contrôlées dont le débit augmente en hiver.

En outre, des « barrages suspendus » peuvent se former par le transport et l'accumulation de frasil et de floes occasionnels sous une couche de glace déjà formée. Ce type d'embâcle n'est pas fréquent, mais il peut entraîner des inondations, car la glace déposée peut atteindre des dimensions extrêmes dans certaines circonstances. Des détails peuvent être trouvés dans Beltaos (2013b).

7.3.2 Rupture de la glace

L'augmentation de la température, que ce soit pendant les périodes hivernales plus chaudes ou au printemps, affecte la débâcle de la couverture de glace de deux façons :

- Dégradation thermique de la couverture de glace; et,
- Fracture mécanique, mobilisation et fragmentation en dalles et blocs de glace par l'augmentation des débits associée à l'augmentation du ruissellement (précipitations et fonte des neiges) et des apports d'eau souterraine.

En général, lorsque la dégradation thermique domine la débâcle, le risque d'embâcle est faible. Ceci est courant dans les cas où les débits n'augmentent pas de façon substantielle pendant la débâcle. Cependant, dans les cas où les débits augmentent considérablement et où les processus de débâcle mécanique dominant, le risque d'embâcles et de niveaux d'eau élevés associés est plus élevé. Lorsque les embâcles se libèrent, ils génèrent des dérives de la glace et des vagues d'eau vive (appelées « javes »). Si la progression vers l'aval de la dérive de la glace est arrêtée par une couverture de glace encore intacte et/ou un autre obstacle, de nouveaux embâcles peuvent se former.

Les ondes de décrochement d'embâcles sont des phénomènes hydrologiques complexes qui sont créés par la formation et la libération d'embâcles et constituent une caractéristique importante du processus de débâcle. Les embâcles de plus grande taille entraînent des ondes de décrochement de plus grande importance qui se déplacent en aval. L'écoulement non permanent, y compris les ondes de décrochement d'embâcles, peut produire des niveaux d'eau plus élevés et des accumulations d'embâcles plus épaisses que celles qui peuvent être modélisées en utilisant la théorie des embâcles en régime permanent. Des recherches considérables ont été menées pour comprendre les caractéristiques des ondes de décrochement d'embâcles (Jasek 2003; She et Hicks 2005; Beltaos 2013a).

7.3.3 Impacts des changements climatiques sur les inondations d'embâcles

Sous les températures plus chaudes observées actuellement et prévues dans le futur, la plupart des régions du Canada devraient connaître un gel plus tardif et une débâcle printanière plus précoce des cours d'eau couverts de glace. Une couverture de glace relativement plus mince et plus fragile et l'augmentation des débits hivernaux sous le climat plus chaud prévu favoriseraient la consolidation par le gel. Des conditions plus chaudes au moment de la période de gel, combinées à une augmentation des débits, réduiraient la résistance interne de la glace accumulée, ce qui entraînerait la consolidation de la couverture de glace. Ainsi, si les conditions climatiques futures étaient plus humides au moment de la période de gel, des débits plus élevés et des températures de l'air plus chaudes entraîneraient une plus grande sévérité des embâcles au moment du gel (Beltaos et Prowse 2009). Toutefois, si les conditions futures sont plus sèches pendant les périodes de formation et de rupture de la glace, des débits plus faibles auraient l'effet inverse.

Notamment, les hivers plus chauds résultant des changements climatiques peuvent entraîner une diminution de la couverture de glace, ce qui affecte la gravité des embâcles. Des hivers plus chauds et de plus grandes quantités de précipitations peuvent également augmenter la probabilité de dégels au milieu de l'hiver menant à des embâcles (Beltaos et al. 2003, Das et Lindenschmidt 2021).

Une étude de Royako et al. (2018), qui a examiné les crues d'embâcles enregistrées de 1903 à 2015 aux stations hydrométriques des RHC à travers le Canada, a constaté des changements distincts à la fois dans le calendrier et l'ampleur des crues d'embâcles observées. L'analyse a montré que dans le sud-est du Canada et dans certaines parties de l'ouest du pays, une tendance à l'embâcle précoce est observée, tandis que le centre du Canada et les côtes nord-est de la Nouvelle-Écosse et de Terre-Neuve connaissent des crues d'embâcle plus tardives depuis le siècle dernier. Les cours d'eau contrôlés dans ces régions ont montré des changements de calendrier plus importants que les cours d'eau non contrôlés, tout comme les cours d'eau avec des bassins de drainage plus petits.

Cette étude a révélé que les cours d'eau non contrôlés du nord-ouest et de certaines régions du centre-sud du Canada connaissent une augmentation des débits de pointe des embâcles, tandis que le nord de l'Alberta, de la Saskatchewan et du Manitoba, le sud de l'Ontario et l'ouest du Nouveau-Brunswick et de Terre-Neuve présentent des tendances à la baisse de l'ampleur des débits des embâcles. Les variations sont entre +3,5 % à -5 % par an. Les rivières contrôlées présentent des tendances similaires, à l'exception du sud-ouest du Canada où les inondations d'embâcle ne présentent que des tendances décroissantes. De plus, l'ampleur des débits dans les rivières contrôlées varie de +3,5 % à -3,5 % par an, ce qui est légèrement plus étroit que pour les rivières non contrôlées.

7.4 Analyse des embâcles

7.4.1 Données requises

Les données sur les embâcles comprennent les relevés hydrométriques, les informations sur les événements d'embâcles enregistrés et les informations sur les caractéristiques de la glace pendant ces événements. Les relevés hydrométriques peuvent être incomplets pendant les inondations dues à la glace, car la glace endommage souvent l'équipement de jaugeage dans

les cours d'eau. De plus, les débits obtenus par des courbes de tarage sont très peu fiables dans des conditions de glace en raison des effets de remous et de la difficulté logistique d'obtenir ces mesures durant les embâcles. Par conséquent, un examen minutieux des données hydrométriques par des experts peut s'avérer nécessaire.

Les archives historiques d'inondations liées à la glace peuvent également s'avérer précieuses. Les types d'analyses « niveau de perception » décrits à la section 5.2.4 peuvent être appliqués aux inondations liées à la glace, comme l'ont démontré *Alberta Environment and Parks* (1993) à Fort McMurray, en Alberta, et des travaux plus récents sur les rivières Athabasca, Bow et Peace, où des inondations historiques ont été combinées avec des observations systématiques enregistrées.

Des données nécessaires pour effectuer l'analyse détaillée des inondations liées aux embâcles peuvent être recueillies auprès d'un certain nombre de sources, notamment :

- Les relevés hydrométriques, y compris ceux des organismes gouvernementaux;
- Les connaissances autochtones;
- Les membres de la communauté;
- Les vidéos (y compris les sites Web de partage de vidéos en ligne);
- Les articles de journaux; et,
- Les preuves physiques, y compris les cicatrices d'arbres, les marques de hautes eaux, la végétation perturbée et les sédiments des berges.

Une fois que la série de données sur les événements des hautes eaux liés aux embâcles est établie, l'analyse de fréquence conventionnelle, telle qu'expliquée à la section 4.4, peut définir une courbe de la probabilité de hauteur (c.-à-d. niveau d'eau) ou des approches synthétiques moins certaines peuvent définir cette courbe.

7.4.2 Analyse conventionnelle (méthode directe)

L'analyse conventionnelle consiste à établir une distribution de probabilité des hauteurs affectées par la glace à partir d'un ensemble de données qui comprend les pointes annuelles des niveaux d'eau influencés par la glace et qui s'étend généralement sur au moins 25 ans (FEMA 2003). L'ensemble de données doit comporter au moins trois événements d'inondation par embâcle discernables (FEMA 2003). Des pointes relativement peu influencées par la glace sont courantes dans de tels ensembles de données. Elles peuvent être dues à des embâcles mineurs ou au remous de la couverture de glace continue si aucun embâcle ne se forme au cours d'une année donnée. Les étapes de la réalisation d'une analyse conventionnelle sont les suivantes :

1. Procéder à l'évaluation de l'ensemble des données;
2. Choisir l'équation de la courbe et tracer les données de hauteurs;
3. Tracer les distributions ajustées de la fréquence des hauteurs affectées par la glace; et,
4. Déterminer la meilleure distribution de probabilité d'inondation par embâcle.

Une fois que la distribution des PDA des pointes du niveau d'eau influencés par la glace est estimée, elle peut être combinée avec la distribution correspondante des pointes en eau libre pour déterminer la distribution des PDA de tout niveau d'eau donné, quelle qu'en soit la cause. Dans les rivières du nord du Canada, la probabilité combinée est souvent dominée par les

effets de la glace. Le principal avantage de cette analyse conventionnelle est qu'elle est axée sur les données et qu'elle nécessite moins d'hypothèses que les autres méthodes.

7.4.3 Analyse de la courbe de fréquence synthétique (méthode indirecte)

Les courbes de fréquence synthétiques peuvent être utilisées pour générer des estimations des hauteurs de crue d'embâcle dans les cas où ils constituent un aléa connu ou anticipé, mais où les données existantes enregistrées sur les embâcles ne sont pas d'une durée ou d'une qualité suffisante pour être extrapolées à de faibles PDA. Cependant, l'utilisation de courbes de fréquence synthétiques nécessite un haut niveau de jugement et d'expertise, et peut être un processus intrinsèquement incertain.

Le fait que, contrairement aux écoulements en eau libre, la courbe hauteur-débit dans des conditions de glace n'est plus spécifique, contribue à l'incertitude et à la complexité. Le niveau d'eau dépend non seulement du débit, mais aussi de la configuration du canal spécifique au site qui a un impact sur la résistance de la glace à l'écoulement. Le temps froid de l'année affecte la formation et la rupture de la glace de façon irrégulière. La glace peut s'accumuler aléatoirement au niveau des restrictions artificielles ou naturelles du canal, des changements de pente ou des changements de direction brusques du canal. Si l'embâcle peut se former à ces endroits certaines années, ce n'est pas forcément le cas chaque année. En outre, des composantes probabilistes, telles que la formation, le type de couverture, la caractéristique hydraulique, et l'épaisseur de la glace, influencent le niveau d'eau.

En affinant une approche préliminaire (Associate Committee on Hydrology 1989), Beltaos (2012) combine les estimations de la fréquence des débits avec deux fonctions synthétiques d'évaluation de la hauteur et du débit pour les conditions de glace. Ces fonctions d'évaluation représentent respectivement des limites supérieures et inférieures, de sorte que la hauteur (niveau d'eau) peut être égale à une valeur comprise entre les valeurs supérieure et inférieure qui dépendent du débit. Par conséquent, Beltaos qualifie la méthodologie d'approche à « fonction distribuée », par opposition à l'approche préliminaire de « fonction discrète ». Les données historiques sur les débits sont beaucoup plus faciles à obtenir que les hauteurs d'eau de pointe influencées par la glace, car la variabilité spatiale des hauteurs d'embâcle est beaucoup plus grande que celle des débits. Par conséquent, le débit d'un site non jaugé peut souvent être déduit des relevés des jauges hydrométriques en amont et en aval, ou même des estimations régionales, alors que les données sur les hauteurs d'embâcle ne peuvent être transposées de façon significative. Une fois que la fréquence des débits de pointe influencés par la glace est établie, la fréquence des hauteurs correspondante peut être déterminée en introduisant une fonction de probabilité locale, évaluée empiriquement, pour l'apparition d'embâcles au cours d'une année donnée.

D'autres approches utilisent des simulations de Monte-Carlo pour les modèles de glace dans le canal, basées sur les probabilités de différents facteurs, y compris le débit, qui affectent les niveaux d'eau dans les conditions de glace. Un modèle de débit/hauteur ou un modèle hydraulique peut générer les simulations de Monte-Carlo.

Une telle approche pour générer des courbes de fréquence synthétiques attribuables à la glace commence par une analyse de fréquence des débits au début de la période de gel (à la fois dans des conditions juxtaposées et consolidées) et des divers mécanismes de débâcle. L'étape suivante requiert un haut niveau d'expertise en matière de glace pour construire des courbes de débit/hauteur liées à la glace pour chaque gamme de débits probables affectés par les

conditions de gel et de débâcle. Des simulations Monte Carlo sur 1000 ans de chacun des débits probables avec les niveaux d'eau associés pour chaque cas d'embâcle déterminent les probabilités synthétiques des hauteurs selon les PDA.

Lindenschmidt et al. (2016) décrivent une autre approche de Monte-Carlo utilisant un modèle hydraulique pour un site étudié spécifique, soit la ville de Peace River, en Alberta, sur la rivière Peace River. Les auteurs ont utilisé les données enregistrées pour différents événements d'embâcle et de crue en eau libre sur le site étudié pour développer des courbes de fréquence des hauteurs affectées par la glace. Ces courbes ont ensuite été appliquées pour caler et valider un modèle hydraulique numérique, RIVICE, qui a simulé différents embâcles et scénarios d'inondation. Ensuite, une analyse de Monte-Carlo a produit un ensemble de 10 000 profils de niveau d'eau, à partir desquels une analyse de fréquence a déterminé les niveaux de crue selon les PDA de 0,1 % et 0,05 % pour le site étudié. Ces niveaux de crue de conception ont ensuite été utilisés pour cartographier les aléas d'inondation et la vulnérabilité de la ville.

Ces différentes approches synthétiques proposées à ce jour sont passées en revue et expliquées dans Beltaos (2021). La revue méthodologique couvre l'approche des fonctions discrètes, des fonctions distribuées et du cadre stochastique de Monte Carlo ainsi qu'une approche plus théorique de régression logistique.

7.5 Effets du contrôle

Le contrôle des eaux qui peut modifier le régime d'écoulement hivernal peut affecter les processus du couvert de glace de nombreuses façons, et doit être envisagé en fonction de sa proximité avec le site étudié. Les débits élevés en hiver, les fluctuations et les effets thermiques peuvent contribuer à un régime de glace contrôlé qui est très différent du régime naturel. Cela inclut un potentiel accru de problèmes de glace tout au long de la saison des glaces. L'évaluation des aléas d'inondation dus au contrôle avant la construction d'une installation est une tâche complexe qu'il vaut mieux entreprendre en utilisant un modèle de glace bien calé qui simule au mieux une gamme de processus hydrothermiques et hydromécaniques (Shen 2010). Dans les situations où le contrôle des eaux est en place depuis plusieurs années et où les résultats des niveaux d'eau liés à la glace ont été mesurés, des procédures d'exploitation ont généralement été établies pour limiter la gravité des impacts. Cependant, les aléas liés à la glace peuvent toujours se produire malgré tous les efforts déployés pour contrôler les résultats. Dans ces situations, le défi consiste à combiner les effets des événements aléatoires et des conditions imposées dans l'analyse de probabilité. Huokuna et al (2017) passent en revue de manière plus complète la littérature sur les changements induits par le contrôle des eaux dans les conditions de glace des rivières et ses divers impacts sur les inondations liées à la glace.

7.6 Analyse hydraulique tenant compte des effets de la glace

7.6.1 Extrapolation basée sur la zone d'influence

Étant donné que la plupart des informations systématiques consistent en des niveaux d'eau liés à la glace à un endroit – généralement à une jauge hydrométrique ou à un emplacement unique d'intérêt ou un point d'accès – il est nécessaire d'appliquer les niveaux d'eau dans tout le tronçon d'intérêt par extrapolation en amont et en aval des emplacements des niveaux d'eau connus. Ceci peut être réalisé de différentes manières, dont la complexité varie d'un simple

calcul de pente uniforme à l'aide d'une pente d'eau libre connue, à une analyse de modélisation hydraulique non uniforme (Carson et al. 2011; Brunner 2016) qui peut tenir compte des changements de forme de la section transversale et d'une pente de canal non uniforme. Dans un cas comme dans l'autre, les profils d'embâcles mesurés (p. ex. Andres et Doyle, 1984) et les observations des conditions générales de la glace permettent de faire confiance à l'extrapolation du débit uniforme et au calage des simulations de niveaux d'eau non uniformes. Pour faciliter cette analyse, il est bon d'effectuer au moins une série d'observations hivernales pour surveiller les conditions de gel et de débâcle s'il existe des problèmes de glace connus à un endroit où une étude des aléas d'inondation doit être entreprise.

L'étude de délimitation des aléas d'inondation pourrait nécessiter l'application des niveaux d'eau de la PDA de conception, déterminés par les méthodes des sous-sections précédentes, à travers le site étudié soumis à la glace et aux embâcles à l'aide d'analyses hydrauliques. Ceci peut être nécessaire, par exemple, lorsqu'une zone inondable secondaire qui est définie par les vitesses est une composante du critère d'inondation, ou lorsque les écoulements des affluents impliquent que la hauteur d'eau (niveau) est une fonction complexe de la géométrie du canal et de l'écoulement. Dans les zones urbaines vulnérables et à risque, la crue de référence pourrait ne pas être à un niveau constant sur toute l'étendue de l'étude. Dans d'autres sites étudiés plus simples, les niveaux de conception de la PDA peuvent être un niveau de refoulement constant sur toute l'étendue de l'étude et une analyse hydraulique du système affecté par la glace n'est pas justifiée.

Lorsqu'une modélisation hydraulique est nécessaire, le spécialiste qualifié doit développer les débits probables dans les conditions de glace observées correspondant au niveau d'eau (hauteurs) des crues de conception de la PDA. Il s'agit sans aucun doute d'un processus itératif, car la hauteur dépend d'autres facteurs que le débit, c'est-à-dire que la même hauteur peut se produire à plusieurs débits selon l'épaisseur de la glace, l'emplacement de l'embâcle, la rugosité de la glace, etc.

Ensuite, le professionnel qualifié doit affiner un modèle hydraulique du système à l'aide des paramètres liés à la glace pour simuler le segment dans des conditions de glace. RIVICE et une version de HEC-RAS sont des modèles hydrauliques capables de simuler des systèmes affectés par la glace. Ces modèles utilisent des estimations de l'épaisseur de la glace, de sa porosité, de sa rugosité et de l'emplacement de la bordure de l'embâcle. Les événements liés à la glace observés pour le site étudié spécifique devraient servir à caler et valider les valeurs typiques pour ces paramètres de glace.

Ensuite, le professionnel pleinement qualifié validera entièrement ce modèle hydraulique spécifique au site affecté par la glace à l'aide d'un ensemble d'événements de haut niveau de glace pour le calage et d'un autre pour la validation. Ce modèle entièrement validé du système simulera les débits de conception afin de déterminer l'étendue, les profondeurs et les vitesses dans tous les tronçons du site étudié pour les diverses crues de conception selon la PDA attribuable à la glace. Le spécialiste devrait examiner le niveau au point où les crues de conception ont été déterminées pour s'assurer que la relation entre le niveau et le débit se maintient, ou si des ajustements et des révisions du modèle hydraulique sont nécessaires.

7.7 Exigences en matière de rapports

La documentation des impacts de la glace sur la délimitation des aléas d'inondation doit couvrir les types d'embâcles, les raisons pour lesquelles ils se sont produits et l'étendue du tronçon de

rivière analysé, comme indiqué à la section 10.0. Le rapport doit indiquer la source des données utilisées pour déterminer les niveaux d'eau de la crue de référence, la provenance des relevés hydrométriques ou l'utilisation d'une approche synthétique, la façon dont les relations entre les niveaux et les débits sous la glace ont été établies, et par qui. Le rapport devrait également détailler tout logiciel hydraulique utilisé, les valeurs des paramètres, les résultats des analyses de sensibilité et les étapes de calage et de validation spécifique au site affecté par la glace. Le rapport devrait fournir la délimitation finale des aléas d'inondation et ses réviseurs.

7.8 Résumé des procédures relatives aux effets de la glace

Dans les sites étudiés où les embâcles ont produit des inondations dans le passé, ou où de telles inondations liées à la glace sont probables, soit lorsque la glace se forme, soit lorsqu'elle se brise et rencontre des conditions qui bloquent son écoulement en aval, l'étude de délimitation des inondations devrait prendre en compte l'impact des inondations attribuables à la glace. Dans le cas où suffisamment de données sont disponibles, il est possible d'adopter une approche basée sur les données pour une AFC liée à la glace, ce qui fournit plus de certitude dans les résultats. Autrement, une approche synthétique, utilisant des paramètres basés sur le jugement et l'expérience de l'ingénierie, peut estimer une probabilité d'inondation liée à la glace, mais conduit à plus d'incertitude dans les résultats. Les aléas d'inondation peuvent également dépendre de la durée prévue d'un niveau d'eau élevé et de la possibilité que des blocs et des dalles de glace entrent dans la zone inondable et s'y déplacent. Par conséquent, l'aléa posé par un niveau d'eau influencé par la glace peut différer de l'aléa posé par le même niveau d'eau dans des conditions d'eau libre. De plus, les changements climatiques sur le site étudié auront un impact sur la probabilité des aléas d'inondation. Un modèle hydraulique entièrement validé pour des conditions d'eau libre et de glace peut être nécessaire pour déterminer les vitesses en deux dimensions pour les tronçons et les points critiques sous l'effet de la glace pour la série de niveaux d'eau selon les PDA de conception. Dans ces cas, un spécialiste hautement qualifié doit estimer les débits probables correspondant au niveau d'eau de conception à partir des événements enregistrés sur le site étudié. L'étape finale consiste à documenter les données et les procédures dans un rapport complet, comme indiqué à la section 10.0.

8.0 INONDATION SUR LES RIVES DES LACS

Cette section décrit les processus physiques prédominants qui provoquent les inondations sur les rives des lacs et présente les procédures d'analyse et de cartographie des aléas liés aux inondations sur ces rives. Plus précisément, l'accent est mis sur les processus hydrologiques (c.-à-d. le bilan hydrique) et les contributions des tempêtes (c.-à-d. les vagues, les ondes de tempête et les seiches) aux aléas d'inondation sur les rives des lacs. Le document de la série « Guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des zones inondables » intitulé « Évaluation des aléas d'inondation côtière pour une analyse basée sur le risque sur les côtes marines du Canada » décrit les procédures applicables aux côtes marines.

Les procédures d'estimation des niveaux d'eau extrêmes et des niveaux d'inondation pour les lacs sont similaires aux procédures pour les rivières et les côtes marines. Cependant, certains processus physiques sont uniques aux lacs ou peuvent être légèrement différents. Les fluctuations à long terme du niveau d'eau, les fluctuations saisonnières et les tempêtes sont abordées dans cette section. D'autres aléas liés aux rivages et à l'eau, notamment l'érosion, l'instabilité des pentes, les plages dynamiques, l'empilement des glaces, le givrage dû aux éclaboussures des vagues et les vagues générées par les navires ne sont pas abordés en détail dans le présent document, mais sont disponibles dans d'autres sources (p. ex., Ontario Ministry of Natural Resources, 2001).

Le tableau 8.1 présente une vue d'ensemble des procédures d'analyse des inondations en bordure de lac.

Tableau 8.1. Procédures d'analyse et de cartographie des aléas d'inondation sur le rivage du lac.

	Procédures d'analyse et de cartographie des aléas d'inondation sur le rivage de lac.
Étape 1	Identifier les processus qui contribuent aux aléas des inondations sur les rives des lacs (p. ex. niveaux d'eau, ondes de tempête, vagues et érosion) et évaluer l'intensité et la probabilité prévues de ces aléas ainsi que leurs interactions. Conceptualiser les voies potentielles d'inondation des rives du lac (p. ex. inondation directe, érosion, débordement, etc.).
Étape 2	Recueillir les données requises, notamment : la bathymétrie, la topographie, le niveau d'eau, les données météorologiques, les vagues et la glace (si elles sont disponibles) (section 8.2).
Étape 3	Estimer les niveaux statiques des lacs (p. ex., les niveaux moyens hebdomadaires ou mensuels) en éliminant les fluctuations à court terme à partir de relevés de la mesure du niveau de l'eau (section 8.4). Utiliser la méthode du maximum annuel (MA) pour déterminer les niveaux statiques extrêmes des lacs pour les PDA souhaitées (section 8.12).
Étape 4	Estimer l'onde de tempête à partir de mesures du niveau de l'eau ou simuler l'onde de tempête à l'aide de modèles numériques (section 8.5). Utiliser la méthode des pointes dépassant un seuil (POT) pour déterminer les ondes de tempête extrêmes pour les PDA souhaitées (section 8.12).
Étape 5	Utiliser l'approche conjointe de probabilités pour déterminer les niveaux de crue extrêmes pour les PDA souhaitées (section 8.12). L'approche utilise les distributions de probabilité du niveau statique du lac et de l'onde de tempête comme entrées.

Procédures d'analyse et de cartographie des aléas d'inondation sur le rivage de lac.	
Étape 6	Déterminer les conditions des vagues littorales à l'aide de méthodes simplifiées ou de modèles numériques (sections 8.6 à 8.8). Estimer les niveaux de la remontée des vagues et/ou les débits de débordement et les aléas associés ou les distances d'inondation (section 8.9).
Étape 7	Cartographier les aléas d'inondation pour les PDA sélectionnées (section 8.10). Documenter la procédure dans le rapport technique.

8.1 Processus physiques

Les rives des lacs peuvent être inondées par des niveaux d'eau élevés (provoqués par des processus hydrologiques et/ou des tempêtes) et/ou par l'effet des vagues. Les principales sources d'aléas d'inondation sur les rives des lacs sont les suivantes :

- Lignes des hautes eaux statiques en raison des différences dans le temps entre les apports d'eau (p. ex. débits entrants des rivières, ruissellement, précipitations à la surface du lac) et les sorties (p. ex. débits sortants des rivières, évaporation, prélèvements, etc.)
- L'onde de tempête (principalement la configuration causée par les vents vers les terres); et,
- Les vagues générées par le vent, qui entraînent le ruissellement sur les rivages et/ou le débordement des dispositifs naturels ou de protections côtières.
- La poussée des glaces

D'autres sources d'aléas d'inondation sur les rives des lacs sont les seiches, le sillage des bateaux, les tsunamis générés par les glissements de terrain et les météotsunamis. Les inondations causées par ces sources ne sont pas traitées dans ce guide.

Il convient de procéder à un examen préliminaire des processus hydrologiques et lacustres locaux/régionaux afin d'identifier les processus physiques importants qui influent sur le potentiel d'aléas d'inondation. Sur les grands et petits lacs, les dommages causés par les inondations ont tendance à être plus graves lorsque les vagues de tempête se produisent à des niveaux d'eau élevés.

8.1.1 Niveaux d'eau statiques

Le niveau d'eau statique est l'élévation de la surface de l'eau, sans tenir compte des effets du vent, des vagues, des seiches et des variations à court terme dues à d'autres processus. Les niveaux d'eau statiques sont déterminés par les conditions hydrologiques et fluctuent sur diverses échelles de temps.

Au Canada, les niveaux des lacs sont généralement les plus élevés à la fin du printemps ou en été et les plus bas en hiver, ce qui correspond aux schémas saisonniers des précipitations, de l'accumulation de neige, de la fonte des neiges, de l'évaporation et d'autres processus. Par exemple, les niveaux d'eau du Grand lac des Esclaves sont généralement 0,3 m plus élevés en été qu'en hiver (voir la figure 8.1).

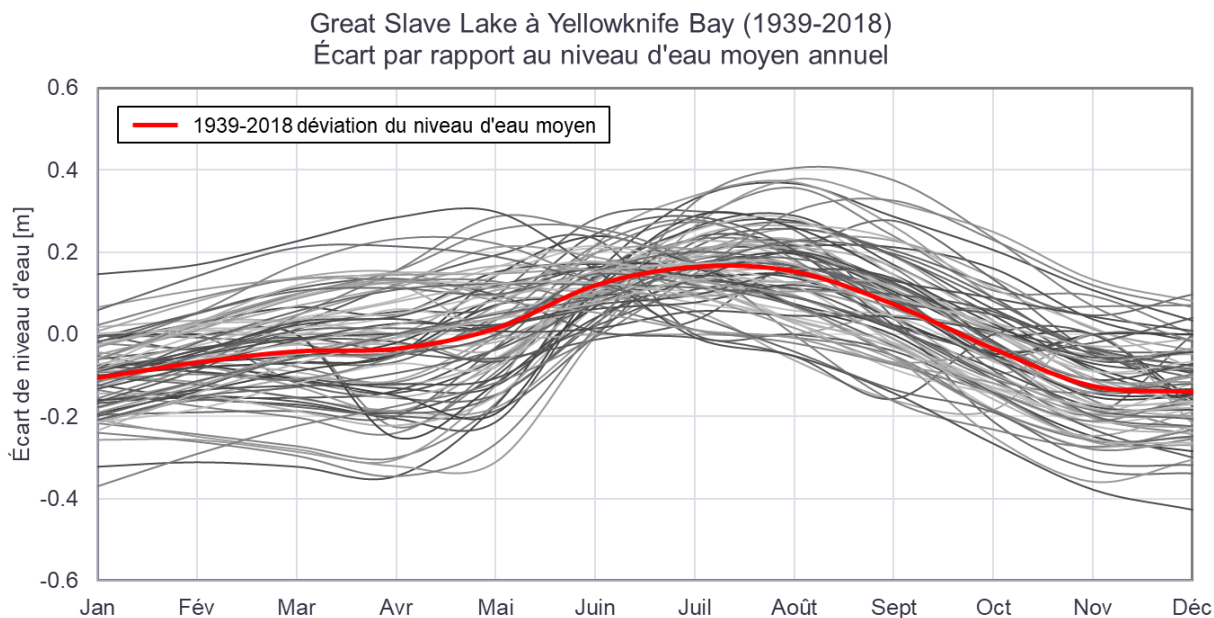


Figure 8.1. Anomalies du niveau d'eau statique du Grand Lac des Esclaves à Yellowknife (1939-2018)

L'ampleur relative de la variabilité à long terme (p. ex., décennale) et de la variabilité saisonnière/annuelle doivent être prises en compte lors de l'évaluation des niveaux des lacs aux fins de l'analyse des aléas d'inondation sur les rives. Les changements sur des échelles de temps décennales peuvent être causés par la variabilité climatique à grande échelle qui influence les modèles de précipitation et d'évaporation régionaux et continentaux (p. ex. l'oscillation australe El Niño-La Niña, l'oscillation nord-atlantique, etc.)

À titre d'exemple illustrant les différentes échelles de temps pertinentes pour la variabilité des niveaux d'eau des lacs, les niveaux d'eau mensuels (statiques) du lac Érié sont présentés à la figure 8.2 pour la période 1918-2020. Les niveaux d'eau les plus bas ont été enregistrés dans les années 1930, et des périodes de niveaux d'eau élevés ont eu lieu presque chaque décennie

depuis les années 1950. L'amplitude saisonnière du niveau d'eau du lac Érié est d'environ 0,5 m et l'amplitude à long terme est de près de 2 m.

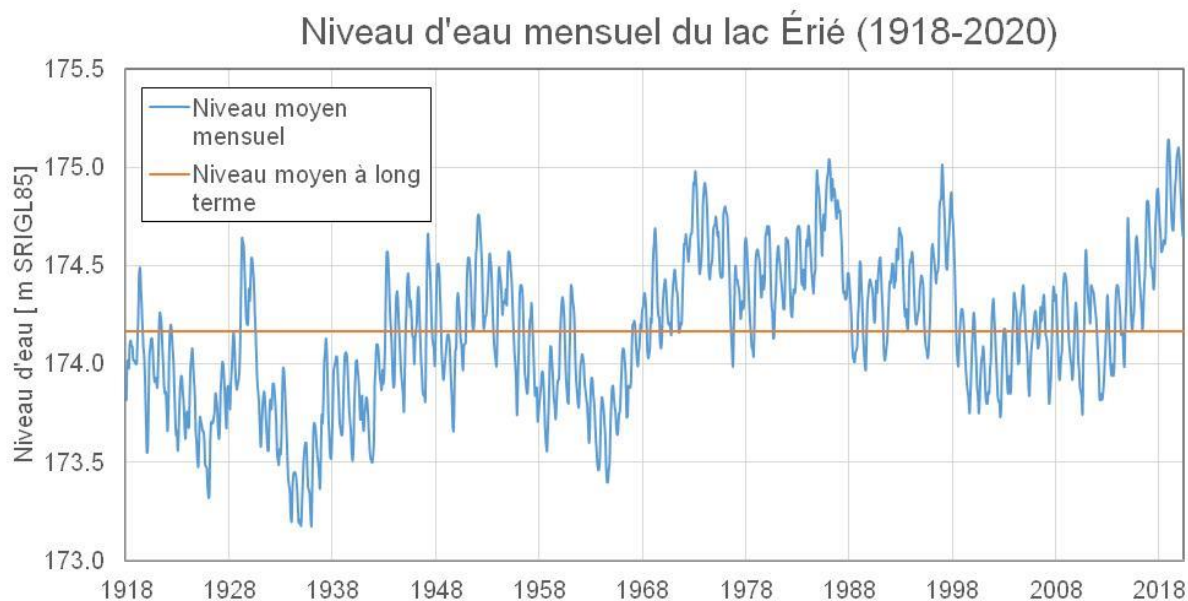


Figure 8.2. Variations à long terme du niveau d'eau du lac Érié

8.1.2 Onde de tempête

L'onde de tempête est l'augmentation (ou la diminution) temporaire du niveau de l'eau due aux conditions météorologiques. Elle peut inclure :

- La dénivellation due au vent : l'augmentation du niveau de l'eau sous le vent résultant de la contrainte de cisaillement exercée par le vent sur la surface de l'eau; et,
- La dénivellation due à la pression : l'augmentation du niveau de l'eau due aux changements de la pression atmosphérique pendant les tempêtes.

Les facteurs qui influencent principalement la dénivellation due au vent sont les suivants :

- Vitesse du vent : la contrainte de cisaillement augmente quadratiquement avec la vitesse du vent;
- Profondeur de l'eau et configuration du littoral : la dénivellation due au vent est amplifiée dans les eaux peu profondes et les baies fermées;
- Fetch et durée : le vent soufflant sur de plus grandes distances pendant une plus longue durée produit plus de dénivellation;
- Rugosité de la surface du lac : la rugosité de l'interface air-lac (déterminée, par exemple, par l'état des vagues et/ou de la glace) influe sur le transfert d'énergie et sur la dénivellation qui en résulte; et,
- Glace : la présence de floes mobiles peut améliorer le transfert d'énergie air-eau en augmentant la rugosité de la surface et génère de la résistance, ce qui amplifie la dénivellation due au vent. Inversement, une couverture de glace étendue ou fixe sur le rivage réduit (ou élimine) le fetch effectif, et supprime ou dissipe la dénivellation due au vent.

La dénivellation due à la pression est une petite composante de l'onde de tempête sur les lacs et peut être ignorée lorsque la différence de pression à la surface du lac est inférieure à

quelques millibars. C'est généralement le cas pour les grands systèmes orageux non convectifs qui passent au-dessus de la plupart des lacs.

8.1.3 Seiche

Les seiches sont des vagues stationnaires, causées par des effets météorologiques ou d'autres mécanismes de perturbation (p. ex., des tremblements de terre), qui se déplacent d'avant en arrière dans un lac. Elles peuvent se former après une onde de tempête, lorsque l'eau qui a été poussée à une extrémité du lac revient.

L'estimation des niveaux de seiche est difficile, car elle dépend de la proximité entre la fréquence des ondes de tempête et la fréquence d'oscillation naturelle du lac, qui dépend de la géométrie et de la bathymétrie du lac, ainsi que des effets de l'amortissement par friction. Les lacs allongés ont tendance à être plus enclins aux amplifications. En général, le potentiel de seiches doit être évalué s'il existe des connaissances ou des preuves indiquant des oscillations périodiques (régulières) du niveau d'eau de l'ordre de quelques minutes. Des méthodes simplifiées pour estimer la période d'oscillation libre et naturelle d'un bassin fermé (p. ex., des lacs) sont fournies dans divers manuels d'ingénierie (p. ex., CIRIA 2007, USACE 2002). Les estimations du potentiel et de la hauteur des seiches peuvent être obtenues par l'analyse des données historiques sur les niveaux d'eau ou de la modélisation numérique de l'hydrodynamique des lacs.

8.1.4 Remontée des vagues et débordement

Le niveau de la remontée de la vague est l'élévation maximale sur le rivage au-dessus du niveau de l'eau calme. Elle se compose de :

- Formation des vagues : la surélévation du niveau moyen de l'eau sur le rivage due au déferlement des vagues; et,
- Rupture des vagues : le mouvement ascendant et descendant de l'eau sur le rivage, qui entraîne des fluctuations de l'élévation du niveau de la vague.

La remontée des vagues est un phénomène complexe qui dépend du niveau local de l'eau, de la profondeur de l'eau à proximité du rivage, du fetch, des conditions de la vague incidente (hauteur, période, direction, déferlement ou non) et de la nature de la plage ou de la structure de la côte (p. ex., pente, réflectivité, hauteur, perméabilité, rugosité) (FEMA 2005).

Lorsque le niveau de la remontée des vagues dépasse l'élévation de la crête d'une plage ou d'une structure côtière, l'eau s'écoule par-dessus. On parle alors de débordement par « eau verte ». Les débordements peuvent présenter des risques directs pour les personnes et les biens ou contribuer à l'inondation des terres.

Une autre forme de débordement des vagues peut se produire lorsque les vagues se brisent sur la face du côté la mer d'une structure abrupte ou verticale, entraînant les gouttelettes d'éclaboussures sur la crête par leur propre élan ou par le vent (EurOtop 2018). Ce phénomène est particulièrement préoccupant dans les climats froids où les éclaboussures peuvent geler sur les bâtiments et autres structures.

8.2 Exigences en matière de données

8.2.1 Données topographiques et bathymétriques

Le lidar topographique est disponible pour de nombreuses régions du Canada et peut être obtenu auprès de sources provinciales et/ou de Ressources naturelles Canada (2021).

Les données bathymétriques peuvent être disponibles auprès du Service hydrographique du Canada (2021a) et de sources provinciales. Les données peuvent être fournies sous forme de cartes de navigation, de feuilles de terrain et/ou de données numériques (p. ex. échosondeur mono ou multi-faisceaux, lidar bathymétrique littoral, etc.). Pour les applications de modélisation des ondes de tempête et des vagues, une bathymétrie à relativement faible résolution peut être adéquate dans les zones profondes ou lorsque les gradients sont faibles, alors que des données bathymétriques à plus haute résolution peuvent être nécessaires dans les régions peu profondes ou dans les zones à fort gradient bathymétrique. Des levés bathymétriques à proximité du rivage (p. ex., au moyen d'un échosondeur) sont souvent effectués pour des projets où les données existantes sont limitées ou non disponibles. Le lidar bathymétrique est de plus en plus disponible, mais présente des limites en ce qui concerne la profondeur de l'eau et la turbidité.

Lors de l'intégration des ensembles de données topographiques et bathymétriques, il faut veiller à assurer une référence verticale cohérente et à minimiser les artéfacts numériques, éventuellement en procédant à une vérification à l'aide de sections transversales.

8.2.2 Sections transversales

Des sections transversales peuvent être nécessaires pour les analyses unidimensionnelles de la remontée des vagues et du débordement.

Elles peuvent être obtenues des modèles numériques d'élévation topographique et bathymétrique à haute résolution, ou relevées à l'aide d'une combinaison de techniques d'arpentage sur l'eau/en bateau et sur terre. Des conditions calmes sont nécessaires pour effectuer des relevés dans la zone des vagues, car les eaux peu profondes, les vagues, les courants et les sédiments mobiles peuvent créer des défis et des aléas pour une équipe. Dans les cas où des données à haute résolution existent (p. ex., des données topographiques et bathymétriques lidar, ou des données multifaisceaux), les sections peuvent être dérivées des données de base, à condition que l'interpolation ne porte que sur de petites distances et élévations.

Les sections doivent être représentatives de la topographie et de la bathymétrie typiques d'un tronçon particulier du littoral. En général, les sections seront perpendiculaires aux contours bathymétriques locaux et au littoral. Les sections (et les tronçons) doivent être plus rapprochés les uns des autres lorsqu'il y a des changements physiques dans la ligne de rivage.

8.2.3 Données sur les niveaux d'eau

Les données sur les niveaux d'eau sont disponibles auprès du Service hydrographique du Canada (2021b), des Relevés hydrologiques du Canada (2023) et de sources provinciales (p. ex. ministère provincial de l'environnement ou des ressources naturelles, services publics d'électricité, universités, etc.). Les données sont généralement disponibles à des intervalles

d'échantillonnage quotidiens et horaires (ou plus fréquents). Les niveaux d'eau moyens mensuels sont également disponibles pour les Grands Lacs (lac Supérieur, lac Michigan-Huron, lac Sainte-Claire, lac Érié et lac Ontario) de 1918 à aujourd'hui (SHC 2021b). Les niveaux d'eau pour chaque lac sont des moyennes basées sur un réseau de stations de jaugeage au Canada et aux États-Unis.

Dans la plupart des cas, le site étudié n'aura pas de jauge de niveau d'eau à long terme. Cependant, si des données sont disponibles pour d'autres endroits sur le lac, les niveaux d'eau statiques peuvent être dérivés de la ou des jauges à proximité. Les mesures de niveau d'eau à court terme (p. ex., semaines à mois) au site étudié peuvent être utilisées pour établir des corrélations avec les jauges de niveau d'eau à long terme et estimer les ondes de tempête extrêmes au site étudié (p. ex., Rogers et al., 2010). Bien que ces méthodes soient généralement plus rapides à appliquer et moins coûteuses que la modélisation numérique, elles doivent être appliquées avec précaution, en particulier sur de longues distances ou le long de côtes complexes en raison des différences propres à chaque site.

Pour de nombreux lacs, les mesures à long terme du niveau d'eau ne sont pas disponibles. Dans ces situations, le niveau d'eau maximum enregistré (si disponible), le niveau d'eau maximum réglementé (p. ex., le permis d'exploitation du réservoir), ou les marques historiques des hautes eaux pourraient être utilisés à la place du niveau d'eau statique réglementaire (p. ex., le niveau d'eau statique de la PDA de 1 %). Les estimations de la dénivellation due au vent doivent être ajoutées aux estimations du niveau d'eau statique lors de la détermination des niveaux d'inondation de la PDA.

Lorsqu'il n'existe aucune information documentée, les connaissances locales et la reconnaissance sur le terrain (p. ex., l'érosion ou l'escarpement de l'arrière-plage, les différents types de végétation, les lignes de bois flotté/débris) peuvent fournir des preuves de niveaux d'eau élevés passés.

8.2.4 Données météorologiques

Des mesures météorologiques horaires sont disponibles auprès d'Environnement et Changement climatique Canada (2021a) pour plus de 2 000 stations à travers le pays. La vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique et la température de l'air sont généralement utilisées pour estimer les conditions des ondes de tempête et des vagues. La plupart des stations principales sont équipées d'un anémomètre U2A, qui enregistre les vitesses moyennes du vent à une minute ou (depuis 1985) à deux minutes à chaque observation (p. ex., toutes les heures) (CCCE, 2021c). Les directions du vent sont enregistrées à 10 degrés près, tandis que celles des instruments plus anciens sont fournies à 8 points sur une boussole. La vitesse et la direction du vent sont grandement affectées par la hauteur de l'anémomètre au-dessus du sol et par la présence de collines, de bâtiments et d'arbres. L'exposition standard des coupes de l'anémomètre est de 10 m au-dessus de la surface du sol.

Les ensembles de données de réanalyse comme le *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) de la NOAA (Saha et al. 2010), le *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts' ERA5 Reanalysis* (Copernicus Climate Change Service 2017) et le *Regional Deterministic Reforecast System* (RDRS) du ECCC (Gasset et al., 2021) peuvent être utilisés pour alimenter les modèles d'ondes de tempête et de vagues pour les grands lacs (lorsque des données météorologiques variant dans l'espace sont nécessaires). Cependant, il faut tenir compte des limites de ces ensembles de données pour les applications lacustres, notamment la

faible résolution spatiale, la faible résolution des champs atmosphériques de surface à l'interface terre/eau, et/ou leur paramétrage ou l'omission d'importants processus d'interaction atmosphère-lac. Une validation locale des données de réanalyse à l'aide de données mesurées devrait être effectuée, afin de caractériser l'incertitude et d'identifier tout besoin de correction des biais.

La présence (ou l'absence), la concentration, la mobilité et les caractéristiques (p. ex., la rugosité de la surface) de la glace des lacs sont des facteurs importants pour la génération et la propagation des vagues et des ondes de tempête, car ils influent sur la longueur effective des fetchs et le transfert de quantité de mouvement air-mer. Les données sur les glaces sont disponibles auprès du Service canadien des glaces (2021) et du *Great Lakes Environmental Research Laboratory* de la NOAA (2021a).

8.2.5 Données sur les vagues

Les données des bouées à vagues (et les données météorologiques auxiliaires) sont disponibles auprès de Pêches et Océans Canada (2021) pour le Grand lac des Esclaves, le lac Winnipeg, le lac des Bois, le lac Nipissing, le lac Simcoe et les Grands Lacs. Des données archivées sur les bouées à vagues sont également disponibles dans la base de données mondiale des bouées à vagues de la NOAA (2021b). Les bouées de mesure des vagues sont habituellement retirées à l'automne pour éviter les dommages causés par la glace. Par conséquent, les mesures de vagues pour les tempêtes d'automne et d'hiver ne sont généralement pas disponibles. Des modèles numériques bien calés et validés peuvent être utilisés pour augmenter ou combler les lacunes des ensembles de données historiques, en particulier si les connaissances locales ou régionales suggèrent que les relevés de données peuvent avoir manqué des événements importants.

La plupart des études de cartographie des zones inondables des côtes marines et des Grands Lacs reposent sur des prévisions rétrospectives à long terme (pluridécennales) des conditions de vagues au large. Les modèles de simulation rétrospective des vagues sont alimentés par des données météorologiques provenant de stations d'observation ou d'ensembles de données de réanalyse, et sont calés en fonction des données météorologiques et des bouées de mesure des vagues. Il n'existe pas une simulation rétrospective publique des vagues pour les lacs canadiens. Toutefois, l'étude d'information sur les vagues du *U.S. Army Corps of Engineers* (2021) comprend des points de sortie le long du littoral ontarien des Grands Lacs.

8.3 Analyse des données météorologiques

8.3.1 Climatologie des tempêtes

Les données sur les vents doivent être examinées afin d'identifier les distributions saisonnières et directionnelles des vitesses de vent extrêmes, comme condition préalable à la détermination des vitesses de vent extrêmes pour la modélisation et l'analyse des ondes de tempête et des vagues. Les vitesses de vent extrêmes ont tendance à se produire plus fréquemment en automne et en hiver, lorsque le niveau des lacs est généralement bas et/ou couvert de glace. Souvent, mais pas toujours, les directions du vent associées aux événements les plus extrêmes coïncident avec le fetch le plus long. Cependant, la corrélation entre les extrêmes directionnels et les distances du fetch doit être prise en compte.

8.3.2 Ajustement des vitesses de vent

Il peut être nécessaire d'ajuster les vitesses du vent avant de pouvoir les utiliser pour estimer les conditions d'ondes de tempête et de vagues. Les techniques standards sont décrites dans la partie II du *Coastal Engineering Manual* (USACE 2002) et peuvent inclure :

- Élévation de l'anémomètre : ajuster les vitesses du vent à 10 m au-dessus de la surface du sol;
- Période de calcul de la moyenne : ajuster les vitesses du vent de la période de calcul de la moyenne de l'observation (p. ex., 2 minutes) à une période qui convient pour la génération de l'onde de tempête et des vagues (cela dépend de la taille du lac, voir USACE 2002);
- Emplacement de l'anémomètre : ajuster les vitesses du vent mesurées au-dessus de la terre aux conditions au-dessus de l'eau (si nécessaire, voir USACE 2002);
- Couche limite atmosphérique : ajuster les vitesses du vent pour tenir compte des effets de stabilité thermique près de l'interface air-eau. Ceci est particulièrement important pour les tempêtes d'automne, lorsque la surface du lac est plus chaude que l'air et que les transferts de quantité de mouvement sont accrus.

8.4 Analyse du niveau statique du lac

Les niveaux d'eau statiques sont des niveaux d'eau dont les fluctuations à court terme (causées par le vent, les vagues, les seiches, le passage des navires, etc.) ont été éliminées par l'établissement d'une moyenne dans le temps. En général, la période d'établissement de la moyenne varie de quelques jours à un mois.

Les niveaux moyens hebdomadaires et/ou mensuels des lacs peuvent être disponibles directement auprès des fournisseurs de données ou calculés à partir de données quotidiennes, horaires ou échantillonnées plus fréquemment (p. ex., 5 minutes). Des moyennes mobiles et des techniques de filtrage plus sophistiquées (p. ex., gaussiennes, passe-bas, etc.) sont utilisées pour éliminer les fluctuations à court terme du relevé du niveau d'eau. Les niveaux d'eau statiques des lacs peuvent être déterminés pour une seule jauge ou pour plusieurs emplacements de jauge.

8.5 Analyse des ondes de tempête

L'analyse des ondes de tempête implique l'estimation de la dénivellation due au vent à l'aide de méthodes simplifiées, de l'analyse des données sur les niveaux d'eau ou de modèles hydrodynamiques. Ces approches sont décrites dans les sections suivantes, incluant des conseils sur les considérations clés et l'application de chaque méthode. Le résultat de l'analyse est une estimation de l'onde de tempête, qui est combinée avec le niveau statique du lac pour déterminer les niveaux d'eau de la crue de la PDA.

8.5.1 Méthodes simplifiées d'estimation des ondes de tempête

Les méthodes simplifiées impliquent généralement l'utilisation de modèles analytiques ou de formules empiriques pour prédire les contributions des effets du vent au niveau d'eau (p. ex., les méthodes fournies au chapitre 4 du *Rock Manual* (CIRIA et al. 2007)). Ces méthodes conviennent généralement pour les évaluations préliminaires, pour les sites où des hypothèses simplificatrices sont valables (p. ex., des zones de vent constantes et homogènes, aucune

variation significative de la profondeur de l'eau), ou lorsque des niveaux élevés d'incertitude dans les estimations peuvent être tolérés. Les méthodes simplifiées sont généralement adéquates pour les petits lacs.

La procédure générale consiste à :

1. Déterminer les vitesses et directions extrêmes du vent à l'aide de méthodes statistiques (p. ex., analyse des pointes dépassant un seuil pour estimer les vitesses du vent pour différentes PDA);
2. Estimer la configuration du vent sur le rivage sous le vent en utilisant des formules analytiques pour des cas simplifiés (p. ex., un bassin fermé de profondeur constante).
3. Estimer la configuration du vent à l'emplacement de l'étude en utilisant des méthodes d'interpolation.

Si des données mesurées sur le niveau d'eau sont disponibles (sur le site étudié ou à d'autres endroits sur le lac), la formule analytique devrait être calée en fonction des événements historiques d'ondes de tempête. Sinon, les valeurs prédites des ondes de tempête doivent être utilisées avec prudence et des analyses de sensibilité doivent être effectuées pour sélectionner des valeurs adéquates (et représentatives) pour le coefficient de friction au vent, la longueur du bassin et la profondeur de l'eau.

8.5.2 Analyse des relevés des jauges de niveau d'eau à long terme

Ces approches impliquent une analyse des données des jauges pour découper les relevés de niveau d'eau total en composantes de niveau d'eau statique et résiduel (supposée représentative des ondes de tempête). Les séries chronologiques résiduelles résultantes peuvent être comparées aux données historiques sur les vents afin d'établir des corrélations entre les événements/directions des vents, les fetchs et les ondes de tempête, et de confirmer ou d'écarter la possibilité que d'autres processus contribuent aux résidus (p. ex., seiche ou tsunami). Une analyse conjointe de probabilités ou de fréquence statistique peut être appliquée aux données de séries chronologiques résultantes pour attribuer des probabilités aux ondes de tempête extrêmes. Des relevés avec des intervalles d'échantillonnage d'une heure (ou plus fréquents) sont généralement nécessaires pour caractériser les ondes de tempête; des intervalles plus longs (p. ex., quotidiens) entre les échantillonnages peuvent manquer les pointes d'ondes. Ce type d'analyse n'est possible que lorsqu'il existe des relevés à long terme des niveaux d'eau pour le site d'intérêt.

La figure 8.3 présente une estimation de l'onde de tempête à partir de relevés de jauges. Dans cet exemple, le niveau d'eau statique et le niveau d'eau calme ont été estimés en appliquant des filtres de moyennes mobiles avec des fenêtres de 30 jours et d'une heure, respectivement, aux données de niveau d'eau échantillonnées à intervalles de 5 minutes. Le résidu (une estimation de l'onde de tempête) est la différence d'élévation entre le niveau d'eau calme et le niveau d'eau statique. Les analyses des pointes dépassant un seuil (p. ex., Goda 2010, CIRIA et al. 2007) doivent être utilisées pour déterminer les ondes de tempête extrêmes pour les PDA souhaitées en fonction des résidus calculés.



Figure 8.3. Estimation des ondes de tempête et des niveaux d'eau statiques à partir de relevés de jauges de niveau d'eau à long terme

8.5.3 Modélisation des ondes de tempête

Les prévisions d'ondes de tempête par modélisation numérique impliquent généralement l'utilisation de modèles hydrodynamiques 2D (moyenne de la profondeur) ou 3D qui permettent de prédire des variations temporelles et spatiales des champs de vent, des champs de pression et des concentrations de glace pour générer des prévisions d'ondes de tempête près du rivage. La modélisation numérique est généralement recommandée ou nécessaire :

- Lorsque des données à long terme ne sont pas disponibles;
- Lorsque cela est nécessaire pour acquérir une compréhension approfondie de la distribution spatiale des ondes de tempête;
- Pour étudier des scénarios de tempête hypothétiques ou futurs;
- Pour examiner les effets des changements et du développement de la zone côtière sur les ondes de tempête;
- Pour soutenir l'analyse des voies de propagation des inondations (p. ex., le débordement et l'érosion); et,
- Pour fournir des données pour la modélisation et la cartographie des aléas de l'inondation de surface (en option, des techniques de grilles imbriquées ou non structurées peuvent être utilisées pour intégrer la modélisation des ondes de tempête à l'échelle du lac et des aléas de l'inondation de surface).

Différentes approches de modélisation hydrodynamique peuvent être adoptées en fonction de la taille du lac et/ou des niveaux de risque globaux. Des conseils sur la mise en place et l'application de modèles d'ondes de tempête sont fournis dans de nombreux documents (p. ex., USACE 2002, FEMA 2016b, FEMA 2014). Pour les situations où des niveaux d'incertitude plus élevés peuvent être tolérés (p. ex., évaluations préliminaires, lacs plus petits, etc.), l'approche peut impliquer :

1. Déterminer les vitesses et directions extrêmes du vent à l'aide de méthodes statistiques (p. ex., analyse des pointes dépassant un seuil pour estimer les vitesses du vent pour différentes PDA) ou sélectionner des événements de tempête discrets à simuler dans le modèle;

2. Développer le maillage/grille du modèle hydrodynamique en utilisant les données du SIG pour définir l'étendue du modèle (rivages) et les données bathymétriques/topographiques pour définir les profondeurs/élevations dans le modèle;
3. Simuler la configuration du vent sur le lac pour soit :
 - Des conditions de vent en régime permanent : champs de vent constants et homogènes; ou,
 - Des événements de tempête discrets : champs de vent homogènes et variables dans le temps.

Dans les situations où un niveau de précision plus élevé est requis (p. ex. lacs de taille moyenne à grande, exposition importante des collectivités riveraines et/ou des biens de valeur, etc.), la modélisation hydrodynamique détaillée peut comprendre les éléments suivants en plus de la procédure générale décrite ci-dessus :

- Acquisition sur le terrain d'une bathymétrie et d'une topographie détaillées près de l'emplacement de l'étude;
- Raffinement du maillage/de la grille de calcul pour capturer les caractéristiques importantes du littoral et de la bathymétrie;
- Utilisation d'ensembles de données de réanalyse variant dans le temps et dans l'espace (données sur le vent et la pression atmosphérique) pour piloter les modèles de simulation d'événements historiques d'ondes de tempête;
- Utilisation d'ensembles de données sur la couverture de glace variant dans le temps et dans l'espace;

Dans toutes les situations, les données historiques des jauges doivent être utilisées pour caler et valider les modèles hydrodynamiques afin d'avoir confiance dans les résultats des modèles et de quantifier l'incertitude. Lorsque les données sur les jauges sont rares ou absentes, d'autres sources de données pour le calage des modèles peuvent inclure des relevés historiques de la ligne des hautes eaux, des élévations de la ligne des débris, des photographies, des preuves morphologiques des marques des hautes eaux (p. ex., des cicatrices d'érosion) ou des contours d'inondation télédétections.

Les paramètres clés pour caler les modèles d'onde de tempête pour les lacs sont les suivants :

- Contrainte due au vent : est généralement paramétrée à l'aide d'un coefficient de traînée qui varie avec la vitesse du vent (USACE 2002, FEMA 2014, FEMA 2016b). Le coefficient de traînée peut être ajusté pour tenir compte des effets de la glace sur le transfert de quantité de mouvement vent-lac (Chapman et al. 2005, 2009, Joyce et al. 2019, Kim et al. 2021). Les coefficients de traînée du vent calés pour les lacs peuvent être plus élevés que les valeurs typiques des côtes marines.
- Frottement du fond : la dissipation d'énergie due au frottement du fond est généralement paramétrée à l'aide d'un coefficient de Manning ou de Chézy. Les ondes de tempête en eaux peu profondes seront plus sensibles au coefficient de frottement du fond;
- Viscosité tourbillonnaire : est généralement utilisée pour paramétrer la turbulence sous la grille. Certains modèles utilisent une simple constante de viscosité tourbillonnaire tandis que d'autres utilisent une formulation plus complexe basée sur le champ de vitesse et la taille de la matrice spatiale (p. ex., la formulation Smagorinsky).

- Résolution de la maille/grille de calcul : le raffinement de la maille/grille du modèle dans des zones clés (p. ex., hauts-fonds, baies, autour des îles, etc.) peut améliorer la capacité de prédiction du modèle.

8.6 Analyse des vagues

L'analyse des vagues implique la génération de vagues en mer, la transformation des vagues à proximité du rivage et l'interaction entre les vagues et le rivage. Ces processus peuvent être estimés à l'aide de méthodes simplifiées et/ou de techniques de modélisation numérique. Les résultats de ces analyses sont une estimation des niveaux de la remontée des vagues et/ou des débits de débordement, qui peuvent ensuite être utilisés pour délimiter les aléas d'inondation sur les rives des lacs.

La procédure générale d'estimation des aléas liés aux vagues implique :

1. Estimer les conditions des vagues en mer
 - a. Pour les petits lacs ou l'analyse préliminaire - utiliser des méthodes simplifiées d'estimation des vagues qui relient les conditions de vagues limitées par le fetch aux vitesses du vent, aux distances du fetch et aux profondeurs d'eau;
 - b. Pour les grands lacs ou l'analyse détaillée - utiliser des modèles de vagues spectraux 1D ou 2D pour simuler le développement des vagues générées par le vent ou acquérir des données de simulation rétrospective de vagues à long terme (multi-décennales) pour les emplacements au large.
2. Estimer les conditions des vagues littorales
 - a. Pour les littoraux peu profonds - utiliser des méthodes simplifiées pour estimer les conditions de vagues limitées en profondeur (vagues déferlantes). Cette approche peut donner lieu à des estimations plus conservatrices que les méthodes ci-dessous;
 - b. Pour les petits lacs ou l'analyse préliminaire - utiliser des méthodes simplifiées de transformation des vagues qui tiennent compte de la réfraction des vagues, de la formation de hauts-fonds et de la rupture due à la bathymétrie locale ou utiliser des modèles spectraux de vagues 1D;
 - c. Pour les grands lacs ou l'analyse détaillée - utiliser des modèles spectraux de vagues 2D pour simuler la réfraction des vagues, la formation de hauts-fonds, la rupture, la friction du fond et d'autres processus qui peuvent être importants sur le site étudié (p. ex., l'interaction vague-courant, etc.). L'utilisation d'approches de modélisation imbriquées ou de maillages non structurés qui offrent une résolution plus élevée près du rivage peut permettre de combiner la modélisation de la génération et de la transformation des vagues en une seule étape.
3. Estimer les niveaux de la remontée des vagues et/ou les débits de débordement
 - a. Pour les petits lacs ou l'analyse préliminaire - utiliser des équations empiriques;
 - b. Pour les grands lacs ou l'analyse détaillée - utiliser des équations empiriques, des modèles de vagues 1D de sections transversales ou des modèles numériques avancés capables de simuler les processus de la zone de remous;

4. Estimer les aléas induits par le débordement des vagues
 - a. Pour les arrière-plages à pente positive (l'eau retourne au lac) - utiliser des équations empiriques ou des modèles numériques avancés de vagues pour estimer les profondeurs, les vitesses et les étendues de l'eau;
 - b. Pour les arrière-plages à pentes négatives (l'eau s'écoule vers des dépressions topographiques) - utiliser des modèles hydrodynamiques numériques pour évaluer les aléas d'inondation causés par le débordement des vagues.

8.7 Génération de vagues

8.7.1 Méthodes simplifiées de génération de vagues

Les méthodes simplifiées décrites dans le *Coastal Engineering Manual* (USACE 2002) et le *Rock Manual* (CIRIA et al. 2007) peuvent être utilisées pour estimer les vagues générées par le vent. Ces méthodes conviennent généralement pour les évaluations préliminaires, pour les sites où des hypothèses simplificatrices sont valables (p. ex., des champs de vent constants et homogènes, aucune variation significative de la profondeur de l'eau) ou lorsque des niveaux élevés d'incertitude dans les estimations peuvent être tolérés. Les formules relient la vitesse du vent, la distance du fetch, la durée et la profondeur de l'eau à une hauteur et une période caractéristique des vagues.

CIRIA et al. (2007) recommande trois méthodes pour l'application sur les lacs et les réservoirs avec des fetchs restreints (méthode Saville, méthode Donelan, et méthode Young et Verhagen). Pour les grands lacs, les méthodes qui ont été développées pour les étendues océaniques sont recommandées (p. ex., USACE 2002, CIRIA et al. 2007). Les hauteurs et les périodes des vagues doivent être estimées à l'aide de diverses méthodes lorsque des équations simplifiées sont utilisées. Si elles sont disponibles, les données sur les vagues mesurées (p. ex., les bouées de mesure des vagues, les instruments de mesure des vagues montés sur le fond, etc.).

La procédure générale pour estimer les conditions des vagues générées par le vent implique :

1. Définir les caractéristiques du lac
 - a. Mesurer les distances de fetch entre le site étudié et la rive opposée du lac pour les points autour d'une boussole (p. ex., par incréments de 10°, 15°, 22,5°);
 - b. Estimez la profondeur moyenne de l'eau pour chaque fetch.
2. Définir les caractéristiques du vent
 - a. Déterminer les vitesses et les directions extrêmes du vent à l'aide de méthodes statistiques (p. ex., analyse des pointes dépassant un seuil pour estimer les vitesses du vent pour différents PDA); ou,
 - b. Préparer les données sur le vent (p. ex., combler les lacunes, etc.) pour simuler des prévisions rétrospectives des vagues à long terme.
3. Estimer les conditions de vagues pour les vitesses de vent et les différents fetchs directionnels en utilisant des équations empiriques. Cela résulte en :

- a. Des hauteurs et des périodes de vagues pour les vitesses et les directions extrêmes du vent correspondantes; ou,
- b. Une estimation des conditions de vagues pour l'ensemble des vents enregistrés, à partir de laquelle les conditions de vagues extrêmes peuvent être extraites.

8.7.2 Modélisation de la génération de vagues

La modélisation de la génération de vagues consiste à simuler des conditions de vagues historiques, en utilisant généralement des données de vent comme entrée motrice du modèle. La modélisation est effectuée à l'aide d'un modèle physique cohérent et d'ensembles de données d'entrée (p. ex., des ensembles de données de réanalyse météorologique et de couverture de glace) pour permettre l'estimation des statistiques de valeurs extrêmes et d'opérabilité. Les données de simulation rétrospectives sont généralement fournies sous forme de séries temporelles de paramètres de vagues (p. ex., hauteur, période, direction, etc.) ou de données vectorielles. Les points de sortie sont généralement limités à des emplacements en mer (eaux profondes) où les vagues ne sont pas affectées par les variations du niveau d'eau et les processus en eaux peu profondes.

L'effort nécessaire pour développer une simulation rétrospective des vagues sur plusieurs décennies dépasse la portée de la plupart des études de cartographie des zones inondables sur les rives des lacs. Les différentes approches pour développer des conditions de vagues extrêmes incluent :

- Simulation à long terme (multi-décennale) pour inclure les événements de tempête;
- Simulation d'événements de tempête discrets incluant l'évolution temporelle des vagues pendant la tempête;
- Simulation d'événements de tempête discrets pour le pic de la tempête.

La modélisation peut être effectuée à l'aide de modèles de vagues spectraux 1D ou 2D capables de simuler la croissance des vagues à partir des apports du vent, le transfert de l'énergie des vagues des hautes vers les basses fréquences et la dissipation due au déferlement. Les données historiques des bouées de vagues doivent être utilisées pour vérifier les résultats des modèles de vagues lorsque des données mesurées sont disponibles.

Le rapport doit inclure une description de la configuration du modèle, des processus physiques simulés par le modèle et des mesures de vérification.

8.8 Transformation des vagues à proximité du littoral

Le littoral est la région d'eau peu profonde où les vagues interagissent avec le fond du lac (généralement les zones où la profondeur de l'eau est inférieure à environ la moitié de la longueur des vagues). Dans cette région, les crêtes des vagues se réfractent pour s'aligner sur les limites du fond du lac et la hauteur des vagues augmente à mesure qu'elles pénètrent dans des eaux moins profondes (haut-fond). Les vagues peuvent également perdre de l'énergie (diminuer en hauteur) en raison de la rupture et de la friction du fond, et changer de direction ou de hauteur en raison de l'interaction avec des vagues provenant d'autres directions, des courants, etc. Généralement, des modèles de vagues spectraux à moyenne phase 1D et 2D sont utilisés pour simuler les processus de transformation des vagues littorales. Dans certains

cas, des méthodes simplifiées ou des modèles avancés de vagues à résolution de phase peuvent convenir pour estimer les conditions des vagues littorales.

Pour les sites riverains qui sont protégés par des îles, des pointes de terre, des brise-lames, etc., il peut être nécessaire d'estimer la diffraction des vagues autour des obstacles. Cela se fait généralement à l'aide de modèles de vagues à résolution de phase (p. ex., les modèles de Boussinesq), ou de modèles de vagues spectraux (utilisant une approximation de réfraction-diffraction découplée en phase) lorsque des niveaux d'incertitude plus élevés peuvent être tolérés.

8.8.1 Vagues limitées en profondeur

Dans certaines situations, les conditions des vagues littorales seront limitées par la profondeur de l'eau. Pour les rivages peu profonds, il est utile d'estimer la hauteur de la vague déferlante, car cela peut guider le niveau d'effort dans la détermination des conditions de vagues au large et près du rivage. Les méthodes d'estimation des vagues limitées par la profondeur (déferlement dû à la profondeur de l'eau) sont fournies dans USACE (2002) et CIRIA et al. (2007).

8.8.2 Méthodes simplifiées d'estimation des vagues littorales

Les méthodes simplifiées décrites dans USACE (2002), CIRIA et al. (2007) et Goda (2010) peuvent être utilisées pour estimer les conditions des vagues littorales. Ces méthodes conviennent généralement pour les évaluations préliminaires, pour les sites où les hypothèses simplificatrices sont valides (p. ex., pente uniforme, limites de fond droites et parallèles), ou lorsque des niveaux élevés d'incertitude dans les estimations peuvent être tolérés. Les formules permettent d'estimer la variation de la hauteur des vagues du large vers le littoral en raison de la réfraction des vagues, de la formation de hauts-fonds et du déferlement. Pour les profils de fond irréguliers, il est souvent plus pratique d'utiliser un modèle spectral de vagues 1D (ou même 2D) que d'appliquer les formules simplifiées. Des méthodes simplifiées (p. ex., USACE 2002) peuvent être utilisées pour estimer la diffraction des vagues pour des géométries très simples.

8.8.3 Modélisation de la transformation des vagues à proximité du littoral

La modélisation des vagues à proximité du rivage est recommandée pour la plupart des études sur les inondations en bordure de lac. Les modèles d'ondes spectraux 1D et 2D simulent tous les processus importants des ondes littorales (haut-fond, réfraction, rupture, diffraction, etc.) et fournissent des résultats plus fiables que les méthodes simplifiées décrites ci-dessus. La modélisation du littoral est nécessaire pour les lacs dont la bathymétrie est irrégulière et/ou dont le littoral est complexe (p. ex., les promontoires, les îles, etc.).

Les modèles de vagues à résolution de phase nécessitent plus d'efforts et d'expertise pour être appliqués et sont souvent utilisés pour des études où la diffraction des vagues et l'interaction entre les vagues et la structure sont importantes (p. ex., l'agitation des vagues dans les ports).

L'utilisation d'approches de modélisation imbriquées ou de maillages non structurés qui fournissent une résolution plus élevée près du littoral peut permettre de combiner la modélisation de la génération et de la transformation des vagues en une seule étape. C'est généralement l'approche qui est adoptée lorsque les ensembles de données de simulation

rétrospectives de vagues ne sont pas disponibles. Dans les situations où les conditions de vagues en mer sont développées indépendamment, la modélisation des vagues près du rivage impliquera le développement de sections 1D ou d'une grille/maille de modèle 2D pour la région près du rivage et la propagation des conditions de vagues en mer vers le rivage. La modélisation des vagues littorales doit être effectuée en utilisant les niveaux d'eau calculés à l'aide d'analyses de l'information ou de la modélisation des ondes de tempête.

Les approches suivantes sont utilisées pour simuler des événements de tempête discrets ou pour transformer la série temporelle entière de données sur les vagues en mer en données relatives aux zones littorales :

- Simulation des conditions de vagues pour des tempêtes discrètes à l'aide de modèles hydrodynamiques et de vagues couplés pour simuler l'évolution temporelle des vagues et des ondes de tempête. Cette méthode implique l'exécution des modèles sur la même grille/maille de calcul et le passage des entrées et sorties entre les modèles (c'est-à-dire le couplage dynamique). Pour les lacs, il est généralement suffisant d'exécuter le modèle de vagues en utilisant les sorties du modèle d'onde de tempête (c'est-à-dire le couplage hors ligne) plutôt que de faire passer les sorties d'un modèle à l'autre. Des modèles à très haute résolution sont nécessaires pour résoudre la configuration des vagues sur le littoral en raison de la proximité des zones de vagues sur la plupart des lacs (FEMA 2014).
- Idem que ci-dessus, mais en simulant les conditions de vagues et d'ondes de tempête uniquement pour le pic de la tempête. Cette approche convient généralement pour les lacs de taille petite à moyenne où les conditions d'équilibre sont susceptibles d'être atteintes.
- Simulation des conditions de vagues pour des événements de tempête discrets en utilisant un modèle de vagues littorales et des vagues au large comme conditions limites. Le modèle peut être exécuté en utilisant des niveaux d'eau provenant d'analyses de bureau ou de la modélisation des ondes de tempête.
- Simulation des conditions de vagues pour une matrice couvrant la gamme complète de la hauteur, de la période, de la direction et des niveaux d'eau des vagues en mer, à l'aide d'un modèle de vagues littorales. Une série temporelle de conditions de vagues littorales est ensuite créée à partir de la série temporelle de conditions en mer en interpolant les résultats du modèle sur les quatre variables.

Les considérations clés pour la modélisation de la transformation des ondes littorales sont les suivantes :

- Bathymétrie : qualité et résolution des données de relevés bathymétriques; représentation de la bathymétrie dans le modèle (résolution de grille, caractéristiques irrégulières, etc.).
- Niveaux d'eau : les processus littoraux sont fortement influencés par la profondeur de l'eau.
- Processus physiques : examen minutieux des processus physiques importants à simuler dans le modèle.

8.9 Analyses de la remontée et du débordement des vagues

La remontée et le débordement des vagues peuvent varier considérablement le long d'un littoral en raison des différences d'exposition aux vagues, de la bathymétrie du littoral, de la topographie du littoral et de la rugosité de la surface. Dans la plupart des cas, le littoral doit être classé par tronçons (où les conditions sont similaires), et la remontée et le débordement des vagues doivent être estimés à l'aide d'un ou de plusieurs profils représentatifs pour chaque tronçon.

L'interaction entre les vagues et le rivage, y compris la remontée et le débordement des vagues, est un phénomène complexe qui dépend du niveau de l'eau, des conditions des vagues, du profil bathymétrique/topographique et des caractéristiques du rivage ou des structures côtières. Les niveaux de la remontée des vagues (et les débits de débordement) fluctuent pendant une tempête en réponse à la séquence et aux interactions des vagues individuelles et des groupes de vagues. Par convention, le niveau dépassant 2 % de la hauteur des vagues est utilisé pour caractériser la remontée des vagues associée à un événement de tempête. Pour la plupart des lacs canadiens, cela correspond au niveau qui serait dépassé par environ 10 à 20 vagues (c.-à-d. des périodes de vagues d'environ 4 à 10 secondes) pendant l'heure la plus intense de l'activité de la tempête.

Les formules empiriques et les modèles 1D pour les sections transversales sont généralement utilisés pour estimer les niveaux de la remontée des vagues et les propriétés des vagues de débordement pour les études de cartographie des zones inondables. Des analyses sur un modèle physique et des modèles numériques avancés peuvent être utilisées lorsqu'un niveau de certitude plus élevé est requis.

Les méthodes empiriques utilisent une représentation simplifiée de la physique du processus de remontée des vagues et de débordement pour relier les paramètres de réponse (p. ex., le niveau de la remontée de 2 % et les débits moyens de débordement) aux paramètres clés des vagues et de la structure (EurOtop 2018). Les coefficients empiriques et les constantes utilisés dans les formules sont dérivés de tests de modèles physiques ou de mesures sur le terrain. En tant que telles, les formules sont sujettes à l'incertitude et à l'inexactitude si elles sont utilisées pour extrapoler au-delà des limites des paramètres et des conditions pour lesquels elles ont été développées. Il est recommandé qu'elles soient utilisées par des spécialistes expérimentés connaissant les origines, les limites et l'applicabilité des formules (p. ex., Murphy et Khaliq, 2017).

Alors que des formules empiriques ont traditionnellement été utilisées pour estimer les niveaux de remontée des vagues, les directives de la FEMA (2014) pour les études de cartographie des zones inondables sur les Grands Lacs recommandent l'utilisation de modèles 1D pour les sections transversales basés sur les équations non linéaires des eaux peu profondes pour la plupart des conditions du littoral (à l'exception des plages dissipatives à pente très faible). Ces modèles simulent bon nombre des processus importants de la zone de remontée, fonctionnent sur une grille fine (p. ex., espacement de 1 m) et conviennent bien à la modélisation d'un grand nombre de profils et de tempêtes. Un avantage de la modélisation 1D est que les profils du littoral sont utilisés directement dans le modèle, alors que les formules empiriques nécessitent que l'utilisateur dérive les caractéristiques géométriques des profils. Cela peut être assez subjectif et devrait être fait par des spécialistes expérimentés connaissant les formules. L'US

Army Corps of Engineers a passé en revue les outils de remontée des vagues pour les études d'aléas d'inondation et a recommandé l'utilisation du modèle open-source CSHORE (Kobayashi 1997, 2009) en raison de ses bonnes capacités de prédiction et de sa facilité d'utilisation (Melby 2012).

Les méthodes suivantes sont recommandées pour les études de cartographie des zones inondables des lacs canadiens :

- Rivages escarpés et structures côtières : le manuel « EurOtop » (2018) fournit les orientations et les outils de calcul les plus récents pour évaluer la remontée des vagues et le débordement des digues, des revêtements et des murs de protection contre la mer. Les formules de « l'approche de conception et d'évaluation » doivent être utilisées pour les études de cartographie des zones inondables (voir par exemple FEMA 2021).
- Profils complexes comprenant des plages, des rivages escarpés et des structures côtières : Les modèles 1D pour les sections transversales basés sur les équations non linéaires des eaux peu profondes doivent être utilisés pour les profils complexes, y compris la plupart des plages (à l'exception des plages dissipatives à pente très faible), ainsi que les rivages abrupts et les structures côtières qui se situent en dehors de la gamme des conditions expérimentales du manuel EurOtop (2018).
- Profils de plage simples : le manuel d'ingénierie côtière (US Army Corps of Engineers 2002) fournit des méthodes pour évaluer la remontée des vagues sur des pentes planes et lisses. Ces méthodes peuvent être utilisées pour des profils de plage simples ou pour vérifier les résultats de modèles 1D. Il est à noter que les formules empiriques développées pour les plages à pente très faible, comme celles de Stockdon et al. (2006), peuvent sous-estimer la remontée des vagues pour les conditions typiques des lacs canadiens.

8.9.1 Aléas induits par le dépassement des vagues

Le débordement des vagues se produit lorsque le niveau de l'écoulement des vagues dépasse la hauteur de la barrière naturelle ou construite. Les débordements, les éclaboussures et les jets d'eau peuvent constituer un aléa direct pour les personnes et les biens ou contribuer à l'inondation des terres.

Le débordement peut devenir très sévère lorsque le niveau de l'eau calme est proche (ou supérieur) du niveau de la barrière. Des modèles hydrodynamiques peuvent être nécessaires dans cette situation pour simuler l'écoulement en surface des débits de débordement des vagues.

La profondeur, la vitesse et l'étendue de « l'eau verte » de débordement peuvent être estimées à l'aide de formules empiriques, de modèles 1D pour les sections transversales et de modèles numériques avancés de vagues. Pour les études de cartographie des zones inondables côtières, la distance horizontale que parcourra une vague de débordement à l'intérieur des terres avant qu'elle ne se transforme en un film mince est la principale préoccupation. La zone des vagues à grande vitesse peut également être cartographiée. Cette zone est généralement très étroite, de l'ordre de quelques mètres pour les rives des lacs, et c'est là que la profondeur et la vitesse de l'eau peuvent endommager de manière significative les infrastructures.

Les principales procédures d'estimation des risques induits par le dépassement des vagues sont les suivantes :

1. Déterminer s'il y a débordement. Le niveau de l'écoulement dépasse-t-il la hauteur de la crête?
 - a. Si oui, passer à l'étape 2.
 - b. Si non, utiliser le niveau du ruissellement pour cartographier les aléas liés aux vagues.
2. Estimer le taux moyen de débordement et la hauteur de « ruissellement excédentaire » (hauteur de ruissellement moins hauteur de la crête). Le taux de débordement moyen présente-t-il un risque pour les personnes, les véhicules ou les biens (voir par exemple USACE 2002, EurOtop 2018)? La hauteur de ruissellement excédentaire dépasse-t-elle 1 m? Y a-t-il des zones d'arrière-plage basses vulnérables aux inondations/étangs?
 - a. Si la réponse est oui à l'une d'entre elles, passer à l'étape 3.
 - b. Si la réponse à toutes les questions est non, utiliser une distance minimale de 5 m (mesurée à partir de la crête) pour cartographier les risques liés aux vagues.
3. Évaluer la topographie de l'arrière-plage. Le plateau est-il plat ou en pente vers le lac?
 - a. Si oui (plateau plat ou pente positive), utiliser des équations empiriques ou des modèles numériques avancés de vagues pour estimer la profondeur, la vitesse et l'étendue de l'eau.
 - b. Si non, (pente négative), utiliser des modèles hydrodynamiques pour évaluer les aléas des inondations terrestres provoquées par le débordement des vagues (p. ex., écoulement vers les zones basses et formation de bassins). Si nécessaire, les zones de débordement des vagues à grande vitesse peuvent également être cartographiées en utilisant des équations empiriques ou des modèles numériques avancés de vagues.

Une procédure simplifiée d'estimation de l'étendue horizontale des vagues de débordement est décrite dans plusieurs documents d'orientation (p. ex., ministère des Richesses naturelles de l'Ontario 2001, FEMA 2005, CIRIA et al. 2007). La méthode est basée sur une formulation théorique de Cox et Machemehl (1986) pour un passage d'eau se propageant sur la terre ferme. Cette méthode simplifiée peut être utilisée dans de nombreuses situations ou comme vérification en cas d'utilisation d'approches plus avancées. Le schéma des équations et de la définition est présenté à la figure 8.4.

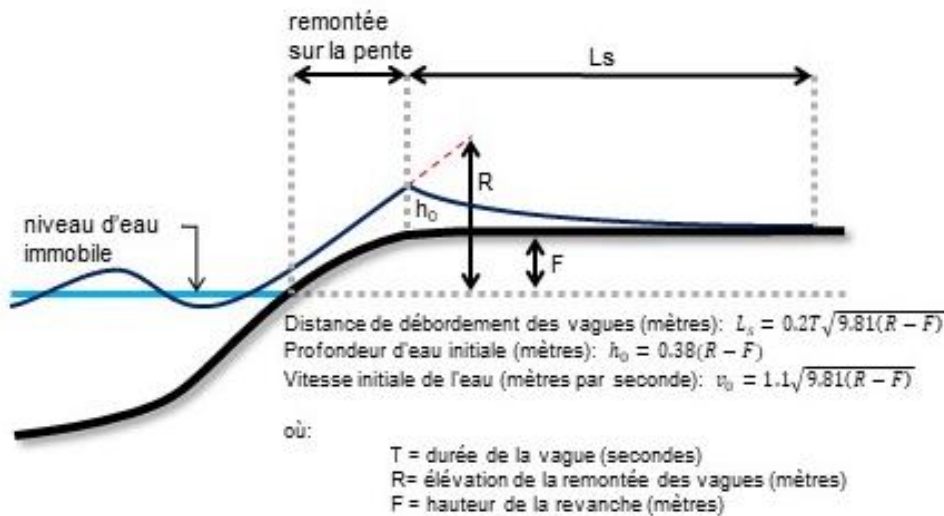


Figure 8.4. Méthode de Cox-Machemehl pour l'estimation des risques induits par le débordement des vagues

8.10 Cartographie des aléas d'inondation des rives du lac

Les cartes des aléas d'inondation des rives des lacs définissent les zones qui sont directement inondées au niveau de l'eau calme et les zones qui sont exposées aux effets des vagues et à d'autres aléas liés à l'eau (p. ex., embruns, débris, glace, etc.). Les cartes peuvent également définir différentes intensités d'aléa (p. ex., les aléas des vagues à grandes vitesses). Dans certains cas, les cartes des aléas riverains montreront les inondations et autres aléas naturels tels que l'érosion, l'instabilité des pentes et les plages dynamiques (non couverts dans ce guide).

La limite horizontale de la remontée et du franchissement des vagues devrait être estimée en fonction de la portée lorsque les conditions des vagues et du rivage sont similaires. Il est recommandé d'utiliser plusieurs sections transversales pour chaque tronçon, car les valeurs estimées de la remontée et de dépassement peuvent varier en raison de différences telles que la profondeur de l'eau locale et la pente du rivage.

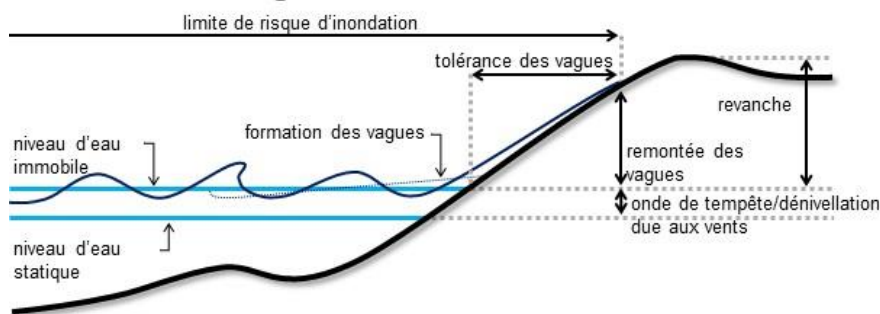
Sur les lacs plus petits, les tolérances de vagues estimées sont généralement de l'ordre de 5 m (ou moins), tandis que les tolérances de l'ordre de 10 m à 20 m sont plus courantes pour les grands lacs. Les limites de vagues devraient être révisées (et éventuellement augmentées) pour les sites vulnérables au givrage dû aux embruns des vagues, à l'accumulation de glace (accumulation de glace) ou aux impacts de débris.

La limite d'aléas d'inondation au bord du lac pour un événement donné est délimitée de plusieurs façons selon que les vagues dépassent ou non la pente du rivage (voir la figure) :

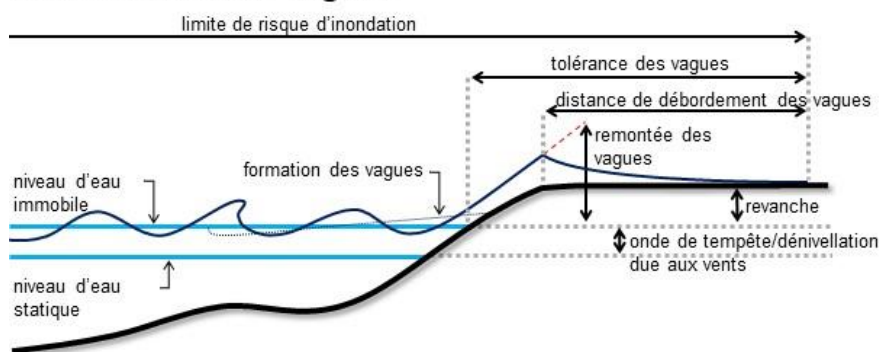
1. Lorsqu'aucun débordement ne se produit, la limite de l'aléa d'inondation est cartographiée à l'aide du contour d'élévation correspondant au niveau de la remontée des vagues;

2. En cas de franchissement d'une barrière naturelle ou construite avec une pente nulle ou positive, la limite d'aléas d'inondation est cartographiée en utilisant la distance de franchissement des vagues mesurée à partir de la crête de la pente. La cartographie des aléas peut également inclure la délimitation des limites des débits tolérables moyens de franchissement des vagues applicables à diverses utilisations (p. ex., les personnes, les véhicules, les structures, etc.) sur la base de calculs ou de simulations;
3. En cas de dépassement d'une barrière naturelle ou construite à pente négative, ou lorsqu'une barrière est submergée, la limite de l'aléa d'inondation peut s'étendre loin à l'intérieur des terres. Le taux de débordement estimé et les caractéristiques de drainage sont utilisés pour identifier les zones sujettes à la formation de mares et estimer les niveaux de l'eau retenue. Des modèles hydrodynamiques et des modèles de vagues peuvent être utilisés pour estimer l'étendue des inondations de surface et les effets des vagues.

Remontée des vagues



Débordement des vagues



Débordement des vagues et accumulation d'eau

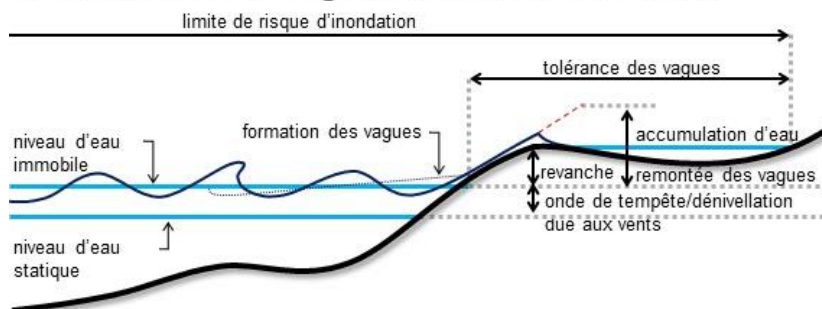


Figure 8.5. Définition des aléas d'inondation des rives du lac pour la remontée et le débordement des vagues

8.11 Considérations relatives aux changements climatiques

Les informations sur les changements climatiques régionaux devraient être examinées pour évaluer les impacts potentiels sur les niveaux d'eau statiques, les ondes de tempête et les vagues. Tel que mentionné précédemment, les niveaux d'eau statiques sont déterminés par des processus hydrologiques et les futurs niveaux d'eau seront affectés par les changements dans :

- Modèles de précipitations (p. ex., ampleur et moment des précipitations extrêmes, précipitations hivernales, chutes de neige, etc.);
- Fonte des neiges (p. ex., moment et volume du ruissellement, etc.);

- Évapotranspiration (p. ex., changements dus à la température, couverture de glace sur les lacs, occupation/couverture du sol, etc.); et,
- Utilisation de l'eau (p. ex., prélèvements pour l'irrigation, l'hydroélectricité, etc.).

Les changements climatiques ont le potentiel d'affecter les ondes de tempête et les vagues en raison des changements dans :

- Niveaux d'eau statiques (c'est-à-dire que les ondes de tempête et la hauteur des vagues sont fortement influencées par la profondeur de l'eau);
- Systèmes orageux (p. ex., changements dans la vitesse du vent, les trajectoires des tempêtes, le moment—p. ex., les tempêtes se produisant pendant des périodes de niveaux d'eau plus élevés ou plus bas, etc.);
- Couverture de glace (p. ex., changements dans la saison des eaux libres, tempêtes hivernales, glace de rivage, etc.);
- Géomorphologie côtière (p. ex., changements du niveau du lac et variations des tempêtes).

Les changements potentiels doivent être examinés et abordés au moyen d'une modélisation numérique ou d'autres approches qui tiennent compte d'une gamme de conditions futures potentielles (p. ex., différents niveaux d'eau statiques, conditions hivernales sans glace, etc.).

8.12 Analyse fréquentielle des inondations au bord des lacs

L'analyse fréquentielle des inondations au bord des lacs implique l'estimation des niveaux d'eau statiques, des ondes de tempête et des probabilités conjointes d'ondes de tempête se produisant à différents niveaux d'eau statiques. La procédure générale d'estimation des niveaux d'eau extrêmes comprend les étapes suivantes :

1. Convertir les niveaux d'eau règlementés en niveaux d'eau naturels, le cas échéant;
2. Déterminer le degré de saisonnalité des niveaux d'eau statiques et des ondes de tempête. S'il est important (p. ex., niveaux d'eau statiques élevés pendant les périodes de vent faible ou vice-versa), les données doivent être subdivisées en saisons;
3. Déterminer les niveaux statiques extrêmes des lacs à l'aide de la méthode du maximum annuel (MA) pour les PDA souhaitées (annuelles ou subdivisées par saison);
4. Déterminer les ondes de tempête extrêmes à l'aide de la méthode des pointes dépassant un seuil (POT) pour les PDA souhaitées (annuelles ou subdivisées par saison);
5. Déterminer les niveaux extrêmes d'eau calme à l'aide de l'analyse conjointe de probabilités pour les PDA souhaitées. L'approche utilise le niveau statique du lac et les distributions de probabilité des ondes de tempête comme données d'entrée.

8.12.1 Taille de l'échantillon

L'échantillon doit être suffisamment grand pour représenter le climat local, les mécanismes météorologiques associés au niveau d'eau et aux vagues extrêmes et l'échantillon ne doit pas couvrir uniquement la période d'activité calme ou plus forte. De plus, les données doivent être examinées avec les stations à proximité et d'autres sources pour identifier les lacunes dans les données afin de déterminer si des événements extrêmes ont été manqués.

L'évolution des conditions au fil du temps (p. ex., la diminution de la glace de lac) peut signifier que les conditions actuelles (p. ex., les ondes de tempête hivernale) peuvent être moins fréquemment observées dans les archives historiques. Dans ces situations, il peut être préférable d'utiliser une taille d'échantillon plus petite plutôt que toute la période de relevé (p. ex., utiliser les 40 à 50 dernières années plutôt que les 80 années de relevés).

La durée de la taille de l'échantillon doit représenter au moins la moitié de la PDA extrême extrapolée (p. ex., un échantillon d'au moins 50 ans est recommandé pour estimer une valeur de retour de 1 : 100 ans, c'est-à-dire une PDA de 1 %). Toute extrapolation au-delà de ces limites doit être faite avec prudence.

8.12.2 Stationnarité

La plupart des méthodes d'analyse des valeurs extrêmes utilisées dans la pratique reposent sur l'hypothèse de stationnarité, qui peut ne pas être valable pour les zones qui ont connu des changements historiques (p. ex., le contrôle des débits) ou des impacts des changements climatiques (p. ex., l'évolution des conditions de glace des lacs). Les tests de tendances, de saisonnalité et de stationnarité sont décrits dans Hawkes et al. (2008). La suppression des tendances et de la non-stationnarité est recommandée avant de procéder à des analyses de valeurs extrêmes (p. ex., Murphy et Khaliq, 2017).

8.12.3 Analyse saisonnière

Le degré de saisonnalité doit être déterminé pour les niveaux d'eau statiques et les ondes de tempête. Si elle est significative, l'analyse des valeurs extrêmes doit être subdivisée en saisons. Par exemple, les fortes tempêtes sont souvent plus fréquentes en automne et en hiver lorsque les niveaux statiques des lacs sont bas. Dans de nombreuses situations, le fait d'ignorer la saisonnalité (en supposant que des niveaux d'eau statiques élevés et des vents forts pourraient se produire ensemble) entraînera des estimations trop prudentes des niveaux d'eau calme.

Subdiviser davantage les données (p. ex., par mois) doit également être fait avec prudence, en particulier lorsque la période de relevés est courte. Si les données sont subdivisées par mois, il peut être souhaitable d'inclure les données dans les deux semaines suivant le début et la fin du mois pour éviter une segmentation excessive (p. ex., une tempête qui s'est produite le 30 septembre doit être incluse dans les statistiques mensuelles de septembre et octobre).

8.12.4 Méthode du maximum annuel

La méthode du maximum annuel (MA) est généralement utilisée pour estimer les niveaux d'eau statiques extrêmes. Les niveaux d'eau statiques sont déterminés par des processus hydrologiques et culminent généralement pendant l'été. La méthode MA extrait la valeur la plus élevée pour chaque année.

8.12.5 Méthode de pointes dépassant un seuil

La méthode de pointes dépassant un seuil (POT) est souvent utilisée pour estimer les ondes de tempête extrêmes. Les ondes de tempêtes sont provoquées par le vent et peuvent survenir à tout moment de l'année, mais sont plus fréquentes en automne et en hiver. La méthode POT sélectionne les événements en fonction de leur ampleur plutôt que de l'année civile au cours de laquelle ils se sont produits. Ainsi, certaines années peuvent avoir plus d'un événement alors

que d'autres années peuvent n'en avoir aucun. En général, le seuil doit être choisi pour produire entre 1 et 3 événements par année.

Des techniques telles que la durée minimale de la tempête, la durée entre les événements, etc., doivent être utilisées pour s'assurer que des événements indépendants sont sélectionnés (p. ex., Mazas et Hamm, 2011; Murphy et Khaliq, 2017). Dans certains cas, il peut également être nécessaire d'examiner et de séparer les événements de tempête par secteur directionnel, phénomènes météorologiques, analyse saisonnière ou événements aberrants (p. ex., ouragans) (p. ex., Mazas et Hamm, 2011; Murphy et Khaliq, 2017).

8.12.6 Analyse de probabilité conjointe

La méthode d'analyse conjointe de probabilité est utilisée pour estimer la probabilité que deux ou plusieurs événements dépendants ou indépendants se produisent simultanément. Toute analyse de probabilité conjointe devrait commencer avec une analyse exploratoire de la relation entre les variables d'intérêts. La dépendance entre les variables dicte l'approche de l'analyse. Lorsque l'on analyse deux variables (par exemple, l'onde de tempête et la hauteur des vagues), il existe deux cas limites. Une limite est que les variables sont parfaitement corrélées (c'est-à-dire colinéaires), l'autre limite est que les deux variables sont complètement indépendantes. Lorsque la relation est proche de l'une ou l'autre de ces limites, des hypothèses simplificatrices peuvent être faites. Cependant, lorsque la relation se situe entre ces deux limites, comme c'est souvent le cas dans les phénomènes naturels, le professionnel qualifié devrait identifier une approche raisonnable pour appairer les PDA des variables dépendantes.

Pour les grands lacs, il est possible d'assumer que les niveaux d'eau statiques et les ondes de tempête soient indépendants parce qu'ils sont entraînés par des processus différents et se produisent à des échelles de temps différentes. De nombreuses combinaisons différentes de niveaux d'eau statiques et d'ondes de tempête pourraient entraîner les mêmes niveaux d'inondation. Par exemple, le niveau d'inondation d'une PDA de 1 % (niveau d'eau calme) pourrait se produire à partir d'une forte augmentation du niveau d'eau statique typique, ou d'une petite augmentation du niveau d'eau statique très élevé.

Dans le cas d'événements essentiellement indépendants, un « événement de conception » utilisant des ondes de tempête de retour de N ans avec des hauteurs de vagues de retour de N ans et des précipitations de retour de N ans peut donner lieu à une PDA bien inférieure à 1/N ans. Cependant, quand deux événements sont considérés comme dépendants, la simple combinaison de deux événements de retour N ans est appropriée.

Une approche simplifiée pour estimer les événements de conception dans le cas de deux événements indépendants est la suivante :

1. Estimer les niveaux d'eau statiques et les ondes de tempête pour des PDA discrètes à l'aide d'analyses de valeurs extrêmes univariées (p. ex., des PDA de 50 %, 20 %, 10 %, ... 0,2 %).
2. Pour une PDA de niveau d'eau calme spécifié (p. ex., une PDA de 1 %), identifier différentes combinaisons de PDA de niveau d'eau statique et de PDA d'onde de tempête qui, multipliées ensemble, égalent la PDA d'eau calme spécifiée (p. ex., 50 % d'eau statique et 2 % d'onde, 20 % statique et 5 % d'onde, 10 % statique et 10 % d'onde, etc.).

3. Identifier la combinaison de niveau d'eau statique et d'onde de tempête (somme) qui donne le niveau d'eau calme le plus élevé pour une PDA donnée.

Une approche simple qui suppose un cas limite (soit une dépendance totale, soit une indépendance totale) peut être appropriée où la tolérance pour l'incertitude est élevée. Cependant, habituellement en milieu naturel, la réalité se situe quelque part entre la dépendance et l'indépendance totales. Ainsi, dans les situations à haut risque, des approches beaucoup plus complexes peuvent être justifiées. De nombreuses approches existent et ne sont pas détaillées dans ces directives. Le professionnel qualifié doit appliquer l'analyse la plus appropriée à la situation.

8.12.7 Probabilité conjointe des vagues et des niveaux d'eau

Pour les lacs plus petits, il se peut que les ondes de tempêtes et les vagues soient plus souvent fortement corrélées (les deux étant générées par le vent). Dans de tels cas, la condition d'onde de la PDA sélectionnée (p. ex., une PDA de 10 %) peut être censée se produire en combinaison avec l'onde de tempête de la PDA sélectionnée (p. ex., une PDA de 10 %). Cependant, sur les grands lacs, la probabilité conjointe des ondes de tempête et des vagues peut devoir être explicitement prise en compte ou analysée (p. ex., FEMA 2014, CIRIA et al. 2007). En l'absence de relevés simultanés des vagues et des niveaux d'eau d'une longueur suffisante pour établir des corrélations ou lorsqu'une faible sensibilité à la dépendance ne justifie pas le temps et les dépenses d'une analyse rigoureuse propre au site, des hypothèses prudentes (c'est-à-dire une forte corrélation) ou des méthodes simplifiées (p. ex., Defra/Environment Agency, 2005) peuvent être appliquées.

Il convient de noter qu'il est peu probable que la condition de vague d'une PDA de 1 % (et la vitesse du vent) accompagne le niveau d'inondation d'une PDA de 1 %. En pratique, le niveau d'inondation d'une PDA de 1 % est généralement une combinaison de niveau d'eau statique et d'onde de tempête, chacun se situant dans la plage d'une PDA de 5 à 20 % (p. ex., un niveau d'eau statique d'une PDA de 5 % avec une onde de tempête d'une PDA de 20 %). Différentes combinaisons de niveaux d'eau statiques et d'ondes de tempête doivent être examinées afin de déterminer les conditions de vagues qui conviennent pour les analyses de la remontée et du débordement des vagues.

8.12.8 Méthodes stochastiques (simulation de Monte Carlo)

Cette approche simule un grand nombre de tempêtes historiques ou synthétiques (hypothétiques) pour créer une base de données permettant d'extraire les résultats d'inondation (p. ex., les niveaux d'eau, les ondes de tempête, les vagues, la remontée, etc.) et d'en déduire des statistiques de valeurs extrêmes. Cette approche évite de présélectionner les combinaisons de niveau d'eau statique, d'onde de tempête et de vagues qui conduisent à des inondations côtières extrêmes. L'approche est plus complexe et devrait être envisagée pour les sites et les projets complexes qui nécessitent un niveau de certitude plus élevé (p. ex., les emplacements à risque plus élevé). Des détails supplémentaires sont fournis dans Melby et al. (2012) et Nadal-Caraballo et al. (2012).

8.13 Exigences en matière de rapports

Le rapport sur les inondations riveraines doit couvrir l'étendue du site étudié, les évènements générateurs d'aléas d'inondation considérés, le ou les mécanismes d'inondation, les approches de modélisation et d'analyse des aléas d'inondation, les analyses fréquentielles des niveaux d'eau et les approches analytiques adoptées pour évaluer la conception des niveaux d'eau sous les climats actuels et futurs. La section 10.0 traite en détail des exigences de déclaration, y compris le transfert de données et la documentation.

8.14 Résumé des pratiques pour les inondations riveraines

Les méthodes décrites ci-dessus doivent être utilisées pour les inondations des rives des lacs, produites par des niveaux élevés des lacs, des ondes de tempête et des effets des vagues. Si les débits fluviaux sont également une source d'aléas d'inondation, le potentiel d'inondations composées impliquant des inondations fluviales et riveraines doit être évalué. Un examinateur qualifié non impliqué dans le projet devrait examiner l'analyse avant la production du rapport final.

9.0 INCERTITUDE DANS L'ÉVALUATION DES ALÉAS D'INONDATION

La caractérisation, la documentation et la gestion de l'incertitude par des professionnels qualifiés sont des aspects essentiels des évaluations rigoureuses des aléas d'inondation. Les sources d'incertitude dans l'évaluation des aléas d'inondation sont nombreuses : les mesures et les observations de phénomènes naturels aléatoires peuvent conduire à des données inexactes; les modèles, leurs procédures analytiques et leurs équations empiriques ont des biais et des imperfections inhérents; et les valeurs des paramètres sont basées sur la nature aléatoire observée. L'étude de délimitation des aléas d'inondation doit tenir compte de ces incertitudes et, le cas échéant, les quantifier et y remédier.

Les approches pour traiter l'incertitude comprennent la méthode de l'indice de sensibilité à l'incertitude (MISI), la méthode du second moment du premier ordre, la simulation de Monte Carlo utilisant la méthode de simulation multiobjectifs (MSM), l'attribution de fonctions de densité de probabilité (FDPs) aux paramètres ou par d'autres méthodes similaires de quantification de l'incertitude. Ces approches dépendent de la situation rencontrée. Par exemple, dans l'estimation de l'incertitude à l'aide d'un modèle de simulation de Monte Carlo, il existe plusieurs options, non seulement pour la distribution du paramètre (p. ex., normale, log-normale, uniforme, triangulaire, boîte à moustaches), mais également pour l'échantillonnage à partir des distributions (p. ex., aléatoire, quasi aléatoire et stratifié).

La section 9.1 décrit une méthode de quantification des incertitudes associées aux procédures de calcul discutées dans les sections ci-dessus pour les analyses de délimitation des aléas d'inondation. La section 9.2 couvre l'incertitude des modèles des changements climatiques, tandis que la section 9.3 développe qualitativement les incertitudes inhérentes à l'évaluation des aléas d'inondation et la manière dont les rapports et les régulateurs pourraient gérer les incertitudes. Finalement, la section 9.4 fournit un résumé de l'incertitude dans les évaluations des aléas d'inondation.

9.1 Quantification de l'incertitude

Une méthode pour quantifier l'incertitude inhérente aux procédures d'analyse et de modélisation des crues de projet est décrite à la figure 9.1.

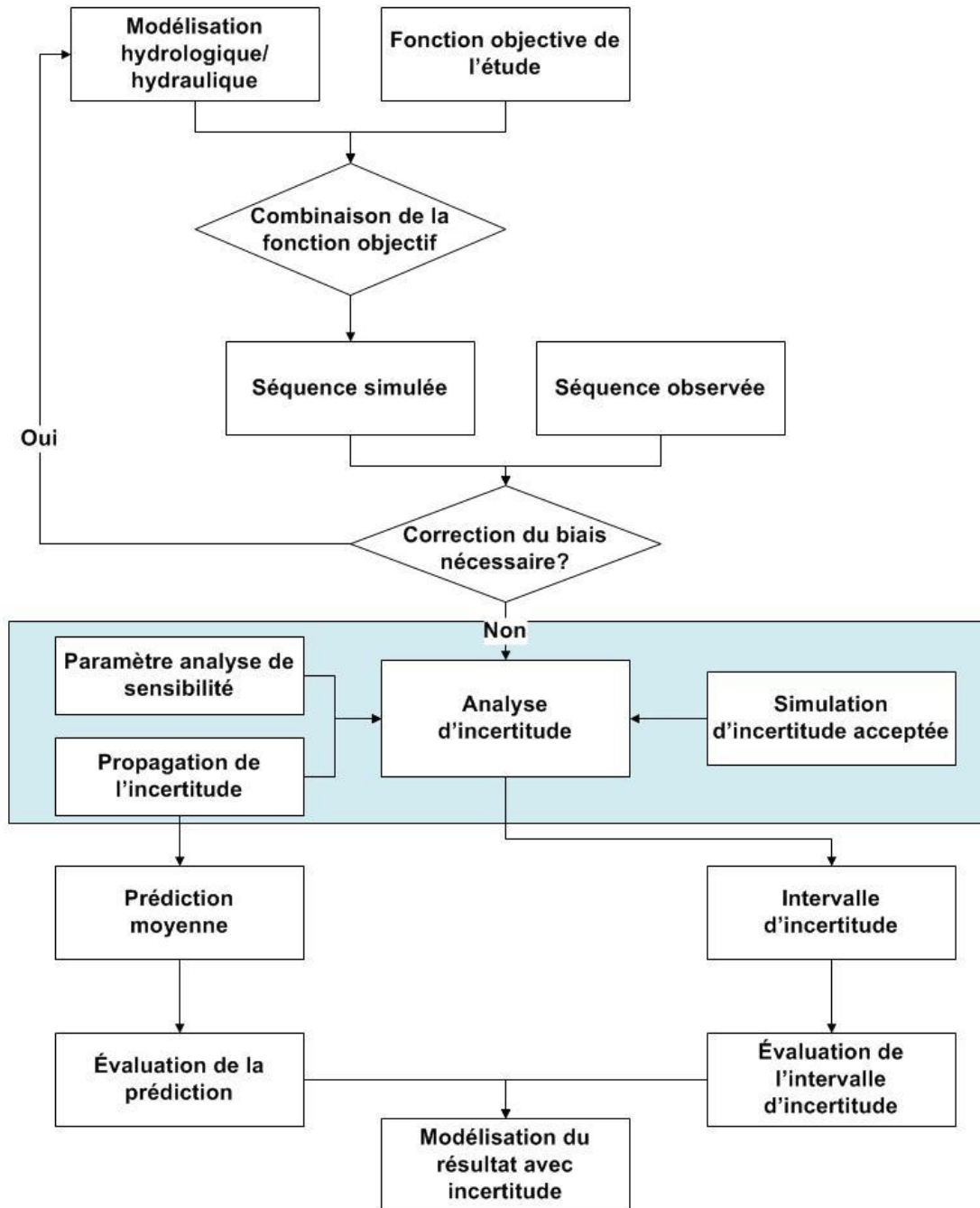


Figure 9.1. Incertitude de la modélisation hydrologique et hydraulique.

La première étape consiste à combiner la fonction objective de l'étude à la méthode d'analyse utilisée, qu'il s'agisse d'analyses fréquentielles des crues, d'extension des données, de modélisation hydrologique et/ou hydraulique. Cette étape fournit des critères de tolérance de la comparaison de la séquence simulée avec la série observée. Le professionnel qualifié détermine si une correction de biais est nécessaire pour améliorer la correspondance et exécuter à nouveau le modèle. Une fois que les résultats de simulation sont suffisamment proches des données observées, aucune autre correction de biais n'est nécessaire.

Ensuite, une analyse de sensibilité des résultats du modèle pour chaque paramètre non constant est effectuée pour déterminer leur impact relatif, en les ajustant par des valeurs définies et en comparant les résultats. La quantification de l'incertitude nécessite la somme des produits de la sensibilité de chaque paramètre et de l'incertitude de ce paramètre. Cette analyse est appelée *First Order Second Moment* (ISO/EIC, 2008). Un autre outil, désormais disponible pour quantifier l'incertitude, utilise l'approche multiméthodes du VARS-TOOL (Razavi et al., 2019). Pour une quantification plus rigoureuse, une simulation de Monte Carlo plus coûteuse et plus longue avec plusieurs exécutions de modèles serait nécessaire.

La plage des résultats du modèle donnera une prédiction moyenne, telle que la valeur moyenne des événements de conception, avec un intervalle d'incertitude exprimé sous forme de limites de confiance ou d'écart minimaux et maximaux à partir des analyses de sensibilité ou des simulations de Monte Carlo. La plupart des logiciels de distribution de probabilités génèrent des limites de confiance à partir des données utilisées comme intrants du logiciel. Après avoir évalué la prédiction et l'intervalle d'incertitude par rapport à d'autres méthodes et séquences observées, le professionnel qualifié sera en mesure de quantifier l'incertitude des modèles hydrologiques ou hydrauliques en termes de valeur moyenne et d'intervalle d'incertitude.

9.2 Incertitude des projections des changements climatiques

L'incertitude liée aux changements climatiques est le résultat d'une série d'incertitudes provenant de diverses sources : scénarios d'émissions, modèles climatiques, méthodes de réduction d'échelle et de correction des biais, variabilité naturelle, estimation des paramètres statistiques et méthodes d'application utilisées pour intégrer les informations climatiques en tant qu'intrants. En ce qui concerne les indicateurs climatiques par exemple, une plage d'incertitude de -5 % à +200 % n'est pas rare lors de la réalisation d'une analyse de sensibilité sur la conception des infrastructures (Roy et al., 2017). L'intercomparaison des méthodes appliquées, y compris les modèles hydrologiques, peut être utile pour garantir que les impacts basés sur des scénarios sont évalués de manière cohérente, car des études précédentes ont montré des différences dans la représentation des modèles hydrologiques, des processus d'évaporation et de fonte des neiges (Cohen et al., 2015).

Le processus décisionnel peut devenir beaucoup plus complexe dans le contexte de ces incertitudes. Une approche d'ensemble, telle que celle décrite à la section 5.0, prend les résultats pour les facteurs météorologiques influençant l'écoulement fluvial à partir d'un certain nombre de simulations du climat futur. Si le professionnel qualifié a utilisé une approche globale pour l'intégration des changements climatiques, la gamme des débits de conception et les résultats de délimitation des aléas d'inondation qui en résultent quantifieront l'incertitude associée aux estimations finales.

9.3 Incertitude dans les évaluations des délimitations des aléas d'inondation

Les changements climatiques et l'occupation du sol peuvent rendre les évaluations des inondations hydrologiques, hydrauliques, de glace et riveraines (et les cartes des aléas d'inondation qu'elles appuient) moins certaines et, dans certains cas, obsolètes. La planification des paramètres initiaux de l'étude pour tenir compte de ces changements potentiels maximise la durée pendant laquelle le produit final sera pertinent. L'examen périodique des hypothèses de modélisation est particulièrement important lorsque les cartes des aléas d'inondation constituent la base de la planification et de la réglementation des aléas d'inondation. Le maintien des données et des modèles utilisés dans l'approche hydrotechnique, ainsi que l'examen périodique et la révision de la réglementation, est un élément majeur de la gestion adaptative. La gestion adaptative est un outil puissant pour contrer l'incertitude dans les évaluations des délimitations des aléas d'inondation.

9.3.1 Planification des changements potentiels

Une planification minutieuse peut éviter le besoin de mises à jour fréquentes qui augmentent les coûts et peut créer une « cible mobile » pour la planification, la croissance et le développement municipaux. Un horizon de 30 ans pour l'évaluation des débits lui permet d'inclure la planification future du développement municipal et les estimations futures des changements climatiques.

Dans le cadre de chaque étude de délimitation des aléas d'inondation, un professionnel qualifié doit examiner la portée et l'utilisation prévues des outils de délimitation des aléas d'inondation dans le contexte des changements en cours et prévus dans le bassin versant ainsi que le long du canal de la rivière. Dans la mesure du possible, les études doivent identifier un horizon de planification (p. ex., l'élévation du niveau de la mer, les changements dans les précipitations, les changements dans l'occupation des sols ruraux et l'urbanisation des zones naturelles). Des facteurs de sécurité peuvent convenir dans des situations où l'incertitude est élevée. Il convient également de tenir compte des travaux d'atténuation des inondations prévus qui peuvent affecter l'étendue, la profondeur ou la vitesse des inondations. Avec une planification minutieuse des changements potentiels dans l'occupation du sol, ainsi que dans l'élévation du niveau de la mer et l'hydrologie due aux changements climatiques, une délimitation des aléas d'inondation devrait permettre un développement stable.

9.3.2 Examen périodique

De nombreuses juridictions légifèrent sur l'examen périodique des aléas d'inondation. Les directives sur les aléas d'inondation de l'Union européenne (European Parliament, 2007) prévoient une révision périodique des plans de gestion des inondations. Le Royaume-Uni (UK Environmental Agency, 2019) exige un examen tous les six ans, la FEMA doit évaluer la nécessité de réviser la cartographie des zones inondables tous les cinq ans (Department of Homeland Security, 2017). Lorsque l'étude initiale a pris en compte les changements futurs de l'occupation du sol et l'incertitude des changements potentiels des changements climatiques, la longévité peut être plus longue, à moins qu'un événement majeur n'ait transformé le cours d'eau (c'est-à-dire avulsion) ou l'occupation du sol (c'est-à-dire incendie de forêt). Un événement de débit, d'embâcle ou d'onde de tempête plus important que le record historique utilisé dans n'importe quelle AFC pour une délimitation des aléas d'inondation modifiera l'AFC, ce qui entraînera des estimations actualisées de l'ampleur des événements de la PDA. De tels

événements devraient conduire à un réexamen de l'AFC. Un examen de l'hydrologie de base de l'étude initiale indiquera si des mises à jour sont nécessaires pour que les utilisateurs de la carte puissent bien comprendre et gérer les aléas. De plus, si le canal ou les infrastructures changent par rapport à l'étude initiale, une nouvelle analyse hydraulique indiquera si les aléas d'inondation ont augmenté même si l'hydrologie reste essentiellement la même.

9.3.3 Approche de gestion adaptative

Une approche de gestion adaptative aborde les incertitudes inhérentes à la délimitation des zones inondables en réévaluant continuellement les intrants des modèles analytiques utilisés et en permettant une flexibilité à mesure que de nouvelles conditions ou que des améliorations à la compréhension des processus moteurs surviennent. Elle conduit à des réponses qui anticipent la plus large gamme de scénarios futurs probables qui ne limitent pas les options futures et prévoient des changements par un suivi pertinent des données d'entrée. De plus, la gestion adaptative documente entièrement les données et les procédures de l'étude initiale. La juridiction doit maintenir les modèles numériques utilisés lors des analyses de la délimitation des aléas d'inondation. Lorsqu'un examen indique que l'occupation du sol, l'hydrologie, l'élévation du niveau de la mer, les caractéristiques du canal ou du plan d'eau ont différé de manière significative de l'étude initiale, une mise à jour sera plus facile et moins coûteuse que de commencer sans les autres composants archivés.

Même une étude de délimitation des aléas d'inondation bien conçue aura une durée de vie réelle ou perçue, compte tenu des changements d'occupation du sol, des changements de morphologie des canaux, des modifications des infrastructures et des non-stationnarités climatiques. La gestion des données et des procédures implique une documentation approfondie et une gestion efficace de l'information des sources et des modèles numériques. Parallèlement à un examen périodique régulier pour surveiller les données d'entrée, la maintenance continue des données et des modèles dans une archive adéquate peut résoudre l'incertitude de la pertinence des travaux antérieurs, pendant quelques années dans le futur. Ces pratiques de gestion sont des composantes majeures de la gestion adaptative et sont détaillées à la section 10.0.

9.4 Résumé des incertitudes dans l'évaluation des aléas d'inondation

L'incertitude dans les délimitations des aléas d'inondation est inévitable. Cependant, un professionnel qualifié devrait être en mesure de reconnaître, de quantifier et de traiter l'incertitude. Les distributions de probabilité des analyses fréquentielles doivent avoir des limites de confiance correspondantes. L'analyse de sensibilité des paramètres du modèle devrait produire des marges d'erreur pour les résultats des modèles hydrologiques et hydrauliques. Les ensembles climatiques généreront une série de valeurs probables pour les débits de conception projetés. L'examen régulier des délimitations des aléas d'inondation et après des événements majeurs de précipitation et des changements d'utilisation des terres ou géomorphiques permettra de maintenir les délimitations applicables aux aléas actuels. Une approche de gestion adaptative facilite la mise à jour des délimitations des aléas d'inondation.

10.0 EXIGENCES POUR LE FORMAT DE RAPPORT

Cette section a pour but d'aider les organismes provinciaux, territoriaux et municipaux qui sous-traitent des études de délimitation des aléas d'inondation. La section d'aperçu fournit en termes généraux la justification et les exigences d'un rapport couvrant chaque aspect technique. Une section sur la gestion des données explique comment la documentation du rapport fait partie intégrante de toute étude de délimitation des aléas d'inondation et de sa gestion adaptative et l'annexe A énumère les exigences relatives aux rapports techniques sur chaque aspect d'une étude de délimitation des aléas d'inondation. Les exigences détaillées (annexe A) peuvent être incluses dans un cahier des charges et doivent être éditées par l'organisme pour être spécifiques au projet.

10.1 Aperçu

La documentation technique relative à l'étude et aux données de base, à l'hydrologie, à l'hydraulique, à l'étude des embâcles, aux effets du vent et des vagues (inondation des rives du lac) et aux cartes doit être produite d'une manière conforme au présent document. La documentation technique doit être préparée de manière à ce que l'ensemble du travail puisse être recréé par toute personne qualifiée sans qu'il soit nécessaire de se référer à d'autres documentations. En outre, les personnes qualifiées doivent être en mesure de reconnaître et de comprendre toutes les méthodes, approches et données de base ainsi que les justifications utilisées pour ces méthodes, telles qu'établi par un examinateur compétent. Tous les rapports doivent porter le seau professionnel/licence ainsi que la signature du gestionnaire/l'ingénieur de projet et de l'examineur. De plus, ils doivent mentionner l'organisme/l'agence de financement et les pages couvertures des rapports doivent porter les logos de l'agence à côté du logo de la municipalité concernée, le cas échéant. La préservation des données et des modèles dans une archive adéquate facilite le processus de révision et toute exigence pour les mises à jour futures. Cette approche de gestion adaptative encourage l'examen périodique des délimitations des aléas d'inondation pour s'assurer qu'elles demeurent pertinentes. La répétabilité des résultats est essentielle dans tout contexte de gestion adaptative. Cela exige que toute agence soit en mesure de reproduire les résultats d'une étude sur la base de la documentation existante, des hypothèses et des détails fournis par le spécialiste.

La documentation technique pour chaque composante de la délimitation des aléas d'inondation doit être préparée en utilisant le format suivant :

- a) Remerciements;
- b) Présentation;
- c) Objectifs;
- d) Description générale du bassin versant et de la zone d'étude;
- e) Historique des inondations (journaux, riverains, police, églises, crues, etc.);
- f) Informations générales sur le contexte;
- g) Étendue des travaux;
- h) Critères utilisés pour l'analyse du rapport (tels que les crues de conception, le scénario des changements climatiques, l'occupation du sol, la stabilité du canal, l'embâcle et/ou les considérations relatives au vent et aux vagues (rivage du lac));
- i) La quantification de l'incertitude dans les résultats;

Un rapport ou une section sur les données d'enquête et de base devrait discuter des critères suivants :

- a) Données utilisées dans les analyses et les travaux de calage, y compris les raisons du choix des données;
- b) Informations, autres que les plus récentes, utilisées dans les analyses;
- c) Justification des paramètres sélectionnés du bassin versant utilisés dans l'étude.

Un rapport sur les crues de conception ou une section couvrant les analyses hydrologiques doit couvrir les critères suivants :

- a) Les critères spécifiques utilisés dans le choix de l'approche pour déterminer les crues de projet;
- b) Les critères utilisés dans toute analyse fréquentielle des crues (AFC); raisons du choix d'une distribution statistique particulière;
- c) Les paramètres de modélisation hydrologique et le choix de tout modèle;
- d) Méthode utilisée et hypothèses formulées dans le calcul des effets des infrastructures qui influent sur le débit et les niveaux d'eau, comme les ponceaux, les ponts, les brise-lames, les bassins de gestion des eaux pluviales, les réservoirs, les remblais et les digues. Inclure la méthode utilisée et les hypothèses sur les lacs, les affluents et les impacts de l'occupation du sol sur les débits;
- e) Méthode et hypothèses pour l'évaluation des changements climatiques.

Un rapport ou une section hydraulique doit mentionner les critères suivants :

- a) La justification du choix du modèle particulier dans l'analyse;
- b) Critères utilisés pour localiser et définir les sections ou maillages utilisés dans les calculs hydrauliques tronçon par tronçon. Méthode utilisée et hypothèses formulées dans la détermination des élévations de départ de la surface de l'eau pour le modèle hydraulique;
- c) Les critères spécifiques utilisés pour déterminer où se trouvent les limites de débit effectif du domaine du modèle et les conditions aux limites;
- d) Raisons d'utiliser les coefficients de rugosité et de pertes hydrauliques de Manning sélectionnés pour déterminer les profils de conception de la surface des eaux d'inondation.
- e) Méthodes utilisées et hypothèses retenues dans le calcul des effets des ponts, des traversées de ponceaux et des remblais sur les profils de surface de l'eau; sélection de la routine de calcul du pont et des raisons de chaque traversée;
- f) Méthodes utilisées et hypothèses formulées dans la détermination des débits de débordement; effets sur les débits en aval et la ligne d'inondation, les zones touchées en raison du débordement.

Un rapport ou une section sur les embâcles devrait inclure les hypothèses formulées et les méthodes utilisées en ce qui concerne l'estimation des paramètres à diverses étapes de l'analyse hydrologique et hydraulique si une analyse d'embâcle a été effectuée.

Tout rapport ou section sur les impacts côtiers doit inclure les impacts des niveaux des eaux côtières sur les niveaux d'inondation, le cas échéant, les détails de la méthode d'analyse

choisie et la manière dont ils sont intégrés dans les analyses, y compris les sources des données d'entrée.

L'annexe A contient des informations plus détaillées et plus spécifiques sur les éléments à inclure dans chaque rapport.

10.2 Gestion des données

Les rapports exhaustifs détaillés à l'annexe A font partie intégrante de la gestion des données et des procédures grâce à leur documentation et à l'archivage des données d'entrée, des sources et des modèles numériques. Les communautés autochtones sont les gardiennes de leurs propres données conformément aux principes de propriété, de contrôle, d'accès et de possession des Premières Nations (PCAP®) abordés à la section 3.5.2. Les révisions nécessitent un contrôle des documents, une datation et une explication des raisons de la révision. La maintenance continue des données et des modèles dans des archives adéquates, ainsi que l'examen et la surveillance périodiques de l'hydrologie, de l'occupation du sol, de la morphologie et de l'infrastructure des canaux, peuvent résoudre l'incertitude quant à la pertinence des délimitations passées des aléas d'inondation, longtemps dans le futur. Le processus d'archivage et de gestion doit permettre la répliquabilité des résultats. Compte tenu des nombreux points de décision subjectifs à la disposition du professionnel des ressources en eau, la documentation des décisions précédentes et la gestion des données sont essentielles pour garantir que les résultats peuvent être reproduits.

11.0 CONCLUSION

Ce document fournit des conseils pour la conception et la réalisation d'analyses hydrologiques et hydrauliques pour l'évaluation des aléas d'inondation du Canada. Il n'est pas destiné à remplacer d'autres lois, réglementations, règlements, politiques, normes de programme, ou guides d'orientation fédéraux, provinciaux, territoriaux ou locaux. La publication de la version 2.0 de ce document fournit une base pour l'évaluation des aléas d'inondation, en incorporant les impacts des changements climatiques et en élaborant sur l'incertitude. De futures mises à jour sont prévues pour étendre la portée et les détails du document, tel que mentionné dans la préface.

12.0 RÉFÉRENCES

- AAFC (2017). *Agriculture and Agri-Food Canada Agroclimate Impact Reporter*. Disponible sur <https://agriculture.canada.ca/en/agricultural-production/weather/agroclimate-impact-reporter>
- Alberta Environment and Parks (1993). *Review of flood stage frequency estimates for the City of Fort McMurray*. Rapport préparé pour le Technical Committee, Canada-Alberta Flood Damage Reduction Program by Technical Services and Monitoring Division, Water Resources Services. Edmonton, Alberta.
- Alberta Transportation. (2001). *Guidelines on Flood Frequency Analysis*. Alberta Transportation, Civil Projects Branch. Edmonton, AB. 74pp.
- Andres, D. D. (1999). The effects of freezing on the stability of a juxtaposed ice cover. *River Ice Management with a Changing Climate: Dealing with Extreme Events*. CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment. *10th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers*, Winnipeg, Manitoba, Canada
- Andres, D. D. et Doyle, P. F. (1984). Analysis of break-up and ice jams on the Athabasca River at Fort McMurray, Alberta. *Canadian Journal of Civil Engineering* 11-3: 444-458.
- Associate Committee on Hydrology (1989). *Hydrology of floods in Canada – A guide to Planning and Design*, Ed Watt, Chief Editor, National Research Council, Ottawa, Ontario
- AutoDesk (2020). *Infoworks 1-D and 2-D*. Disponible sur <https://www.innovyze.com/en-us/products/storm-sewer-flood-modelling/>
- Beard, L. R. (1974). *Flood Flow Frequency Techniques*: Technical Report CRWR-1198, Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin
- Beltaos, S. (1983). River ice jams: theory, case studies and applications. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, 109-10: 1338-1359.
- Beltaos, S. (Ed.) (1995). *River Ice Jams*. Water Resources Publications. Littleton, CO.
- Beltaos, S. (2012). Distributed function analysis of ice jam flood frequency. *Cold Regions Science and Technology*, 71: 1–10.
- Beltaos, S. (2013a). Hydrodynamic characteristics and effects of river waves caused by ice jam releases. *Cold Regions Science and Technology*, 85: 42-55.
- Beltaos, S. (2013b). Chapter 7. Freeze Up jamming and formation of ice cover. in: *River Ice Formation. CGU-HS Committee on River Ice Processes and the Environment (CRIPE)*, Edmonton, pp 181-255.
- Beltaos S. (2021). Assessing the Frequency of Floods in Ice-Covered Rivers under a Changing Climate: Review of Methodology. *Geosciences*, 11(12):514. <https://doi.org/10.3390/geosciences11120514>
- Beltaos, S., Ismail, S. et Burrell, B.C. (2003). Midwinter breakup and jamming on the upper Saint John River: a case study. Special Issue on River Ice Engineering, *Canadian Journal of Civil Engineering*, ISSN 1208-6029, NRC Research Press, National Research Council Canada, 30(1): 77-88.
- Beltaos, S. et Prowse, T.D. (2009). River-ice hydrology in a shrinking cryosphere. *Hydrological Processes* 23: 122-144.

- Bezak, N., Brilly, M., et Šraj, M., (2014). Comparison between the peaks-over-threshold method and the annual maximum method for flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 59 (5), 959–977.
- Bruce, J.P. (1976). National Flood Damage Reduction Program, *Canadian Water Resources Journal*, 1(1): 5-14.
- Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River analysis system user's manual. Version 5.0. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Centre, Davis, California, USA.
- Brunner, G., Savant, G., et Heath, R.E. (2020). Modeler Application Guidance for Steady vs Unsteady, and 1-D vs 2-D vs 3-D Hydraulic Modeling, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, TD-41, 114 pp.
- Bush, E. et Lemmen, D.S., (Eds.) (2019). Canada's Changing Climate Report; Government of Canada, Ottawa, ON. 444 p. Disponible sur <https://changingclimate.ca/>
- Canadian Ice Service (2021). *Nautical Charts and Services*. Disponible sur ice-glaces.ec.gc.ca
- Carson, R., Beltaos, S., Groenevelt, J., Healy, D., She, Y., Malenchak, J., Morris, M. Saucet, J-P., Kolerski, T., et Shen, H. T. (2011). Comparative testing of numerical models of river ice jams. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38: 669-678
- Chang, C., Ashenurst, F. Damaia, S. & Mann, W. (2002). Ontario Flow Assessment Techniques (OFAT), Hydraulic Information Management, Brebbia, C.A., & W.R. Blain (Eds.), WIT Press, Ashurst, Southampton, U.K., pp. 421-431.
- Chapman, R. S., Kim, S.C., Mark, D.J. (2009). *Storm-induced water level prediction study for the Western Coast of Alaska*. Rapport préliminaire pour POA, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Chapman, R.S., Mark, D., et Cialone, A. (2005). *Regional tide and storm-induced water level prediction study for the West Coast Alaska*. Draft Report to POA, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Charron, I. (2014). *A Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions*. Ouranos, 86p.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- CHS (2021a). *Nautical Charts and Services*. Disponible sur www.charts.gc.ca
- CHS (2021b). *Tides, Currents, and Water Levels*. Disponible sur www.waterlevels.gc.ca
- CIRIA, CUR, et CETMEF (2007). *The Rock Manual: The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*. C683, CIRIA, London.
- Clay (2022). 'We're still concerned': Brampton officials say more flooding possible in Churchville area over next few days. *Brampton Guardian*. Disponible sur <https://www.thestar.com/local-brampton/news/2022/02/21/we-re-still-concerned-brampton-officials-say-more-flooding-possible-in-churchville-area-over-next-few-days.html>
- Climatedata.ca (2022). Topic 6: Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves *Climate Data for a Resilient Canada*. Disponible sur <https://climatedata.ca/resource/idf-curves-and-climate-change/>
- Cohen, S., Koshida G. et Mortsch, L. (2015). Climate and water availability indicators: Challenges and a way forward. Part III – Future scenarios. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 40-2: 160-172.

- Cohn, T. A., England, J.F., Berenbrock, C. E., Mason, R. R., Stedinger, J. R., et Lamontagne, J. R. (2013). A Generalized Grubbs-Beck Test Statistic for Detecting Multiple Potentially Influential Low Outliers in Flood Series. *Water Resources Research*. 49-8: 5047-5058.
- Cohn, T. A., Lane, W. L., et Baier, W. G. (1997). An algorithm for computing moments-based flood quantile estimates when historical flood information is available. *Water Resources Research* 3-9: 2089-2096.
- Commission for Environmental Cooperation (2020). *North American Land Change Monitoring System*. Land use datasets Disponible sur <http://www.cec.org/north-american-land-change-monitoring-system/>
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017). *ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate*. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), Disponible sur <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Coulson (1991). *Manual of Operational Hydrology in British Columbia*, British Columbia Ministry of Environment, Water Management Division, Hydrology Section 2nd Ed 238pp.
- Coulson, C. H. et Obedkoff, W. (1998). *British Columbia Streamflow Inventory*. BC Ministry of Environment, Lands and Parks, Resources Inventory Branch, Water Inventory Section. 56pp.
- Cox, J. C. et Machemehl, J., (1986). *Overland Bore Propagation Due to an Overtopping Wave*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 112, pp. 161–163.
- Crutcher, H. L. (1975). A note on the possible misuse of the Kolmogorov-Smirnov Test. *Journal of Applied Meteorology*. 14: 1600-1603.
- CSA (2019). *CSA Plus 4013-2019: TECHNICAL GUIDE Development, Interpretation and Use of Rainfall Intensity-Duration-Frequency (IDF) Information: Guideline for Canadian Water Resources Practitioners*. Disponible sur https://webstore.ansi.org/preview-pages/CSA/preview_2427707.pdf
- CSA (2021). *Ordering RADARSAT-2 Data*. Disponible sur http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/order_contact.asp
- Cunderlik, J. M., Jourdain, V., Ouarda, T. B. M. J. et Bobée, B. (2007). Local Non-Stationary Flood-Duration-Frequency Modelling. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 32(1): 43-58.
- Cunge, J. A., Holly, F. M., Verwey, A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. London: Pitman Publishing Limited.
- Cunnane, C. (1973). A particular comparison of annual maxima and partial duration series methods of flood frequency prediction, *Journal of Hydrology*, 18(3-4): 257-271. Disponible sur [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90051-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90051-6)
- Das, A, et Lindenschmidt, E-K. (2021). Modelling climatic impacts on ice-jam floods: a review of current models, modelling capabilities, challenges, and future prospects. *Environmental Reviews* 29(3): 378-390. Disponible sur <https://doi.org/10.1139/er-2020-0108>
- Defra/EA (2005). Joint Probability: Dependence Mapping and Best Practice: Technical report on dependence mapping, R&D Technical Report FD2308/TR1. Disponible sur https://assets.publishing.service.gov.uk/media/602bacfd8fa8f50381945d04/Joint_probability_Dependence_mapping_and_best_practice_Technical_report_on_dependence_mapping_Technical_Report.pdf
- Deltares (2020). *SOBEK and Delft3D*. Disponible sur <http://www.deltares.nl/en/software-solutions/sobek-and-delft3d/>

Department of Homeland Security (2017). *FEMA Needs to Improve Management of its Mapping Programs* Office of Inspector General p.2. Disponible sur https://www.documentcloud.org/documents/4066233_OIG_17_110_Sep17.html

DFO (2021). *Marine Environmental Data Section Archive*. Disponible sur meds.sdmm.dfo.mpo.gc.ca

DHI (2017). *MIKE Extreme Value Analysis Toolbox*. Disponible sur https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/General/EVA_UserGuide.pdf

ECCC (anciennement Environnement Canada) (1976). *Hydrologic and Hydraulic Procedures for Flood Plain Delineation*. Water Planning and Management Branch, Inland Waters Directorate, Ottawa <http://climate.weather.gc.ca/>

ECCC (2021a). *Historical Climate Data*. Disponible sur <http://climate.weather.gc.ca/>

ECCC (2021b) *Intensity-Duration-Frequency Files (IDF)*. Disponible sur https://climate.weather.gc.ca/prods_servs/engineering_e.html

ECCC (2021c). *Technical documentation: Climate Normals* Disponible sur <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/canadian-centre-climate-services/download/technical-documentation-climate-normals.html>

El Adlouni, S. et Bobée, B. (2015). *Hydrological Frequency Analysis Using HYFRAN-PLUS Software, User's Guide available with the software DEMO*

El Adlouni, S., Ouarda, T. B. M. J., Zhang, X., Roy, R., et Bobée, B. (2007). Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model. *Water Resources Research*. 43-3. Disponible sur <https://doi.org/10.1029/2005WR004545>

England, J. F. Jr., Cohn, T. A., Faber, B. A., Stedinger, J. R., Thomas Jr., W. O., Veilleux, A. G., Kiang, J. E., and Mason, R. R., (2017). *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency – Bulletin 17C: USGS Techniques and Methods book 4, chap. B5. 244 p.* Disponible sur https://acwi.gov/hydrology/Frequency/b17c/bao-approval-copy_IP-065340_Cohn-Bulletin17c-09-25-2017.pdf.

European Parliament (2007). Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks, 8 pp.

EurOtop (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures.*, Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., Disponible sur www.overtopping-manual.com

FEMA (2003). Appendix F: Guidance for Ice jam Analyses and Mapping *Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners*. Federal Emergency Management Agency, United States Government.

FEMA (2005). *Final Draft Guidelines for Coastal Flood Hazard Analysis and Mapping for the Pacific Coast of the United States*. Oakland, CA.

FEMA (2014). *Great Lakes Coastal Guidelines*. In: Guidelines and Standards for Flood Hazard Mapping Partners, Appendix D.3 Update. Washington, DC.

FEMA (2016b). *Coastal Water Levels*. Guidance Document 67.

FEMA (2021). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping: Coastal Wave Runup and Overtopping*. Disponible sur https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_coastal_wave_runup_overtopping_112021.pdf

Fill, H.D. et Steiner, A.A. (2003). Estimating instantaneous peak flow from mean daily flow data, *Journal of Hydrologic Engineering*, 8:365–369. Disponible sur [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2003\)8:6\(365\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2003)8:6(365))

First Nations Information Governance Centre (2022). *The First Nations Principles of OCAP®*
<https://fnigc.ca/ocap-training/>

Fuller, W.E. (1914). Flood flows, *Trans. ASCE* 77: 564-617.

Gasset, N., Fortin, V., Dimitrijevic, M., Carrera, M., Bilodeau, B., Muncaster, R., Gaborit, É., Roy, G., Pentcheva, N., Bulat, M., Wang, X., Pavlovic, R., Lespinas, F., Khedhaouria, D., et Mai, J. (2021). *A 10 km North American precipitation and land-surface reanalysis based on the GEM atmospheric model*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 4917–4945, <https://doi.org/10.5194/hess-25-4917-2021>

Gaur, A. et Simonovic, S. P. (2018). Future changes in flood hazards across Canada under a changing climate. *Water* 10, 1441: 1–21.

Gerard, R. et Karpuk, E. (1979). Probability analysis of historical flood data. *Journal of the Hydrology Division, ASCE*, 105(HY9): 1153-1165.

Goda, Y. (2010). *Random seas and design of maritime structures* (Vol. 33). World Scientific Publishing Company.

Han, G., Ma, Z., Zai, L., Greenan, B., Thomson, R. (2016). Twenty-first century mean sea level rise scenarios for Canada. *Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences* 313.

Hardison, C., (1974). Generalized Skew Coefficients of Annual Floods in the United States, *Water Resources Research*, v.10, no. 4, p. 745-752

Hawkes, P. J., Gonzalez-Marco, D., Sánchez-Arcilla, A. et Prinos, P. (2008). Best practice for the estimation of extremes: A review. *Journal of Hydraulic Research*, 46(S2), pp.324-332.

Helsel, D. R. et Hirsch, R. M. (2002). Statistical Methods in Water Resources *Techniques of Water Resources Investigations, Book 4, chapter A3*. USGS

Hessami, M., Gachon, P., Ouarda, T. B. M. J., et St-Hilaire, A. (2008). Automated Regression-based Statistical Downscaling Tool. *Environmental Modelling & Software*. 23. 813-834.

Horritt, M. S. et Bates, P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D Numerical Models for Predicting River Flood Inundation. *Journal of Hydrology* 268(1-4): 87-99.

Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. (1997). *Regional Frequency Analysis*. Cambridge University Press.

Hughes, D.A. et Smakhtin, V. (1996). “Daily flow time series patching or extension: a spatial interpolation approach based on flow duration curves.” *Hydrological Sciences- Journal-des Sciences hydrologiques*, 41-6.

Hunter, N.M., Bates, P.D., Neelz, S., Pender, G., Villeneuve, I., Wright, N.G., Liang, D., Falconer, R.A., Lin, B., Waller, S., et Crossley, A.J. (2008). Benchmarking 2D Hydraulic Models for Urban Flooding. *Water Management* 161 (WMI): 13-30. Disponible sur <https://eprints.whiterose.ac.uk/77249/1/wama161-013.pdf>

Huokuna M., Morris, M., Baltaos, S., et Burrell, B. (2017). Ice in regulated rivers and reservoirs. *CGU Conference HS Committee on River Ice Processes and the Environment 19th Workshop on the Hydraulics of Ice-Covered Rivers at: Whitehorse, Canada*. Disponible sur https://www.researchgate.net/publication/318431879_Ice_in_Regulated_Rivers_and_Reservoirs

ISO/EIC (2008). *ISO Guide 98-3: 1995 and 2008 Uncertainty in measurement*. Disponible sur <https://www.iso.org/standard/50461.html>

James, T. S., Robin, C., Henton, J. A., et Craymor, M. (2021). *Relative sea-level projections for Canada based on the IPCC Fifth Assessment Report and the NAD83v70VG national crustal velocity model*. Geological Survey of Canada. Disponible sur https://geoscan.nrcan.gc.ca/text/geoscan/fulltext/of_8764.pdf

Jarrett et England (2002). *Reliability of Paleostage Indicators for Paleoflood Studies. Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology*. American Geophysical Union

Jasek, M. (2003). Ice jam release surges, ice runs, and breaking fronts: field measurements, physical descriptions, and research needs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30-1: 113 – 127.

Joyce, B. R., Pringle, W. J., Wirasaet, D., Westerink, J. J., Van DerWesthuysen, A. J., Grumbine, R., Feyen, J. (2019). High resolution modeling of western Alaskan tides and storm surge under varying sea ice conditions. *Ocean Model*. 2019, 141, 101421.

Kim, J., Murphy, E., Nistor, I., Ferguson, S., et Provan, M. (2021). Numerical Analysis of Storm Surges on Canada's Western Arctic Coastline. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), p.326.

Khaliq, M.N. (2017). *Flood Frequency Analysis: Review of Selected Software Tools*, NRC Technical Report – UNCLASSIFIED: OCRE-TR-2017-003, Document Version 1.2

Khaliq, M.N. (2019). *An Inventory of Methods of Estimating Climate Change-informed Design Water Levels for Floodplain Mapping*, National Research Council of Canada: Ocean, Coastal and River Engineering Technical Report no. NRC-OCRE-2019-TR-011. Disponible sur https://nrcpublications.canada.ca/eng/view/object/?id=d72127b3_f93b_48fb_ad82_8eb09992b6b8

Kobayashi, N. (1997). *Wave runup and overtopping on beaches and coastal structures*. Research Report No. CACR-97-09. Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.

Kobayashi, N. (2009). *Documentation of Cross-Shore Numerical Model CSHORE*. Research Report No. CACR-09-06, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.

Kovachis, N., Burrell, B. C., Huokuna, M., Beltaos S., Turcotte, B., et Jasek M. (2017). Ice jam flood delineation: Challenges and research needs, *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 42-3 : 258-268

Leclerc, M., Doyon, B., Heniche, M., Secretan, Y., Lapointe, M, Driscoll, S., Marion, J. et Boudreau, P. (1998). Simulation hydrodynamique et analyse morphodynamique de la rivière Montmorency en crue dans le secteur des Îlets. Rapport de recherche (R522). INRS-Eau, Québec.

Lemmen, D.S., Warren, F.J., James, T.S. et Mercer Clarke, C.S.L. editors (2016) : *Canada's Marine Coasts in a Changing Climate*; Government of Canada, Ottawa, ON, 274p.

Limerinos, J.T. (1970). *Determination of the Manning Coefficient from Measured Bed Roughness in Natural Channels*. Geological Survey Water Supply Paper 1898-B.

Lindenschmidt, K-E., Das, A., Rokaya, P. et Chu, T. (2016). Ice jam flood risk assessment and mapping. *Hydrological. Processes*, 30: 3754–3769

Lindenschmidt, K, Huokuna, M., Burrell B. C. et Beltaos S. (2018). Lessons learned from past ice jam floods concerning the challenges of flood mapping, *International Journal of River Basin Management*, vol.16-4: 457-468

López, J. & Francés, F. (2013). Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17: 3189-3203. Disponible sur <https://doi.org/10.5194/hess 17 3189 2013>

Luetlich, Jr. et Westerink (2016). *ADCIRC: A (Parallel) Advanced Circulation Model for Oceanic, Coastal and Estuarine Waters*. Disponible sur <https://adcirc.org/>

MacDonald, Detwiler et Associates Geospatial Services (2021). *RADARSAT-2*. Disponible sur <https://mda.space/en/form/>

Mazas, F. et Hamm, L., 2011. A multi-distribution approach to POT methods for determining extreme wave heights. *Coastal Engineering*, 58(5), pp.385-394.

Melby, J.A. (2012). *Runup Prediction for Flood Hazard Assessment*. U.S. Army Corps of Engineers, TR-XX-12

Melby, J. A., Nadal-Caraballo, N. C., et Ebersole, B. A. et al. (2012). *Lake Michigan: Analysis of Waves and Water Levels*, U.S. Army Corps of Engineers, TR-XX-12

Ministres responsables de la sécurité civile (2017). *Un cadre de sécurité civile pour le Canada*, Troisième édition. Disponible sur <https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrscs/pblctns/2017 mngmnt frmwrk/2017 mrgnc mngmnt frmwrk fr.pdf>

Moin, S. M. A. et Shaw, M.A. (1985). *Regional Flood Frequency Analysis for Ontario Streams: Volume 1, Single Station Analysis and Index Method*. Inland Waters Directorate, Environment Canada, Burlington.

Moin, S. M. A. et Shaw, M. A. (1986). *Regional Flood Frequency Analysis for Ontario Streams: Volume 2, Multiple Regression Method*. Inland Waters Directorate, Environment Canada, Burlington

Murphy, E. et Khaliq, M. N. (2017). *Input to Canadian National Guideline for Flood Hazard Mapping: Coasts and Lakes. Technical Report (National Research Council of Canada. Ocean, Coastal and River Engineering), no. OCRE-TR-2017-005*. Disponible sur <https://doi.org/10.4224/40000374>

Murphy, E., Lyle, T., Wiebe, J., Hund, S., Davies, M. et Williamson, D. (2020). *Coastal Flood Risk Assessment Guidelines for Building and Infrastructure Design: Supporting Flood Resilience on Canada's Coasts*. Disponible sur <https://doi.org/10.4224/40002045>

Nadal-Caraballo, N. C., Melby, J. A., and Ebersole, B. A., (2012). *Lake Michigan: Storm Sampling and Statistical Analysis Approach*. U.S. Army Corps of Engineers, TR-XX-12

Nayak, P.C., Sudheer, K.P., Rangan, D.M. et Ramasastri, K.S. (2004). A neuro-fuzzy computing technique for modeling hydrological time series, *Journal of Hydrology*, 291: 52-66.

NDMP (2021). *National Disaster Mitigation Program (NDMP)*. Disponible sur <https://www.publicsafety.gc.ca/cnt/mrgnc mngmnt/dsstr prvntn mtgtn/ndmp/index>

NOAA (2017). *mPING Reporting : Crowdsourcing Weather Reports*. Disponible sur <https://mping.nssl.noaa.gov/>

NOAA (2021a). *Great Lakes Environmental Research Laboratory*. Disponible sur glrl.noaa.gov

NOAA (2021b). *National Data Buoy Center*. Disponible sur ndbc.noaa.gov

NRCan (2017). *Report a Felt Earthquake*. Disponible sur <http://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/dyfi lavr/index en.php>

NRCan (2018). *Case Studies on Climate Change in Floodplain Mapping (Volume 1)*. Disponible sur https://publications.gc.ca/collections/collection_2019/rncan nrcan/M113 3 5 2018 1 eng.pdf

- NRCan (2019). *National Hydrographic Network*. Disponible sur https://open.canada.ca/data/en/dataset/a4b190fe_e090_4e6d_881e_b87956c07977
- NRCan (2021). *High Resolution Digital Elevation Model (HRDEM) - CanElevation Series*. Disponible sur https://open.canada.ca/data/en/dataset/957782bf_847c_4644_a757_e383c0057995
- NRCan et PSC (2018). *Federal airborne LiDAR data acquisition guideline*. Disponible sur <https://geoscan.nrcan.gc.ca/starweb/geoscan/servlet.starweb?path=geoscan/fulle.web&search1=R=308382>
- NRCan et PSC (2019). *Federal geomatics guidelines for flood mapping*. Disponible sur <https://publications.gc.ca/site/eng/9.893853/publication.html>
- NSERC (2020). *Floodnet Regional Frequency Analysis (RFA)*. Disponible sur GitHub at NSERC Floodnet-Research Outcomes-Tools <https://www.nsercfloodnet.ca/tools>
- Ontario Ministry of Natural Resources (1982). *HYDSTAT Computer Program for Univariate and Multivariate Statistical Applications*. Conservation Authorities and Water Management Branch.
- Ontario Ministry of Natural Resources (1989). *Great Lakes System Flood Levels and Water Related Hazards*. Conservation Authorities and Water Management Branch.
- Ontario Ministry of Natural Resources (2001). *Great Lakes - St. Lawrence River System and Large Inland Lakes. Technical Guide for Flooding, Erosion and Dynamic Beaches*. Watershed Science Centre, ISBN 0-9688196-1-3
- Pariset, E., Hausser, R., et Gagnon, A., (1966). Formation of ice covers and ice jams in rivers, Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, November 1966. physical descriptions, and research needs. *Canadian Journal Civil Engineering*, 30: 13-127.
- PCIC (2021). *Statistically Downscaled Climate Scenarios*. Disponible sur <https://www.pacificclimate.org/data/statistically-downscaled-climate-scenarios>
- Pender, G. (2006). Briefing: Introducing Flood Risk Management Research Consortium. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management*, 159 (WM1): 3-8.
- Pilon, P J. et Harvey, K. D., (1993). *Consolidated Frequency Analysis (CFA) DOS version* Disponible sur Institute for Watershed Science – Software <https://www.trentu.ca/iws/software>
- Rajulapati C., Tesemma, Z., Shook, K. Papalexiou, S. et Pomeroy, J. W. (2020). *Climate Change in Canadian Floodplain Mapping Assessments* Centre for Hydrology Report No. 17 Disponible sur https://researchgroups.usask.ca/hydrology/documents/reports/chrpt17_climate_change_in_canadian_floodplain_mapping_assessments_finalreport_30april2020_final.pdf
- Razavi, S., Sheikholeslami, R., Gupta, H. V., et Haghnegahdar, A., (2019). VARS-TOOL: A toolbox for comprehensive, efficient, and robust sensitivity and uncertainty analysis. *Environmental Modelling and Software* 112: 95-117. Disponible sur <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815218304766>
- Razmi, A., Golian, S., et Zahmatkesh, Z. (2017). Non-Stationary Frequency Analysis of Extreme Water Level: Application of Annual Maximum Series and Peak-over Threshold Approaches. *Water Resources Management* 31: 2065–2083.
- Relevés hydrologiques du Canada (2023). *Niveau d'eau et débit*. Disponible sur www.wateroffice.ec.gc.ca

Rogers, J., Hamer, B., Brampton, A., Challinor, S., Glennerster, M., Brenton, P., et Bradbury, A., (2010). *Beach Management Manual* (second edition). CIRIA C685, London.

Roy, P., Fournier, É. et Huard, D. (2017). *Standardization Guidance for Weather Data, Climate Information and Climate Change Projections*. Montreal, Ouranos. 52 pp. + Appendixes.

Rokaya, P., Budhathoki, S., et Lindenschmidt, K.-E. (2018). Trends in the timing and magnitude of ice-jam floods in Canada. *Scientific Reports*. 8(1): 5834. Disponible sur <https://www.nature.com/articles/s41598-018-24057-z>

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., & Liu, H. (2010). *The NCEP climate forecast system reanalysis*. Bulletin of the American Meteorological Society, 91(8), 1015-1058.

Sangal, B.P. (1981). A Practical Method for Estimating Peak from Mean Daily Flows with Application to Streams in Ontario, Technical Bulletin No. 122, National Hydrology Research Institute, Inland Waters Directorate, Ottawa.

She, Y. T. et Hicks, F. (2005). Incorporating ice effects in ice jam release surge models. CGU HS Committee on River Ice Processes et the Environment. *13th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers*, Hanover, NH, pp. 470-484.

Shen, H. T. (2010). Mathematical modeling of river ice processes. *Cold Regions Science et Technology*, 62(1), 3-13. Disponible sur <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165232X10000339>

Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., et Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, et runup. *Coastal Engineering* 53, Elsevier, 573-588.

Strathcona Regional District (2021). *Tsunami Resources – Northwest Vancouver Islet Tsunami Mapping*. Disponible sur <https://srd.ca/services/emergency-preparedness/tsunami-resources-maps/>.

TELEMAC- MASCARET (2021). *Telemac v.8 p2*. Disponible sur <http://www.opentelemac.org/index.php/download>

TUFLOW (2020). *Flood, Urban Stormwater & Coastal Simulation Software*. Disponible sur <https://www.tuflow.com/products/>

UK Environmental Agency (2019). *Guidance - Flood risk management plans (FRMPs): responsibilities*, Disponible sur <https://www.gov.uk/guidance/flood-risk-management-plans-frmps-responsibilities>

USACE (2002). *Coastal Engineering Manual*. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (in 6 volumes).

USACE (2019). *Statistical Software Package. HEC-SSP*. Disponible sur <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ssp/>

USACE (2021). *HEC-RAS v.6*. Disponible sur <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

USACE (2021). *Wave Information Study*. Disponible sur wis.usace.army.mil

USGS (2017). *Verified Roughness Characteristics of Natural Channels*. Disponible sur <https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/index.htm>

USGS (2019). *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency Bulletin 17C*. U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey. Reston, Virginia. Draft: May 2019. Accessed 29 September 2021.

Vogel, R. M. (2017), Stochastic watershed models for hydrologic risk management, Water Security, Volume 1, July, pages 28-35.

Warren, F. J., et Lemmen, D. S. (2014). *Canada in a Changing Climate: Sector Perspectives on Impacts and Adaptation*. Government of Canada, Ottawa.

Wasko, C., Westra, S., Nathan, R., Orr, H. G., Villarini, G., Villabos Herrera, R., et Fowler, H. J., (2021). Incorporating climate change in flood estimation guidance. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 379: 20190548. Disponible sur <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0548>

Wilby, R. L., Dawson, C. W., et Barrow, E. M. (2002). SDSM – a Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts. *Environmental Modelling and Software* 17: 147-59.

WMO (2009). Manual on estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP), ISBN 978-926-3101045-9, WMO No. 1045, 291 pp. Disponible sur https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=1302#.YvuZXi7MI2x

WMO (2011). *Manual on Flood Forecasting and Warning* WMO-No. 1072. 2011 Edition.

WMO (2021). *The Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019)*. Disponible sur https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21930#.YUtCpn0pDIW

Zaerpour, M., Papalexiou, S. M., et Nazemi, A. (2021). Informing Stochastic Streamflow Generation by Large-Scale Climate Indices at Single and Multiple Sites. *Advances in Water Resources*: 156.

13.0 BIBLIOGRAPHIE

Adams, B. J. & Howard, C. D. D. (1986). Design Storm Pathology, Canadian Water Resources Journal, 11:3, 49-55, DOI: 10.4296/cwrj1103049

Bishop, C. T., & Donelan, M. A. (1989). *Wave prediction models*. Elsevier Oceanography Series (Vol. 49, pp. 75-105). Elsevier.

British Columbia Ministry of Environment (2009). *Manual of British Columbia Hydrometric Standards*. Prepared by the Science and Information Branch for the Resources Information Standards Committee, Version 1.0.

Brunner, G. W. (2022). HEC-RAS, River Analysis System, HEC-RAS User's Manual, Version 6.2 the Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, California 721 pp.

DHI (2021). *MIKE+*, *MIKE FLOOD*, *MIKE21/3*. Disponible sur <https://www.mikepoweredbydhi.com>

Donelan, M. A. (1980). *Similarity theory applied to the forecasting of wave heights, periods, and directions*. Proceedings of the Canadian Coastal Conferences, p. 47-61, National Research Council, Ottawa.

EGBC (2017). *Flood Mapping in British Columbia*. Disponible sur <https://www.egbc.ca/getmedia/8748e1cf-3a80-458d-8f73-94d6460f310f/APEGBC-Guidelines-for-Flood-Mapping-in-BC.pdf.aspx>

FEMA (2016a). *Coastal Flood Frequency and Extreme Value Analysis*. Guidance Document 76.

FEMA (2020). *Hydraulics: Two-Dimensional Analysis Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping*.

Fernandes, R. A., Bariciak, T., Prévost, C., Yao, H., Field, T., McConnell, C., Luce, J. et Metcalfe, R. (2019). *Method for measurement of snow depth using time-lapse photography*. Geomatics Canada open file 47, NRCAN. Disponible sur https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/rncan/nrcan/m103_3/M103_3_47_2019_eng.pdf

Fernandes R. A., Prévost, C., Canisius, F., Leblanc, S.G., Maloley, M., Oakes, S., Holman, K., et Knudby, A. (2018). Monitoring snow depth change across a range of landscapes with ephemeral snowpacks using structure from motion applied to lightweight unmanned aerial vehicle videos. *The Cryosphere*, 12: 3535–3550. Disponible sur <https://doi.org/10.5194/tc-12-3535-2018>

Hendrick, A. R. et Marshall, H.-P. (2014). Automated snow depth measurements in avalanche terrain using time lapse photograph, *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, Banff, 836-842.

Hughes, S. A. (1993). Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 7. World Scientific.

Hydraulic modelling: best practice (model approach) Updated (2021). Disponible sur <https://www.gov.uk/government/publications/river-modelling-technical-standards-and-assessment/hydraulic-modelling-best-practice-model-approach>

INRS-ETE (2008). HyFran. Disponible sur Water Resources Publications (INRS-ETE) <https://www.wrpllc.com/books/HyfranPlus/indexhyfranplus3.html>

Intergovernmental Oceanographic Commission (2016). *IOC Manuals and Guides No. 14 – Manual on Sea Level Measurement and Interpretation* [online] Disponible sur http://ioc.unesco.org/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=6036

Khaliq, M. N. et Attar, A. (2017). Assessment of Canadian floodplain mapping and supporting datasets for codes and standards, Technical Report (National Research Council of Canada. Ocean, Coastal and River Engineering), no. OCRE-TR-2017-026, 111 pp.

Khaliq, M.N et Piche, S. (2017). *2D Hydrodynamic Models for Floodplain Mapping: Review of Selected Modelling Packages* Technical Report No. OCRE-TR-2017-004, Document Version 1.2

Klemeš, V. (1987). Hydrological and engineering relevance of Flood Frequency Analysis. in: Singh V.P. (Ed.) *Hydrologic Frequency Modeling*. Reidel, Dordrecht. pp. 1-18.

NRCan (2015). *Risk-based land-use guide: safe use of land based on hazard risk assessment*. Geological Survey of Canada Open File 7772. Disponible sur <https://publications.gc.ca/site/eng/9.847514/publication.html?wbdisable=true>

NRCan (2017). *Way forward for risk assessment tools in Canada*. Geological Survey of Canada Open File 8255. Disponible sur https://publications.gc.ca/collections/collection_2017/nrcan/nrcan/M1832/M183-2-8255-eng.pdf

Oakes, S., Fernandes, R. A., Canisius, F. (2016). Protocol for photographic survey of snow depth stakes in Support of CCMEO Snow Depth from UAV Activities, *CCRS Open File 28*, 9pp

Ontario Provincial Mapping Unit, (2017). *User Guide for Ontario Flow Assessment Tool (OFAT)*. Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry, Corporate Management and Information Division, Mapping and Information Resources Branch, Provincial Mapping Unit. 79pp.

Parajka, J., Haas, P., Kirnbauer, R., Jansa, J., & Blöschl, G., (2012). Potential of time-lapse photography of snow for hydrological purposes at the small catchment scale. *Hydrological Processes*. vol. 26-22:3327– 3337. Disponible sur <https://doi.org/10.1002/hyp.8389>

Partnership for Water Sustainability (2021). *Qualhymo Energy*. Disponible sur <https://waterbalance.ca/tool/qualhymo/>

Pirazzini, R., Leppaneen, L., Picard, G., Lopez-Moreno, J. I., Marty, C., Macelloni, G., Kontu, A., von Lerber, A., Tanis, C. M., Schneebeli, M., de Rosnay, P., et Arslan, A. N. (2018). European in-situ snow measurements: practices and purposes. *Sensors* 2018, vol. 18-7 2016. Disponible sur <https://doi.org/10.3390/s18072016>

Québec MELCCC (2021). Water Level and Flow Rates. Disponible sur https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/index_en.htm

Smith, C.D., Yang, D., Ross, A., et Barr, A., (2018). The Environment et Climate Change Canada solid precipitation intercomparison data from Bratt's Lake et Caribous Creek, Saskatchewan, *Earth System Science Data Discussions*, 11:1-17. Disponible sur <https://essd.copernicus.org/articles/11/1337/2019/>

USACE (2021). *Wave Information Study*. Disponible sur wis.usace.army.mil

Walker, J., Murphy, E., Ciardulli, F., et Hamm, L. (2014). On the reliance on modelled wave data in the Arabian gulf for coastal et port engineering design. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), p.28.

ANNEXE A : EXIGENCES RELATIVES AUX RAPPORTS TECHNIQUES

L'annexe A énumère les exigences relatives aux rapports techniques sur chaque aspect d'une étude de délimitation des aléas d'inondation. Les exigences détaillées énumérées ici peuvent être incluses dans un cahier des charges et doivent être modifiées par l'organisation pour être spécifiques au projet.

Partie A : Enquête et données de base

- 1) Discussion
 - a) Étude sur le terrain de la bathymétrie du canal et de la topographie de la zone inondable, des structures hydrauliques et de contrôle des crues, des repères et des lignes des hautes eaux
 - b) Méthode de collecte et liste de tous les équipements de terrain utilisés, nom et version
 - c) Datum, époque, géoïde
 - d) Données sur la ligne des hautes eaux (date, lieu, qualité)
 - e) Source de lidar, orthophotographie, imagerie aérienne
 - f) Source de bathymétrie
 - g) Source, disponibilité et emplacement des données hydrométriques (débit, niveau d'eau, aire de drainage au-dessus de la jauge)
 - h) Source, disponibilité et emplacement des données météorologiques (précipitations sous forme de pluie ou de neige, températures, jour sans gel, début de fonte, propriétés statistiques)
 - i) Source et disponibilité des données sur l'occupation des terres et les sols
 - j) Données historiques sur les embâcles (dates, emplacement des embâcles, étendue des inondations, etc.)
 - k) Données historiques sur les crues (dates, lieu, étendue des crues, etc.)
- 2) Conclusions et recommandations
 - a) Liste des personnes techniques qualifiées ayant travaillé sur le projet;
 - b) Seau professionnel/licence et signature de l'arpenteur-géomètre/chargé de projet;
 - c) Liste de tous les logiciels utilisés, nom et version;
 - d) Limitations (y compris les clauses de non-responsabilité);
 - e) Références.

Partie B : Analyse hydrologique en eau libre

- 1) Résumé
 - a) Informations générales
 - b) Études hydrologiques précédentes
 - c) Historique des crues en eau libre (dates, ampleur du débit)
 - d) Inspection des stations et registres de jaugeage et météorologiques
 - e) Méthodologie utilisée pour déterminer les paramètres du bassin versant
 - f) Facteurs (lacs, réservoirs, occupation des terres, etc.) influençant le ruissellement
 - g) Traversées de rivières (ponts, remblais) avec effet de stockage important
 - h) Justification des méthodes utilisées pour déterminer et vérifier les débits de conception pour les conditions existantes et futures

- i) Évaluation des géorisques (p. ex., inondations de débits et risque de changement de canal)
- 2) Méthodologie pour l'analyse hydrologique
- a) Option d'analyse fréquentielle des crues (AFC)
 - i) Choix de la méthode de sélection du débit instantané maximal annuel (MA) ou des pointes dépassant un seuil (POT)
 - ii) Conversion des débits contrôlés aux conditions naturelles (naturalisées)
 - iii) Tests statistiques sur les échantillons de données avant les analyses fréquentielles pour l'indépendance, le caractère aléatoire et l'homogénéité
 - iv) Si une séparation des événements de pointe est requise, dans ce cas, la technique de recombinaison éventuelle
 - v) Comment l'étude traite les données non stationnaires
 - vi) Extension des données de débit
 - vii) Transfert d'emplacement
 - viii) Choix de l'AFC ou l'AFRC à site unique
 - ix) Choix de la distribution de fréquence parmi toutes celles évaluées, de la méthode d'ajustement et des paramètres pour chaque distribution évaluée
 - x) Résultats graphiques et numériques pour les quantiles d'inondation et les limites de confiance
 - xi) Source d'hydrologie régionale utilisée comme base pour une AFC;
 - xii) Tous les coefficients de régression et les équations primaires et secondaires pour les quantiles d'inondation
 - xiii) Tout ajustement pour des changements naturels et anthropiques qui ont été appliqués pour tenir compte de facteurs tels qu'une occupation différente des sols ou de développement futur
 - xiv) Conversion aux conditions contrôlées selon les procédures d'exploitation probables du réservoir
 - xv) Toute génération d'hydrogrammes synthétiques pour les pointes de conception
 - xvi) Comparaison des résultats avec l'analyse par d'autres méthodes, estimations précédentes ou événements enregistrés
 - xvii) Incertitudes des résultats
 - b) Option modèle hydrologique
 - i) Programme(s) informatique(s) utilisé(s)
 - ii) Techniques de routage utilisées
 - iii) Toute entrée en amont du modèle
 - iv) Données utilisées pour le calage (hydrogrammes observés, quantités de précipitations, distributions spatiales et temporelles des précipitations, conditions d'humidité antérieures, températures, autres paramètres météorologiques, paramètres d'infiltration du sol, etc.)
 - v) Analyse de sensibilité
 - vi) Calage des paramètres du modèle
 - vii) Justification des valeurs des paramètres calibrés
 - viii) Validation du modèle
 - ix) Résultats du modèle
 - x) Comparaison des résultats avec l'analyse par d'autres méthodes, estimations précédentes ou événements enregistrés
 - xi) Incertitude des résultats

- c) Considérations relatives aux changements climatiques et à l'occupation du sol
 - i) Scénarios et modèles climatiques retenus
 - ii) Sources des changements d'occupation des sols et des étendues ainsi que la nature des changements
 - iii) Méthode de réduction d'échelle du modèle climatique utilisé
 - iv) Vérification du ou des modèles hydrologiques utilisés
 - v) Données utilisées (quantités et précipitations observées et projetées, distributions spatiales et temporelles des précipitations, températures observées et projetées, autres paramètres d'infiltration du sol, etc.)
- d) Analyse d'incertitude
 - i) Analyse de sensibilité
 - ii) Correction de biais incluant les valeurs des paramètres calés et validés
 - iii) Résultats du modèle
 - iv) Comparaison des résultats avec l'analyse par d'autres méthodes
 - v) Incertitude des résultats
- 3) Conclusions et recommandations
 - e) Ampleur des débits de conception pour les conditions existantes et futures
 - f) Valeurs d'incertitude associées aux débits de conception
 - g) Liste des personnes techniques qualifiées qui ont travaillé sur le projet
 - h) Seau professionnel/licence et signature du chargé/ingénieur de projet
 - i) Liste de tous les logiciels utilisés, nom et version
 - j) Limitations (y compris les clauses de non-responsabilité)
 - k) Recommandations pour une étude future, y compris l'horizon de future planification, nécessitant la prochaine étude de délimitation des aléas d'inondation
 - l) Références aux autres rapports actuels associés à l'étude, aux rapports antérieurs et aux rapports sur les techniques hydrologiques utilisées

Partie C : Hydraulique

- 1) Résumé
 - a) Informations générales
 - b) Analyse hydraulique précédente
 - c) Étude des mécanismes d'inondation
 - d) Enquête associée et rapport de données de base
 - e) Source des profils de niveaux d'eau observés
- 2) Méthodologies et hypothèses
 - a) Caractéristiques du canal et de la zone inondable
 - b) Approche pour les digues
 - c) Stabilité géomorphique
 - d) Considérations sur les embâcles
- 3) Programme(s) informatique(s) utilisé(s) pour l'analyse hydraulique
- 4) Modélisation hydraulique
 - a) Point de contrôle hydraulique
 - i) Élévation de la surface de l'eau de départ et conditions aux limites
 - ii) Profil de la pente du canal
 - iii) Sélection des routines de calcul de ponts
 - iv) Effets des traversées de rivières et des affluents
 - b) Résultats de l'analyse de sensibilité

- i) Emplacements avec plus d'impact
- ii) Portée des perturbations
- c) Vérification des paramètres du modèle
 - i) Données utilisées pour le calage et la validation
 - ii) Valeurs de rugosité et de coefficient de perte pour divers débits élevés enregistrés
 - iii) Valeurs de rugosité et de coefficient de perte pour la crue de conception
- d) Profils de surface de l'eau des débits de conception
 - i) Niveaux d'inondation déterminés par l'analyse du tracé du réservoir, si nécessaire
 - ii) Niveaux d'inondation déterminés par l'analyse de rupture de barrage, si nécessaire
 - iii) Niveaux et vitesses de l'inondation basés sur la modélisation 1D ou 2D
 - iv) Modifications manuelles de l'étendue des inondations
- e) Zones inondables
 - i) Urbain
 - ii) Rural, agricole
- f) Zones de débordement
 - i) Naturel/artificiel
 - ii) Volume du débit de débordement
 - iii) Vitesses de débordement
 - iv) Impact sur les débits en aval et les niveaux de crue
 - v) Étendue, profondeur et vitesse de l'inondation due au débordement
- 5) Plage d'incertitude des résultats hydrauliques
- 6) Conclusions et recommandations
 - a) Étendue, profondeur, vitesse, probabilité et incertitude de l'inondation de conception
 - b) Liste des personnes techniques qualifiées ayant travaillé sur le projet
 - c) Seau professionnel/licence et signature du chargé/l'ingénieur de projet
 - d) Liste de tous les logiciels utilisés, nom et version
 - e) Limitations (y compris les clauses de non-responsabilité)
 - f) Recommandations pour une étude future, y compris l'horizon de future planification, nécessitant la prochaine étude de délimitation des aléas d'inondation
 - g) Les références aux autres rapports en cours associés à l'étude, aux rapports antérieurs et aux rapports sur les techniques hydrauliques utilisées

Partie D : Embâcle (le cas échéant)

- 1) Résumé
 - a) Contexte
 - i) Informations sur les analyses de glace précédentes
 - ii) Mécanismes des inondations passées causées par les glaces
 - iii) Enquête associée et rapport sur les données de base
 - b) Méthodologies et hypothèses
 - i) Analyse niveau-fréquence des hauts niveaux d'eau historiques liés aux embâcles, OU
 - ii) Hypothèses, paramètres et résultats de l'analyse synthétique de la fréquence des niveaux
 - iii) Analyse hydraulique de la glace – relations niveau-débit sous la glace, coefficients de rugosité et autres paramètres
 - c) Programme(s) informatique(s) utilisé(s) pour l'analyse de la glace
 - d) Incertitudes des résultats
 - e) Comment les changements climatiques affecteront-ils probablement les embâcles sur le site étudié

- 2) Analyse fréquentielle des crues (AFC) des niveaux d'eau affectés par la glace
 - a) Choix de la méthode de sélection du maximum annuel (MA) ou des pointes dépassant un seuil (POT)
 - b) Conversion des niveaux d'eau contrôlés aux conditions naturelles
 - c) Tests statistiques sur les échantillons de données avant les analyses fréquentielles pour l'indépendance, le caractère aléatoire et l'homogénéité
 - i) Si une séparation des événements de pointe est requise, dans ce cas, la technique de recombinaison éventuelle
 - d) Comment l'étude traite les données non stationnaires
 - e) Prise en compte des niveaux d'eau limites de conception non systématiques
 - f) Choix d'AFC à site unique, d'AFRC ou d'AFC synthétique
 - g) Choix de la distribution de fréquence parmi toutes celles évaluées, de la méthode d'ajustement et des paramètres de distribution pour chaque distribution évaluée
 - h) Résultats graphiques et numériques pour les quantiles d'inondation et les limites de confiance
 - i) Tous les coefficients de régression et les équations primaires et secondaires pour les quantiles d'inondation des AFC synthétiques
 - j) Tout ajustement pour des changements naturels et anthropiques qui ont été appliqués pour tenir compte de facteurs tels qu'une occupation différente des sols ou de développement futur
 - k) Conversion aux conditions contrôlées selon les procédures d'exploitation probables du réservoir
 - l) Comparaison des résultats avec l'analyse par d'autres méthodes, des estimations antérieures ou des événements enregistrés
 - m) Incertitude des résultats
- 3) Courbes niveau-débit sous la glace
 - a) Choix des événements observés utilisés pour générer des courbes
 - b) Ajustement des événements observés aux courbes sélectionnées
 - c) Conversion des niveaux PDA des débits de l'AFC en débits PDA
- 4) Modélisation hydraulique
 - a) Points de contrôle hydrauliques
 - b) Élévation de la surface de l'eau de départ et conditions aux limites
 - c) Sélection des routines de calcul de ponts
 - d) Effets des traversées de rivières et des affluents
 - e) Paramètres de la glace
 - i) Coefficient de rugosité de la glace supérieure
 - ii) Coefficients des embâcles
 - f) Résultats de l'analyse de sensibilité
 - g) Paramètres du modèle de vérification
 - i) Données utilisées pour le calage et la validation
 - ii) Valeurs de rugosité et de coefficient de perte pour divers écoulements fortement influencés par les glaces enregistrées
 - iii) Valeurs de rugosité et de coefficient de perte pour la crue de conception
 - h) Profils de surface de l'eau des débits de conception
 - i) Niveaux d'inondation déterminés par l'analyse du transport de l'eau dans le réservoir, si nécessaire
 - ii) Niveaux d'inondation déterminés par l'analyse de rupture de barrage, si nécessaire

- iii) Niveaux et vitesses de l'inondation basés sur la modélisation 1D ou 2D
 - i) Zones inondables
 - i) Urbains
 - ii) Rural, agricole
 - j) Zones de débordement
 - i) Naturel/artificiel
 - ii) Volume du débit de débordement
 - iii) Vitesses de débordement
 - iv) Impact sur les débits en aval et les niveaux de crue
 - v) Étendue, profondeur et vitesse de l'inondation due au débordement
 - vi) Plage d'incertitude des résultats hydrauliques
- 5) Conclusions et recommandations
- a) Niveaux d'eau de conception, étendue des inondations, vitesses et probabilités d'évènements influencés par les embâcles
 - b) Incertitudes associées aux analyses des embâcles
 - c) Délimitation des aléas d'inondation par embâcle
 - d) Liste des personnes techniques qualifiées qui ont travaillé sur l'approche de l'analyse des glaces pour le projet
 - e) Seau professionnel/licence et signature de l'ingénieur/gestionnaire de projet
 - f) Liste de tous les logiciels utilisés, nom et version
 - g) Recommandations pour une étude future, y compris l'horizon de future planification, nécessitant la prochaine étude de délimitation des aléas d'inondation
 - h) Attentes face aux changements climatiques
 - i) Limitations (y compris les clauses de non-responsabilité)
 - j) Les références aux autres rapports en cours associés à l'étude, aux rapports antérieurs et aux rapports sur les techniques hydrologiques et hydrauliques utilisées.

Partie F : Effets côtiers (le cas échéant)

- 1) Résumé
 - a) Contexte
 - b) Informations sur les analyses côtières précédentes
 - c) Mécanismes des inondations côtières passées
- 2) Enquête associée et rapport de données de base
- 3) Méthodologies et hypothèses
 - a) Hypothèses, approches, données et résultats relatifs aux ondes de tempête
 - b) Hypothèses, approches, données et résultats de la remontée des vagues
 - c) Justification du taux d'augmentation du niveau de la mer choisi, le cas échéant
 - d) Méthodes de probabilité conjointe et résultats
 - e) Programme(s) informatique(s) utilisé(s) dans l'analyse
- 4) Conclusions et recommandations
 - a) Niveaux d'eau de conception, étendue des inondations, vitesses de probabilités de délimitation des aléas d'inondation côtière
- 5) Incertitudes dans les délimitations des aléas d'inondation côtière
 - a) Liste des personnes techniques qualifiées qui ont travaillé sur l'approche de l'analyse côtière pour le projet

- b) Seau professionnel/licence et signature de l'ingénieur/gestionnaire de projet
- c) Liste de tous les logiciels utilisés, nom et version
- d) Recommandations pour une étude future, y compris l'horizon de planification futur, nécessitant la prochaine étude de délimitation des aléas d'inondation
- e) Attentes des impacts des changements climatiques
- f) Limitations (y compris les clauses de non-responsabilité)
- g) Les références aux autres rapports en cours associés à l'étude, aux rapports antérieurs et aux rapports sur les techniques hydrologiques, hydrauliques et hydrodynamiques utilisées.

Partie G : Cartes en annexe

- 1) Une carte topographique à grande échelle en format numérique montrant :
 - a) Courbes de niveaux et élévations ponctuelles de la zone inondable, du canal et de la côte
 - b) Étendue de l'étude
- 2) Une carte topographique à petite échelle en format numérique montrant :
 - a) Limites des bassins versants et des sous-bassins versants
 - b) Stations météorologiques
 - c) Stations hydrométriques, s'appliquant à la région étudiée dans l'AFRC
 - d) Couverture terrestre dans le bassin versant (conditions existantes et futures)
 - e) Types de sols dans le bassin versant
 - f) Sections transversales du modèle et/ou zone de maillage du modèle hydraulique
 - g) Profils observés de la surface de l'eau aux débits élevés
 - h) Hydrogrammes observés, utilisés pour générer des hydrogrammes de conception
 - i) Profil(s) de la surface de l'eau des débits de conception indiquant les profondeurs, les vitesses et l'étendue des inondations
 - j) Une carte topographique à petite échelle en format numérique montrant les emplacements passés des inondations et/ou des embâcles
 - k) Autres cartes ou diagrammes de données pertinents
- 3) Analyse des images aériennes historiques

Partie H : Schémas en annexes

- 1) Option modèle hydrologique
 - a) Schéma de principe du modèle
 - b) Hydrogrammes observés et simulés dans les analyses de calage et de validation
- 2) Hydraulique
 - a) Option AFC
 - b) Courbes de probabilité d'un site unique ou d'une analyse régionale par rapport aux données tracées
 - c) Limites de confiance
- 3) Embâcles (le cas échéant)
 - a) Relation niveau-débit sous forme de courbe
- 4) Autres diagrammes de données pertinents
- 5) Fiches techniques des ponts et autres ouvrages hydrauliques

- 6) Tracés des coupes transversales et/ou cartes du MNT et de la bathymétrie montrant les nœuds de la grille et du maillage

Partie I : Tableaux en annexes

- 1) Données hydrologiques, météorologiques et hydrométriques
 - a) Origine
 - b) Lieu, numéro d'identification, nom
 - c) Années collectées
- 2) Occupation du sol et taux d'infiltration dans le sol (option modèle hydrologique)
- 3) Autres paramètres pertinents pour l'étude
- 4) Option AFC
 - a) Résultats de l'analyse fréquentielle, des quantiles et des limites de confiance
 - b) Toutes les équations de transfert et de corrélation utilisées sous forme de tableau
 - c) Tous les coefficients de régression et les équations primaires et secondaires pour les quantiles d'inondation sous forme de tableau
- 5) Option modèle hydrologique
 - a) Données paramétriques utilisées dans le modèle
 - b) Données météorologiques utilisées
 - c) Résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres
 - d) Périodes de données utilisées dans les étapes de calage et de validation
 - e) Résultats de calage et de validation
 - f) Paramètres du bassin versant calculés et calés pour les conditions existantes et futures
 - g) Comparaison des débits par différentes méthodes pour divers événements de débit de période de retour
 - h) Ampleur des débits de conception pour les conditions existantes et futures à divers points d'intérêt le long du cours d'eau
 - i) Valeurs d'incertitude associées aux débits de conception
 - j) Autres tableaux d'intérêt pour l'analyse hydrologique
- 6) Résultats de la modélisation hydraulique
 - a) Hydrauliques, étendues, vitesses et niveaux d'eau observés aux endroits critiques
 - b) Résultats de l'analyse de sensibilité
 - c) Comparaison des résultats de calage et de validation avec les valeurs observées
 - d) Valeurs de rugosité et de coefficient de perte pour les débits de conception
 - e) Étendues, vitesses et niveaux d'eau de conception aux endroits critiques
- 7) Tout tableau pertinent de données ou résultats de l'analyse
- 8) Embâcle (le cas échéant)
 - a) Détails des inondations liées aux embâcles passés : dates, emplacement des embâcles, étendue de l'inondation, etc.
 - b) Tableau niveau-fréquence
- 9) Détails des inondations côtières passées : dates, lieu, étendue des inondations, etc.

Partie J : Autres annexes

- 1) Évaluation en eau libre
 - a) Données d'entrée et sortie informatique de toute AFC
 - b) Une carte topographique à grande échelle du bassin versant montrant les sous-bassins versants, les débits de surface et les longueurs de canaux utilisés à tout moment des calculs de temps de concentration, l'emplacement des coupes transversales de la vallée, les structures avec un stockage important
 - c) Calculs de divers paramètres du bassin versant (pente pondérée, temps de concentration, temps de montée, constante de récession, nombres de courbes, etc.), facteurs de réduction des précipitations, relations stockage-débit, analyses de régression et de corrélation
 - d) Données d'entrée et de sortie pour les analyses de sensibilité de toute analyse de modèle hydrologique
 - e) Données d'entrée et de sortie de l'analyse de calage et de validation d'une analyse de modèle
 - f) Données d'entrée et de sortie récapitulatives de toute analyse de modèle hydrologique
 - g) Résultats du MCR utilisés pour estimer les effets des changements climatiques
 - h) Calculs d'incertitude
- 2) Hydraulique
 - a) Calculs du niveau d'inondation basés sur l'analyse du transport de l'eau du réservoir pour les structures avec un important stockage en amont, le cas échéant
 - b) Données d'entrée et de sortie pour les analyses de sensibilité
 - c) Données d'entrée et de sortie des cycles finaux de calage et de validation
 - d) Données d'entrée et de sortie récapitulative des calculs hydrauliques
 - e) Tous les calculs pour l'analyse de la zone de débordement
 - f) Données d'entrée et de sortie de toute analyse de rupture de barrage
 - g) Photographies de toutes les structures
 - h) Photographies de la zone inondable à des tronçons représentatifs
 - i) Photographies des lignes des hautes eaux
- 3) Autres informations pertinentes