

GUIDE MÉTHODOLOGIQUE APPLICABLE À L'ÉTABLISSEMENT DES ZONES INONDABLES ET DE MOBILITÉ DES COURS D'EAU

VOLET TECHNIQUE ET SCIENTIFIQUE

ÉDITION 2025



Équipe de réalisation

Direction

Jean Francoeur, ing. M. Sc., directeur principal de l'expertise hydrique

Coordination

François Godin, ing. M. Sc.

Rédaction

Sarah Aubé-Michaud, M. Sc. géomorphologue
François Coderre, ing.
Stéphane Comtois, B. Sc. géomatique
Jean-François Cyr, ing. M. Sc.
Hind El Housni, Ph. D.
François Godin, ing. M. Sc.
Guillaume Jeanmoye-Turcotte, M. Sc. géogr., M. Sc. Eau
Mathieu Levasseur, B. Sc. géographie
Valérie Mathon-Dufour, M. Sc. géomorphologue
Gabriel Roy-Poulin, ing. M. Sc.
Chantal Rainville, coordonnatrice OPI
Richard Turcotte, ing. Ph. D.

Révision et validation des textes

François Godin, ing. M. Sc.
Adeline Bazoge, M. Sc. Env., directrice de l'hydrologie et de l'hydraulique
Jean Francoeur, ing. M. Sc., directeur principal de l'expertise hydrique
Renée Plamondon, M. Sc., directrice de l'aménagement et du milieu hydrique
Caroline Robert, directrice principale de la gouvernance de l'eau et de l'encadrement des inondations

Édition

Marie-Ève Després, conseillère en communication
Ariane Michaud-Gagnon, graphiste
Chrystiane Harnois, réviseure linguistique
Accessibilité Québec, mise en page et édition

Collaboration

Joëlle Bérubé, ing. M. Sc., Daniel Blais, B. Sc. géographie, Ursule Boyer-Villemare, Ph. D., Patricia Clavet, ing. M. Sc., Bakary Diakhaby, M. Sc. géographie, Catherine Frizzle, Ph. D., Catherine Gauthier, Brigitte Laberge, biologiste, M. Sc. Eau, Michael Laliberté-Grenier, urbaniste, M. ATDR, Audrey Lavoie, ing. M. Sc., Éric Levasseur, B. Sc. Géomatique, Édouard Mailhot, ing. M. Sc., Patricia Mathieu, tech. Géomatique, Véronique Parent-Lacharité, Clara Pelletier-Boily, M. Sc., Jasmine Pelletier-Dumont, Simon Rochette, ing. Ph. D., Françoise Tardif, ing. M. Sc., Michèle Tremblay, M. Sc. géographie

Un comité scientifique composé de 13 personnes principalement du monde de la recherche universitaire, gouvernementale et parapublique a été consulté dans le cadre de la rédaction du Guide. Des consultations ont aussi été réalisées avec des spécialistes ouvrant dans le monde municipal.

Coordination et rédaction

Cette publication a été réalisée par la Direction principale de l'expertise hydrique du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP).

Renseignements

Téléphone : 418 521-3830

1 800 561-1616 (sans frais)

Formulaire : www.environnement.gouv.qc.ca/formulaires/renseignements.asp

Internet : www.environnement.gouv.qc.ca

Dépôt légal – 2025

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

ISBN 978-2-555-01275-2 (PDF)

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec – 2025

Préface

Avec l'effet des changements climatiques et de l'occupation croissante du territoire québécois, l'importance sociétale de la gestion des risques liés aux inondations s'est accrue. Les conséquences des inondations et de la mobilité des cours d'eau ont récemment affecté de manière importante des milliers de citoyens, de bâtiments et d'infrastructures ainsi que le fonctionnement de la société et celui des écosystèmes, mettant en évidence la nécessité de mettre en place des outils actualisés pour la gestion des risques liés à la dynamique des cours d'eau. En informant préventivement les décideurs et la population sur les secteurs pouvant être touchés par ces événements, la cartographie des zones inondables et de mobilité s'avère un outil fondamental pour un aménagement durable et résilient du territoire. Le présent ouvrage intitulé *Guide méthodologique applicable à l'établissement des zones inondables et de mobilité des cours d'eau* rend dorénavant disponibles des balises de référence pour réaliser cette cartographie.

Malgré une apparente simplicité, la cartographie des zones inondables et de mobilité des cours d'eau nécessite de nombreux outils scientifiques essentiels à des délimitations de qualité qui tiennent compte de la diversité des processus opérants. Une zone inondable est un espace où il est probable qu'un lac ou un cours d'eau déborde. Similairement, une zone de mobilité est un espace où il est probable qu'un cours d'eau se déplace avec le temps. Le terme « probable », au cœur de ces deux concepts résolument tournés vers le futur, implique d'anticiper et d'évaluer ce qui pourrait survenir dans les années à venir. Face aux incertitudes inhérentes à toute anticipation, de nombreux défis scientifiques sont à relever pour garantir la précision et le réalisme de la cartographie.

Les données recueillies lors d'événements du passé, qui sont toujours trop peu abondantes, ont de toute évidence un rôle primordial à jouer dans la détermination de l'inondabilité et de la mobilité. Toutefois, ces données, si elles peuvent aider à connaître les secteurs qui ont été inondés ou ceux où la rivière s'est déplacée dans les dernières décennies, ne sont que l'une des assises pour cerner les secteurs à risque pour l'avenir. Une zone inondable ne se limite pas aux secteurs ayant été inondés, tout comme une zone de mobilité ne se limite pas à définir les anciens emplacements occupés par la rivière.

Pour cartographier, il est aussi nécessaire d'évaluer l'intensité future des inondations et de la mobilité en ayant recours à de grandes quantités de données géospatiales et chronologiques ainsi qu'à des modèles climatiques, hydrologiques, hydrauliques, hydro-sédimentaires et statistiques. Pour y parvenir, ces données et ces modèles doivent être mis en relation dans une chaîne d'opérations complexe conduisant à de nombreuses simulations numériques. À toutes les étapes de ce travail, des spécialistes doivent analyser les résultats pour faire des choix judicieux qui relient les hypothèses scientifiques utilisées au contexte d'application.

La description et la mise en relation de ces étapes de travail font partie des raisons qui justifient l'importance du Guide. Celui-ci permet d'établir une vision commune des principes, des méthodes et des outils à considérer. Il devient de ce fait un point focal pour la réalisation des cartographies, mais aussi pour imaginer les bonifications successives qui pourront s'ajouter. Le Guide ouvre la porte à l'intégration de nouvelles approches découlant des avancées de la science lorsque celles-ci atteignent un niveau de maturité qui les rendent aptes à passer de la recherche à l'application.

Ce processus est essentiel, car la majorité des étapes nécessaires à la détermination des zones inondables ont été profondément améliorées dans les dernières décennies, et cela est appelé à se poursuivre. Des méthodes d'acquisition massives de données reposant sur des technologies *in situ*, aéroportées ou en orbite, qui n'étaient peu ou pas disponibles au tournant du siècle, sont maintenant d'utilisation courante. L'hydrologie s'appuie dorénavant sur la combinaison d'observations hydrométriques et de simulations de modèles hydrologiques, pratiquement absents des travaux de la génération précédente, pour couvrir l'ensemble des tronçons des cours d'eau du Québec méridional, qu'ils soient jaugés ou non. Ceci ouvre notamment la possibilité de cartographies à l'échelle territoriale prenant en compte l'écoulement par bassin versant. À cela s'ajoute la capacité de considérer l'impact des changements climatiques sur les crues en se servant de scénarios élaborés par la communauté internationale et des capacités québécoises en modélisation hydroclimatique à une échelle adéquate pour notre territoire.

Par ailleurs, la modélisation hydraulique s'est aussi raffinée par l'effet de l'augmentation de la résolution des maillages et du recours fréquent à une modélisation bidimensionnel. De plus, la modulation de l'effort d'implantation des modèles hydrauliques en fonction des enjeux d'inondation rend maintenant possible leur application à l'échelle du bassin versant malgré l'étendue gigantesque du territoire d'intérêt. Et que dire de la cartographie des zones de mobilité qui, en deux décennies, est passée d'une science plus fondamentale à des processus opérationnels permettant de réaliser toutes les étapes menant à une cartographie.

Ces avancées scientifiques trouvent leur place à l'intérieur des balises du Guide et peuvent être mises en œuvre dès maintenant. Elles viennent répondre à des besoins existants comme celui d'améliorer le calcul des étendues d'inondation pour des crues de diverses récurrences, mais aussi à des besoins méthodologiques découlant de nouveautés quant à ce qui définit dorénavant les zones inondables et de mobilité. Ces nouveautés, comme la prise en compte des profondeurs d'eau pour établir l'intensité de l'aléa d'inondation ou la prise en compte des effets spécifiques des embâcles de glace, des ouvrages de protection et de l'atténuation des crues par les barrages sur ce même aléa, sont des catalyseurs qui incitent au développement d'une science appliquée en adéquation avec les besoins.

Bien qu'elles soient ancrées dans les efforts de la communauté internationale, les avancées réalisées au Québec doivent aussi beaucoup à des travaux de la communauté scientifique québécoise elle-même. Notre territoire immense, avec ses saisons contrastées où l'eau est omniprésente, pose des défis qui nous sont propres et auxquels nous avons su trouver des réponses. La Société Radio-Canada nous a identifié comme lauréats du prix du Scientifique de l'année 2024 à titre de représentants de la communauté de scientifiques ayant renouvelé la science qui balisera l'élaboration de la nouvelle génération des cartographies des zones inondables et de mobilité au Québec. Bien que nous en soyons très honorés, nous sommes surtout reconnaissants envers la grande communauté de chercheurs québécois qui, ensemble, ont permis ces pas de géant et avec qui nous tenons à partager les honneurs.

Au-delà des aspects scientifiques, le Guide est également le fruit de la coopération entre de nombreux acteurs en provenance du monde municipal, gouvernemental et universitaire, du secteur privé et d'autres organismes. Plusieurs années de collaboration entre un large spectre de spécialistes issus d'un horizon disciplinaire très vaste,

dont le génie, la climatologie, l'hydrologie, l'hydraulique, l'hydrogéomorphologie, la géomatique et les techniques de mesures sur le terrain, percolent à travers ce Guide. Une collaboration de cette envergure est remarquable et porteuse de grandes possibilités pour la suite.

Les défis environnementaux que nous affrontons aujourd'hui sont nombreux. La cartographie des zones inondables et de mobilité, réalisée de manière scientifique et rigoureuse, constitue un levier incontournable pour mener à bien ce chantier collectif sans précédent au Québec pour mieux s'adapter aux changements climatiques. Par son rôle dans l'encadrement pour la production de cartographies de qualité, le Guide soutient le développement d'une plus grande résilience des communautés riveraines. Il est un repère dans la confiance qui doit être associée à la cartographie. Nous vous invitons à le consulter avec attention. C'est la partie émergée d'un grand effort scientifique étalé sur plusieurs années.

Les lauréats du prix de Scientifique de l'année 2024
de la Société Radio-Canada*

Richard Turcotte, ing., Ph. D.

Thomas Buffin-Bélanger, Ph. D.

Mélanie Trudel, ing., Ph. D.

Louis-Philippe Caron, Ph. D.

*En janvier 2025, la Société Radio-Canada a décerné son 38^e prix du Scientifique de l'année à la communauté de scientifiques ayant renouvelé la science qui balisera l'élaboration de la nouvelle génération des cartographies des zones inondables et de mobilité au Québec. Le prix a été remis à quatre de ses représentants.

Versions

Version 0	17 juin 2024	Version projet - Consultation réglementaire;
Version 0.5	31 mars 2025	Version projet révisée;
Version 1.0	11 juin 2025	Dépôt officiel – Première édition;

Table des matières

Équipe de réalisation	iii
Liste des tableaux	10
Liste des figures	11
Liste des schémas	13
1. Introduction	15
2. Piliers de l'approche	17
2.1 Contexte	17
2.2 Pratique professionnelle responsable	17
2.3 Respect de principes directeurs	18
2.4 Exigences méthodologiques minimales	20
2.5 Disponibilité d'éléments de bonne pratique	20
3. Vue d'ensemble du processus de détermination des ZI et ZM	21
4. Caractérisation des bassins versants	25
4.1 Objectif et résultats attendus	25
4.2 Caractéristiques physiques des bassins versants et des cours d'eau	25
4.3 Niveau d'effort cartographique	27
4.4 Présence d'un potentiel d'influence du régime des crues par des sources de perturbations anthropiques	28
4.5 Présence d'un potentiel d'influence de l'hydraulique par des ouvrages de protection contre les inondations	29
5. Estimation d'une crue en hydrologie naturelle	30
5.1 Objectif et résultats attendus	30
5.2 Intégration des changements climatiques	31

5.3	Dynamique temporelle et instantanéité du phénomène de crue	33
5.4	Construction de la chronique hydrologique et analyses fréquentielles	35
5.5	Prise en compte des données hydrométriques	36
5.6	Prise en compte de singularités présentes dans le réseau hydrographique	48
5.7	Gestion de l'incertitude	55
6.	Hydrologie influencée par une ou plusieurs sources de perturbations anthropiques	58
6.1	Objectif et résultats attendus	58
6.2	Traitements méthodologiques	72
7.	Simulations hydrodynamiques	88
7.1	Objectif et résultats attendus	88
7.2	Étapes de la modélisation hydrodynamique	88
7.3	Caractériser les particularités du cours d'eau	89
7.4	Choisir l'approche de modélisation	89
7.5	Construire le modèle numérique de terrain	92
7.6	Construire le modèle hydrodynamique	92
7.7	Caler/valider le modèle	95
7.8	Simuler les débits de crue	100
8.	Analyser l'impact de la présence d'OPI	104
8.1	Objectif et résultats attendus	104
8.2	Mise en contexte	104
8.3	Identification d'un OPI	104
8.4	Orientations	105

9. Inondation par embâcle de glace	109
9.1 Objectif et résultats attendus	109
10. Mobilité des cours d'eau	114
10.1 L'approche hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones de mobilité	114
10.2 Principes généraux, résultats attendus et exigences méthodologiques de l'approche HGM	116
10.3 L'impact des changements climatiques sur la mobilité des cours d'eau	144
10.4 Autres bonnes pratiques pour la cartographie des aléas fluviaux	146
11. Gestion, acquisition et traitement des données géospatiales	151
11.1 Objectif et résultats attendus	151
12. Conclusion	162
Références bibliographiques	163

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Résumé des extraits des processus liés à l'analyse des aléas du schéma de réalisation global	24
Tableau 4.1 : Liste des caractéristiques du bassin versant et du cours d'eau proposées qui peuvent être intégrées au rapport technique	26
Tableau 5.1 : Exemple de sélection d'approches selon le tronçon	48
Tableau 6.1 : Catégorisation des barrages opérés présents dans un bassin versant selon leur mode d'influence sur le régime des crues des zones inondables situées en aval et résultats attendus concernant la cartographie conséquente de ces zones	63
Tableau 6.2 : Catégorisation des barrages présents dans un bassin versant selon leur mode d'influence sur le régime des crues des zones inondables situées en aval et résultats attendus concernant la cartographie conséquente des zones inondables situées en amont	68
Tableau 10.1 : Spécifications relatives à la qualité du géoréférencement	134
Tableau 11.1 : Spécifications relatives au format de la date et de l'heure	151
Tableau 11.2 : Spécifications relatives au format des nombres et des unités	152
Tableau 11.3 : Spécifications relatives aux données matricielles	153
Tableau 11.4 : Spécifications relatives aux données vectorielles	153
Tableau 11.5 : Spécifications relatives aux références altimétriques et planimétriques des données géospatiales	155
Tableau 11.6 : Classification des données LiDAR	158
Tableau 11.7 : Liste non exhaustive des objets et structures à ne pas classer comme bâtiments	159

Liste des figures

Figure 1.1.	Démarche synthèse des axes d'orientation du Plan de protection du territoire face aux inondations	15
Figure 5.1.	Schéma d'une zone de confluence de deux cours d'eau	54
Figure 6.1.	Évaluation du niveau d'eau en amont d'un barrage de classe 1, 2 ou 3 dont le débit d'apport est influencé par l'action de barrages de classe 1 situés dans le bassin versant amont	69
Figure 6.2.	Option de prise en compte de l'effet des changements climatiques (CC) sur l'hydrologie des crues en présence de barrages – Transposition au débit évacué du barrage du facteur de changement (majoration) applicable aux apports	86
Figure 6.3.	Option d'estimation du niveau du réservoir amont en condition de climat futur – Utilisation d'une relation entre le débit évacué du barrage et le niveau de son réservoir amont (courbe d'évacuation ou relation statistique) pour déterminer le niveau amont correspondant au débit évacué estimé en condition de climat futur	87
Figure 10.1.	Exemple d'évolution de méandres par migration latérale et recouplement (adaptée de Siddique, 2014)	115
Figure 10.2.	Exemple de migration latérale et d'élargissement	115
Figure 10.3.	Exemples de recouplement de méandre, a) par érosion régressive/fluviale (chute cut-off) et b) par migration latérale (neck cut-off)	116
Figure 10.4.	Exemples de modifications verticales du lit d'une rivière par a) aggradation et b) incision	116
Figure 10.5.	Les cônes alluviaux et les deltas sont des formes d'accumulation de sédiments en forme d'éventail déposés au pied d'un versant ou dans un plan d'eau récepteur. Le tracé rouge correspond à la morphologie des cônes alluviaux et deltas qui seront intégrés à la cartographie.	119
Figure 10.6.	Exemple simplifié d'une segmentation d'un cours d'eau selon le style fluvial. La segmentation du cours d'eau s'effectue sur le réseau hydrographique linéaire du GRHQ ou du CRHQ.	121
Figure 10.7.	Typologie des styles fluviaux (adaptée de Schumm, 1985, et de Pouliot et collab., 2024.)	122
Figure 10.8.	Échelle temporelle couverte par les zones de mobilité	125
Figure 10.9.	Empiètement des zones de mobilité court et long terme dans le cas d'un cours d'eau a) non fortement dynamique et b) dont le dynamisme est fort	127

Figure 10.10.	a) Localisation d'un ouvrage de stabilisation au niveau plein bord et exemple de l'application. b) Des taux de mobilité pré-ouvrage et c) une zone tampon correspondant au 90 ^e centile afin d'intégrer les ouvrages de stabilisation dans la cartographie des zones de mobilité _____	131
Figure 10.11.	Typologie des avulsions (adaptée de Slingerland et Smith, 2004) _____	138
Figure 10.12.	Exemple de réalisation de la zone de mobilité court terme _____	139
Figure 10.13.	a) Points d'inflexion et axe principal des méandres. b) Corridor englobant toutes les boucles des méandres ainsi que les projections sur 50 ans; les flèches rouges correspondent au méandre le plus ample et indiquent le point de mesure pour déterminer la largeur du corridor par tronçon homogène (adapté de VANR, 2008). c) Ajustement du corridor d'amplitude des méandres afin d'y soustraire les secteurs non érodables et d'y ajouter les méandres abandonnés situés dans la plaine alluviale actuelle. d) Corridor d'amplitude des méandres corrigé. e) Ajustement de la zone de mobilité long terme afin d'y soustraire et de déplacer les secteurs qui s'étalent au-delà des limites de la vallée. f) Ajout de la marge de sécurité latérale g) Zone de mobilité long terme corrigée et finale _____	143
Figure 10.14.	Plaine alluviale fonctionnelle et terrasses alluviales (adaptée de Demers et collab., 2018) ____	150

Liste des schémas

Schéma 3.1 : Schéma de réalisation global pour la détermination des zones inondables et de mobilité _____	22
Schéma 4.1 : Schéma de réalisation pour la détermination du niveau d'effort cartographique _____	27
Schéma 5.1 : Schéma de réalisation pour l'estimation de crue en hydrologie naturelle _____	30
Schéma 5.2 : Schéma de réalisation pour l'estimation de crue à partir de chroniques hydrologiques observées _____	41
Schéma 5.3 : Schéma de réalisation pour l'estimation de crue à partir de chroniques hydrologiques modélisées _____	45
Schéma 6.1 : Catégorisation des barrages aux fins du processus de détermination et de cartographie des zones inondables _____	60
Schéma 6.2 : Démarche de catégorisation des barrages opérés selon leur mode d'influence sur le régime des crues des cours d'eau situés en aval et de délimitation conséquente des zones inondables de ces derniers _____	62
Schéma 6.3 : Résultats attendus concernant la détermination du niveau d'eau et de la zone inondable en amont d'un barrage de classe 1, 2 ou 3, selon le type d'influence auquel est soumis son débit d'apport en provenance du bassin versant amont _____	69
Schéma 6.4 : Cheminement décisionnel pour la délimitation de zones inondables de tronçons en aval de barrages de classe 1 _____	76
Schéma 6.5 : Cheminement décisionnel pour la délimitation de zones inondables de tronçons en amont de barrages de classe 1 _____	81
Schéma 7.1 : Schéma de réalisation de simulations hydrodynamiques _____	88
Schéma 8.1 : Démarche de catégorisation des OPI et exigences selon que la responsabilité est demandée ou non par la municipalité _____	108
Schéma 9.1 : Schéma de réalisation pour déterminer les zones d'inondation par embâcle de glace _____	111
Schéma 10.1 : Schéma de réalisation de l'approche HGM pour la caractérisation et la cartographie de l'aléa mobilité _____	118
Schéma 10.2 : Schéma décisionnel menant à la réalisation de la zone de mobilité court terme _____	126

Schéma 10.3 : Schéma décisionnel menant au calcul de la marge de sécurité annualisée de la zone de mobilité court terme _____	132
Schéma 10.4 : Schéma décisionnel menant à la réalisation de la zone de mobilité long terme _____	140
Schéma 11.1 : Séquence de traitements recommandée pour produire le MNT _____	157

1. Introduction

Les inondations printanières majeures qu'a connues le Québec en 2017 et 2019 ont éveillé les consciences quant à notre tolérance et à notre résilience en tant que peuple face à cet aléa omniprésent. Le Québec s'est construit et développé à proximité des lacs et des cours d'eau et doit travailler à diminuer la vulnérabilité aux inondations pour mieux protéger ses riverains et les infrastructures ainsi que l'environnement, particulièrement dans un contexte de changements climatiques. Ce constat a amené le gouvernement à mettre en œuvre plusieurs initiatives qui se sont principalement articulées autour du Plan de protection du territoire face aux inondations.

Le [Plan de protection du territoire face aux inondations](#) (PPTFI), dont la mise en œuvre a débuté en 2020, s'organise autour de 23 mesures regroupées selon 4 axes (Figure 1.1) :

- Cartographier
- Connaître et communiquer
- Planifier et intervenir
- Régir et encadrer



Figure 1.1. Démarche synthèse des axes d'orientation du Plan de protection du territoire face aux inondations

La mesure 1 du PPTFI de l'axe « Cartographier » prévoit d'adopter une méthodologie standardisée et cohérente de la cartographie des aléas d'inondations présentant les approches à sélectionner, les hypothèses à privilégier et les éléments à cibler, de telle sorte que les zones inondables soient cartographiées selon un processus mieux encadré.

Cet objectif s'incarne également dans les nouvelles responsabilités du ministre de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs au regard de la cartographie des zones inondables et de mobilité, introduites dans les articles 46.0.2 et suivants de la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE) en mars 2021. Plus particulièrement, l'article 46.0.2.1 précise que le ministre prépare, tient à jour et rend publiques les règles applicables à l'établissement des limites de zones inondables et de mobilité.

Ainsi, le guide vient en appui à la mise en œuvre du nouveau cadre réglementaire appliqué à la détermination des zones inondables et de mobilité des cours d'eau afin de baliser le livrable cartographique. Toute nouvelle cartographie à l'entrée en vigueur du prochain cadre réglementaire devra respecter les balises méthodologiques inscrites au guide pour pouvoir être reconnues par le ministre de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. Puisque les nouveaux pouvoirs du ministre lui permettent également de déléguer la responsabilité de la détermination des zones inondables et de mobilité, la prise en compte des éléments méthodologiques du guide sera également requise dans ces situations.

Les balises du présent guide ont été établies en répertoriant des éléments qui émergent de la démarche québécoise des dernières années dans la détermination des zones inondables et de mobilité. Ces balises sont également appuyées par un cheminement scientifique, présenté à l'aide de schémas de réalisation ou de logigrammes.

Le présent document est destiné à une clientèle spécialisée et couvre notamment les sciences de l'hydrologie, de l'hydraulique, de l'hydrogéomorphologie, de la géomatique et de la cartographie.

Il est prévu de faire des mises à jour de cet ouvrage de référence afin de refléter les avancées techniques et scientifiques dans le monde complexe de la détermination des zones sujettes à l'inondation et à la mobilité, comme prévu à l'[article 46.0.2.1 de la LQE](#).

Le guide se décline en deux volets distincts et intègre également des annexes qui aident à la compréhension de la théorie et à la mise en œuvre des travaux de détermination et de cartographie :

- **Volet technique et scientifique** (le présent document) : ce volet vise une clientèle de spécialistes et d'ingénieurs dans le domaine de la caractérisation des aléas d'inondation et de mobilité et de leur cartographie. Il vient encadrer la démarche scientifique à l'aide de principes phares, de schémas de réalisation, d'exigences minimales et d'éléments de bonne pratique. Ces balises, tout en offrant une certaine latitude aux experts qui viendront élaborer une réponse pour les spécificités régionales, amènent une démarche structurée à la limite standardisée nécessaire à un livrable de qualité. C'est également dans ce document que seront discutés les éléments techniques de gestion des données et les métadonnées géospatiales.
- **Volet cartographie réglementaire** : ce volet met en lumière des choix de gouvernance et des méthodes permettant de passer d'une cartographie des aléas à la production d'une cartographie pour application réglementaire.

2. Piliers de l'approche

2.1 Contexte

La cartographie des zones inondables et de mobilité des cours d'eau (ZI et ZM) vise à spatialiser et à caractériser les phénomènes d'inondation et de mobilité. Cette connaissance est nécessaire pour l'application du cadre réglementaire venant baliser les activités permises dans ces zones de contraintes à l'aménagement du territoire. Elle sert aussi à informer les citoyens et l'ensemble des acteurs de l'eau des aléas d'inondation et de mobilité afin de favoriser une approche sécuritaire et résiliente de la gestion des risques qui en découlent.

La détermination des ZI et ZM implique l'application de définitions strictes permettant de transformer le concept général de zones où peuvent se produire des inondations ou des déplacements des cours d'eau en des entités géographiques délimitées clairement. Par exemple, on définira un secteur comme faisant partie d'une zone inondable si sa probabilité statistique d'être inondé est plus grande qu'un seuil édicté. Malgré ces définitions strictes, la détermination des ZI et ZM nécessite l'analyse de nombreuses données ainsi que le choix et l'application d'outils scientifiques et techniques variés, laissant plusieurs possibilités au jugement des professionnels mandataires.

Le présent guide méthodologique présente des balises permettant de limiter la variabilité des approches en recherchant un équilibre entre :

- Une qualité, une équité et une cohérence des cartographies à l'échelle du Québec, qui impliquent que le guide exprime des contraintes méthodologiques;
- Une capacité à tenir compte de l'expertise et des spécificités locales, qui implique une flexibilité méthodologique.

Pour ce faire, l'approche méthodologique mise de l'avant s'appuie sur :

- Une pratique professionnelle responsable;
- Le respect de principes directeurs;
- Le respect d'exigences méthodologiques minimales;
- La disponibilité d'éléments de bonne pratique.

2.2 Pratique professionnelle responsable

En s'appuyant sur une pratique professionnelle responsable, la cartographie peut être réalisée en conformité avec les standards de pratique d'une profession et les valeurs fondamentales de la responsabilité professionnelle. Une pratique professionnelle responsable en matière de cartographie s'effectue en garantissant :

- La protection du public et de l'environnement;
- Le recours à une méthodologie rigoureuse scientifiquement;
- Le respect des règles de bonne pratique de la profession;
- Les connaissances adéquates et suffisantes des professionnels;
- La réalisation de travaux exempts d'erreurs;
- L'indépendance de l'exercice professionnel et l'absence de conflits d'intérêts.

Les termes qui définissent la pratique professionnelle responsable sont, pour certaines professions, encadrés par un ordre professionnel. Les termes qui en découlent s'ajoutent aux énoncés présentés plus haut.

2.3 Respect de principes directeurs

Les principes directeurs mettent en évidence des éléments qui transcendent la mise en œuvre technique de la détermination des ZI et ZM.

Les quatre principes directeurs sont :

1. Le principe de précaution
2. Le principe de combinaison des aléas
3. Le principe de cohérence spatiale
4. Le principe de la prise en compte de l'évolution des aléas

2.3.1 Principe de précaution

Le principe de précaution consiste à faire des choix penchant vers la réduction des conséquences associées aux inondations lorsque la science et les connaissances techniques ne sont pas à même de fournir des certitudes. Ce principe n'implique pas de retenir obligatoirement, à chacune des étapes du processus de détermination des ZI et ZM, les approches ou les hypothèses les plus prudentes, qui auraient pour effet d'augmenter les superficies sujettes à des contraintes d'aménagement de façon difficilement justifiable, mais plutôt de prendre des décisions qui penchent de façon raisonnable et pondérée vers la précaution. Ce principe implique cependant sans équivoque qu'il n'est pas acceptable de faire des choix qui retiennent systématiquement des approches et des hypothèses moins prudentes.

Suivant le principe de précaution, le mandataire doit ainsi faire des choix qui conduisent à des résultats cartographiques qui tiennent compte de l'étendue des incertitudes, du niveau d'accord entre les approches alternatives et de l'évaluation qualitative des limites que nous apportent la science et les données disponibles. Un niveau de certitude plus faible doit conduire à des choix conservant une marge de précaution.

2.3.2 Principe de combinaison des aléas

Les différents mécanismes menant à des inondations d'une portion de territoire (p. ex., un tronçon de rivière) doivent être considérés et leurs effets sur la ZI doivent se cumuler les uns aux autres. Ainsi, la cartographie des ZI doit, dans le cas général, être réalisée en combinant les résultats de plusieurs types d'inondation (p. ex., en eau libre et par embâcles de glace) pour retenir en fin de processus les conditions les plus sévères. Pour un type d'inondation donné, le principe s'applique aussi aux différentes conditions menant à des inondations puisque les inondations le long d'un cours d'eau peuvent dans certains cas être causées par des manifestations différentes du même processus physique. Par exemple, un secteur à la jonction de tributaires peut être à la fois inondé par la crue de l'un ou l'autre des tributaires ou par différentes combinaisons de crues de ceux-ci. Il en résulte que l'évaluation finale de l'aléa est l'intégration de chacune des conditions d'inondations pour chacun des types d'inondations en conservant la valeur maximale. En ce sens, le profil en long, constitué des cotes retenues pour établir la zone inondable, n'est pas obligatoirement le profil d'écoulement d'un événement de crue unique et, de ce fait, il est courant de référer à ce résultat final sous le nom de zone enveloppe des différentes évaluations. Le même principe est à considérer pour la détermination des autres aléas fluviaux selon leurs contextes propres.

2.3.3 Principe de cohérence spatiale

Le principe de cohérence spatiale des ZI consiste à s'assurer de maintenir un lien explicable scientifiquement entre les différentes valeurs de niveaux d'eau ou des autres paramètres sur lesquels s'appuie la détermination des zones entre des secteurs voisins. Il implique par exemple de faire un découpage des secteurs d'étude pour assurer l'intégrité hydraulique d'un tronçon de cours d'eau et de conserver une vision cohérente de l'hydrologie à l'échelle du bassin versant. Le principe de cohérence spatiale implique ainsi un devoir de coordination entre les différents intervenants, porteurs de mandats distincts de réalisation de cartographie de zones appartenant à un même cours d'eau et à un même bassin versant.

La cohérence spatiale n'est pas strictement un synonyme de continuité spatiale. Il est tout à fait possible que deux secteurs voisins, mais dont les conditions générant des inondations diffèrent légèrement par leur intensité ou leur type, puissent présenter une discontinuité en ce qui concerne les zones inondées tout en demeurant cohérents spatialement.

2.3.4 Principe de prise en compte de l'évolution des aléas

Les contraintes réglementaires qui s'appliquent sur les territoires déterminés comme faisant partie des ZI et ZM ont un impact à très long terme sur l'aménagement du territoire. De ce fait, il est essentiel que la détermination des ZI et ZM inclue une analyse temporelle qui ne se limite pas à l'instant présent et qui comprend une prise en compte des conditions futures possibles. Ainsi, une période d'analyse, qui s'étend minimalement jusqu'à la fin du siècle, doit être considérée. Les débits de crue et les autres variables qui devront être retenus pour réaliser la détermination des ZI et ZM reflètent la valeur de l'aléa pour l'année ou le groupe d'années où les conditions anticipées sont les

plus sévères sur cette période d'analyse. Ces conditions peuvent autant se présenter au tout début de la période (conditions actuelles) qu'au milieu ou à la fin de celle-ci (conditions futures).

La considération de l'évolution possible des aléas sur la période future inclut évidemment l'évaluation de l'effet des changements climatiques. D'autres facteurs de changements pourraient aussi être considérés lorsque le contexte local les rend probables, tels des changements prévisibles d'occupations du sol (p. ex., des travaux impliquant des milieux humides) ou de structures de gestion des eaux (p. ex., la modification d'un barrage influent). Ce principe s'incarne également du fait qu'une réévaluation de la cartographie des ZI et ZM est prévue minimalement tous les dix ans (article 46.0.2.3 de la LQE).

2.4 Exigences méthodologiques minimales

Les exigences méthodologiques minimales permettent d'assurer que les grandes étapes de réalisation sont communes à l'ensemble des études de détermination des ZI et des ZM, et que certaines étapes particulières sont réalisées en respectant des éléments précis.

Dans les étapes de détermination des ZI et des ZM où la pratique est bien établie, les exigences présentées correspondent généralement au dénominateur commun des études de bonne qualité émanant des meilleurs standards de la pratique actuelle. Dans les étapes plus nouvelles de détermination des ZI et des ZM, les exigences sont généralement formulées comme un premier pas raisonnable, mais important à franchir pour aborder cette activité. Enfin, les exigences sont formulées de telle sorte qu'elles soient vérifiables et réalisables et qu'elles offrent globalement assez de flexibilité pour prendre en compte de particularités locales.

Les exigences méthodologiques minimales représentent un seuil en deçà duquel aucune cartographie des ZI et ZM ne serait acceptée à des fins d'application réglementaire par le ministre. Elles sont présentées dans les différents chapitres qui suivent en fonction des thématiques auxquelles elles se rapportent. Le livrable cartographique des ZI et des ZM devra être accompagné d'un rapport technique et d'une liste de vérification à effectuer sur l'ensemble des exigences méthodologiques minimales (voir l'annexe 3).

2.5 Disponibilité d'éléments de bonne pratique

Les renseignements supplémentaires sur de bonnes pratiques, sans viser l'exhaustivité, permettent de bonifier les travaux de cartographie et de répondre à certains besoins locaux. Ces renseignements peuvent par exemple prendre la forme de descriptions d'outils et d'approches ou de cibles chiffrées fournissant des repères dans l'atteinte de résultats. Le fait que ces renseignements soient présentés n'implique toutefois pas qu'ils doivent être nécessairement utilisés. Les éléments de bonne pratique permettent de diriger les ingénieurs ou les professionnels vers une méthodologie particulière à considérer ou de laquelle s'inspirer, mais sans les contraindre. Il est à noter que, dans le cadre du présent document, peu d'éléments de bonne pratique ont été recensés.

3. Vue d'ensemble du processus de détermination des ZI et ZM

Le guide méthodologique définit les règles applicables à l'établissement des zones inondables et de mobilité comme prévu à l'[article 46.0.2.1 de la LQE](#).

Cette cartographie des ZI et ZM permet l'application du cadre réglementaire, lequel balise l'aménagement du territoire permis selon l'intensité des aléas sur ces zones.

La détermination des ZI et ZM implique un niveau d'effort important et un niveau de complexité globalement élevé. Elle requiert notamment l'application d'un éventail d'outils numériques provenant de nombreuses disciplines scientifiques (statistique, géomatique, géographie, hydrologie, hydraulique, etc.) et l'acquisition de données décrivant différents aspects de la réalité terrain (bathymétrie, topographie, hydrométrie, etc.). Une partie des données doit être acquise lors d'événements de crue qui, par définition, se produisent peu fréquemment. Pour cette raison, la détermination nécessite la mobilisation de plusieurs spécialistes et du travail qui s'étend sur un certain nombre d'années.

Le schéma 3.1, qui détaille le processus de détermination des ZI et ZM, vise deux objectifs. D'abord, présenter de façon globale les grandes étapes permettant de réaliser la cartographie et, ensuite, annoncer les chapitres suivants du guide et établir le lien entre eux. Pour une compréhension complète du processus de cartographie, le lecteur peut se référer également au volet **cartographie réglementaire** du présent guide. Ce document contient les éléments de gouvernance retenus pour finaliser le processus de production d'une cartographie des ZI et ZM à des fins réglementaires. Rappelons que l'application réglementaire, qui impose des contraintes d'aménagement du territoire, repose sur la cartographie de l'intensité des aléas fluviaux. Les éléments de gouvernance sont exprimés principalement dans des matrices d'intensité. Ces matrices d'intensité ont comme paramètres, par exemple, des segments fréquentiels et des profondeurs d'eau pour l'inondation en eau libre. Chaque aléa d'inondabilité et de mobilité est illustré par sa propre matrice d'intensité, ce qui sera présenté dans le volet **cartographie réglementaire** du présent guide.

Cette première édition du guide méthodologique traite des aléas d'inondation en eau libre (sous les aspects étendue et profondeur d'eau), d'inondation par embâcles de glace et de mobilité.

Doivent être appliqués à toutes les étapes du processus de détermination des zones inondables et de mobilité

- Respect des principes directeurs
- Respect des piliers de l'approche
- Respect d'exigences méthodologiques
- Considération des éléments de bonne pratique

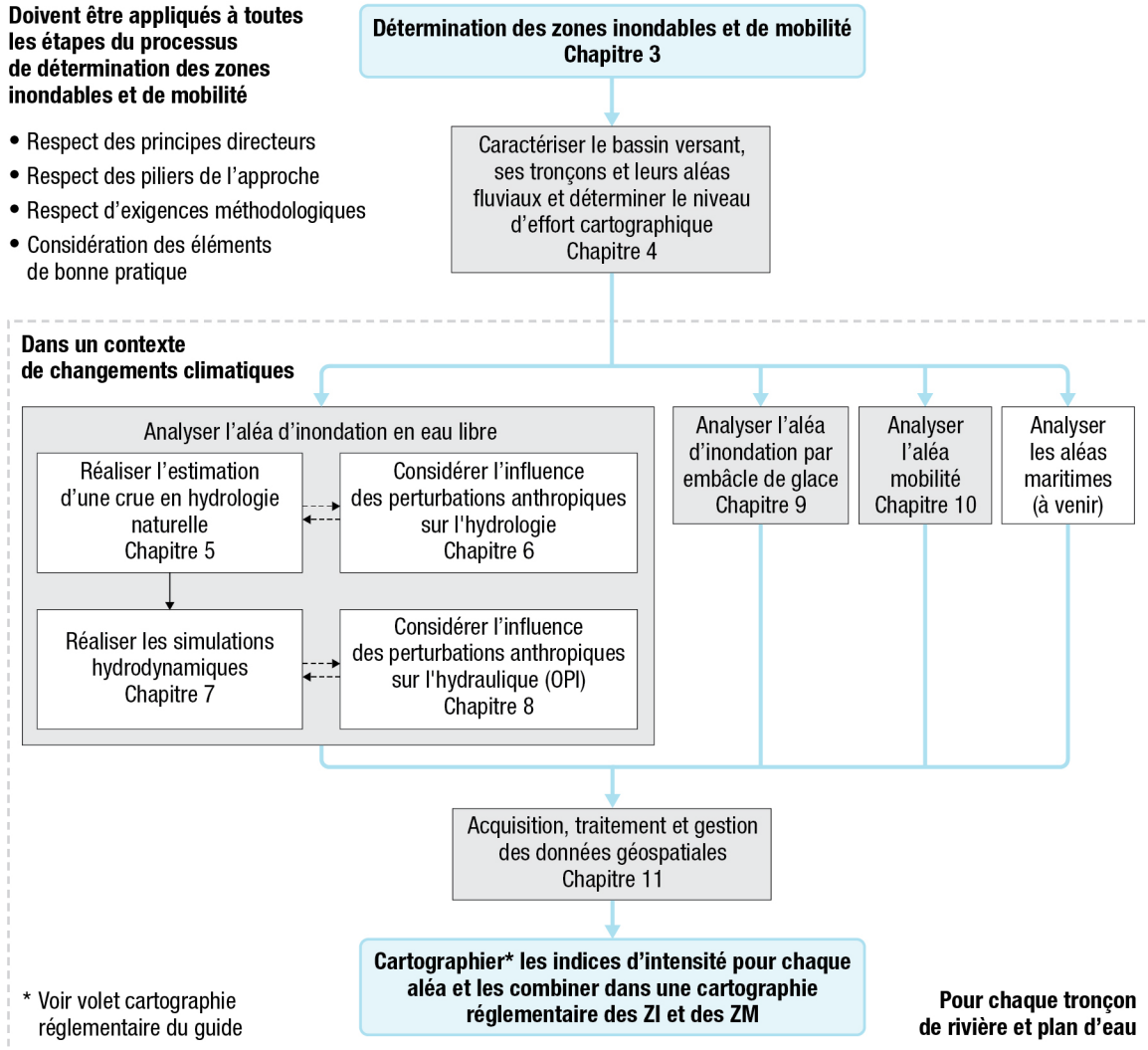


Schéma 3.1 : Schéma de réalisation globale pour la détermination des zones inondables et de mobilité

La première étape de réalisation consiste à caractériser le bassin versant et à déterminer les aléas fluviaux pour chacun des tronçons de ce bassin. Elle implique aussi de déterminer l'effort cartographique minimal à déployer en fonction des enjeux que peuvent poser l'inondation et la mobilité sur ces mêmes tronçons. Elle permet enfin de cerner les perturbations anthropiques de l'hydrologie et de l'hydraulique à considérer. On retrouve une description détaillée de cette étape au chapitre 4.

Les étapes subséquentes se réalisent à l'échelle de chacun des tronçons de rivière ou de plan d'eau et peuvent être effectuées en parallèle selon les aléas (et leurs différents types) recensés sur le tronçon. Le terme tronçon englobe à la fois les cours d'eau et les plans d'eau. Certaines distinctions couvertes plus loin dans le texte sont à considérer, mais, de façon générale, le terme tronçon se veut inclusif.

Le schéma 3.1 laisse aussi une place pour la détermination de zones liées aux aléas impliquant l'érosion et la submersion en milieu maritime. Toutefois, ce sujet n'est pas approfondi dans la présente version du guide.

L'analyse de l'aléa d'inondation en eau libre, un aléa qui est présent sur chacun des tronçons et qui doit être considéré dans toutes études de ZI, vise généralement l'obtention des résultats suivants, bien que des résultats complémentaires soient attendus dans certaines situations où des barrages et des ouvrages de protection contre les inondations (OPI) viennent modifier l'hydrologie et l'hydraulique du tronçon (voir le tableau 3.1) :

- L'estimation de crues pour trois probabilités au dépassement;
- L'évaluation des profondeurs d'inondation en zone inondable pour ces mêmes crues.

De plus, l'étendue et la profondeur d'inondation correspondant aux plus hautes eaux connues (PHEC) peuvent également être considérées. Ainsi, la prise en compte des événements exceptionnels consiste alors en un modèle mixte probabiliste/déterministe plutôt qu'un modèle exclusivement probabiliste. La présente version du guide ne fournit pas de précision sur des exigences minimales ou des approches utilisables pour en faire l'évaluation. Le mandataire ou le délégataire pourra en faire l'évaluation selon une approche dont il justifiera la pertinence, s'il juge que des données de qualité suffisantes peuvent être mises à profit.

L'analyse de l'aléa d'inondation en eau libre a été décomposée en quatre étapes faisant chacune l'objet d'un chapitre.

Le chapitre 5 présente les étapes de réalisation de l'estimation des crues en milieu dit naturel, c'est-à-dire sur un tronçon dont les intensités de crues ne sont pas modifiées significativement par des actions anthropiques susceptibles de les perturber.

Dans le cas où le régime hydrologique en crue peut être perturbé par une action anthropique, telle que l'atténuation des crues par un barrage ou certains éléments de la gestion du drainage urbain, des conditions hydrologiques spécifiques sont à considérer. Ces conditions, ainsi que des suggestions de méthodes de calcul permettant de les représenter, sont décrites dans le chapitre 6.

Le chapitre 7 traite de la modélisation hydrodynamique et de son utilisation pour effectuer des simulations menant du débit de crue aux niveaux d'eau et aux étendues d'inondation.

Le chapitre 8 présente le cas particulier de l'évaluation des étendues d'inondation à considérer dans les zones localisées derrière les ouvrages de protection contre les inondations qui perturbent l'hydraulique du tronçon. Dans ce cas aussi, des approches de simulations hydrodynamiques applicables dans le contexte général pourraient être utiles et le lecteur pourrait juger pertinent d'utiliser des approches décrites dans le chapitre 7.

Le chapitre 9 présente les étapes permettant d'établir la composante des ZI associée aux inondations causées par les embâcles de glace, ce qui vise à déterminer, lorsque possible, les secteurs où des embâcles sont avérés et les secteurs qui présentent des caractéristiques les prédisposant aux embâcles de glace.

Le chapitre 10 présente les étapes associées à la détermination des ZM par une approche hydrogéomorphologique permettant la détermination des secteurs susceptibles d'être mobiles à court et à long terme.

Tableau 3.1 : Résumé des extraits des processus liés à l'analyse des aléas du schéma de réalisation global

Aléa (ou type d'aléa)	Résultats attendus	Résultats optionnels
Inondation en eau libre	<ul style="list-style-type: none"> • Étendue et profondeur d'inondations pour des crues dont les probabilités annuelles au dépassement sont de 5 % (1 : 20), 1 % (1 : 100) et 0,3 % (1 : 350). • Pour un tronçon dont l'hydrologie subit des perturbations anthropiques liées à l'influence de barrages, les étendues et profondeurs doivent être évaluées en contexte d'atténuation et d'atténuation restreinte des crues dans certains cas de figure décrits au chapitre 6. • Pour un tronçon dont l'hydraulique subit des perturbations anthropiques (OPI), des zones de précaution et des zones protégées à risque résiduel doivent être aussi évaluées dans certains cas de figure décrits au chapitre 8. 	<ul style="list-style-type: none"> • Étendue et profondeur d'inondation correspondant aux plus hautes eaux connues.
Inondation par embâcle de glace	<ul style="list-style-type: none"> • Identification des secteurs déjà visés par une zone inondable par embâcle de glace réglementaire, telle que définie dans un règlement de contrôle intérimaire (RCI) ou un schéma d'aménagement et de développement (SAD), lorsque disponible sous forme de polygone. • Délimitation de secteurs d'inondation par embâcles de glace avérés, lorsqu'une détermination contemporaine est réalisée à l'aide de données hydrauliques hivernales observées et documentées. 	<ul style="list-style-type: none"> • Délimitation de secteurs qui présentent des caractéristiques les prédisposant à des inondations dues aux embâcles de glace.
Mobilité	<ul style="list-style-type: none"> • Délimitation des secteurs susceptibles d'être mobiles à court terme. • Délimitation des secteurs susceptibles d'être mobiles à long terme. 	

Enfin, le chapitre 11 porte sur les aspects géomatiques et de gestion des données et métadonnées hydriques, topométriques et bathymétriques, qui constituent des balises essentielles à un processus de déploiement cartographique standardisé lorsque plusieurs mandataires et délégataires travaillent sur un projet commun de cartographie.

4. Caractérisation des bassins versants

4.1 Objectif et résultats attendus

Le présent chapitre décrit les exigences méthodologiques relatives à la description du bassin versant et des aléas fluviaux qui y sont présents, de même que les exigences qui concernent le niveau d'effort cartographique minimal à déployer pour chacun des tronçons étudiés. Le chapitre présente également le travail à réaliser pour déterminer les tronçons pour lesquels des perturbations anthropiques de l'hydrologie et de l'hydraulique doivent mener à des évaluations adaptées des zones inondables.

Les résultats attendus de ce processus sont une connaissance solide des paramètres physiques du bassin versant, la détermination des aléas présents pour chacun des tronçons, le niveau d'effort cartographique à considérer minimalement (élevé ou modéré), le recensement des barrages ayant un potentiel d'influence sur le régime des crues (voir annexe 4) et le recensement des ouvrages de protection contre les inondations (OPI).

4.2 Caractéristiques physiques des bassins versants et des cours d'eau

En plus d'être essentielle pour bien établir le contexte global de travail, la connaissance des caractéristiques physiques des bassins versants et des cours d'eau permet d'asseoir les choix méthodologiques. Le tableau 4.1 détaille une liste de caractéristiques physiques qu'il est recommandé de connaître à l'échelle du bassin versant et du cours d'eau préalablement à la réalisation des étapes subséquentes de la détermination des ZI et ZM. Quelques éléments de ce tableau sont des exigences minimales. Certains de ces renseignements sont issus du jeu de données du Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ).

EM 4.1	Exigence minimale
Caractéristiques physiques des bassins versants et des cours d'eau	Pour établir le contexte de l'étude, le mandataire ou le délégué devra minimalement caractériser la superficie drainée du bassin versant, l'utilisation du territoire, la pente du cours d'eau, ainsi que les caractéristiques physiques du cours d'eau qu'il juge pertinentes à intégrer au rapport technique.

Les éléments de contenu d'un rapport technique type sont présentés à l'annexe 8.

Tableau 4.1 : Liste des caractéristiques du bassin versant et du cours d'eau proposées qui peuvent être intégrées au rapport technique

Caractéristiques physiques du bassin versant	Caractéristiques physiques du cours d'eau
Superficie drainée (CRHQ)	Longueur (CRHQ)
Topographie	Pente moyenne (CRHQ)
Dénivelé	Aire de drainage (CRHQ)
Hydrographie	Composition du chenal et des berges, substrat (CRHQ)
Volume d'eau drainé annuellement (CRHQ)	Type et direction de l'écoulement
Débits de crue et d'étiage (réseau hydrométrique, Atlas hydroclimatique du Québec méridional)	Profil en long des cours d'eau et affluents principaux
Puissance spécifique en crue et à l'étiage (CRHQ)	Confluence de tributaires et embouchures
Densité de drainage (km/km ²)	Ouvrages hydrauliques (barrages, seuils, digues, réservoirs, structures latérales, ponts, ponceaux, etc.)
Type de réseau hydrographique (p. ex., dendritique, parallèle, rectangulaire, anarchique, etc.)	Ouvrages de stabilisation
Superficie et types de milieux humides	Contrôle aval (refoulement, marées, niveau du fleuve, lac, cours d'eau important, etc.)
Lacs et réservoirs	Plaines inondables avec grande capacité de laminage
Géologie	Formes alluviales associées au cours d'eau (CRHQ)
Province, lithologie (CRHQ)	Secteurs avec schéma d'écoulement complexe
Dépôts de surface	Caractéristiques de l'aléa « mobilité »
Stratigraphie	Historique de mobilité (sédimentation ou érosion)
Morphologie du bassin versant	Cartographie existante des zones de mobilité (espaces de liberté)
Styles fluviaux (CRHQ)	Dynamisme du cours d'eau (CRHQ)
Dynamique des versants (mouvements de sols)	Sinuosité
Occupation du sol	Confinement
Types d'occupation du sol (fourrage, cultures, eau, forêt, milieux humides, etc.) (CRHQ)	Caractéristiques de l'aléa « inondation » (eau libre et embâcle)
Barrages ou ouvrages de régulation	Cartographie en vigueur des zones inondables
Zones urbaines	Cartographie en vigueur des zones inondables par embâcles de glace (réglementée et autres secteurs connus)
Conditions climatiques	Prédisposition aux embâcles
Température moyenne annuelle (CRHQ)	Banques de données sur les embâcles
Précipitation totale annuelle (CRHQ)	Observations, rapports, archives
	Processus de glace (p. ex., couverts fragiles, couverts flottants, consolidations, absence de glace)
	Propriétés morphologiques (p. ex., rupture concave de pente, multichenaux, géométries variables)
	Obstacles (p. ex., piliers de pont, embâcles de bois)

4.3 Niveau d'effort cartographique

Le niveau d'effort cartographique et les exigences qui en découlent seront modulés en fonction des enjeux associés au territoire. Compte tenu de l'étendue immense du réseau hydrographique québécois, de la grande variation de densité de l'occupation humaine du territoire et des moyens pouvant raisonnablement être mis en œuvre pour la détermination des ZI et ZM, il est pratique et raisonnable d'alléger les exigences méthodologiques dans les secteurs où les risques associés aux inondations apparaissent moindres. Bien qu'allégées, ces exigences sont considérées comme suffisantes à une connaissance de l'aléa utile à un aménagement du territoire en zones inondables qui assure la protection face aux inondations. Cette approche aura pour effet de moduler le niveau d'effort cartographique le long d'un cours d'eau ou à l'intérieur d'un bassin versant. L'approche par niveau d'effort cartographique permet de cartographier un plus grand territoire, mais implique que le degré de précision de la cartographie variera selon les secteurs.

Ainsi, il est essentiel d'évaluer l'effort cartographique minimal nécessaire pour chaque tronçon. À l'intérieur de cette approche, notons qu'il est accepté qu'un tronçon qui a des caractéristiques associées à un effort modéré soit traité en déployant un effort majeur si nécessaire. Par exemple, un court tronçon à traiter selon un effort modéré situé entre deux tronçons à traiter selon un effort majeur pourrait être traité comme ceux-ci, dans un esprit de continuité du niveau d'effort cartographique.

Le schéma 4.1 illustre les étapes permettant de déterminer le niveau d'effort cartographique.

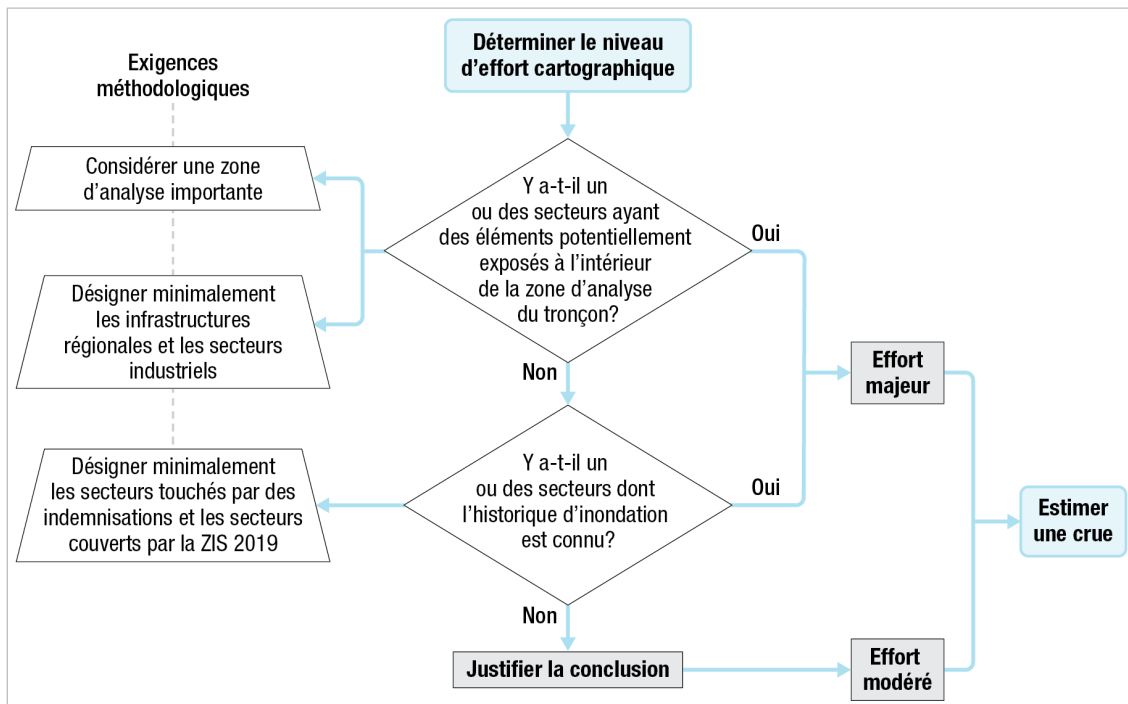


Schéma 4.1. Schéma de réalisation pour la détermination du niveau d'effort cartographique

Le mandataire technique doit déterminer le niveau d'effort requis en fonction des enjeux d'exposition et de vulnérabilité rencontrés, tout en considérant les coûts par rapport aux bénéfices engendrés par la cartographie.

Un effort cartographique « majeur » devrait être considéré si le tronçon possède des éléments potentiellement exposés (voir le glossaire de l'annexe 1), rattachés à la protection des biens et des personnes, a déjà été cartographié « inondable » ou a un historique d'inondation connu et documenté.

Un effort cartographique « modéré » est considéré comme suffisant si le tronçon ne possède aucun élément potentiellement exposé ni aucun historique connu d'inondation.

Dans tous les cas, l'évaluation doit tenir compte d'un bon jugement et de considérations d'efficience dans l'attribution des efforts qui découleront du choix qui sera fait.

EM 4.2	Exigence minimale
Niveaux d'effort cartographique	Le mandataire ou le délégataire aura la responsabilité de répertorier et de discriminer les tronçons de cours d'eau selon deux niveaux d'effort cartographique (majeur et modéré) en fonction des enjeux d'exposition et de vulnérabilité rencontrés ainsi qu'en considérant l'aspect d'efficience dans l'attribution des efforts que générera ce choix.

4.4 Présence d'un potentiel d'influence du régime des crues par des sources de perturbations anthropiques

La présence d'aménagements dans un bassin versant peut avoir un impact sur le régime des crues d'un cours d'eau. Il s'agit principalement de barrages, dont l'ouvrage d'évacuation peut être fixe ou manœuvrable, mais aussi, à une échelle plus locale, de mesures de gestion des eaux pluviales urbaines. On parle alors de sources de perturbations anthropiques.

Par ailleurs, la présence de lacs peut aussi modifier le régime des crues d'un cours d'eau par un effet de laminage naturel.

Les modes d'influence de ces différentes sources d'altération, naturelles ou anthropiques, du régime hydrologique sont variés, tout comme doivent l'être les approches à préconiser pour prendre en compte ces influences dans le contexte d'un processus de cartographie des zones inondables. De fait, la prise en compte de l'effet de la gestion ou de la simple perturbation anthropique des crues implique des considérations méthodologiques pouvant être si diversifiées et parfois complexes qu'un chapitre entier du présent document y est consacré, soit le chapitre 6.

Selon les types de sources de perturbations hydrologiques pouvant être rencontrés dans un bassin versant, le schéma 4.2 ci-dessous étaye le cheminement du mandataire ou du délégataire qui entreprend un processus de cartographie en l'orientant soit vers le chapitre 5, consacré aux processus hydrologiques naturels, soit vers le chapitre 6 lorsqu'entrent en jeu de possibles sources anthropiques de perturbation du régime des crues.

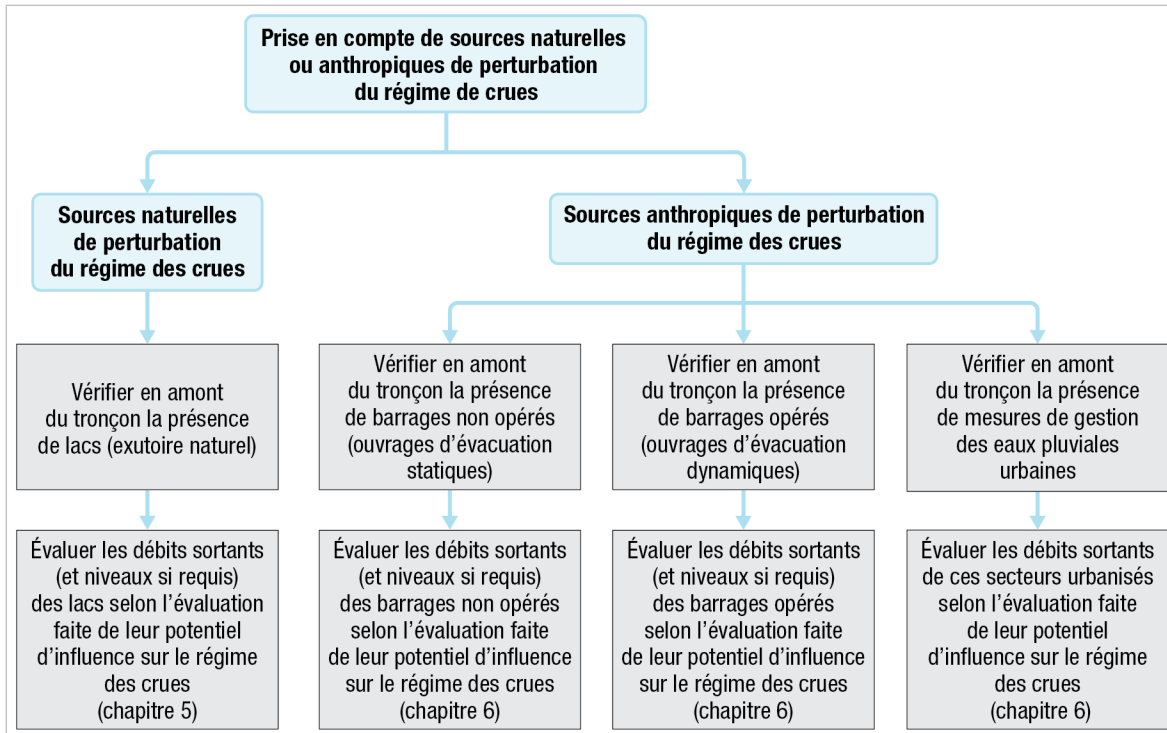


Schéma 4.1. Prise en compte de la présence de sources, naturelles et anthropiques, de perturbation du régime de crues d'un cours d'eau

4.5 Présence d'un potentiel d'influence de l'hydraulique par des ouvrages de protection contre les inondations

La rupture de la digue de Sainte-Marthe-sur-le-Lac en 2019 et du muret lors des inondations à Baie-Saint-Paul au printemps 2023 a frappé l'imaginaire collectif des Québécois et a mis la lumière sur la grande vulnérabilité de certains secteurs urbains à la défaillance de telles structures anthropiques. Le sentiment de protection et de sécurité que semblent offrir les OPI aux résidents en aval de ces ouvrages est cependant associé à une probabilité non négligeable de défaillance de l'ouvrage au cours de sa durée de vie utile. Ainsi, en présence d'un OPI, la prise en compte de la protection de l'OPI dans la cartographie est possible uniquement si des conditions particulières sont respectées par une municipalité, comme présenté au schéma 3.1 et discuté au chapitre 8. Dans ces cas, le gouvernement définit et délimite une zone de contrainte réglementaire particulière au sein du processus de détermination des ZI et ZM. Par ailleurs, de par sa présence et son rôle de barrière à l'écoulement naturel, l'OPI peut présenter un potentiel d'influence sur les conditions hydrodynamiques proximales du lac ou du cours d'eau. Cette particularité devra être considérée lors de la réalisation des simulations hydrodynamiques, sujet abordé au chapitre 7.

5. Estimation d'une crue en hydrologie naturelle

5.1 Objectif et résultats attendus

L'objectif du présent chapitre est de présenter les exigences méthodologiques et certaines règles de bonne pratique relatives au processus d'estimation des débits de crue en hydrologie naturelle. On parle ici d'hydrologie naturelle non pas pour référer à un contexte où un bassin versant serait exempt de toute forme d'infrastructure anthropique, mais simplement pour indiquer que les intensités des crues sur le bassin versant ne sont pas modifiées significativement par des actions anthropiques réalisées lors d'une crue.

Les résultats attendus sont des estimations des débits de crue pour des probabilités annuelles au dépassement de 5 %, 1 % et 0,3 %. Ces estimations impliquent obligatoirement une analyse portant jusqu'à l'horizon 2100 pour s'assurer que les débits de crue conduisent à un aménagement du territoire sécuritaire maintenant et dans le futur.

EM 5.1	Exigence minimale
Estimation d'une crue en hydrologie naturelle	Le mandataire ou le délégataire devra, dans son processus de cheminement scientifique, respecter le schéma de réalisation (ou logigramme) de l'estimation d'une crue en hydrologie naturelle.

Les sous-sections suivantes décrivent, dans l'ordre, chacune des étapes de la démarche illustrée au schéma 5.1.

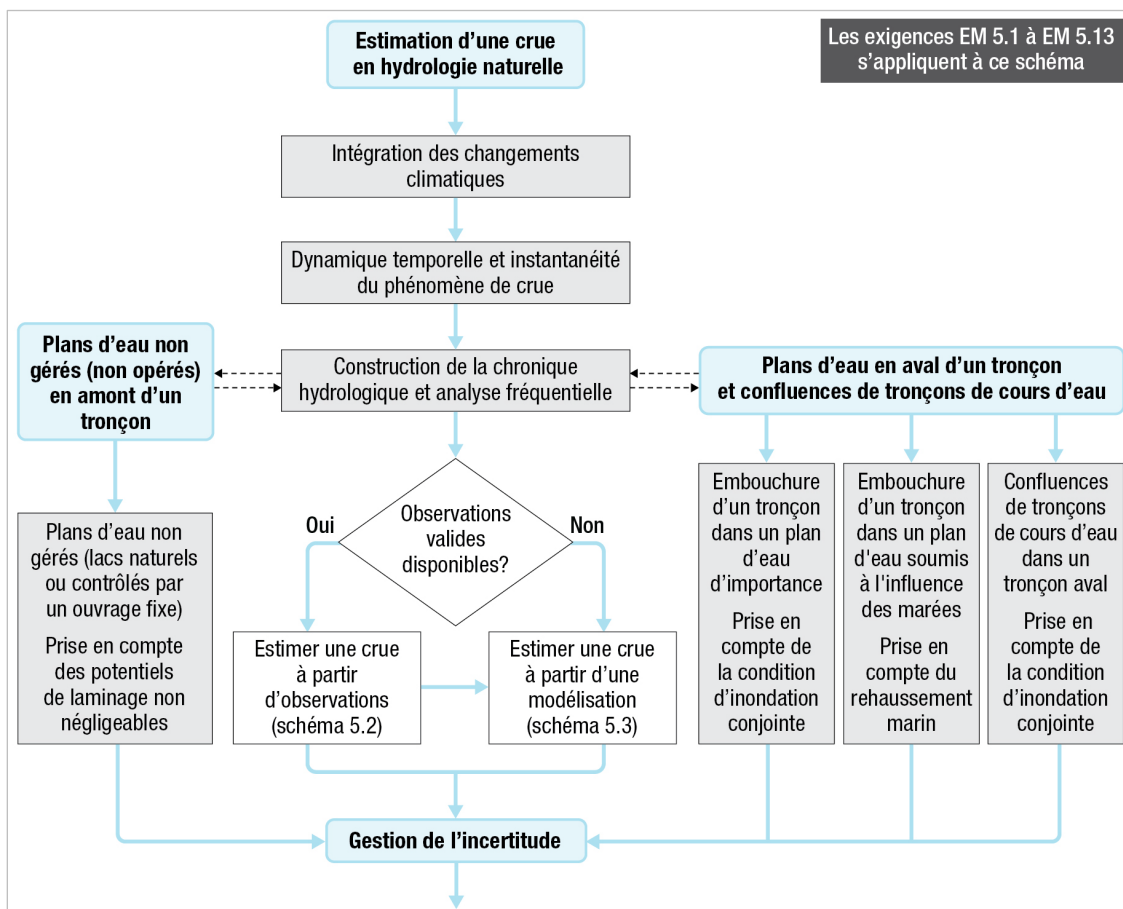


Schéma 5.1 : Schéma de réalisation pour l'estimation de crue en hydrologie naturelle

5.2 Intégration des changements climatiques

Historiquement, les débits de crue étaient évalués en posant l'hypothèse de stationnarité, c'est-à-dire que les conditions passées étaient considérées comme identiques aux conditions actuelles et à celles du futur. Il est dorénavant nécessaire d'analyser l'évolution possible des crues. Il devient obligatoire en début de processus de s'outiller pour disposer d'une série de données chronologiques qui tient compte des facteurs de changements prévisibles des crues par rapport à la période historique. Ces facteurs doivent inclure la prise en compte des changements climatiques.

5.2.1 Intégration des changements climatiques à l'hydrologie

EM 5.2	Exigence minimale
Intégration des changements climatiques à l'hydrologie	Le mandataire ou le délégué devra utiliser une chaîne de modélisation hydroclimatique pour prendre en compte l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie. Cette chaîne doit permettre de bien couvrir l'incertitude, notamment en considérant plusieurs modèles climatiques. Le mandataire ou le délégué devra retenir l'estimation de crue égale à la valeur médiane la plus élevée d'un scénario SSP3-7.0 ou RCP8.5 parmi toutes les périodes étudiées (état de référence et horizons futurs jusqu'à 2100). Il devra aussi considérer un scénario d'émission modérée (SSP2-4.5 ou RCP4.5) si celui-ci conduit à des crues plus élevées. Si des données de modélisation hydroclimatique utilisant les scénarios SSP sont disponibles, elles doivent être privilégiées par rapport aux scénarios RCP.

Les changements climatiques sont à considérer systématiquement comme source potentielle de changement dans le futur des crues. À cet égard, il existe un nombre de plus en plus important d'informations pour évaluer l'impact qu'aura le réchauffement climatique sur le débit des cours d'eau. Ces informations sont majoritairement construites à l'aide d'une chaîne de modélisation qui produit des simulations hydroclimatiques. Cette chaîne s'appuie sur différentes simulations climatiques, qui tiennent compte de scénarios d'évolution de la concentration de gaz à effet de serre, et sur des simulations hydrologiques, qui modélisent le transit de l'eau par les bassins versants. Une chaîne de modélisation hydroclimatique permet non seulement de prendre en compte l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie, mais également d'avoir une idée de l'incertitude. L'estimation de l'incertitude est réalisée en considérant la dispersion des résultats issus de plusieurs simulations climatiques.

L'expertise et l'effort à déployer pour produire des simulations hydroclimatiques à jour et conformes aux meilleures pratiques sont substantiels. Pour cette raison, il est souvent pertinent de référer à des banques de simulations existantes. L'une des banques principales pour le Québec est celle de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional produite par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) et disponible depuis 2013 (révisé en 2015, 2018 et 2022). Cet Atlas propose la synthèse de deux scénarios d'évolution de gaz à effet de serre, plus d'une centaine de scénarios climatiques et plus d'un millier de simulations hydrologiques disponibles pour environ 10 000 tronçons de cours d'eau. Les changements prévus dans les statistiques des crues sont évalués sur trois horizons temporels jusqu'à 2100 par comparaison à une

période dite de référence (1981-2010). Ainsi, des projections d'indicateurs hydrologiques pour plusieurs tronçons du territoire québécois sont disponibles. Différentes ampleurs du changement futur de ces indicateurs y sont calculées sur la base de la dispersion des résultats de simulations. Aux fins de la cartographie des zones inondables, la valeur médiane de l'ampleur du changement pour un indicateur en climat futur (valeur centrale du spectre de dispersion des projections) doit être considérée. De plus, des scénarios d'émission de gaz à effet de serre modérée et élevée doivent être considérés dans l'ensemble de simulations.

Plusieurs tronçons de cours d'eau ne sont toutefois pas couverts par la banque de données de l'Atlas. Parmi eux se trouvent les petits cours d'eau associés à de plus petits bassins versants que ceux simulés dans l'Atlas. Pour ces petits bassins versants, il existe toutefois une littérature abondante qui établit la relation entre, d'une part, l'intensité, la durée et la fréquence de la pluie à l'aide de courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) et, d'autre part, le débit de crue. Cette approche permet de lier l'impact des changements climatiques aux changements d'intensité qu'ils produiront sur les pluies provoquant des crues. L'évaluation de l'impact des changements climatiques à l'aide d'une approche issue de cette littérature peut généralement se faire avec un effort raisonnable tout en s'assurant de respecter l'EM 5.2.

Il est à noter également que, dans un certain nombre d'autres situations (p. ex., bassin versant fortement influencé par un territoire hors Québec, rivière à l'extérieur du domaine spatial de l'Atlas), aucune information sur l'impact des changements climatiques n'est facilement disponible. *Dans ce contexte, il est nécessaire d'explorer d'autres banques de simulations ou d'en réaliser de nouvelles qui, respectent alors au mieux les exigences minimales énoncées dans le présent guide.*

Enfin, précisons que des éléments autres que les changements climatiques peuvent aussi perturber l'évolution de l'hydrologie d'un bassin versant. L'urbanisation, la déforestation, le drainage de milieux humides sont des exemples de processus ayant comme effet de modifier le parcours de l'eau dans un bassin versant. S'ils sont déployés à grande échelle par rapport à la superficie totale du bassin versant, ces processus peuvent grandement affecter la réponse hydrologique. Bien que leur prise en compte ne soit pas une exigence minimale, ils peuvent être inclus dans la détermination des ZI si une méthodologie et des données adéquates peuvent être mises à profit.

5.2.2 Intégration des changements climatiques en milieu maritime

EM 5.3	Exigence minimale
Intégration des changements climatiques en milieu maritime	Le mandataire ou le délégué devra, pour toute évaluation qui implique la prise en compte du milieu maritime, considérer les variations du niveau marin relatif à l'horizon 2100. Cette évaluation doit tenir compte du rehaussement marin et de l'ajustement isostatique local et bien couvrir l'incertitude en analysant plusieurs simulations. Le rehaussement marin retenu doit être égal à une projection médiane à l'horizon 2100 selon un scénario d'émission de gaz à effet de serre élevée (SSP5-8.5, ou RCP8.5) pour lequel il aura sélectionné la médiane des simulations. Si les scénarios SSP sont disponibles, ils doivent être privilégiés par rapport aux scénarios RCP.

Bien qu'il ne s'agisse pas à proprement parler d'un processus hydrologique, le rehaussement marin lié aux changements climatiques (rehaussement du niveau moyen des mers) doit être pris en compte dans l'évaluation des niveaux d'inondation dans le cas d'un cours d'eau soumis à l'effet des marées ou d'un cours d'eau se jetant dans un plan d'eau qui y est soumis.

Le contexte géographique est important puisque les rehaussements ne seront pas les mêmes partout, en raison notamment du déplacement isostatique de la croûte terrestre. Ainsi, il est nécessaire de prendre en compte les valeurs de niveau marin relatif, c'est-à-dire tenant compte d'une projection de ces déplacements isostatiques. Pour évaluer le rehaussement marin, l'utilisation d'un ensemble de simulations est nécessaire de manière à utiliser la plage de dispersion des différentes simulations comme estimation de l'incertitude. Parmi les simulations possibles, il est demandé de retenir comme condition minimale de rehaussement celle qui correspond à une projection médiane à l'horizon 2100 selon un scénario d'émission de gaz à effet de serre élevée (SSP5-8.5, ou RCP8.5 lorsque les scénarios SSP ne sont pas disponibles).

L'expertise et l'effort à déployer pour produire des simulations de rehaussements marins sont substantiels. Pour cette raison, il est possible de recourir à des travaux existants, notamment ceux de Ressources naturelles Canada (James et collab., 2021).

5.3 Dynamique temporelle et instantanéité du phénomène de crue

Lorsque les analyses fréquentielles et la construction des chroniques hydrologiques inhérentes sont destinées à alimenter des simulations hydrodynamiques de détermination de zones inondables, l'un des aspects fondamentaux à considérer est de savoir si le phénomène de crue et d'inondation du tronçon de cours d'eau concerné doit être analysé en tenant compte de la complexité de sa dynamique transitoire ou si l'hypothèse, plus simple, du régime d'écoulement permanent est suffisante et appropriée.

Dans le premier cas, les données de débit de crue doivent être produites sous la forme d'un hydrogramme de crue, construit par pas de temps sur une durée définie, alors que dans le second cas, il n'est nécessaire de déterminer que la valeur du débit de pointe de cette crue.

La décision d'utiliser l'une ou l'autre de ces formes de données, hydrogramme ou pic de crue, dépend de la dynamique d'inondation attendue dans le tronçon de cours d'eau concerné. Cette dynamique est principalement conditionnée par l'importance relative de la capacité de stockage de la plaine inondable par rapport aux volumes de crue pouvant être produits par le bassin versant du tronçon.

Dans le cas où l'on anticipe que l'atteinte des niveaux d'inondation dans la plaine inondable sera fortement conditionnée par le remplissage préalable des volumes de stockage de la plaine inondable, une approche de simulation hydrodynamique en mode transitoire est préconisée, comme présentée à la section 7.4.2 du chapitre 7. Dans ce cas, le volume de la crue constitue une variable essentielle à la représentation du phénomène autant que le débit de pointe. Les données hydrologiques requises doivent alors être analysées dans le but de produire des hydrogrammes de crue et non seulement des valeurs du débit de pointe de cette crue. L'unique utilisation d'une

valeur de pointe dans un tel cas risquerait de mener à des résultats de niveaux d'inondation qui seraient surestimés et irréalistes, car elle sous-entendrait à tort que le niveau d'inondation correspondant à ce débit s'établit instantanément dans le cours d'eau, négligeant l'effet tampon important du phénomène de remplissage de la plaine inondable.

Au contraire, lorsque la capacité de stockage de la plaine inondable est jugée faible ou négligeable par rapport aux débits et aux volumes de crue produits par le bassin versant, l'hypothèse du régime d'écoulement permanent peut être considérée comme n'étant pas exagérément sécuritaire, justifiant alors de n'utiliser que des valeurs de débits de pointe dans les simulations hydrodynamiques.

5.3.1 Hydrogramme de crue

La définition des hydrogrammes de crue implique minimalement de considérer le débit de pointe et le volume journalier maximal. L'hydrogramme doit globalement avoir une forme qui permet de bien approximer le volume total de la crue en prenant en compte, notamment, une durée égale ou supérieure au temps de concentration du bassin versant du tronçon de cours d'eau à étudier.

EM 5.4	Exigence minimale
Hydrogramme de crue	Le mandataire ou le délégataire devra considérer des hydrogrammes de crue qui reproduisent le débit de pointe et le volume journalier maximal. L'hydrogramme devra avoir une forme qui permet de bien approximer le volume total de la crue en prenant en compte, notamment, une durée égale ou supérieure au temps de concentration du bassin versant.

5.3.2 Débit de pointe de crue

Que ce soit pour un calcul en écoulement permanent ou pour définir la pointe maximale d'un hydrogramme en écoulement transitoire, il est demandé de déterminer la valeur dite instantanée de ce débit.

EM 5.5	Exigence minimale
Débit de pointe de crue	Le mandataire ou le délégataire devra considérer l'instantanéité du phénomène de crue par une analyse fréquentielle à l'aide de données infrajournalières ou par l'application d'un facteur de pointe sur une analyse fréquentielle journalière.

Les données de débit, qu'elles soient observées à une station hydrométrique ou calculées par simulation hydrologique, sont produites à un pas de temps donné. Assez souvent, ces données de débit sont disponibles sous la forme de moyennes journalières (c'est-à-dire au pas de temps journalier), bien que certaines soient disponibles à des pas de temps sous-journaliers (moyennes horaires, sur 15 minutes, etc.).

Aux fins de la détermination des zones inondables, la valeur recherchée est celle du pic de la crue, de façon à pouvoir capter la condition de débit qui mène aux niveaux d'inondation les plus élevés, pour une probabilité annuelle au dépassement donnée. Considérant cette hypothèse, la valeur maximale du débit instantané du cours d'eau doit être établie à partir du plus petit pas de temps disponible au sein des données.

Il est en effet possible que la crue maximale instantanée de certains bassins versants soit beaucoup plus importante que la crue maximale considérée sur la base d'une moyenne journalière. Dans ce cas, deux façons de procéder sont généralement considérées. La première consiste à effectuer l'analyse fréquentielle sur la longue série de données journalières et à utiliser l'information sous-journalière pour évaluer un facteur d'amplification du débit journalier (souvent appelé facteur de pointe) pour approximer le maximum sous-journalier. Ce facteur peut alors être appliqué a posteriori aux résultats obtenus d'une analyse fréquentielle de maximums journaliers. La seconde façon consiste à réaliser l'évaluation à l'échelle sous-journalière directement. Lorsque les deux façons de faire sont réalisables, il est prudent de les utiliser toutes les deux et d'en faire une comparaison critique.

À titre indicatif, une compilation des valeurs de facteurs de pointe aux stations enregistrant des données infrajournalières sur le réseau hydrométrique québécois est [disponible en ligne](#) (MELCC, 2020).

5.4 Construction de la chronique hydrologique et analyses fréquentielles

Les notions de chronique hydrologique et d'analyse fréquentielle sont deux aspects qui transcendent tout le processus hydrologique d'estimation des crues, et il importe donc de préciser le contexte et la définition de ces deux termes.

Le terme « chronique hydrologique » désigne ici les différentes séries temporelles de débits pouvant être constituées en vue de réaliser les analyses fréquentielles requises à l'estimation statistique des débits de crue, appelée estimation des crues. Ces chroniques hydrologiques peuvent être constituées de séries de débits observés à des stations hydrométriques ou de séries de débits produites par différentes options possibles de modélisation hydrologique.

Le schéma 5.2, plus loin dans le présent chapitre, présente les étapes du processus menant à l'estimation des crues à partir de chroniques hydrologiques observées. Règle générale, si les données formant la chronique hydrologique observées sont issues d'observations enregistrées à une station hydrométrique située directement sur le tronçon à l'étude, le processus d'estimation des crues qui découlera du traitement statistique de ces données est dit « Estimation des crues en milieu jaugé ». Le traitement statistique qui en découle est dit « Analyse fréquentielle locale ».

Si les données formant la chronique hydrologique observées sont issues de la combinaison de plusieurs stations qui ne sont pas situées sur le tronçon à l'étude, mais plutôt dans le voisinage spatial ou hydrologique de ce tronçon, le processus d'estimation des crues qui découlera du traitement statistique de ces données est dit « Estimation des crues en milieu non jaugé ». Le traitement statistique qui en découle est dit « Analyse fréquentielle régionale ».

On appellera aussi « Estimation des crues en milieu non jaugé » le processus d'estimation des crues qui découlera du traitement statistique de chroniques hydrologiques issues de résultats de modélisation. Le processus d'estimation de crue à partir de chroniques hydrologiques modélisées est illustré par le schéma 5.3 présenté plus loin.

Le terme « analyse fréquentielle » réfère à l'exercice qui consiste à établir, sur la base d'outils statistiques, l'estimation des probabilités (ou des fréquences) d'occurrence de crues de différentes intensités. Cette approche tire son origine du fait que la réponse des bassins versants aux forçages météorologiques et à l'état du bassin versant (stock de neige, eau dans le sol, etc.) est conditionnée par des caractéristiques géophysiques du bassin versant relativement stables (dimension, forme, propriétés et utilisations du sol), mais aussi par la succession de processus biophysiques très variables (précipitation, évapotranspiration, ruissellement, etc.). Les conditions hydrologiques qui mènent à la génération de crues ne sont jamais tout à fait identiques d'un événement à l'autre et ces différences de conditions produisent des intensités de crues différentes. L'analyse fréquentielle des crues part de l'hypothèse que les processus qui génèrent une crue ont une composante aléatoire importante et que cette composante aléatoire peut être décrite statistiquement en analysant une chronique hydrologique.

5.5 Prise en compte des données hydrométriques

Les méthodes et les processus décrits dans les prochains paragraphes abordent la question des données hydrométriques et de l'évaluation de leur potentiel d'utilisation pour réaliser une analyse fréquentielle. Les données hydrométriques, lorsqu'utilisables, sont la source d'information pour constituer une chronique hydrologique et, de ce fait, leur prise en compte dans le processus d'analyse fréquentielle est exigée.

EM 5.6	Exigence minimale
<p>Prises en compte des données hydrométriques</p>	<p>Le mandataire ou le délégué devra s'assurer de prendre en compte les données de toutes les stations hydrométriques situées à proximité qui sont représentatives de l'hydrologie actuelle du tronçon et qui ont un assez long historique depuis 1970. Toute donnée antérieure à 1970, pour être considérée, devra faire l'objet d'une analyse particulière. Le mandataire ou le délégué devra mettre à profit dans ses analyses fréquentielles les données dont la qualité et la représentativité pour le tronçon à l'étude sont adéquates.</p>

Puisque la quantité, la qualité et la représentativité des données observées ont une grande incidence sur l'incertitude des estimations de crue, une discussion sur la qualité et la représentativité des données de chaque station par rapport au tronçon de rivière à l'étude est essentielle. Une analyse de la pertinence d'utiliser ces données dans le cadre d'analyses fréquentielles, locales ou régionales, est une assise pour les étapes de travail subséquentes.

5.5.1 Analyse des données hydrométriques

5.5.1.1 Qualité des données

Les données principales pour l'étude des niveaux et des débits sont les séries de données ponctuelles provenant des enregistrements des stations hydrométriques. De telles stations peuvent faire partie de réseaux de mesure comme ceux du MELCCFP du gouvernement du Québec, d'Hydro-Québec et d'Environnement et Changement climatique Canada, mais peuvent également appartenir à une entité plus locale, comme une municipalité. Bien que les données de débit provenant de ces stations soient très majoritairement issues d'enregistrements de niveaux d'eau qui sont convertis à l'aide d'une courbe de tarage, on les désigne généralement comme des données observées ou des données d'observations malgré cette étape de conversion.

Toutes les stations hydrométriques situées à proximité du tronçon à l'étude doivent être considérées pour évaluer leur potentiel d'utilisation pour enrichir l'analyse fréquentielle et en réduire l'incertitude. Les observations à ces stations peuvent être utilisées si elles sont représentatives de l'hydrologie actuelle du tronçon à l'étude et si elles constituent un historique assez long depuis 1970. En effet, la longueur de la série historique de données utilisée pour estimer une crue doit être suffisante relativement à la récurrence de la crue que l'on souhaite évaluer, sinon cette estimation devient trop incertaine. En dessous d'un certain seuil du nombre d'années disponibles, même l'évaluation de l'incertitude devient de mauvaise qualité. Dans ce contexte, considérer comme utilisable une série de données courte (moins de 15 ans, voire 25 ans de valeurs de maximums annuels) devrait faire l'objet d'un solide exercice de justification préalable (Anctil et collab., 1998). Les stations ayant un historique jugé trop court peuvent être combinées à d'autres stations ou tout simplement rejetées. De plus, si des données enregistrées avant 1970 sont utilisées pour estimer la crue, elles devront faire l'objet d'une analyse particulière (voir England et collab., 2018, pour des exemples) sachant que les réseaux de mesure québécois ont subi une phase de modernisation autour de cette période qui a nettement amélioré la fiabilité des données.

La station qui a permis de recueillir les données de base sur le terrain et le processus qui permet de les transformer en débit doivent aussi être exploités suivant des protocoles reconnus. Puisque les courbes de tarage des stations incluent en général peu de mesures d'événements extrêmes, il est à propos de se questionner spécifiquement sur la qualité des données de crues de certaines stations qui peuvent être obtenues par extrapolation de la courbe de tarage et peuvent ainsi être biaisées systématiquement. Dans ces cas, il peut être à propos de ne pas considérer l'utilisation d'une station dont les données seraient entachées d'une trop grande erreur de mesure en crue.

EM 5.7	Exigence minimale
Qualité des données hydrométriques	Le mandataire ou le délégataire devra vérifier si les données observées respectent les hypothèses de bases d'une analyse fréquentielle et, dans le cas contraire, justifier leur utilisation.

Pour contribuer à une analyse fréquentielle, la chronique hydrologique utilisée doit respecter certaines hypothèses de base (England et collab., 2018, Meylan et collab., 2008). Il faut s'assurer que les événements qui la composent sont indépendants les uns des autres. Il faut aussi tenir compte de l'homogénéité des données et s'assurer qu'il n'y a pas de différence significative entre des sous-périodes à l'intérieur de l'échantillon. Enfin, il est à propos d'évaluer si l'échantillon est stationnaire ou si l'on y retrouve une tendance significative à la hausse ou à la baisse. Dans le cas où des tendances sont détectées, il est possible de réaliser une analyse fréquentielle tenant compte explicitement de la non-stationnarité ou de la négliger en le justifiant à partir de l'incidence que ceci a sur les résultats de l'analyse. En effet, il demeure possible d'alimenter une analyse fréquentielle à partir de séries temporelles qui ne vérifient pas une ou plusieurs hypothèses de base mentionnées précédemment (Serinaldi et Kilsby, 2015), mais, dans ce cas, une justification doit accompagner l'utilisation de la série chronologique. En présence d'une série non stationnaire, il est également possible de la tronquer pour conserver un échantillon qui, lui, respecte l'hypothèse de stationnarité. Plus précisément, il s'agit de retirer les premières années de l'échantillon jusqu'à ce que l'échantillon soit considéré comme stationnaire. Des tests statistiques permettent de confirmer ou d'infirmer les hypothèses à la base de l'hydrologie statistique, notamment le test de Wald-Wolfowitz pour l'indépendance des données, le test de Kendall pour la stationnarité des données et le test de Wilcoxon pour l'homogénéité des données.

De même, la qualité des données doit être regardée sous l'angle de son contenu en information sur les crues. Par exemple, deux séries de données disponibles pour les mêmes périodes n'auront pas la même qualité si l'une d'elles a des données manquantes dans les périodes de l'année où il est le plus probable que des crues importantes surviennent. Des données manquantes, dans ce contexte, peuvent réduire de façon importante la pertinence de leur utilisation.

Par souci de simplification, l'analyse fréquentielle est regardée ici dans la perspective de l'analyse des crues maximales annuelles. Toutefois, il est important de mentionner que l'approche est utilisable dans d'autres contextes, comme l'analyse statistique des crues maximales correspondant à des maximums saisonniers (été/automne ou printemps) ou l'analyse statistique des crues supérieures à un certain seuil (méthode de renouvellement), sans se limiter à une seule valeur maximale chaque année.

Enfin, le fait que les données d'une station hydrométrique ne soient pas optimales pour une utilisation en estimation de crue n'implique pas obligatoirement de les retirer, mais bien d'expliquer l'incidence d'une qualité moindre sur les résultats finaux et de prévoir un ajustement correspondant dans l'évaluation de l'incertitude des résultats.

5.5.1.2 Représentativité des données (régime d'écoulement et aspect spatial)

Il importe aussi d'évaluer si les données qui seront utilisées représentent adéquatement le tronçon à l'étude. Il est généralement admis que la superficie du bassin versant est une variable de premier plan pour expliquer les changements du débit le long d'un tronçon de cours d'eau. De ce fait, même si une station hydrométrique se situe plus en amont ou plus en aval que le tronçon étudié, il est possible d'avoir une estimation valable du débit en appliquant un facteur linéaire de correction basé sur le rapport des superficies drainées. Toutefois, plus le tronçon

à l'étude est éloigné de la station hydrométrique, plus l'incertitude associée à une évaluation du débit basée sur la superficie tributaire de ce tronçon augmente. Ainsi, à partir d'un certain éloignement, il est préférable de ne pas considérer la station comme étant utilisable pour une analyse en milieu jaugé et de s'orienter vers des approches en milieu non jaugé qui ajouteront d'autres stations hydrométriques et d'autres informations en supplément de la superficie drainée à l'évaluation.

Par ailleurs, la seule proximité spatiale entre une station hydrométrique et un tronçon à l'étude n'est pas une condition suffisante pour permettre de réaliser une analyse fréquentielle locale. Outre la proximité, il est nécessaire d'évaluer le niveau de similitude entre les caractéristiques physiographiques du bassin versant à la station et celles du bassin au tronçon à l'étude.

Pour évaluer la similitude, quelques questions peuvent être posées :

- Est-ce que la présence d'ouvrages gérés (opération de barrages) influence la station hydrométrique de manière à la rendre non représentative de l'hydrologie du tronçon étudié?
- Est-ce que les superficies drainées des deux tronçons sont assez semblables pour que les caractéristiques de la réponse hydrologique soient similaires d'un bassin à l'autre?
- Est-ce que les lacs ou les milieux humides capables d'influencer le régime hydrique causent des effets de laminage comparables dans les deux bassins versants?
- Est-ce que la météorologie, la topographie, les occupations du territoire et le type de sol sont suffisamment semblables pour que les données de la station hydrométrique soient représentatives de l'hydrologie du tronçon?

De plus, les processus générateurs des crues maximales annuelles doivent aussi être déterminés et comparés, ce qui permet de s'assurer que le régime de crue à la station hydrométrique est issu du même processus dominant que celui au tronçon à l'étude. Il ne serait, par exemple, pas cohérent d'utiliser les données d'une station hydrométrique dont les crues maximales sont générées par des crues printanières pour estimer les crues d'un bassin versant dont les crues maximales sont majoritairement dues à des pluies estivales ou automnales.

L'effort de détermination des facteurs de similitude et des différences significatives entre les bassins versants des stations et ceux du tronçon à l'étude est important, car il vient appuyer la sélection des approches d'analyse fréquentielle les plus pertinentes pour l'estimation des crues.

Enfin, mentionnons que la construction de la chronique hydrologique et les analyses fréquentielles à réaliser peuvent également être influencées par le besoin de tenir compte de la présence de singularités du réseau hydrographique et nécessiter des traitements statistiques adaptés. Comme le montre le schéma 5.1, c'est le cas notamment en présence de plans d'eau (même non gérés) en amont d'un tronçon ou à l'embouchure de celui-ci, de même que dans des zones de confluence de deux tronçons ou plus. Ces différentes conditions sont traitées dans la section 5.6.

5.5.2 Analyse fréquentielle

La présente section décrit les éléments généraux de l'analyse fréquentielle des crues. Les sous-sections suivantes s'appuient sur deux contextes de disponibilité de données en analyse fréquentielle, soit :

- Les analyses fréquentielles réalisées à partir de **chroniques hydrologiques observées** :
 - Selon la proximité de la source des observations (station hydrométrique) par rapport au tronçon analysé, on distingue deux types d'analyses fréquentielles :
 - **L'analyse fréquentielle locale**, lorsqu'il existe une chronique hydrologique de débits observés utilisables directement pour le tronçon. Il s'agit d'une approche dite en milieu jaugé.
 - **L'analyse fréquentielle régionale**, qui tire principalement profit de chroniques de débits observés du voisinage spatial ou hydrologique du tronçon. Il s'agit d'une approche dite en milieu non jaugé. Si on dispose de telles données, l'analyse fréquentielle régionale peut aussi être réalisée même lorsqu'une analyse fréquentielle locale est possible.
- Les analyses fréquentielles réalisées à partir de **chroniques hydrologiques obtenues de la modélisation hydrologique** :
 - Il s'agit aussi d'une approche dite en milieu non jaugé.
 - Ces analyses fréquentielles peuvent aussi être réalisées lorsqu'il est possible de réaliser des analyses fréquentielles locales et/ou régionales basées sur des chroniques hydrologiques observées.

Bien que pouvant s'appliquer à des contextes de jaugeage différents, l'analyse fréquentielle locale et l'analyse fréquentielle régionale sont donc deux approches basées sur des chroniques hydrologiques observées et leur utilisation est décrite au schéma 5.2.

L'analyse fréquentielle utilisant des chroniques hydrologiques basées sur de la modélisation est décrite au schéma 5.3.

Suivant la description de ces trois approches, la sous-section finale met en évidence l'exigence d'utiliser plus d'une approche, en rappelant que les approches en milieu non jaugé peuvent être mises à profit même lorsque des données observées sont disponibles.

5.5.2.1 Analyse fréquentielle à partir de chroniques hydrologiques observées

L'analyse fréquentielle à partir de chroniques hydrologiques observées s'effectue en considérant les étapes du schéma 5.2.

La première étape vise à obtenir de l'information infrajournalière sur les débits de crue. Deux approches sont possibles, soit à partir de séries de maximums annuels journaliers sur lesquelles sont effectuées les analyses fréquentielles avec application subséquente de facteurs de pointe aux débits de crue obtenus, soit à partir de séries

de maximums annuels à pas de temps sous-journalier (p. ex., horaire) pour lesquelles les analyses fréquentielles sont réputées produire des quantiles de débit de crue plus représentatifs des valeurs instantanées des pics de crue. Toutefois, comme les séries d'observations sous-journalières sont courtes au Québec (généralement depuis 1995 seulement) et que les crues à estimer sont associées à des probabilités faibles qui gagnent à être estimées avec des séries plus longues, le calcul de facteurs de pointe sera en général l'approche privilégiée. Ces facteurs seront ensuite appliqués pour amplifier les crues issues d'une analyse fréquentielle réalisée avec des données journalières. Malgré les affirmations précédentes, il demeure tout à fait possible de mettre en œuvre une seconde approche tirant profit directement des observations horaires à l'intérieur du processus d'analyse fréquentielle, surtout si cette analyse est conçue pour maximiser l'utilisation du plus grand nombre d'années de mesure possible.

Comme le précise la section 5.3, si les simulations hydrodynamiques prévues sont réalisées en régime permanent, les intrants requis au modèle hydrodynamique sont les débits de pointe de crue et, de ce fait, les analyses fréquentielles réalisées sur les valeurs de débits sont suffisantes. Si les simulations hydrodynamiques doivent être effectuées en régime transitoire, les intrants requis sont des hydrogrammes et une analyse fréquentielle réalisée sur les volumes de crue est également nécessaire pour pouvoir les produire.

À la suite de l'analyse fréquentielle, qui est la seconde étape du schéma 5.2 et qui s'effectue soit localement, soit régionalement, l'effet des changements climatiques est ajouté à la troisième étape grâce à des facteurs d'amplification des crues historiques découlant de l'analyse de simulations climatiques (voir la section 5.2.1).

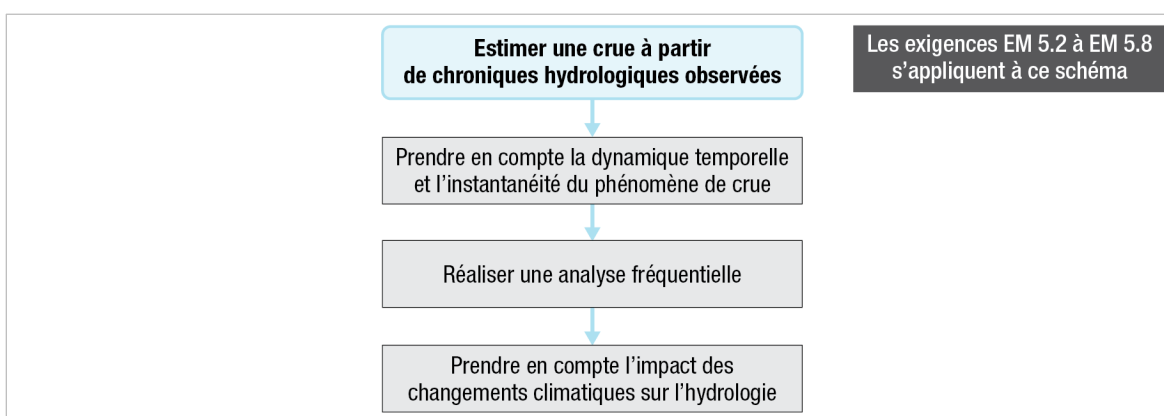


Schéma 5.2 : Schéma de réalisation pour l'estimation de crue à partir de chroniques hydrologiques observées

5.5.2.2 Analyse fréquentielle locale

De manière générale et nonobstant les approches utilisées, l'analyse fréquentielle s'appuie sur la sélection de lois statistiques et de leur ajustement à la chronique hydrologique. Les différentes étapes de cette analyse impliquent un nombre important de choix méthodologiques. Il peut être à propos d'en illustrer quelques-uns. D'abord, la loi statistique doit être sélectionnée. Parmi les nombreuses possibilités pouvant être considérées, mentionnons à titre d'exemple les lois Log-normale, Gamma, Log-Pearson et d'Extremum généralisé (GEV). Ces lois peuvent avoir des comportements assez différents lorsqu'elles sont utilisées pour extrapoler des données peu nombreuses dans le but d'évaluer des probabilités au dépassement faibles. L'ajustement des paramètres des lois est aussi un

exercice qui implique la sélection d'approches et de critères de qualité d'ajustement. L'évaluation globale de la qualité de l'ajustement des différentes lois et des paramètres possibles est aussi teintée par les critères décisionnels retenus et par une interprétation subjective de la personne responsable de l'analyse à la lumière des informations non quantifiables que son expérience professionnelle lui a permis d'acquérir. En bref, l'analyse fréquentielle locale est un outil fondamental de la pratique en détermination des zones inondables qui inclut une part non négligeable d'incertitude méritant d'être explicitée.

Pour toutes ces raisons, le choix de la loi statistique a une influence importante sur les estimations des débits de crue. Afin d'explorer cette incertitude, au moins deux lois statistiques doivent être regardées dans le cadre de l'analyse fréquentielle. L'estimation de crue finale pourra découler de la sélection de la loi ajustée qui donnera des indices attestant sa meilleure qualité, ou encore de la pondération, équiprobable ou non, de plusieurs lois et ajustements. Ce choix devra être justifié.

EM 5.8	Exigence minimale
Analyse fréquentielle à partir de chroniques hydrologiques observées	Le mandataire ou le délégataire devra procéder à une analyse fréquentielle par ajustement d'au moins deux lois statistiques et justifier le choix du meilleur ajustement ou de la pondération des lois retenues.

5.5.2.3 Analyse fréquentielle régionale

Pour un tronçon non jaugé, une analyse régionale permet d'utiliser un certain nombre de stations hydrométriques du voisinage géographique ou hydrologique, mais non directement situées sur le tronçon, à partir desquelles il est possible de faire une estimation des crues pour le tronçon à l'étude. L'analyse fréquentielle régionale peut aussi être considérée pour un tronçon jaugé dans la mesure où elle permet généralement de mettre à profit d'autres données que celles mesurées directement sur le tronçon. Il existe plusieurs façons de réaliser des analyses fréquentielles régionales que l'on peut classer en deux grandes catégories.

La première catégorie concerne les approches faisant la pondération d'analyses fréquentielles locales. Ces approches visent à traduire sous forme de poids numériques le niveau de similarité entre le tronçon à l'étude et chacune des stations hydrométriques utilisables pour en évaluer les crues. Ces poids peuvent dépendre de la distance euclidienne directe entre le tronçon et les stations ou d'une distance topologique tenant compte des patrons d'écoulement. Ils peuvent également dépendre de facteurs de similarités hydrologiques comme la climatologie, la topographie et les caractéristiques biophysiques des bassins versants sans prépondérance particulière accordée à la proximité géographique (voir Ouarda et collab., 2001). Enfin, dans le plus trivial des cas, il peut être aussi possible de se limiter à attribuer des poids égaux aux quelques stations jugées les plus représentatives du tronçon à l'étude si un contexte particulier le justifie. Cela équivaut à utiliser une moyenne des stations jugées représentatives.

La seconde catégorie concerne les approches traitant l'ensemble des données d'observation d'un voisinage géographique ou hydrologique de manière simultanée pour réaliser une analyse fréquentielle les traitant globalement. Ce type d'approche permet, par exemple, de réaliser des analyses fréquentielles s'appliquant à des régions considérées homogènes (voir Anctil et collab., 1998, et Ouarda et collab., 2001).

Comme les éléments fondamentaux de l'analyse fréquentielle régionale découlent de techniques utilisées en analyse fréquentielle locale, les exigences associées à cette dernière s'appliquent.

5.5.2.4 Analyse fréquentielle à partir de chroniques hydrologiques obtenues de la modélisation avec une prise en compte de l'impact des changements climatiques

Dans certains cas, il est impossible de réaliser une estimation des crues par une approche d'analyse fréquentielle s'appuyant directement sur des données mesurées. Cela est particulièrement vrai lorsqu'il y a absence de station de mesure sur le tronçon à l'étude et que les bassins versants instrumentés dans le voisinage sont trop différents du bassin versant du tronçon à l'étude. Dans ces cas, l'approche d'analyse fréquentielle à partir de simulations basées sur de la modélisation hydrologique devient l'option principale. Dans les autres cas où des données d'observation sont utilisables, l'approche par modélisation n'en demeure pas moins une approche disponible apportant de l'information complémentaire qui peut être fort pertinente.

Il existe un vaste éventail de possibilités pour réaliser une modélisation hydrologique menant à une analyse fréquentielle. Le cas le plus simple est celui où les crues sont directement générées par les pluies, généralement dominées par le ruissellement, et dépendent peu des conditions initiales ou antécédentes du bassin versant. C'est notamment le cas dans certains petits bassins versants (ici considérés comme les bassins versants de moins de 100 km²). Dans ces petits bassins, il est assez rare de pouvoir compter sur des observations de débits utilisables directement. L'approche d'analyse fréquentielle basée sur la modélisation permet alors de faire un lien direct entre la probabilité associée à la pluie et celle associée à la crue. Elle peut donc être appliquée à partir de données de pluies même si des données hydrométriques ne sont pas disponibles. Un exemple courant d'analyse fréquentielle basée sur la modélisation pour estimer les crues de petits bassins versants est l'utilisation de la méthode rationnelle. Ce modèle considère une pluie fictive, construite à partir de courbes IDF qui sont des statistiques sur les pluies les plus fortes, pour calculer une crue. Cette méthode convient généralement au bassin dont la réponse hydrologique est proportionnelle à un coefficient de ruissellement.

À partir du moment où les conditions initiales ou antécédentes deviennent importantes ou que la crue peut être générée par la fonte de neige ou un mélange de pluie et de fonte de neige, il devient adéquat de faire de la modélisation hydrologique en continu qui tient compte des principaux processus du cycle de l'eau en jeu. Dans ce cas, une vision rigoureuse peut être d'utiliser les modèles hydrologiques à l'aide d'intrants météorologiques sur de longues périodes de simulations (s'étendant sur plusieurs dizaines d'années) afin de produire des simulations de débits avec lesquelles il devient ensuite possible de faire une analyse fréquentielle. Ces situations se présentent dans la majorité des bassins versants de moyenne à grande superficie, où il est nécessaire de recourir à un modèle hydrologique qui décrit les écoulements dans des environnements ayant des sols et des occupations du territoire

diversifiés. La littérature scientifique regorge de modèles qui ont fait leurs preuves dans des zones géographiques différentes. Ces modèles peuvent être conceptuels (p. ex., modèles à réservoir) et globaux (c'est-à-dire n'offrant un débit qu'à l'exutoire du bassin versant considéré). Ils peuvent également être spatialisés (p. ex., modèles distribués sur des mailles ou sur de petits bassins versants élémentaires) et permettre une description plus fine des processus dans le temps et l'espace. Enfin, l'approche fait le plus souvent appel à de la modélisation hydrologique classique, mais elle peut aussi être basée sur des modélisations plus spécifiques, telles que des modèles de laminage par des réservoirs ou des plans d'eau.

Il est important de souligner que tous les modèles hydrologiques possèdent des forces et des faiblesses qui doivent être cernées durant l'analyse. Celles-ci sont généralement minimisées par un effort de calage qui tire profit de données de débit observé pour faire l'ajustement des paramètres libres des modèles et en optimiser la performance. Toutefois, par la nature même de l'application de la modélisation hydrologique comme substitut aux observations directes dans l'analyse fréquentielle, le calage des modèles hydrologiques est généralement moins robuste que dans d'autres types d'application et l'incertitude en découlant reste importante. De ce fait, l'utilisation d'une méthode appliquant un post-traitement des résultats de modélisation hydrologique pour tirer profit du maximum d'informations sur les crues observées peut permettre l'amélioration des estimations. Un exemple de ce type de post-traitement est celui qui a été réalisé dans le cadre de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional pour la production du portait hydrologique historique, au moyen de la méthode par interpolation optimale (Lachance--Cloutier et collab., 2018).

Comme le montre le schéma 5.3, la première étape rappelle qu'il est primordial de considérer l'instantanéité des crues. Le recours aux facteurs de pointe sera nécessaire si le pas de temps de simulation est journalier, alors qu'une analyse fréquentielle directement au pas de temps sous-journalier est possible si le pas de temps de modélisation est lui-même sous-journalier. Encore ici, si les simulations hydrodynamiques prévues sont effectuées en mode transitoire, une analyse fréquentielle réalisée sur les volumes de crue est également nécessaire pour produire les hydrogrammes requis aux simulations hydrodynamiques.

À l'étape suivante, un départage du type de modélisation est réalisé en fonction de l'ordre de grandeur de superficie des bassins versants, soit les grands bassins versants catégorisés ainsi pour les superficies de 100 km² et plus, et les petits bassins versants catégorisés ainsi pour les superficies inférieures à 100 km². Cette sélection basée sur la superficie, un critère simple, mais imparfait, pourrait être flexible dans certains contextes si des justifications sont fournies.

Comme le montre le schéma 5.3, l'étape suivante est la prise en compte de l'impact des changements climatiques sur les débits et les volumes de crue. Le recours à de la modélisation hydrologique ouvre directement la voie à la réutilisation de ces mêmes outils pour réaliser ces analyses d'évolution, notamment celles qui sont liées aux changements climatiques. L'étape préalable vise à déterminer des intrants qui décrivent les conditions climatiques actuelles et futures. Par la suite, les modèles hydrologiques peuvent être forcés par des scénarios climatiques en suivant les bonnes pratiques de ce domaine (Chen et collab., 2021). Toutefois, des outils ou des banques de données disponibles au Québec peuvent être mis à profit.

L'utilisation et la nature des données de forçage diffèrent selon que les bassins versants étudiés ont une superficie de moins ou de plus de 100 km². Pour le premier cas, l'analyse fréquentielle est réalisée directement sur les données de pluies et alimente la modélisation de telle sorte que la probabilité des crues corresponde directement à la probabilité des pluies. L'intégration des changements climatiques est alors prise en compte par l'estimation de leur impact sur les intensités de pluie, généralement au moyen d'un ajustement des statistiques d'intensité, de durée et de fréquence des pluies. Dans le deuxième cas, des séries temporelles de précipitations et de températures (et d'autres variables de forçage si elles sont pertinentes) alimentent la modélisation, les débits résultants constituant alors des chroniques hydrologiques sur lesquelles s'applique l'analyse fréquentielle.

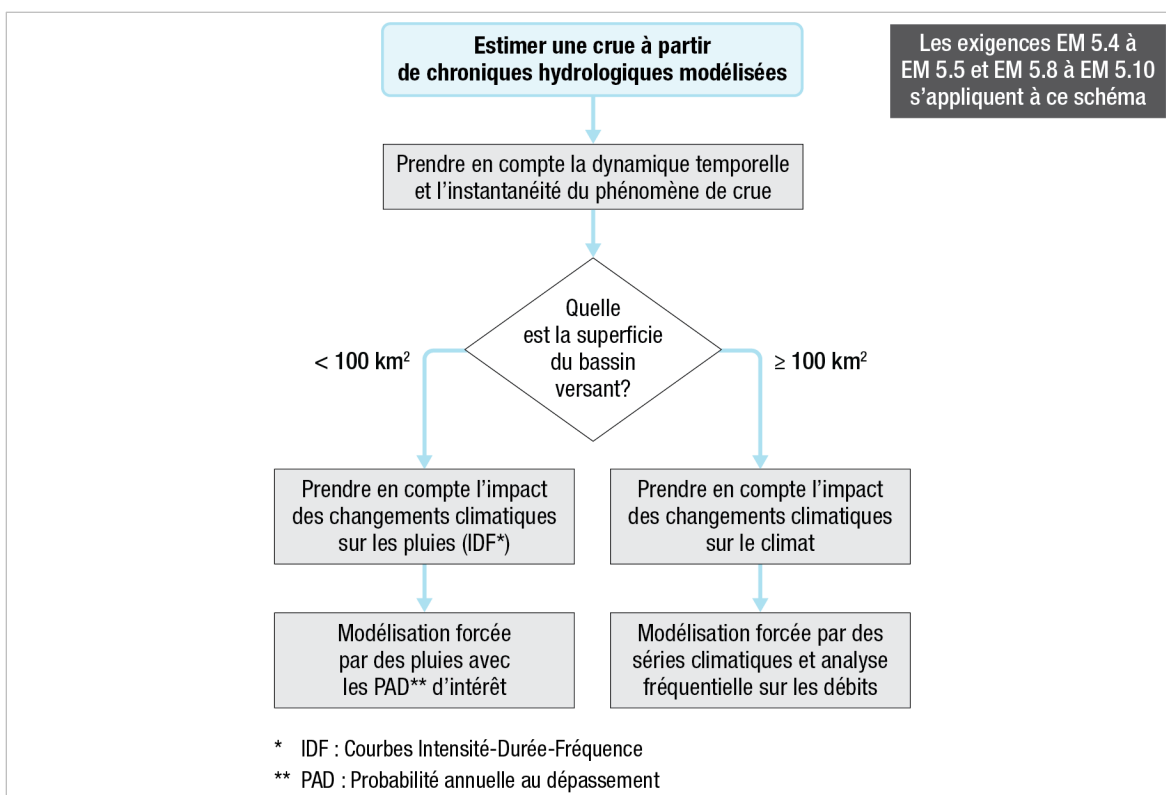


Schéma 5.3 : Schéma de réalisation pour l'estimation de crue à partir de chroniques hydrologiques modélisées

5.5.2.5 Bassins versants de superficie de 100 km² et plus

EM 5.9	Exigence minimale
Analyse fréquentielle à partir de chroniques hydrologiques basées sur la modélisation (≥ 100 km²)	Le mandataire ou le délégué devra, pour les tronçons non jaugés drainant plus de 100 km ² , avoir recours à une modélisation hydrologique validée et permettant l'intégration des changements climatiques ou utiliser les résultats existants issus d'une telle modélisation, comme celle qui sous-tend les données procurées par l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Si l'Atlas n'est pas utilisé, les résultats obtenus devront être comparés avec celui-ci et les différences importantes devront être expliquées.

Les bassins versants de relativement grande superficie ont en général plus de probabilité de présenter une certaine diversité de caractéristiques physiographiques (types de sol, pentes, occupation du sol, etc.) et de conditions initiales (humidité du sol, neige au sol, etc.). De même, leur crue maximale annuelle survient souvent au printemps, de telle sorte que les forçages météorologiques qui les produisent sont généralement des séquences sur plusieurs jours de pluie et de fonte de neige. D'une part, la représentation hydrologique de ces bassins versants exige l'utilisation de modèles hydrologiques relativement complexes, capables d'offrir une certaine représentation mathématique des divers phénomènes inhérents à ces disparités spatiales de leur territoire, incluant la disparité spatiale des conditions initiales découlant des conditions antécédentes et des simulations en continu à partir de chroniques d'intrants météorologiques. D'autre part, au regard de leur grande taille, ces bassins versants offrent aussi la possibilité que l'effet hydrologique de certains détails physiographiques locaux soit inclus dans celui d'ensembles de plus grande échelle. Ce faisant, des modèles hydrologiques distribués et désagrégés à des échelles raisonnables sont tout à fait indiqués pour leur représentation.

Dans ce contexte, un outil de modélisation comme celui qui sous-tend l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional, est pertinent pour procurer des données de débit de modélisation issues de bassins versants de superficie supérieure ou égale à 100 km². De plus, l'outil « Indicateur hydrologique » de l'Atlas fournit des valeurs d'indicateurs qui prennent en compte l'impact des changements climatiques pour la période de référence ainsi que trois horizons futurs (voir la section 5.2 concernant l'exigence minimale sur l'intégration des changements climatiques à l'hydrologie). Ces données peuvent être utilisées pour estimer les crues en considérant à la fois la période historique et le futur anticipé.

Il est évidemment possible d'utiliser une autre méthode pour ce faire. Dans ce cas, les résultats devront être comparés à ceux issus de l'Atlas et, pour tous débits estimés significativement différents, une explication sera fournie.

5.5.2.6 Bassins versants de superficie inférieure à 100 km²

EM 5.10	Exigence minimale
Analyse fréquentielle à partir de chroniques hydrologiques basées sur la modélisation (< 100 km²)	Pour les bassins versants de moins de 100 km ² , le mandataire ou le délégataire devra avoir recours à une modélisation hydrologique validée et adaptée à cette échelle de superficie et permettant l'intégration des changements climatiques.

Lorsqu'un bassin versant draine une petite superficie, les méthodes habituelles d'estimation des débits de crue peuvent devenir difficiles à appliquer, soit en raison d'un manque de données qui limite les possibilités d'une estimation en milieu jaugé, soit parce que les spécificités physiographiques du territoire prennent trop d'importance

quant aux possibilités de représentation par un modèle hydrologique implanté à plus grande échelle. Ce dernier cas s'applique à la modélisation sous-jacente de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional qui, en raison de son implantation à grande échelle, est moins bien adapté à la représentation de bassins versants de superficie inférieure à 100 km².

Dans de tels cas, il est commun d'utiliser des approches de modélisation qui sont mieux adaptées à la modélisation de petits bassins versants. C'est notamment le cas de la méthode rationnelle, bien connue des hydrologues praticiens. Cette méthode, abondamment utilisée et documentée dans la littérature, a l'avantage d'être simple d'utilisation et de nécessiter relativement peu de données. Mailhot et ses collaborateurs (2023) proposent une version modifiée de la méthode rationnelle en se basant sur les petits bassins jaugés du territoire québécois et dont l'applicabilité a été évaluée pour des superficies de bassins versants atteignant les 100 km². Il est important de rappeler que la méthode rationnelle ne tient pas compte de la fonte du couvert de neige. Il serait donc nécessaire de valider avec les acteurs locaux que les inondations historiques ne se produisent pas durant la période printanière, auquel cas, une autre méthode devra être considérée. C'est le cas notamment pour certains bassins versants ayant une superficie se situant entre 50 et 100 km².

D'autres modèles sont évidemment utilisables, qui ne sont pas détaillés dans le présent guide, mais à propos desquels la littérature foisonne. Compte tenu des écarts parfois importants pouvant être obtenus dans l'évaluation des débits des petits bassins versants, le recours à la comparaison d'au moins deux méthodes est une bonne pratique suggérée.

Mentionnons enfin que la modélisation spécialisée en hydrologie urbaine est un cas particulier faisant généralement partie des approches décrites ci-haut pour le cas des bassins versants de moins de 100 km². La forte réactivité des apports de ruissellement faisant que les débits de crue maximaux sont généralement reliés de façon quasi proportionnelle à l'intensité des précipitations liquides, il est de pratique répandue en hydrologie urbaine d'associer la probabilité de dépassement des débits de crue à celle de l'intensité des pluies, comme dans la méthode rationnelle. Des méthodes plus sophistiquées, comme les simulations événementielles à l'aide de modèles d'hydrologie urbaine, ont aussi recours à cette prémisse de transposition des récurrences des pluies sur celles des débits résultants. On utilise alors des hyétogrammes synthétiques, dits pluies de projet, dont la probabilité annuelle au dépassement (période de retour) est préalablement caractérisée. Il existe une abondante littérature présentant différentes méthodes et différents outils de modélisation d'hydrologie urbaine.

5.5.3 Sélection des approches locales, régionales et par modélisation

EM 5.11	Exigence minimale
Sélection des approches locales, régionales et par modélisation	Le mandataire ou le délégataire devra utiliser deux approches pour faire l'estimation de crue dans le cas des tronçons à effort cartographique élevé.

Les approches d'analyse fréquentielle locale, régionale et par modélisation présentent des forces et des faiblesses différentes et des contextes d'applicabilité qui peuvent se recouper. Par exemple, une approche basée sur une chronique hydrologique courte peut appuyer son calcul des crues sur un faible nombre de données qui sont toutefois hautement informatives, une approche régionale peut inclure plus d'informations, mais qui sont moins spécifiques aux conditions locales, tandis qu'une approche par modélisation peut générer un nombre élevé de données simulées, mais qui sont entachées par des hypothèses simplificatrices de modélisation. Cela met en évidence l'intérêt de combiner différentes approches. Si une approche d'analyse fréquentielle locale est employable pour un tronçon donné, il est souvent possible d'utiliser aussi une approche d'analyse fréquentielle régionale et par modélisation hydrologique.

Le tableau 5.1 donne des exemples d'approches qui pourraient être choisies pour satisfaire à l'exigence d'utiliser plus d'une méthode d'estimation des crues pour la période actuelle. D'autres combinaisons restent toutefois possibles si elles sont justifiées.

Tableau 5.1 : Exemple de sélection d'approches selon le tronçon

Pour un tronçon où :	Sélectionner :
Une approche d'analyse fréquentielle locale est possible	<ul style="list-style-type: none"> • Deux ou plusieurs ajustements de lois statistiques • Une méthode régionale et/ou par modélisation hydrologique
Une approche d'analyse locale est impossible, mais une analyse régionale est possible	<ul style="list-style-type: none"> • Une méthode régionale • Une deuxième méthode régionale ou une méthode par modélisation hydrologique
Seule une approche d'analyse par modélisation hydrologique est possible	<ul style="list-style-type: none"> • Une méthode par modélisation hydrologique • Une deuxième méthode complémentaire de modélisation hydrologique ou une analyse détaillée de la sensibilité de la première méthode

5.6 Prise en compte de singularités présentes dans le réseau hydrographique

La construction de la chronique hydrologique et les analyses fréquentielles à réaliser peuvent également être influencées par le besoin de tenir compte de la présence de singularités du réseau hydrographique et nécessiter des traitements de données adaptés.

Dans ces cas, le débit de crue à considérer dans un tronçon donné peut en effet résulter de la combinaison de diverses conditions survenant en amont et en aval. Comme le montre le schéma 5.1, c'est le cas notamment en

présence de plans d'eau (même non gérés) en amont d'un tronçon ou à l'embouchure de celui-ci, de même que dans des zones de confluence de deux tronçons ou plus.

Les plans d'eau situés en amont d'un tronçon peuvent créer un effet de laminage des crues qui influence l'ampleur de la zone inondable du tronçon de cours d'eau en aval. Lorsque ces plans d'eau sont situés à l'embouchure d'un tronçon de cours d'eau, les débits de crue de ce tronçon peuvent survenir lors de différentes conditions de niveau de ces plans d'eau aval en affectant à différents degrés les conditions d'inondation à l'embouchure. C'est notamment le cas d'un tronçon dont l'embouchure se trouve dans un lac d'une certaine importance ou dans le fleuve Saint-Laurent.

De façon analogue, dans des cas de confluences de cours d'eau, il est possible que diverses combinaisons de répartition des débits des tributaires amont conduisent à un même débit de crue du tronçon étudié en aval.

Les secteurs influencés par deux conditions limites ou plus doivent donc être étudiés spécifiquement pour décrire l'interaction entre ces conditions limites sur les zones inondables. L'apport de l'hydrologie se limite ici à décrire les relations entre les conditions limites. Le relais est pris ensuite dans l'analyse des simulations hydrodynamiques de ces différentes conditions (voir la section « Simuler les débits de crue » du chapitre 7.

5.6.1 Effet sur les débits en aval des plans d'eau naturels ou contrôlés par un ouvrage fixe

EM 5.12	Exigence minimale
Effet sur les débits en aval des plans d'eau naturels ou contrôlés par un ouvrage fixe	Lorsqu'un lac dont l'exutoire est naturel ou contrôlé par un ouvrage fixe se situe en amont d'un tronçon à cartographier et que la capacité de laminage de ce plan d'eau est jugée non négligeable, le mandataire ou le délégataire doit recourir à une méthode lui permettant d'estimer cet effet de laminage.

L'approche suggérée ici pour la prise en compte de l'effet de laminage des débits en aval de ces plans d'eau est la même qu'il s'agisse de lacs naturels ou de plans d'eau dont l'exutoire est contrôlé par un ouvrage d'évacuation fixe. Dans ce dernier cas, l'ouvrage peut consister en un simple déversoir fixe auquel peut s'ajouter ou non une ou plusieurs ouvertures d'évacuation non manœuvrables (par exemple un pertuis installé au fond du réservoir ou traversant le barrage à une certaine élévation du fond). L'un des exemples intéressants de ce type d'ouvrage est celui de barrages locaux implantés sur un cours d'eau afin de protéger une zone urbaine située en aval. Ce type d'aménagement, généralement assimilé à une mesure de gestion des eaux pluviales, doit néanmoins être considéré comme un barrage. Ces ouvrages sont habituellement non opérés, mais ils sont munis d'équipements d'évacuation généralement constitués d'orifices pratiqués dans la digue de retenue et de déversoirs, hydrauliquement calibrés de façon à limiter le débit en aval jusqu'à concurrence d'un niveau en amont associé à une crue d'une récurrence donnée. Certains ouvrages peuvent aussi être munis de régulateurs de débit statiques apportant un certain raffinement au contrôle du débit évacué.

Dans tous les cas de plans d'eau avec ouvrages de contrôle fixes, on peut parler de plans d'eau dits non gérés (non opérés), au sens où les ouvrages d'évacuation de ces plans d'eau ne sont pas manœuvrables et donc, dont le fonctionnement en cours d'événement ne peut être modifié par une intervention humaine. Pour plus d'information au sujet des barrages non opérés, le lecteur peut se référer au chapitre 6. A fortiori, le terme de plan d'eau non géré s'applique aussi au cas des lacs naturels.

Selon les caractéristiques du plan d'eau et de son mode d'évacuation, l'effet hydrologique (laminage) sur le débit de crue en aval peut être négligeable ou non. Ainsi, il importe au départ d'analyser ces plans d'eau et leur mode d'évacuation et de déterminer si leur potentiel de laminage est de nature à influencer le régime hydrologique des tronçons à l'étude. Les plans d'eau dont le potentiel de laminage est jugé non négligeable doivent être pris en compte aux fins de la délimitation des zones inondables des tronçons aval, comme il est indiqué dans le schéma 5.1 et décrit ci-dessous. Pour ceux dont le potentiel de laminage est estimé négligeable, considérer que le débit sortant du plan d'eau est égal au débit entrant est une hypothèse appropriée.

BP 5.1	Bonne pratique
Effet sur les débits en aval des plans d'eau naturels ou contrôlés par un ouvrage fixe	Le mandataire ou le délégué peut prendre en compte l'influence des plans d'eau non gérés sur un tronçon en effectuant une analyse fréquentielle avec des données observées en aval ou basée sur les séries temporelles simulées de débits en aval du plan d'eau, provenant par exemple de l'outil « Portrait » de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional, ou en réalisant une modélisation de type réservoir.

Lorsque la capacité de laminage d'un plan d'eau a été jugée non négligeable, le choix de la méthode d'évaluation du débit laminé sortant dépendra du besoin ou non de déterminer aussi les niveaux d'inondation atteints sur le plan d'eau lui-même.

Détermination des débits évacués du plan d'eau

Si le besoin se limite à déterminer les débits en aval du plan d'eau, la solution pourrait passer par des approches simples, à condition de disposer d'observations de débits valides et couvrant une série historique de durée suffisamment longue à l'aval proche du plan d'eau. Dans ce cas, une analyse fréquentielle classique, telle que présentée à la section 5.5.2, peut, par exemple, être réalisée pour tenir compte implicitement de l'influence que peut exercer le plan d'eau sur les débits de crue du tronçon aval.

En l'absence de données observées valides en aval, on peut estimer ces débits en prenant les indicateurs de l'outil « Indicateurs » de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional ou en réalisant soi-même l'analyse fréquentielle à partir de séries temporelles simulées. De telles séries simulées au pas de temps journalier peuvent notamment être extraites du portrait hydrologique pour chaque tronçon situé en aval d'un plan d'eau explicitement modélisé dans l'Atlas. Il faut toutefois savoir que la représentation que fait l'Atlas du laminage effectué par un plan d'eau est plutôt approximative et n'est calibrée que globalement à partir d'observations provenant de stations hydrométriques qui sont le plus souvent physiquement éloignées du plan d'eau en question.

L'autre approche possible pour évaluer les débits laminés est de recourir à des simulations, événementielles ou en continu, à l'aide d'un modèle réservoir, ce dernier étant constitué des relations de stockage et d'évacuation déterminées à partir des caractéristiques physiques du barrage et du réservoir.

Dans le cadre d'une simulation événementielle, plusieurs stratégies existent pour construire un hydrogramme. On peut penser à l'utilisation de l'hydrogramme d'une crue réelle et jaugée sur un tronçon représentatif de celui étudié. Il est également possible de générer un hydrogramme synthétique, provenant par exemple d'un hydrogramme unitaire ou issu d'une simulation de modèle hydrologique. Un autre élément à prendre en compte dans la confection de l'hydrogramme de crue est le processus critique qui mène aux crues (pluie, fonte, pluie et neige, etc.). Pour être certain de considérer un contexte menant aux crues les plus fortes, il est important de déterminer la bonne période de l'année sur laquelle réaliser l'étude hydrologique menant à la confection de l'hydrogramme. En définitive, l'hydrogramme généré doit être ajusté si sa correspondance avec le débit de pointe (mesuré ou estimé) au tronçon à l'étude est défectueuse. Il faut aussi considérer qu'une simulation événementielle par modèle réservoir nécessite que soient définies des conditions hydrologiques et hydrauliques initiales raisonnablement sécuritaires, relatives notamment au degré de remplissage initial du réservoir.

L'autre approche, la simulation en continu de longues séries historiques d'apports introduites dans le modèle réservoir, permet pour sa part de s'assurer de capter l'ensemble des conditions hydrologiques possibles. Une analyse fréquentielle subséquente sur les débits maximaux simulés à l'exutoire du plan d'eau permet de tirer du processus les indicateurs de crue appropriés pour les différentes probabilités annuelles au dépassement visées. À cet effet, il est possible, le cas échéant, de recourir ici aussi au portrait hydrologique historique de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional pour constituer des séries d'apports à introduire dans le modèle réservoir. Cela se fait en extrayant les séries temporelles journalières du portrait pour le ou les tronçons de l'Atlas situés à l'amont immédiat du plan d'eau concerné.

Dans le cas où le plan d'eau est contrôlé par un ouvrage d'évacuation fixe, il demeure aussi possible de considérer, lorsqu'elles existent, les évaluations réalisées lors de la conception ou du suivi de l'ouvrage pour tenter d'en extraire les valeurs de débits nécessaires à la délimitation de la ZI située en aval de ces barrages.

Détermination des niveaux du plan d'eau

La détermination des niveaux du plan d'eau est requise, soit pour délimiter la zone inondable au pourtour du plan d'eau en question, soit pour connaître les niveaux d'eau à l'embouchure d'un cours d'eau amont qui se jette dans ce plan d'eau, soit pour ces deux raisons en même temps. Pour déterminer ces niveaux correspondants aux récurrences visées, il est possible de réaliser l'analyse fréquentielle d'une série suffisamment longue d'observations valides de niveaux maximaux annuels de ce plan d'eau, si une telle série de données est disponible. Faute de pouvoir disposer de telles observations, on peut recourir à l'analyse fréquentielle de séries temporelles simulées, notamment au moyen d'une modélisation de type réservoir.

Précisons finalement qu'il est également possible d'utiliser d'autres méthodes que celles mentionnées dans cette section, à condition de documenter et de justifier l'approche proposée et d'être en mesure de produire des résultats validés.

5.6.2 Analyse des conjonctures d'inondation à l'embouchure d'un cours d'eau et à une confluence de cours d'eau

L'analyse des conjonctures d'inondation vise à établir une variété de scénarios permettant une analyse prudente des niveaux d'eau possibles lors d'une inondation dans les zones localement soumises à l'influence de conditions limites imposées en amont et en aval d'un cours d'eau. De telles situations se rencontrent à l'embouchure d'un cours d'eau, dans un plan d'eau d'importance ou à la confluence de deux cours d'eau.

La gestion des conditions limites est un problème hydrologique et hydrodynamique complexe. L'étude hydrodynamique d'un cours d'eau requiert de pouvoir fixer un débit ou un niveau d'eau à sa limite amont ainsi qu'un niveau d'eau à sa limite aval (p. ex., niveau du cours d'eau pour la condition de débit visée ou niveau d'un cours d'eau récepteur, d'un lac, d'un fleuve, d'un réservoir, etc.). La majorité du linéaire de cours d'eau du territoire est influencée par une seule condition limite (typiquement le débit de crue), mais certaines zones, comme les embouchures et les abords d'une confluence de deux rivières, peuvent être localement influencées par deux conditions limites ou plus.

Dans ces situations, on pourrait vouloir imposer la probabilité annuelle au dépassement recherchée à toutes les conditions limites. Toutefois, cette approche simple présente l'inconvénient d'entraîner une surestimation probable de la zone inondable. Il est donc exigé, dans ces cas, de recourir à des approches plus complètes qui tiennent compte de la concomitance probable entre les événements de hauts niveaux et les forts débits des systèmes concernés. Les deux sections suivantes traitent de ces approches pour les embouchures et les confluences.

5.6.2.1 Embouchures

EM 5.13	Exigence minimale
Embouchures	Le mandataire ou le délégataire devra, lorsque le tronçon à cartographier se jette dans un plan d'eau d'importance, réaliser une analyse conjointe entre les débits du tronçon et les niveaux du plan d'eau.

Comme il est indiqué au schéma 5.1, lorsqu'un cours d'eau se jette dans un plan d'eau d'importance, les zones inondables locales sont dictées à la fois par les débits du tributaire et par les niveaux d'eau en aval. On doit donc considérer les différentes conjonctures combinatoires de ces deux variables ayant une même probabilité de survenir. Par exemple, pour une même probabilité globale de survenance, un fort débit du tributaire s'alliant à un niveau plutôt bas du plan d'eau en aval peut causer dans la zone d'embouchure des inondations différentes de celles produites lorsqu'un débit plutôt faible survient alors que le niveau du plan d'eau en aval est plutôt haut.

L'hydrologue qui souhaite préparer des données en vue de réaliser les simulations hydrodynamiques de tels secteurs devra donc considérer ces deux variables dans son analyse fréquentielle. On parle alors d'analyse fréquentielle conjointe ou bivariée.

En cette matière, un élément important qui dictera la meilleure façon d'inclure les variables de débit et de niveau dans l'analyse est le degré de corrélation existant entre celles-ci. En effet, le cas d'une embouchure pour laquelle les niveaux en aval sont non corrélés aux débits en amont est différent du cas d'une embouchure où une corrélation est établie entre les deux variables. Dans le premier cas, on peut considérer les deux variables indépendamment et analyser différentes combinaisons de probabilités complémentaires, dans le but de définir des scénarios présentant la probabilité (réurrence) combinée visée. Dans le second cas, cette façon de faire sous-estimera potentiellement les débits et les niveaux associés aux récurrences voulues.

Qu'il y ait absence ou présence de corrélation (dépendance), une analyse bivariée est requise (analyse par copule statistique). Ainsi, en absence de corrélation, l'analyse est faite à l'aide d'une fonction spécifique de copule dite copule indépendante. La distribution cumulative de la copule indépendante est simplement définie comme le produit de la fonction de distribution cumulative des variables. L'approche par copule indépendante englobe notamment celle proposée par la Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2022). Par opposition, en présence de corrélation (dépendance) entre les variables débit et niveau, l'analyse se base sur une approche dite par copule dépendante.

Les rapports de Bizhanimanzar et ses collaborateurs (2021a, 2021b et 2022) présentent des exemples concrets d'analyses conjointes aux exutoires de plusieurs bassins versants du projet INFO-Crue. Ces rapports couvrent les façons de déterminer le degré de corrélation entre deux variables, de même que des exemples d'application d'analyses par copule, tant pour des cas où les variables débit et niveau sont corrélées (copules dépendantes) que pour des cas où les deux variables sont non corrélées (copules indépendantes). La section 7.8.3 du chapitre 7 réfère aussi à cette documentation.

5.6.2.2 Confluences

BP 5.2	Bonne pratique
Confluences	Le mandataire ou le délégataire peut prendre l'enveloppe de plusieurs scénarios pour estimer les zones inondables à la confluence de plusieurs cours d'eau.

La jonction de plusieurs rivières est un cas particulier qui mérite une attention spéciale dans le présent guide. On nomme confluence ce point où deux cours d'eau se rencontrent pour n'en former qu'un seul. Il peut s'agir de l'endroit où un tributaire se jette dans un cours d'eau d'importance ou encore de la rencontre de deux cours d'eau de taille moyenne. La figure 5.1 est une représentation schématique de confluence, où chaque branche est identifiée.

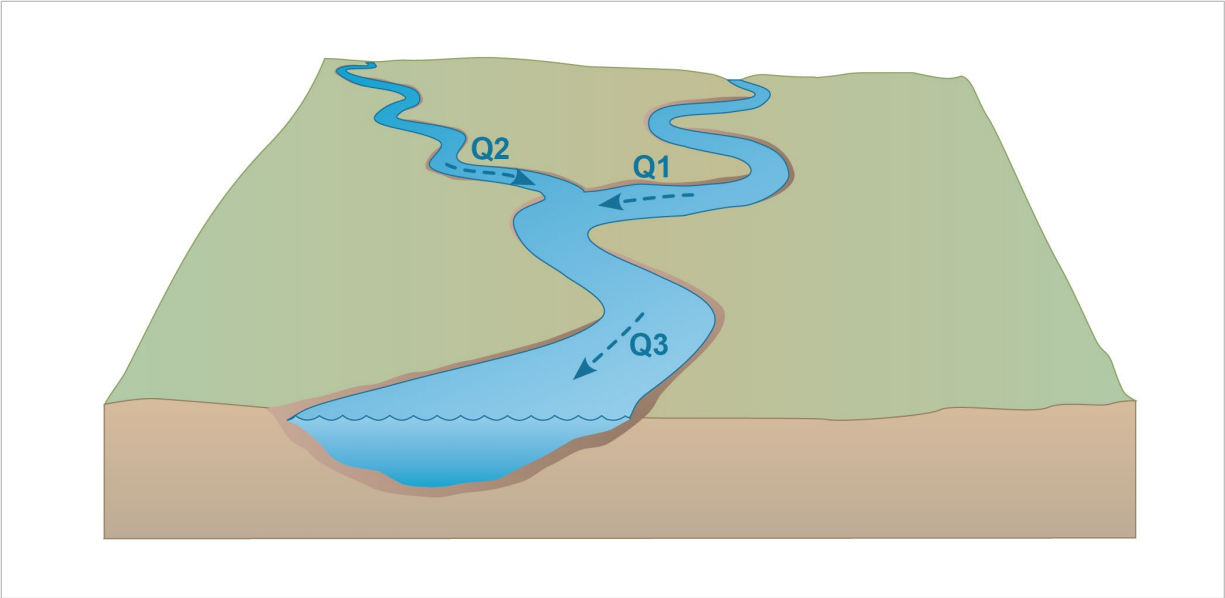


Figure 5.1. Schéma d'une zone de confluence de deux cours d'eau

Théoriquement, les conjonctures d'inondation à la confluence de deux cours d'eau constituent un cas d'analyse de probabilités jointes d'inondation au même titre que les cas d'embouchures d'un cours d'eau dans un plan d'eau. Le niveau d'eau occasionné par l'écoulement dans le tronçon en aval constitue une composante des conjonctures possibles d'inondation à ce site. Le nombre de sites de confluence pouvant exister dans un bassin versant étant généralement beaucoup plus élevé que le nombre d'embouchures dans un plan d'eau, une approche complète d'analyse bivariée représente un effort de traitement statistique et un exercice de traitement qui deviennent trop lourds pour en justifier l'exigence méthodologique. Une approche plus sommaire qui serait raisonnablement précise pourrait constituer ici une bonne pratique à adopter. L'objet de la présente section est de proposer l'une de ces possibles approches, destinée à la délimitation d'une zone inondable constituée de l'enveloppe d'un nombre limité de scénarios de conditions limites hydrologiques. L'objectif est alors d'estimer des zones inondables sécuritaires, mais réalistes. Le scénario le plus sécuritaire serait de simuler hydrauliquement les tronçons de la confluence alimentés de débits issus d'une analyse fréquentielle univariée effectuée sur chacun des tronçons. Plutôt que d'utiliser ainsi directement les débits associés à la probabilité annuelle au dépassement (PAD) dans les tronçons Q1, Q2 et Q3, il est proposé de simuler hydrauliquement la confluence avec différentes combinaisons plus réalistes de débits et de prendre l'enveloppe des résultats pour la cartographie finale. Les débits dans chaque branche peuvent être obtenus de différentes façons, dont deux seront mentionnées ici.

La première façon consiste à créer des scénarios dans lesquels une branche de la confluence est complémentaire aux deux autres. Par exemple, le premier scénario pourrait considérer un Q3 et un Q2 associés à la PAD issue d'une analyse fréquentielle univariée effectuée sur chacun d'eux et un Q1 qui serait la différence entre Q3 et Q2, assurant ainsi la continuité des débits. Le second scénario pourrait considérer la combinaison complémentaire, soit un Q3 et un Q1 associés à leur PAD individuelle et un Q2 égal à la différence entre Q3 et Q1. En combinant les zones inondables de ces deux scénarios, on obtient une zone à la fois sécuritaire et réaliste. Il est important de noter que si

le troisième scénario possible, soit celui où le tronçon en aval (Q3) est complémentaire, risque de donner des ZI trop sécuritaires, il peut être testé, mais on devrait généralement l'éviter lors de la création de la cartographie.

La seconde approche pour établir les débits dans chaque scénario est proposée par la Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2022), approche dont il est question à la section 5.6.2.1. Elle permet de couvrir une variété de crues et de les considérer dans l'enveloppe de la zone inondable finale.

5.7 Gestion de l'incertitude

BP 5.3	Bonne pratique
Gestion de l'incertitude	Le mandataire ou le délégataire pourra fournir une quantification des incertitudes associées aux estimations de crue.

L'estimation des crues est incertaine par définition et, ce faisant, la quantification de l'incertitude est une bonne pratique qui permet de guider le mandataire ou le délégataire pour retenir un résultat final prudent à partir de l'ensemble des analyses découlant de l'estimation des crues. Il demeure qu'une quantification des incertitudes décrivant avec une bonne qualité la distribution des valeurs réelles possibles, mais inconnues, est un exercice d'analyse qui peut être complexe. Pour illustrer cette idée de qualité de la quantification de l'incertitude, pensons simplement au fait que pour que l'intervalle de confiance de 90 % d'un indicateur de crue soit de qualité, il faut obligatoirement que la valeur réelle de l'indicateur soit à l'extérieur de cet intervalle dans 10 % des cas. En d'autres mots, ce serait un signe de mauvaise qualité de la quantification de l'incertitude si 100 % des valeurs réelles se retrouvaient à l'intérieur de l'intervalle de confiance à 90 %. Il faut donc considérer l'estimation de l'incertitude comme un exercice important qui doit être réalisé avec rigueur. De plus, il faut garder à l'esprit que chaque technique d'estimation de l'incertitude est soumise à certaines limites et qu'il est essentiel de choisir la plus exacte possible.

Le recours à plusieurs approches différentes d'estimation de crues, comme différentes combinaisons d'approches locales, régionales et par modélisation, n'est pas en soi une méthode d'estimation formelle de l'incertitude. L'écart entre les résultats donne une indication sur la dispersion produite par différents choix méthodologiques, mais ne représente généralement pas l'ensemble des résultats probables. C'est pourquoi il est pertinent d'estimer l'incertitude de chaque approche individuellement.

Les sources d'incertitude pour l'estimation des crues sont nombreuses. Pour nommer les plus importantes, mentionnons la taille de l'échantillon et les incertitudes dans les valeurs des données de cet échantillon.

L'incertitude sur la taille de l'échantillon est celle qui est le plus souvent considérée dans la pratique. Cette incertitude découle, notamment, du besoin, aux fins de détermination des zones inondables, de quantifier une crue d'une probabilité telle qu'il est tout à fait possible qu'aucune crue du même ordre de grandeur n'ait été observée dans l'échantillon disponible. Par exemple, un échantillon qui n'a que 20 ans de données a moins d'une chance

sur cinq de contenir une crue plus grande qu'une crue de probabilité 1 : 100. Dans ce contexte, l'hydrologue dispose de beaucoup d'observations des événements fréquents, mais de très peu d'observations des événements rares. L'incertitude sur l'estimation augmente donc rapidement avec la rareté de l'événement recherché et doit être quantifiée.

Les méthodes les plus simples pour estimer l'incertitude provenant de la taille de l'échantillon sont les méthodes de sous-échantillonnage. Elles consistent à estimer les crues possibles sur la base d'une sélection de quelques données parmi la totalité des données de l'échantillon. Les techniques les plus connues comme le « bootstrap » consistent à sélectionner au hasard n valeurs avec remise parmi l'ensemble de valeurs possibles. Les statistiques de crues estimées sur ce nouvel échantillon seront plus ou moins différentes de celles estimées à partir de l'échantillon complet et, si la procédure est répétée un grand nombre de fois, permettront d'estimer des intervalles de confiance. Par exemple, le « bootstrap » fournira une grande incertitude et un intervalle de confiance très large si l'échantillon comporte quelques valeurs extrêmes puisque des répétitions incluront ces valeurs extrêmes et d'autres ne les incluront pas. Le « bootstrap » est évidemment sensible et limité par la quantité des données utilisées. Si ces données sont en nombre insuffisant, le « bootstrap » peut retourner des intervalles de confiance qui ne représentent pas la véritable incertitude.

Bien que ces dernières soient souvent négligées, les incertitudes dans les valeurs des données de l'échantillon utilisé pour l'analyse fréquentielle peuvent aussi influencer l'estimation de la probabilité d'inondation. Ces incertitudes peuvent provenir, selon les situations, de la prise des mesures, de leur interpolation spatiale, des imprécisions de la modélisation, etc. Ainsi, pour les estimations des incertitudes de la prise de mesure des débits standards, l'évaluation repose entre autres sur l'évaluation des erreurs possibles qui découlent de la courbe de tarage. Les incertitudes d'interpolation peuvent généralement être estimées par des méthodes de validation croisée. Les incertitudes liées aux données de simulation issues de la modélisation peuvent aussi être estimées à partir de simulations à des sites jaugés qui n'ont pas contribué à la construction et au calage des outils de modélisation.

La prise en compte de plusieurs sources d'incertitudes implique généralement l'utilisation de méthodes d'analyse de l'incertitude globale qui résulte des estimations de crues. Par exemple, l'utilisation d'approches statistiques bayésiennes peut permettre de regarder une large gamme d'incertitudes dans un cadre statistique formel. Des méthodes plus simples sont aussi possibles selon le contexte et les hypothèses quant à la forme de la distribution des incertitudes (p. ex., distribution normale).

Enfin, l'analyse de sensibilité n'est pas une analyse d'incertitude en soi, mais elle permet de regarder la robustesse des hypothèses posées dans l'élaboration des approches en perturbant les paramètres et les variables d'intérêt pour mesurer la réponse des résultats à ces perturbations. Il n'est généralement pas possible d'estimer les intervalles de confiance par cette analyse, mais on peut déterminer les éléments cruciaux qui ont une incidence sur les estimations.

5.7.1 Évaluation de l'incertitude et de la dispersion des projections hydroclimatiques

La façon d'utiliser la dispersion des scénarios pour faire une estimation de l'incertitude est une question de recherche active et, à cet égard, de nouvelles approches sont régulièrement étudiées. En absence de consensus scientifique clair, il est courant et pratique d'estimer l'incertitude, dans le cas le plus simple, en utilisant la totalité des simulations comme si chacune était équiprobable ou, dans un cas plus élaboré, en appliquant des pondérations à chacune des simulations pour tenir compte d'une évaluation de leur qualité à reproduire le passé et du niveau d'indépendance qu'elles ont par rapport aux autres simulations. Le résultat médian et les quantiles autour de cette médiane peuvent alors donner une estimation de l'incertitude des futurs possibles.

6. Hydrologie influencée par une ou plusieurs sources de perturbations anthropiques

6.1 Objectif et résultats attendus

Le présent chapitre vise à présenter les résultats attendus, les exigences méthodologiques et des suggestions de bonnes pratiques relatives aux situations où le régime des crues est influencé par des **sources de perturbations anthropiques** (SPA).

Au sens de la détermination de l'impact hydrologique des SPA sur le régime des crues, on peut distinguer deux types de perturbations anthropiques, soit principalement les perturbations générées par les barrages et, à une moindre échelle, les perturbations liées aux mesures de gestion des eaux pluviales, en particulier urbaines. Il n'est toutefois pas exclu que d'autres types de sources d'altération anthropiques du régime des crues puissent exister dans un bassin versant; on peut penser par exemple à l'action d'une dérivation soustrayant une part sensible du débit de crue d'un cours d'eau. En pareil cas, il revient au mandataire ou au délégataire de déterminer ces sources et d'en justifier le traitement proposé.

Il est d'abord nécessaire d'évaluer si la SPA, peu importe son type, entraîne ou non une perturbation importante aux débits de crue des cours d'eau aval. Le plus souvent, la perturbation que l'on cherchera à quantifier consiste en une atténuation du débit de crue apportée par la SPA ou liée à sa gestion. Par la suite, une caractérisation de la perturbation et de son mode d'intervention sur le régime de la crue dictera la façon de prendre en compte son effet lors du processus de détermination des zones inondables concernées. Dans le cas, par exemple, d'un barrage opéré associé à un lac-réservoir, la possible perturbation consiste généralement en une atténuation du débit de crue apportée par l'opération de ces ouvrages d'évacuation, atténuation qu'il importe de traiter de façon prudente au regard du processus de cartographie des zones inondables du cours d'eau aval concerné. Au contraire, dans le cas d'un barrage opéré « au fil de l'eau », l'atténuation, sans s'avérer nulle, est généralement faible, ne justifiant alors pas sa prise en compte dans le processus de cartographie des zones inondables situées en aval.

L'objectif du présent chapitre consiste à proposer un cheminement et des critères d'évaluation pour guider le lecteur dans ce processus, soit :

- a) L'évaluation de l'effet potentiel de la source de perturbation;
- b) La caractérisation de l'échelle temporelle, de l'importance et de la nature de la perturbation;
- c) Le choix du traitement méthodologique approprié à la prise en compte des perturbations confirmées et son application dans le processus de délimitation des ZI qui sont affectées.

En définitive, les orientations méthodologiques présentées dans ce chapitre sont toujours basées sur une application raisonnable du principe de précaution.

6.1.1 Les barrages

Tant pour les résultats attendus que pour les méthodologies de traitement proposées, la démarche relative à l'évaluation de l'effet des barrages sur les zones inondables concernées tient compte à la base d'une distinction entre les barrages opérés et les barrages non opérés et propose de les aborder séparément.

On entend par barrage « opéré » un barrage dont l'ouvrage d'évacuation comporte des équipements manœuvrables, que les manœuvres y soient réalisées en temps réel ou à une fréquence plus faible (p. ex., à une échelle de temps saisonnière). Généralement, les équipements manœuvrables en question sont des vannes ou des poutrelles amovibles, automatisées ou non. Le terme « opéré » a été privilégié au terme « géré » pour exprimer la portion essentiellement technique de la gestion d'un barrage. En général, le terme « géré » se rapporte au caractère plus global de la gestion de l'ouvrage, incluant son entretien, son administration financière et légale, etc. Lorsque plusieurs barrages présents dans un même bassin versant sont opérés de façon concertée, on convient de décrire cette situation au moyen de l'expression « système géré ». Les opérations des ouvrages concernés dans ce cas impliquent en effet une coordination parfois hautement organisée, dépassant la seule opération technique d'un ouvrage considéré isolément.

Comme l'illustrent ci-après le schéma 3.1 et la section 6.1.1.1, la méthodologie proposée pour les barrages opérés est déclinée pour trois classes de barrages distinctes de cette même catégorie. Cette classification repose principalement sur l'influence que l'opération de ces barrages exerce sur le régime des crues des cours d'eau en aval.

Les barrages non opérés sont des ouvrages qui peuvent être destinés ou non à lamener une crue, mais qui ont comme point commun de ne pas être dotés d'équipement d'évacuation manœuvrable. Leur potentiel d'atténuation de la crue, lorsqu'avéré, n'est donc dû qu'à leurs caractéristiques physiques. Celles-ci sont déterminées lors de la conception des barrages et sont considérées comme invariables dans le temps, à la condition que l'on procède à un bon entretien de l'état physique de ces ouvrages.

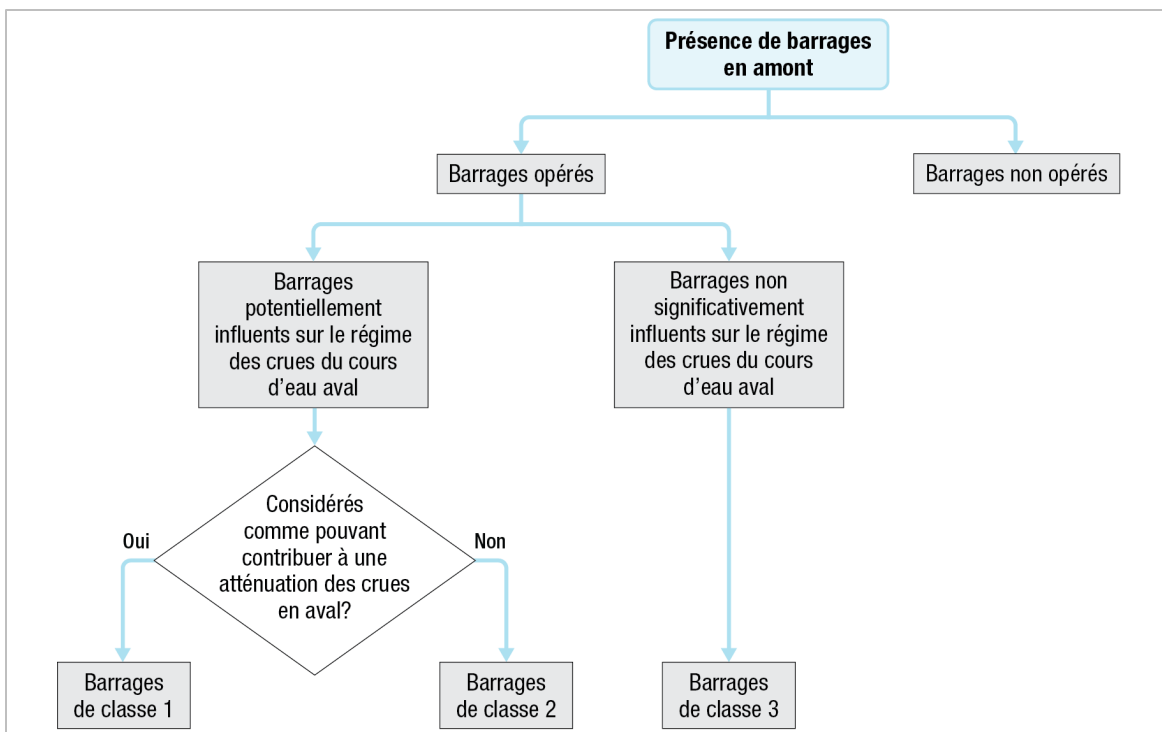


Schéma 6.1 : Catégorisation des barrages aux fins du processus de détermination et de cartographie des zones inondables

6.1.1.1 Les barrages opérés

Influence en aval

Tel qu'il a été mentionné, la catégorisation des barrages opérés, effectuée aux fins du processus de détermination et de cartographie des zones inondables, est basée sur l'effet que peut exercer l'opération de ces barrages sur le régime des crues des cours d'eau situés en aval.

À cet égard, au Québec, les initiatives et les programmes antérieurs de cartographie des zones inondables n'étaient pas appuyés sur des directives ou des méthodologies claires relatives à la prise en compte de l'effet que peuvent avoir la présence et l'opération des barrages sur les débits de crue des cours d'eau en aval dont les zones inondables devaient être délimitées et cartographiées. Souvent, ces débits émanaient d'analyses fréquentielles réalisées à partir d'historiques d'observations enregistrées à des stations hydrométriques situées en aval de barrages. Ces valeurs de débit reflétaient implicitement l'effet que pouvaient avoir sur le débit l'exploitation de ces barrages, mais sans que cet effet soit explicité ou quantifié. Il n'était alors pas possible de savoir si les résultats obtenus correspondaient ou non à une bonne représentation des effets de laminage liés à l'opération des barrages en amont pour les récurrences recherchées.

Certains événements d'inondation passés nous incitent à élaborer une approche de cartographie qui intègre de façon prudente l'effet des barrages. Aussi, dans le cadre de la mise en place en 2020 du Plan de protection du

territoire face aux inondations (PPTFI), le besoin de préciser une démarche claire et systématique relative à la prise en compte de l'effet de l'opération des barrages dans le processus de cartographie des zones inondables est marquant et incontournable. C'est à cet objectif que se consacre la majeure partie du présent chapitre.

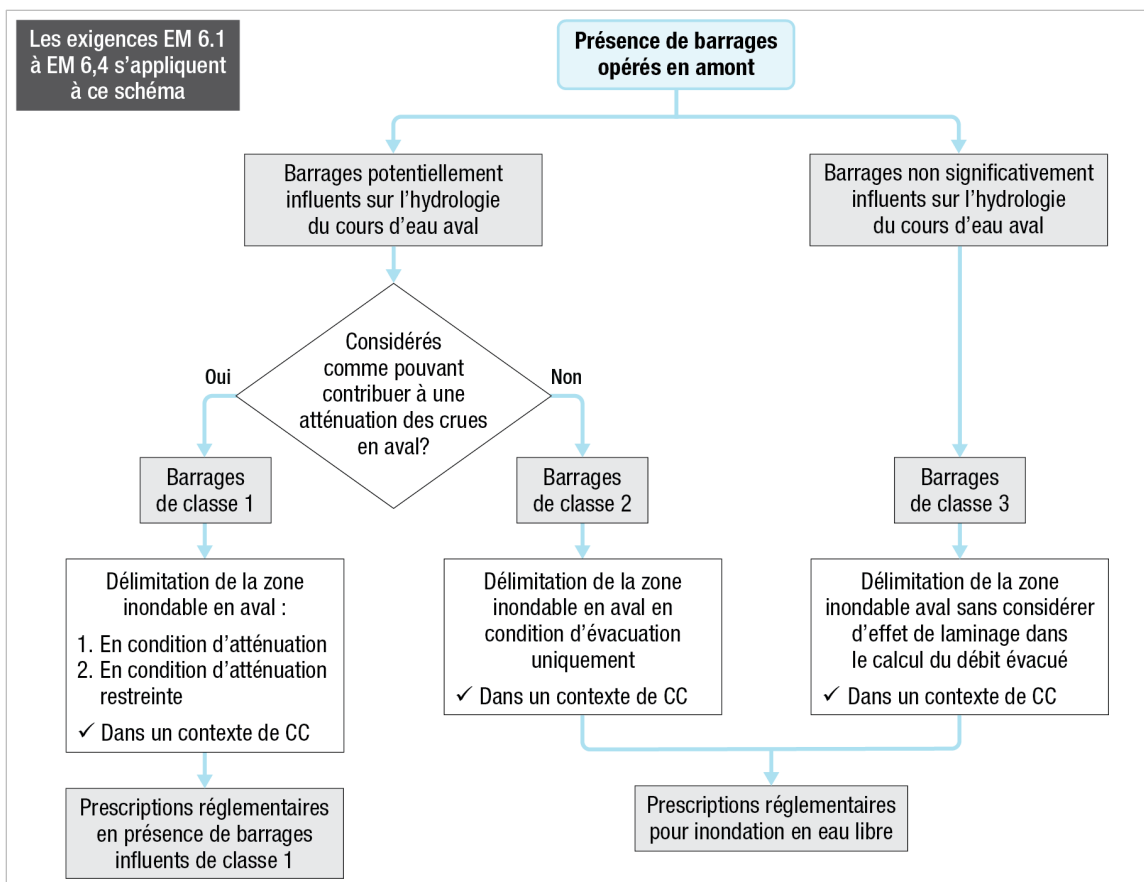
L'approche décrite met à profit la prise en compte de directives suivies par d'autres provinces du Canada, dont l'Ontario et l'Alberta, et d'autres pays, comme la France et les États-Unis. Toutes ces directives comprennent une considération, plus ou moins spécifiquement ou largement applicable selon les cas, de délimitation de zones inondables en aval qui ne tient pas compte de l'atténuation des débits de crue pouvant être associée à l'action de certains barrages.

Nous verrons dans les sous-sections suivantes du présent guide qu'une considération semblable est prescrite pour une proportion limitée des barrages opérés. Cette considération, nommée « condition d'atténuation restreinte », n'est applicable qu'aux barrages opérés de classe 1, dont le nombre total représente moins de 3 % de l'ensemble des barrages présents sur le territoire du Québec méridional.

Il importe d'ajouter que le processus de cartographie des zones inondables décrit dans le présent chapitre ne prend pas en compte le risque de bris du barrage lorsqu'une des crues visées en cartographie réglementaire excède les valeurs relatives à la crue de sécurité de ce dernier. Selon la Loi sur la sécurité des barrages (LSB), la crue de sécurité n'est pas établie en fonction des capacités fonctionnelles et structurales d'un barrage, mais en fonction du niveau des conséquences considéré en aval lors de la rupture théorique d'un barrage. L'évaluation de la crue de sécurité est exigée uniquement pour les barrages de forte contenance et est habituellement documentée dans les rapports des études de l'évaluation de la sécurité des barrages, un document mis à jour tous les dix ans. Ainsi, la crue de sécurité associée à un barrage ne peut à elle seule renseigner sur la réelle capacité de l'ouvrage à résister à une crue de récurrence supérieure à cette crue. Le mandataire ou le délégué peut, à sa convenance, consulter le gestionnaire du barrage pour vérifier la résistance de ce dernier à une crue visée en cartographie dépassant sa crue de sécurité et la documenter s'il le souhaite. Toutefois, dans son processus de délimitation de la zone inondable en aval du ou des barrages, le mandataire ou le délégué n'est pas tenu d'évaluer le risque de bris. Rappelons que la nouvelle cartographie de zones inondables vise à couvrir l'étendue minimale de la zone inondable dans laquelle l'aménagement du territoire devra être mieux réglementé.

Par ailleurs, l'appréciation de l'influence des barrages sur le régime des crues des cours d'eau en aval se fait en supposant un bon entretien de l'état structural et fonctionnel de l'ouvrage, deux concepts couverts par la LSB. Au même titre que pour la résistance d'un barrage à une crue de récurrence dépassant sa crue de sécurité, la vérification de l'intégrité structurale et fonctionnelle de l'ouvrage peut être faite auprès du gestionnaire ou propriétaire du barrage, mais ne nécessite pas de considérations particulières de la part du mandataire ou délégué.

Le schéma 6.2 illustre le processus menant à la sélection et à l'application des prescriptions appropriées à la catégorisation des barrages opérés et à l'intégration de leur effet aux fins de la cartographie des zones inondables des cours d'eau aval.



Note : CC = changements climatiques

Schéma 6.2 : Démarche de catégorisation des barrages opérés selon leur mode d'influence sur le régime des crues des cours d'eau situés en aval et de délimitation conséquente des zones inondables de ces derniers

Le processus de catégorisation des barrages opérés débute par l'évaluation de leur **potentiel d'influence sur le régime des crues**. La notion d'**influence « hydrologique »** réfère principalement à la capacité opérationnelle de l'aménagement à influencer significativement le régime des **débits évacués** au cours d'eau en aval en conditions de crues.

L'étape suivante consiste à tenir compte de la conception et de la gestion des barrages classés potentiellement influents et à distinguer ceux dont l'analyse mène à les considérer comme pouvant, par leur opération, contribuer à l'atténuation des débits de crue en aval.

Ces deux premières étapes d'évaluation conduisent à une classification dictant les considérations à suivre lors du processus de la délimitation de la ZI en aval. Trois principales classes de barrages opérés découlent de ce processus :

- **Classe 1** : barrages influents, opérés en temps réel ou sur une échelle saisonnière, considérés comme pouvant contribuer directement ou indirectement à une atténuation des débits de crue en aval.
- **Classe 2** : barrages influents, opérés en temps réel ou sur une échelle saisonnière, et considérés comme ne pouvant contribuer à une atténuation des débits de crue en aval.
- **Classe 3** : barrages opérés non significativement influents.

Pour chacune de ces trois classes de barrages, le tableau 6.1 précise les résultats attendus relatifs à la détermination des débits évacués par ceux-ci, à utiliser aux fins de la délimitation des ZI des cours d'eau situés en aval. Ces résultats se rapportent aux règles de gouvernance présentées dans le volet **cartographie réglementaire** du présent guide méthodologique.

Tableau 6.1 : Catégorisation des barrages opérés présents dans un bassin versant selon leur mode d'influence sur le régime des crues des zones inondables situées en aval et résultats attendus concernant la cartographie conséquente de ces zones

Classe de barrages	Définition de la classe	Type de barrage considéré pour la classe	Résultat attendu quant à la détermination des débits évacués par les barrages à des fins de délimitation des ZI des cours d'eau en aval
Classe 1	Barrages opérés classés comme influents sur le régime des crues en aval et comme pouvant contribuer à une atténuation des débits de crue en aval	- Barrages opérés en temps réel ou sur une échelle saisonnière	<ul style="list-style-type: none"> - Débits de crue pour des PAD de 5 % et 1 % en condition d'atténuation de la crue - Débits de crue pour des PAD de 1 % et 0,3 % en condition d'atténuation restreinte de la crue <p>Évaluations à faire dans un contexte de CC*</p>
Classe 2	Barrages opérés classés comme influents sur le régime des crues en aval, mais comme ne pouvant pas contribuer à une atténuation des débits de crue en aval	- Barrages opérés en temps réel ou sur une échelle saisonnière non attribuables à la classe 1 (p. ex., barrages avec vannes ou poutrelles opérées en condition de crue uniquement pour l'évacuation de cette dernière)	<ul style="list-style-type: none"> - Débits de crue pour des PAD de 5 %, 1 % et 0,3 % en considérant le barrage en « mode évacuation » en temps de crue. <p>Évaluations à faire dans un contexte de CC*</p>

Classe de barrages	Définition de la classe	Type de barrage considéré pour la classe	Résultat attendu quant à la détermination des débits évacués par les barrages à des fins de délimitation des ZI des cours d'eau en aval
Classe 3	Barrages opérés classés comme non significativement influents sur le régime des crues en aval	- Barrages opérés en temps réel ou sur une échelle saisonnière	- Débits de crue pour des PAD de 5 %, 1 % et 0,3 % évalués en ne considérant pas d'effet de laminage relié à la présence du barrage Évaluations à faire dans un contexte de CC*

* CC = changements climatiques; la prise en compte des CC est applicable pour toutes les sources de perturbations anthropiques (voir la section 6.1.4).

Dans le cas des barrages de classe 1, la considération d'une contribution à une atténuation mènera, conformément aux règles de gouvernance présentées dans le volet **cartographie réglementaire** du guide, à une double délimitation de la ZI en aval :

- Une première zone correspondant au débit évacué du barrage en condition influencée par l'effet d'atténuation qui est opéré par ce dernier, tel qu'elle peut être constatée actuellement;
- Une seconde zone, un peu plus étendue, destinée à tenir compte d'une potentielle altération (dégradation, diminution) dans le temps de cet effet d'atténuation, soit une condition dite d'atténuation restreinte.

La raison de ce traitement particulier se justifie :

- 1) **Pour la condition d'atténuation**, du fait qu'il est démontré que l'aménagement en question peut contribuer ou contribue actuellement à une atténuation des débits de crue en aval. En raison de la capacité des barrages de classe 1 recensés sur le territoire (section 6.2.1.1) et de leur historique de gestion, cette atténuation n'est généralement jugée possible que pour les crues de PAD de 5 % et de 1 % des crues déjà observées. En effet, l'expérience de la gestion des crues des dernières années (2017, 2019, 2023 et 2024, dont certaines sont estimées de récurrence 100 ans), même par des barrages de grande taille, nous amène à penser qu'il est justifié de considérer la condition d'atténuation uniquement pour des crues fréquentes à moyennement fréquentes. Pour des crues peu fréquentes, l'atténuation est jugée peu probable par les experts en gestion de barrages.
- 2) **Pour la condition d'atténuation restreinte**, par la considération prudente du quatrième principe directeur (prise en compte de l'évolution des aléas) qui amène à tenir compte de la possibilité que, dans un contexte de gestion futur, la capacité et le degré actuels de contribution du barrage à cette atténuation soient altérés,

voire compromis. L'application de cette condition est limitée aux crues allant de moyennement à peu fréquentes (de PAD de 1 % et de 0,3 %). Les crues fréquentes, quant à elles, sont considérées comme étant atténuables par l'opération des barrages de classe 1 et ne nécessitent pas d'évaluation en condition d'atténuation restreinte.

Les causes envisageables d'un changement du potentiel actuel d'atténuation sont notamment : 1) de possibles modifications des priorités et des objectifs de gestion locaux, régionaux ou même internationaux affectant un ou plusieurs barrages à l'intérieur d'un bassin versant (p. ex., par la modification des priorités et des objectifs de gestion d'un aménagement multiobjectif); 2) des changements des paramètres de concertation de la gestion au sein de systèmes de plusieurs barrages dans un bassin versant; 3) le potentiel impact des changements climatiques sur le mode de gestion des ouvrages en raison d'un changement conséquent des objectifs et des priorités de gestion, le tout pouvant affecter la capacité des aménagements à atténuer les crues (pour plus de détails, voir Wu et collab., 2023).

Dans ce contexte, et ce, pour la crue de récurrence PAD de 1 % pour laquelle la ZI est délimitée pour les deux conditions, c'est-à-dire atténuation et atténuation restreinte, la zone se situant entre ces deux limites constitue une frange de territoire qui doit être considérée comme potentiellement inondable, même si elle est en général actuellement protégée par l'opération des barrages en amont pour une intensité de crue donnée. La création de cette zone inondable particulière donne l'occasion aux autorités responsables d'y réglementer spécifiquement l'aménagement du territoire, de manière à préserver le plus possible les bénéfiques actuels apportés par l'opération de ces ouvrages.

Il importe de préciser que la notion d'atténuation restreinte ne concerne pas les possibles écarts de gestion actuels liés aux inévitables défis opérationnels et prévisionnels. Ces possibles écarts sont intrinsèques au processus de gestion et, aux fins de la délimitation des zones inondables en aval, doivent être intégrés à la représentation de la condition d'atténuation de la crue.

À noter que la quantification de la condition d'atténuation restreinte doit tenir compte des contraintes opérationnelles que peut imposer à certains barrages l'application du plan de gestion concertée d'un système géré.

Il est important de souligner en dernier lieu que le concept d'atténuation restreinte défini dans le présent chapitre exclut toute considération liée au risque de défaillance structurale ou de problématiques d'intégrité physique d'un ouvrage, telle une rupture de barrage. Ces considérations sont couvertes dans le cadre de la LSB et de ses règlements afférents.

Dans le cas des barrages de classe 2, soit ceux qui ont été jugés comme ne contribuant pas à une atténuation de la crue en aval ou dont le mode de gestion peut même ne pas permettre de mobiliser le potentiel de laminage de leur réservoir, il est indiqué d'adopter une approche d'évaluation sécuritaire et raisonnable du débit évacué pour la délimitation des ZI en aval. La zone inondable en aval sous l'influence de ces ouvrages nécessite le calcul de débits représentatifs d'une condition d'évacuation seulement. En effet, la vocation d'un tel barrage consiste en général à maintenir un niveau minimal au plan d'eau en amont pendant la saison estivale afin de pouvoir soutenir

diverses activités (écologiques, récréatives ou autres). Ainsi, durant la période estivale, les ouvrages d'évacuation du barrage sont configurés en « mode rétention » par la fermeture partielle des vannes ou le relèvement du seuil déversoir, composé de poutrelles amovibles ou de vannes déversoirs. Cependant, en période de crue, ces barrages passent en « mode évacuation », car leur conception et la capacité du plan d'eau en amont ne permettent pas de gérer une crue autrement qu'en l'évacuant totalement de façon à protéger l'ouvrage et/ou à éviter l'inondation du plan d'eau. L'ouvrage d'évacuation du barrage est alors positionné de manière à procurer une capacité d'évacuation maximale ou du moins suffisante par l'ouverture des vannes ou l'abaissement du niveau du déversoir. Ces barrages étant, dans la grande majorité des cas, des ouvrages opérés à une fréquence saisonnière, ce positionnement en « mode évacuation » est le plus souvent effectué vers la fin de l'automne. Pour cette catégorie de barrages, la condition d'atténuation n'est pas admise. Tout comme les barrages de classe 1, les barrages de classe 2 constituent relativement une faible proportion des barrages du Québec méridional.

Les barrages de classe 3, qui sont jugés non significativement influents sur le régime des crues, doivent, quant à eux, être traités en n'associant aucun effet de laminage à l'évaluation des débits évacués.

Il est important de mentionner que lors de l'évaluation des débits évacués d'un barrage de classe 1 ou de classe 2 pour la délimitation des ZI en aval, le mandataire ou le délégataire s'assurera que les débits évacués sélectionnés sont cohérents avec la capacité d'évacuation de l'ouvrage en question.

Influence en amont

Les conséquences de la présence et de la gestion d'un barrage ne se font pas ressentir que sur les débits des cours d'eau situés en aval. Du fait de leur seule présence, ces aménagements ont aussi un effet sur le niveau des plans d'eau situés en amont. Il importe à cet égard de considérer la condition d'opération critique du barrage à l'endroit de ce niveau amont.

Pour ce faire, une démarche d'évaluation des niveaux d'eau pour la zone inondable amont a été définie pour les trois classes de barrages précédemment définies en fonction de leur influence sur le cours d'eau aval. On comprend que la condition d'opération qui se révèle critique à l'égard des niveaux d'eau amont ne peut être la même que celle qui se révèle critique pour les débits évacués vers l'aval. Ainsi, pour ce qui est, par exemple, des barrages de classe 1, la condition d'atténuation restreinte entraînera un débit évacué supérieur à celui découlant de la condition d'atténuation, mais sera moins critique que cette dernière à l'égard du niveau d'eau provoqué en amont. De même, dans le cas d'un barrage de classe 2, si c'est la condition d'opération en mode évacuation de la crue qui est considérée comme critique pour l'évaluation du débit évacué, c'est au contraire en condition d'opération en « mode rétention » que seront obtenus les niveaux les plus élevés en amont.

Le tableau 6.2 résume les considérations à couvrir et les résultats attendus relatifs à la délimitation des ZI en amont de chaque classe de barrages, soit :

- **Pour les barrages de classe 1**, la condition d'opération la plus critique à l'égard du niveau d'eau amont est appelée « condition d'atténuation de la crue au bénéfice de la zone en aval ». En effet, comme l'atténuation de la crue au bénéfice du cours d'eau en aval se fait par un stockage de volume dans le réservoir, elle entraîne un rehaussement du niveau d'eau dans la zone en amont.
- **Pour les barrages de classe 2**, la condition d'opération du barrage la plus critique à l'égard du niveau d'eau amont est le « mode rétention » décrit précédemment. Malgré le fait que la configuration en « mode rétention » de ces barrages ne s'applique pas au cours de la période habituelle de crue, il est jugé plus prudent de la considérer néanmoins comme effective pour le calcul du niveau de crue du plan d'eau amont.
- **Pour les barrages de classe 3**, les niveaux amont peuvent être évalués sans la considération d'un effet de laminage par ces barrages, au moyen d'un calcul strictement hydraulique faisant intervenir le débit d'apport au barrage.

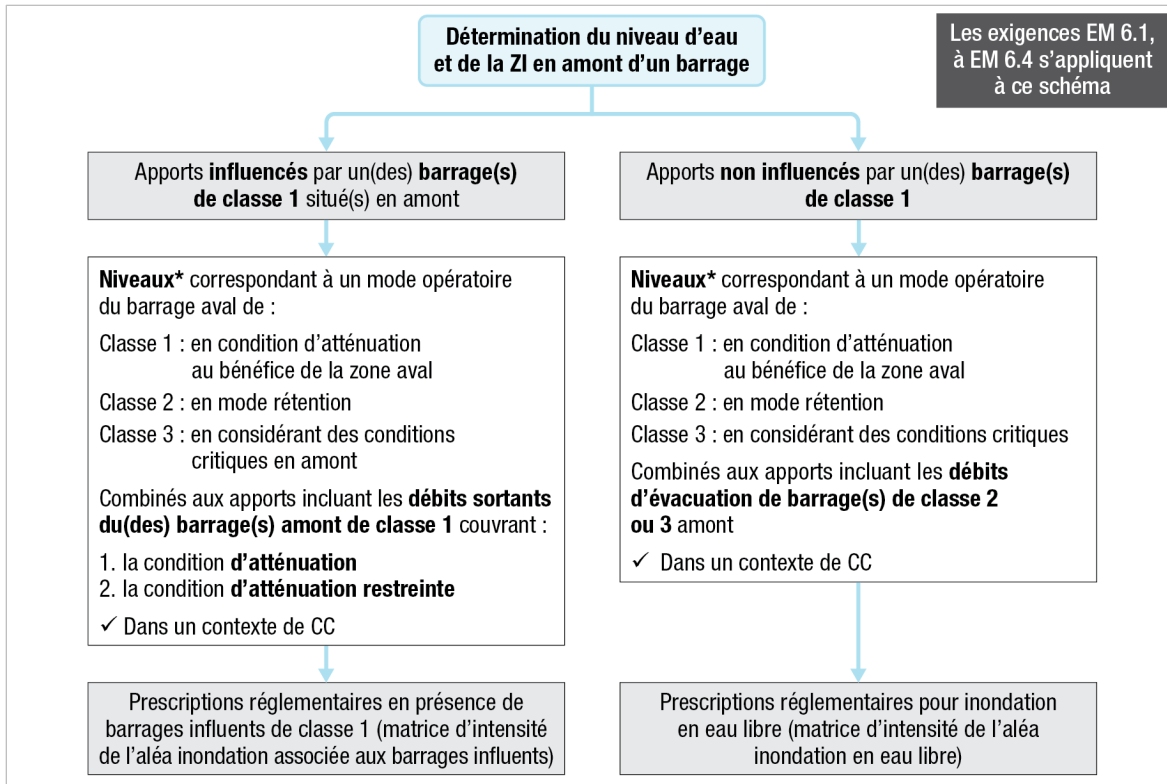
L'autre aspect à prendre en compte dans l'évaluation du niveau d'eau amont est la condition d'influence du débit d'apport en provenance du bassin versant. Comme indiqué au tableau 6.2 et illustré dans le schéma 6.3 et la figure 6.1, si le débit entrant dans le bief amont est influencé par l'action d'un ou de plusieurs barrages de classe 1 localisés dans le bassin amont, le niveau critique du réservoir doit être combiné aux deux conditions de débits propres à ce type d'influence, soit les conditions d'atténuation et d'atténuation restreinte applicables selon les récurrences requises. Il en résultera une cartographie de la zone inondable amont réalisée par application de la matrice d'intensité de l'aléa inondation associée aux systèmes gérés.

Si le débit entrant dans le bief amont n'est pas influencé par un ou plusieurs barrages de classe 1 situés en amont, le niveau critique du réservoir à déterminer pour chaque récurrence correspondra à un seul débit, soit, selon les cas, le débit naturel du bassin versant ou un débit composé en tout ou en partie de débits d'évacuation de barrages de classe 2 ou 3 localisés dans ce bassin versant. Il en résultera une cartographie de la zone inondable amont réalisée par application de la matrice d'intensité de l'aléa inondation en eau libre.

Tableau 6.2 : Catégorisation des barrages présents dans un bassin versant selon leur mode d'influence sur le régime des crues des zones inondables situées en aval et résultats attendus concernant la cartographie consécutive des zones inondables situées en amont

Classe de barrages	Définition de la classe	Type de barrage considéré pour la classe	Résultat attendu quant à la détermination des niveaux d'eau en amont du barrage
Classe 1	Barrages opérés classés comme influents sur le régime des crues en aval et comme pouvant contribuer à une atténuation des débits de crue en aval	- Barrages opérés en temps réel ou sur une échelle saisonnière	- Niveau du réservoir en amont de l'ouvrage pour des PAD de 5 %, 1 % et 0,3 % en condition d'opération critique à l'égard de la zone amont (atténuation de la crue au bénéfice de la zone aval), combiné aux conditions de débit d'apport en cas d'influence ou non de barrages de classe 1 en amont Évaluations à faire dans un contexte de CC*
Classe 2	Barrages opérés classés comme influents sur le régime des crues en aval, mais comme ne pouvant pas contribuer à une atténuation des débits de crue en aval	- Barrages opérés en temps réel ou sur une échelle saisonnière non attribuables à la classe 1 (p. ex., barrages avec vannes ou poutrelles opérées pour maintenir un niveau d'eau minimum dans le réservoir amont uniquement en périodes hors crue)	- Niveau du réservoir en amont de l'ouvrage pour des PAD de 5 %, 1 % et 0,3 % en condition d'opération critique à l'égard de la zone en amont (« mode rétention »), combiné aux conditions de débit d'apport en cas d'influence ou non de barrages de classe 1 en amont Évaluations à faire dans un contexte de CC*
Classe 3	Barrages opérés classés comme non significativement influents sur le régime des crues en aval	- Barrages opérés en temps réel ou sur une échelle saisonnière	- Niveau du réservoir en amont de l'ouvrage pour des PAD de 5 %, 1 % et 0,3 %, sans calcul de laminage en considérant des conditions critiques (p. ex., totalité des apports de crue évacués par le déversoir de surface), combiné aux conditions de débit d'apport en cas d'influence ou non de barrages de classe 1 en amont Évaluations à faire dans un contexte de CC*

* CC = changements climatiques; la prise en compte des CC est applicable à toutes les sources de perturbations anthropiques (voir la section 6.2.4).



* : Le niveau, peu importe la récurrence, devra être supérieur ou égal au niveau maximal d'exploitation du barrage

Schéma 6.3 : Résultats attendus concernant la détermination du niveau d'eau et de la zone inondable en amont d'un barrage de classe 1, 2 ou 3, selon le type d'influence auquel est soumis son débit d'apport en provenance du bassin versant amont

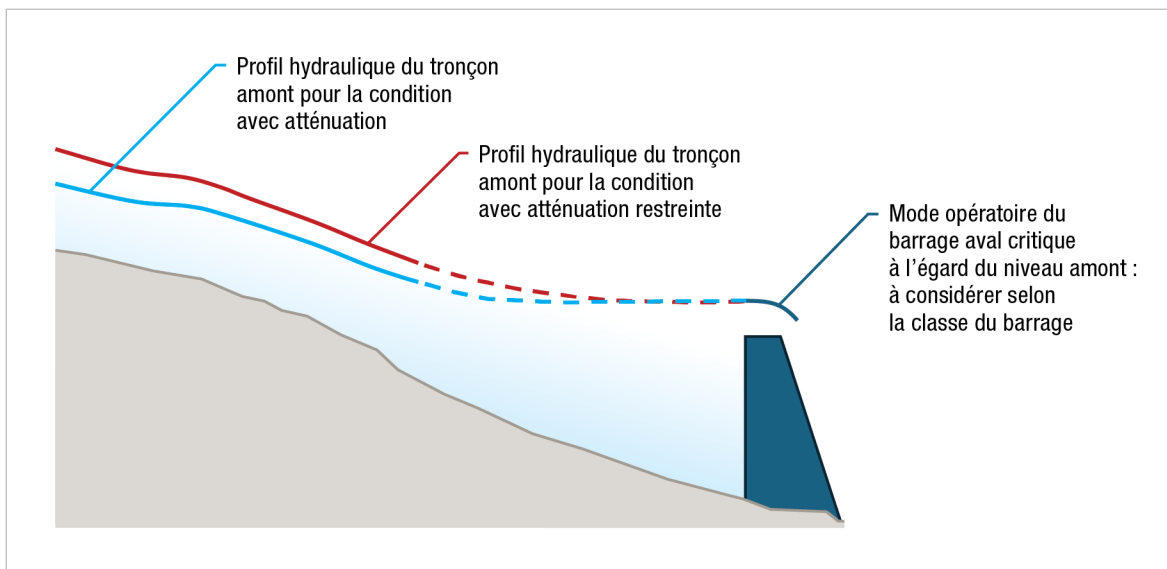


Figure 6.1. Évaluation du niveau d'eau en amont d'un barrage de classe 1, 2 ou 3 dont le débit d'apport est influencé par l'action de barrages de classe 1 situés dans le bassin versant amont

6.1.1.2 Les barrages non opérés

Comme mentionné précédemment, les barrages non opérés sont des ouvrages qui ne comportent pas d'équipement d'évacuation manœuvrable. Leurs vocations sont très variables et, selon celles-ci, ils peuvent être destinés ou non à laminier une crue. Leur potentiel d'atténuation de la crue, lorsqu'avéré, est intrinsèque à leurs caractéristiques physiques. Celles-ci sont déterminées lors de la conception des barrages et sont considérées comme invariables dans le temps, à la condition que l'on procède à un bon entretien de l'état physique de ces ouvrages.

Influence en aval

En vertu des prescriptions présentées au volet **cartographie réglementaire** du guide, il est approprié de délimiter la zone inondable située en aval des barrages non opérés en considérant le débit évacué, qu'il soit laminé ou non, selon l'analyse qui sera faite de leur fonctionnement. Ce fonctionnement étant invariable dans le temps, l'évaluation de l'atténuation de crue associée au laminage statique que certains de ces barrages pourraient procurer ne peut faire l'objet du concept d'atténuation restreinte.

Il est important de noter que, contrairement au cas des barrages opérés, le MELCCFP n'a pas réalisé d'analyse préalable du potentiel d'influence des barrages non opérés sur le régime des crues. L'appréciation de ce potentiel doit donc être réalisée par le mandataire ou le délégataire responsable de cartographier la zone inondable du tronçon.

Influence en amont

Puisque les barrages non opérés sont munis d'ouvrages d'évacuation fixes, l'évaluation du niveau amont pour chaque récurrence se fait au moyen d'un calcul de nature hydraulique uniquement. Ce calcul peut se faire à l'aide d'une modélisation de type réservoir si son usage a été jugé nécessaire à l'évaluation du débit évacué en aval. Sinon, il peut être réalisé en utilisant le débit d'apport comme valeur de débit évacué.

De la même façon que pour les barrages de classe 1 et 2, le caractère, influencé ou non, des débits d'apports en provenance du bassin versant amont indiquera si le niveau en amont du barrage non opéré analysé doit être combiné à une ou deux conditions de débit.

6.1.2 Les mesures de gestion des eaux pluviales en milieu urbain, rural ou agricole

Par souci de précaution et en règle générale, il est suggéré de ne pas tenir compte de l'effet d'atténuation des crues des cours d'eau qui peut être associé à la présence de mesures de gestion des eaux pluviales. Cette règle peut être assouplie dans les cas où l'on dispose d'informations particulières et quantifiées attestant du fonctionnement et de la pérennité opérationnelle de tels aménagements et de leur réel pouvoir d'atténuation pour chacune des crues ciblées en cartographie de zones inondables. La section 6.2.3 décrit cette situation, expose les raisons qui justifient cette recommandation et mentionne les cas d'exception pouvant se présenter.

Mentionnons aussi que pour ces cas, l'effet exercé par ces aménagements sur les niveaux d'eau en amont n'est pas considéré dans le cadre du présent guide. La détermination de ces niveaux est intrinsèquement liée à la conception du réseau de drainage urbain, qui ne fait pas partie de la thématique de cartographie considérée ici, qui est celle des zones inondables en cours d'eau et non celle des zones inondables en réseau de drainage urbain.

6.1.3 Autres sources potentielles de perturbations anthropiques

Bien que pouvant faire plutôt figure d'exception, il est loisible au mandataire ou au délégataire de faire valoir l'existence d'autres types d'altération anthropique du régime des crues qui seraient présents dans le bassin versant des cours d'eau à cartographier. On peut penser, par exemple, à l'action d'une dérivation soustrayant une part sensible du débit de crue d'un cours d'eau. La situation contraire pourrait aussi se présenter, soit qu'un certain débit dérivé d'un cours d'eau vienne s'ajouter à un cours d'eau dont la ZI est à cartographier. Dans un cas comme dans l'autre, le rôle perturbateur dans de telles situations devra être exposé et décrit. De plus, le caractère permanent ou occasionnel peut être un élément déterminant. Ainsi, dans le cas d'une dérivation permanente ou dynamique, il est suggéré d'en tenir compte aux fins de la délimitation des ZI affectées. Par ailleurs, et dans le cas d'une dérivation occasionnelle (p. ex., dans le cadre d'une opération de barrages et de possibles canaux d'amenée et de contournement), il est recommandé de discuter avec l'exploitant des ouvrages afin de pouvoir déterminer quelle situation devrait être considérée. Mentionnons également que, si les canaux eux-mêmes par lesquels sont effectuées ces dérivations sont d'envergure, il peut être pertinent de délimiter leurs propres zones inondables selon les conditions applicables. En définitive, le mandataire ou le délégataire devra documenter et justifier les raisons de tenir compte ou non de l'effet de telles perturbations sur le régime des crues ainsi que le traitement proposé pour intégrer cette prise en compte au processus de délimitation des zones inondables affectées.

6.1.4 Prise en compte de l'impact des changements climatiques en hydrologie influencée par des sources de perturbations anthropiques

EM 6.1	Exigence minimale
<p>Prise en compte des changements climatiques dans la délimitation des zones inondables de tronçons influencés par des sources de perturbations anthropiques</p>	<p>Le mandataire ou le délégataire devra prendre en compte l'impact des changements climatiques comme il est énoncé dans l'exigence minimale EM 5.2. Cet impact devra être considéré pour chacune des variables (p. ex., apports, débits sortants et niveaux) utilisées pour délimiter les zones inondables de tronçons influencés par des sources de perturbations anthropiques.</p>

De même qu'en hydrologie naturelle et selon les mêmes directives données dans la section 5.2, l'impact des changements climatiques est un élément important à prendre en compte dans la délimitation des zones inondables des tronçons situés en aval ou en amont de SPA capables d'influencer leur régime hydrologique. Cette prise en compte est de mise, quel que soit le type de la SPA, les conditions à couvrir ou la localisation du tronçon sous son influence. Les détails techniques pour cette prise en compte sont discutés dans la section 6.2.4.

6.2 Traitements méthodologiques

Certaines exigences minimales générales sont énoncées dans le présent chapitre, mais ce dernier est essentiellement consacré à la suggestion de règles jugées de bonne pratique pour guider le lecteur dans sa démarche méthodologique.

6.2.1 Les barrages opérés

6.2.1.1 Évaluation du potentiel d'influence et classement des barrages opérés

EM 6.2	Exigence minimale
Influence hydrologique potentielle des barrages	Le mandataire ou le délégataire devra vérifier la présence de barrages opérés et valider leur potentiel d'influence sur le régime hydrologique en aval.

EM 6.3	Exigence minimale
Classification des barrages potentiellement influents	Le mandataire ou le délégataire devra valider ou décider du classement des barrages opérés potentiellement influents selon leur mode d'influence en période de crue (due à leur fonctionnement ou à un effet statique du réservoir) et leur pouvoir de contribuer ou non à un effort d'atténuation des crues.

Il appartient au mandataire ou au délégataire d'évaluer et de juger du potentiel d'influence de tous les barrages opérés présents en amont d'un tronçon de cours d'eau dont la ZI est à délimiter et de le catégoriser de la façon suivante :

- Barrages évalués potentiellement influents sur le régime des crues
- Barrages évalués non significativement influents sur le régime des crues

La détermination de ce caractère « influent ou non » implique de devoir faire l'analyse du potentiel de laminage des crues de l'une ou l'autre des manières suivantes :

- 1) À partir de l'évaluation des données observées ou simulées avant et après l'installation du barrage et/ou avant et après la mise en application du plan de gestion en cours. Ainsi, une modification non négligeable de certains critères hydrologiques, tels que la modalité des hydrogrammes annuels des débits évacués observés, les débits maximaux annuels et les débits médians annuels, peut suffire pour détecter l'influence de la gestion du barrage sur les débits en aval;
- 2) Sur la base d'informations tirées d'analyses de laminage par simulations hydrologiques avec et sans présence de réservoir;

- 3) Par la considération de variables pouvant servir de proxys d'un potentiel de laminage de l'ouvrage. Par exemple, l'indice *Degree of Regulation* (DOR; Mailhot et collab., 2018), calculé sur la base de la capacité de rétention du réservoir et du volume d'écoulement annuel transitant par le tronçon en aval, peut servir de proxy du potentiel de laminage ou d'influence. Le recours à ce proxy, adapté à cet objectif, est pertinent, d'autant qu'il découle d'évaluations statistiques portant sur des caractéristiques hydrologiques ou physiographiques de plusieurs cours d'eau du Québec.

Le MELCCFP a recensé environ 4 400 barrages sur le territoire du Québec méridional. De ce nombre, environ 450 barrages sont opérés à l'aide de vannes ou par des poutrelles, ou les deux. Les autres barrages ne sont pas opérés et sont majoritairement associés à des plans d'eau dits non opérés.

Le MELCCFP a réalisé une classification préliminaire des barrages opérés et en a tiré des listes qu'il met à disposition des mandataires et des délégués.

Pour la constitution de ces classes préliminaires, le potentiel d'influence des barrages opérés a servi de premier critère et a été évalué. Cette évaluation a été réalisée de l'une ou l'autre des façons suivantes, ou des deux :

- 1) Selon le ratio établi entre la capacité de rétention individuelle du réservoir d'un barrage et/ou la capacité de rétention cumulative des réservoirs de plusieurs barrages situés en amont et le volume moyen annuel transitant par chaque tronçon de rivière en aval;
- 2) Selon une estimation par modélisation hydrologique sommaire de la capacité de laminage du réservoir associé à chacun des barrages concernés.

Par la suite, une catégorisation supplémentaire, basée sur le type d'appareil d'évacuation, a permis de déterminer les barrages capables ou non de contribuer à une atténuation de la crue en aval. Ces évaluations ont permis de dresser les trois listes préliminaires de barrages opérés suivantes (figurant dans l'annexe 4) :

- 1) **Liste de barrages de classe 1** – Barrages potentiellement influents, opérés en temps réel ou sur une échelle saisonnière. Il s'agit de barrages opérés principalement à l'aide de vannes, accompagnées parfois de poutrelles, et ayant une capacité de rétention individuelle ou cumulative jugée importante. Ce sont des barrages dont la capacité du réservoir est jugée en mesure de modifier significativement les débits sortants maximaux et médians annuels. Le fait que de tels ouvrages soient opérés dynamiquement suggère qu'ils sont opérés en temps réel et qu'ils ont les principales qualités opérationnelles requises leur permettant de contribuer à une action d'atténuation en tout temps. Il est alors présumé que les barrages de cette liste peuvent contribuer à une atténuation de crue. L'atténuation apportée par cette catégorie de barrages peut se faire sentir à une échelle **locale**, à quelques centaines de mètres en aval, ou à une échelle **régionale**, prolongée bien loin dans le réseau hydrographique en aval. On parle également d'une influence régionale lorsque plusieurs barrages sont opérés de concert selon un certain nombre d'objectifs de gestion (p. ex., écrêtement de la crue). Cette liste préliminaire regroupe un peu moins de 60 barrages opérés recensés sur le territoire concerné.

- 2) **Liste de barrages de classe 2** – Barrages potentiellement influents, opérés en temps réel ou sur une échelle saisonnière. Ces barrages sont principalement opérés à l'aide de poutrelles, mais pas uniquement, et sont généralement sujets à un mode opérationnel binaire : 1) selon une configuration en « mode évacuation » des crues au printemps et durant la saison automnale; 2) selon une configuration en « mode rétention » ayant pour but le maintien d'un niveau minimal du plan d'eau pour les conditions estivales. On estime que les caractéristiques techniques et opérationnelles de ces barrages, destinés à être manipulés ponctuellement, à quelques reprises seulement au cours de l'année, ne leur confèrent pas la capacité de contribuer à une atténuation de crue en tout temps.
- 3) **Liste de barrages de classe 3** – Barrages opérés évalués comme étant non significativement influents. Ce sont des barrages dont l'influence sur le régime hydrologique en aval est marginale ou non importante.

Notons que la liste de barrages de classe 2 ne contient pour le moment aucun barrage potentiellement influent opéré à l'aide de vannes. Une validation auprès des exploitants des barrages de classe 1 concernant leur réelle contribution à une atténuation de crue est de mise. Ainsi, les barrages de classe 1 ne pouvant contribuer à une atténuation de crue doivent être joints aux barrages de classe 2 ou de classe 3.

De plus, au vu du caractère inclusif des trois listes décrites précédemment, une validation de ce classement préliminaire est nécessaire avant de procéder au traitement des ZI sous l'influence de ces barrages. Cela peut être fait en consultant le gestionnaire du barrage, par la collecte d'informations à jour concernant le barrage ou par une évaluation précise de son réel pouvoir d'influence hydrologique et d'atténuation de crue. Le mandataire ou le délégataire peut alors, à la suite de sa validation, modifier le classement initial d'un barrage et proposer l'ajout et le classement d'un barrage opéré non listé, à condition de fournir des justifications.

6.2.1.2 Délimitation de zones inondables de tronçons sous influence de barrages opérés

EM 6.4	Exigence minimale
Prise en compte de l'effet hydrologique des barrages	Le mandataire ou le délégataire devra prendre en compte l'effet hydrologique des barrages opérés recensés, selon leur potentiel d'influence et leur classement, dans la délimitation de la zone inondable des tronçons situés en aval.

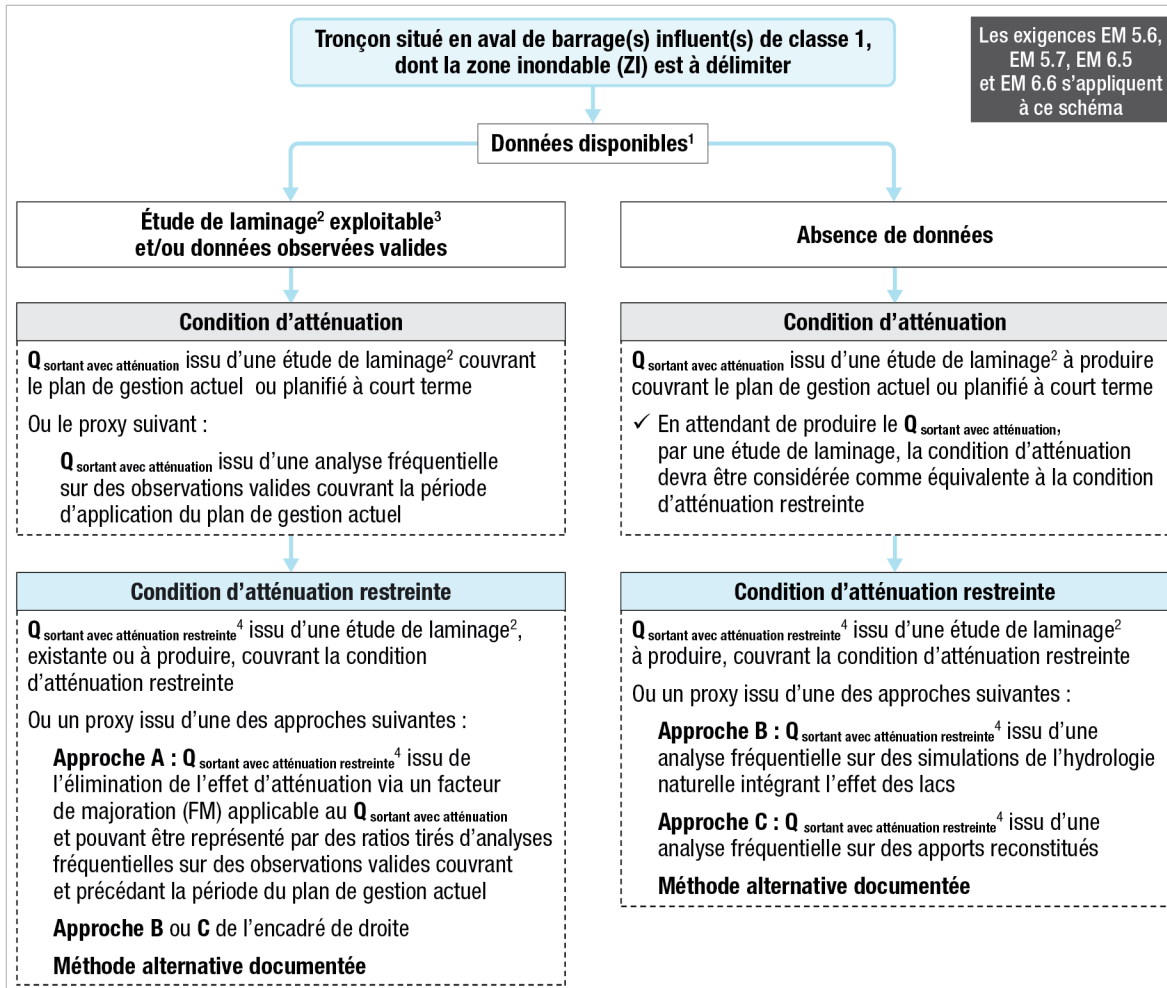
Aux fins de la délimitation des zones inondables des tronçons situés en aval et en amont de barrages opérés selon leur classement, plusieurs pratiques méthodologiques sont présentées dans les sous-sections suivantes. À noter que ces pratiques possibles concernent la délimitation de zones inondables des tronçons influencés par des barrages opérés dont le classement aura été préalablement confirmé et validé par le mandataire ou le délégataire. Ce dernier aura aussi le choix d'utiliser ou de proposer d'autres méthodes non mentionnées dans le présent chapitre, mais il devra fournir la documentation justificative. Le mandataire ou le délégataire est aussi invité à recourir à plusieurs méthodes de calcul lorsque possible.

Évaluation du débit évacué et délimitation de la zone inondable aval

Barrages de classe 1

Le schéma 6.4 propose différentes approches méthodologiques pour parvenir au calcul des données nécessaires à la délimitation des zones inondables pour un tronçon situé en aval d'un barrage de classe 1 en condition d'atténuation et en condition d'atténuation restreinte.

Le recours à l'une ou l'autre des approches décrites dans le schéma 6.4 dépend des données et des informations disponibles, à savoir des études de laminage exploitables et des données observées valides. Cependant, la possibilité d'exploiter les résultats d'une étude de laminage n'empêche pas l'utilisation des résultats issus d'un historique de données observées valides, ou la comparaison avec de tels résultats, et vice versa. Le schéma contient aussi des alternatives méthodologiques en l'absence de ces deux éléments, et ce, pour l'ensemble des deux conditions à couvrir (atténuation et atténuation restreinte).



¹ : Lorsque les données disponibles le permettent, le recours à plusieurs approches est préférable.

² : Une étude de laminage inclut une évaluation par simulations hydrologiques/hydrauliques événementielles, comme habituellement réalisée dans le cadre des études de l'évaluation de la sécurité des barrages, ou par simulations en continu avec intégration des règles de gestion en cours.

³ : Une étude de laminage exploitable doit contenir des récurrences de crues considérées dans la cartographie des ZI ou des récurrences permettant de les déduire par interpolation. Le recours à l'extrapolation des résultats n'est toutefois pas acceptable.

⁴ : Le débit sortant en condition d'atténuation restreinte devra être raisonnablement conservateur et ne pas dépasser : 1) la capacité maximale d'évacuation du barrage; 2) la valeur associée aux apports. De plus, lorsque le barrage fait partie d'un système à gestion concertée, la condition d'atténuation restreinte doit être déterminée en tenant compte des contraintes inhérentes à la gestion de ce système.

Schéma 6.4 : Cheminement décisionnel pour la délimitation de zones inondables de tronçons en aval de barrages de classe 1

EM 6.5	Exigence minimale
Utilisation des données hydrométriques en hydrologie influencée par des barrages	Si l'approche choisie implique l'utilisation de données observées en aval de barrages opérés influents ou de données hydrométriques influencées par l'opération des barrages, le mandataire ou le délégataire devra s'assurer que l'historique d'observation choisi est représentatif des règles de gestion en vigueur.

EM 6.6	Exigence minimale
Utilisation des résultats d'une étude de laminage existante en hydrologie influencée par des barrages	Si l'approche choisie implique l'utilisation de résultats d'une étude de laminage existante d'un barrage, le mandataire ou le délégataire devra s'assurer que l'étude de laminage existante : 1) représente le plan de gestion actuel ou un plan de gestion en planification à court terme; 2) considère les modifications structurales récentes de l'ouvrage susceptibles d'influencer sa gestion; 3) couvre les PAD prévues pour la cartographie de zones inondables ou du moins un spectre de PAD permettant de les déduire.

➤ **Condition d'atténuation**

Comme illustré dans le schéma 6.4, les débits atténués sortant des barrages de classe 1 peuvent être issus d'une étude de laminage **existante** du barrage en question. Ce genre d'étude est habituellement produit dans le cadre des études de l'évaluation de la sécurité (ÉÉS) des barrages. Toutefois, dans certaines conditions, il n'est pas toujours possible d'utiliser des débits évacués issus des ÉÉS pour délimiter les zones inondables en condition d'atténuation. Il est en effet nécessaire de s'assurer que l'étude à exploiter : 1) représente le plan de gestion actuel ou un plan de gestion en planification à court terme; 2) considère les plus récentes modifications structurales de l'ouvrage susceptibles d'influencer sa gestion; 3) couvre les crues de PAD prévues aux fins de la cartographie des zones inondables ou, du moins, un spectre de PAD permettant de les déduire par interpolation. L'extrapolation dans ces cas est jugée inappropriée, considérant la spécificité du comportement liée à la capacité de chaque barrage et réservoir. Il est d'ailleurs recommandé de procéder à des vérifications supplémentaires avant de recourir aux résultats d'une étude existante et de consulter le gestionnaire du barrage pour vérifier la pertinence de les utiliser. Par ailleurs, le mandataire ou le délégataire devrait évaluer, le cas échéant, comment sont considérés, dans l'étude, les éventuels écarts opérationnels et l'impact des changements climatiques (CC) sur les apports. L'absence de ces dernières considérations n'est toutefois pas en soi une raison pour exclure l'étude existante puisque le mandataire ou le délégataire peut en tenir compte a posteriori.

Cependant, en l'absence d'une étude de laminage adéquatement exploitable ou pour inclure a priori l'évaluation de certains éléments manquants à une étude existante (p. ex., l'impact des CC), la réalisation d'une nouvelle étude de laminage spécifique aux besoins de délimitation des ZI en aval de barrages de classe 1 serait l'approche la plus complète s'il est possible de le faire. Cela permet de considérer les plus récentes avancées techniques concernant

les méthodes de calcul et de laminage et d'introduire les historiques hydrométéorologiques les plus récents. S'il réalise une analyse de laminage par simulation événementielle, le mandataire ou le délégataire peut ainsi intégrer les meilleures pratiques dans la conception et la sélection des hydrogrammes synthétiques (par PAD) destinés au laminage et intégrer les crues d'importance les plus récentes dans cette conception (Poirier et collab., 2024). Le mandataire ou le délégataire peut aussi réaliser son étude de laminage au moyen de simulations en continu qui intègrent les règles et les stratégies de gestion en vigueur ou à venir, si possible.

L'autre possibilité pour calculer les débits atténués consiste à réaliser une analyse fréquentielle sur des données observées valides lorsque de telles données sont disponibles. Ici, les mêmes critères de validité abordés dans la section 5.5.2 en lien avec l'hydrologie naturelle sont à respecter, auxquels s'ajoute un critère supplémentaire spécifique à l'atténuation apportée par un barrage de classe 1 en aval. Ce dernier critère concerne la période de gestion couverte par l'historique d'observation. En effet, l'historique choisi doit être représentatif des règles de gestion en vigueur sur une assez longue durée et ne doit pas présenter de signal de changement notable dans cette gestion. Par ailleurs, la sélection d'une période d'observation suffisamment longue pour contenir des événements de crues importants améliore la confiance apportée à l'extrapolation statistique des débits atténués pour les fortes récurrences et favorise la prise en compte implicite de possibles écarts de gestion d'origine opérationnelle et prévisionnelle, intrinsèques au concept de la condition d'atténuation.

Toutes les options discutées dans les paragraphes précédents conviennent au calcul des débits atténués pour la délimitation de la zone inondable d'un tronçon situé en aval d'un seul barrage de classe 1. Dans le cas d'un tronçon situé en aval d'un ensemble de barrages de ce type, opérés de manière concertée (système géré), une analyse à échelle globale est plutôt suggérée. Ce genre d'évaluation peut être basé sur une analyse fréquentielle applicable à des données issues de simulations hydrologiques et hydrauliques de l'ensemble des tronçons, d'amont en aval, incluant la représentation des règles de gestion en vigueur, ou à des données observées au tronçon à l'étude respectant les critères de validité énoncés précédemment.

Enfin, si aucune des options proposées n'est possible ou si toutes les options s'avèrent irréalisables à court terme, on doit délimiter par prudence la zone couvrant la condition d'atténuation comme s'étendant jusqu'à la limite de la zone couvrant la condition d'atténuation restreinte (décrite ci-dessous).

➤ **Condition d'atténuation restreinte**

Selon le schéma 6.4, la détermination des débits avec atténuation restreinte sortant d'un barrage de classe 1 peut être réalisée de plusieurs façons. Leur détermination peut être basée sur les résultats d'une étude de laminage dans laquelle la fonction d'atténuation de la crue est basée sur le plan de gestion futur, lorsque celui-ci est connu, ou simplement en excluant la fonction d'atténuation comme il est prévu dans le plan de gestion actuel des principaux objectifs de gestion du barrage. Par définition, cette option nécessite la production d'une nouvelle étude dans ce sens, étant donné que les études existantes ne couvrent pas cette hypothèse. La réalisation d'une nouvelle étude offre de plus l'occasion d'intégrer a priori l'impact des CC sur les apports à cette étape.

Les débits sortants avec atténuation restreinte peuvent aussi être estimés en considérant comme limite maximale les débits d'apports au réservoir. Ceux-ci peuvent être extraits d'une étude de laminage existante ou reconstitués à l'aide d'une méthode hydrologique reconnue (p. ex., par transfert de bassin versant). Ces débits peuvent aussi être évalués à l'aide de simulations hydrologiques et hydrauliques, disponibles ou à produire, qui représentent les conditions hydrologiques caractéristiques du bassin versant tributaire du réservoir en régime naturel.

Enfin, les débits sortants avec atténuation restreinte d'un barrage de classe 1 peuvent être estimés en majorant d'un certain facteur les débits sortants avec atténuation de ce barrage issus d'une analyse fréquentielle sur des données observées valides. Différentes approches sont envisageables pour estimer un tel facteur de majoration. Ces approches n'étant pas nécessairement équivalentes, il est recommandé d'en comparer les résultats pour faire le choix le plus approprié. Parmi les approches possibles, mentionnons les suivantes :

- 1) Le ratio des résultats d'analyses fréquentielles appliquées à une période antérieure à la gestion actuelle sur ceux d'analyses fréquentielles appliquées à la période de gestion en cours;
- 2) Le ratio des résultats d'analyses fréquentielles effectuées sur des séries de données simulant un régime hydrologique naturel (p. ex., tirées de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional) sur ceux d'analyses fréquentielles de séries de données observées, chacune de ces séries couvrant la même période correspondant à l'application du plan de gestion actuel;
- 3) Le ratio des débits d'apports estimés au barrage sur les débits sortants, estimés, par exemple, par une analyse de laminage;
- 4) Toute autre méthode documentée et justifiée.

Les débits sortants avec atténuation restreinte obtenus de l'ensemble des options décrites ci-haut, sauf celles concernant les études de laminage, doivent être mis en relation avec la capacité d'évacuation du barrage. Celle-ci peut être, par exemple, la capacité associée au niveau maximal d'exploitation.

En présence de plusieurs barrages de classe 1 en amont d'un tronçon à l'étude, la condition d'atténuation restreinte pour l'ensemble de ces barrages doit prendre en considération les contraintes de gestion associée au système dans sa globalité. Il s'agit d'exception à la condition d'atténuation restreinte lorsqu'on est en présence de barrages opérés de concert (système géré). Ici, on suggère une évaluation qui prend en compte la réalité de gestion imposée par le système dans sa globalité. Ainsi, lorsqu'un barrage est principalement opéré pour atténuer les crues pour le bénéfice d'un ou de plusieurs barrages en aval, il pourrait être pertinent de considérer les débits sortants atténués du barrage amont pour évaluer la condition d'atténuation restreinte du ou des barrages aval. Cela peut permettre, le cas échéant, d'éviter de produire une condition d'atténuation restreinte non réaliste ou jugée trop sécuritaire. Dans ce cas de figure, il est aussi possible de recourir à l'évaluation d'un facteur de majoration, comme mentionné précédemment, à partir de l'analyse d'historiques d'observations à des stations situées dans la partie la plus en aval de cet ensemble de barrages, en évaluant, par exemple, les périodes d'observations avant et après la mise en application du plan de gestion actuel.

Enfin, rappelons que l'évaluation de la condition d'atténuation restreinte représente une situation de gestion future et que, en conséquence, il est recommandé de discuter des différentes hypothèses d'estimation avec l'exploitant du barrage pour en arriver à dégager celles qui paraissent les plus appropriées et réalistes.

Barrages de classe 2

Dans le contexte d'influence d'un barrage de classe 2, la délimitation des ZI aval devra prendre en compte des conditions hydrologiques et hydrauliques sécuritaires. Les approches de délimitation de ZI correspondant aux barrages opérés sur une échelle saisonnière et aux barrages opérés en temps réel sont discutées ci-dessous.

- **Barrages opérés sur une échelle saisonnière**

Du fait que, par définition, un barrage de ce type est considéré comme ne pouvant pas procurer une atténuation de la crue (voir la section 6.1.1.1), la règle de prudence recommandée est de ne pas tenir compte des effets d'atténuation et d'utiliser plutôt les apports pour représenter les débits évacués. Toutefois, s'il est jugé trop prudent d'adopter cette hypothèse pour certains barrages (ceux pourvus d'un très grand réservoir), il est alors possible de considérer l'existence d'un certain effet de laminage, même en mode d'évacuation. Pour ce faire, le mandataire ou le délégataire peut réaliser une modélisation de type réservoir (abordée dans la section 5.6.1) en considérant les appareils d'évacuation dans une position fixe correspondant au mode évacuation ou utiliser des données d'observation valides sur des périodes de l'année jugées représentatives de cette condition (généralement au printemps).

À noter que les données correspondant au « mode évacuation », tout comme au « mode rétention », de ces barrages peuvent être disponibles auprès de l'exploitant du barrage.

- **Barrages opérés en temps réel**

Pour les barrages de classe 2 opérés en temps réel, le débit évacué en aval et le niveau d'inondation en amont doivent être évalués en considérant les conditions opérationnelles susceptibles d'entraîner les valeurs les plus élevées. On peut alors faire l'hypothèse d'associer à ce barrage un mode de gestion et un traitement analogue à celui des barrages à gestion saisonnière. Cela dit, la façon la plus prudente de procéder dans ce cas est certainement de consulter préalablement l'exploitant du barrage.

Barrages de classe 3

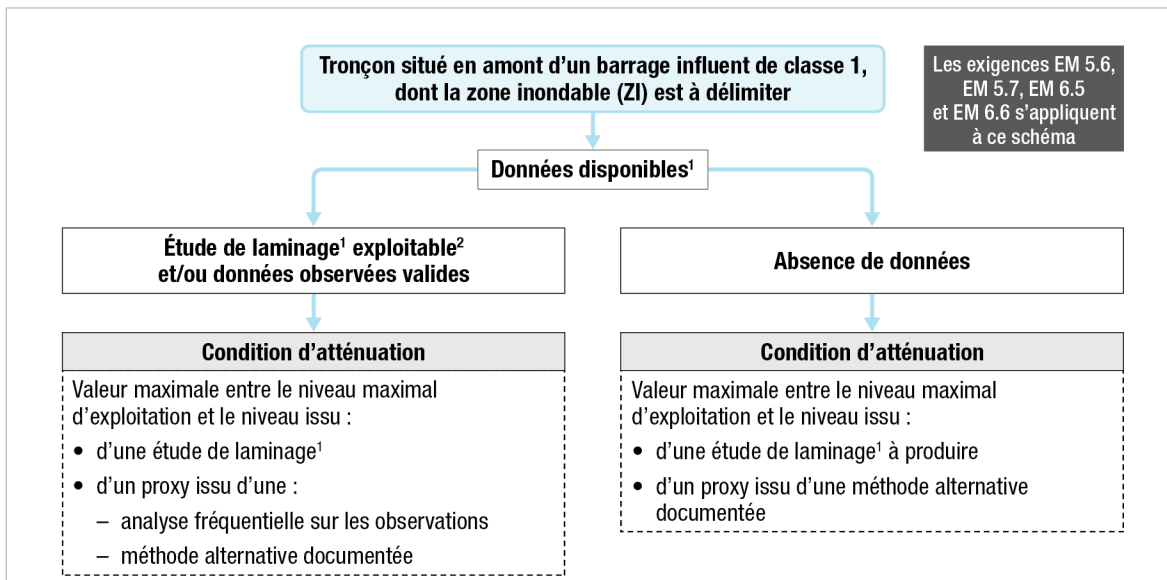
Le traitement relatif à la délimitation de la zone inondable située en aval de barrages de classe 3 consiste à ne pas tenir compte de quelque effet de laminage que ce soit. L'hypothèse simplificatrice selon laquelle le débit évacué par l'ouvrage est identique au débit d'apport à ce dernier est une approche sécuritaire et appropriée.

Il demeure toujours possible de considérer, lorsqu'elles existent, les évaluations réalisées lors de la conception ou du suivi de l'ouvrage pour extraire les valeurs de débits nécessaires à la délimitation de la ZI aval de ces barrages.

Évaluation du niveau et délimitation de la zone inondable en amont

Barrages de classe 1

Le schéma 6.5 propose le cheminement pouvant guider le mandataire ou le délégataire dans l'exercice de délimitation de la zone inondable d'un tronçon situé en amont d'un barrage de classe 1, qui, rappelons-le, devrait couvrir la condition défavorable (critique) à l'égard du niveau d'inondation du réservoir en amont du barrage. Ce schéma propose, en fonction des données disponibles, des options de méthodes de calcul du niveau, qui est la variable d'intérêt pour les tronçons amont.



¹ : Une étude de laminage inclut une évaluation par simulations hydrologiques/hydrauliques événementielles, comme habituellement réalisée dans le cadre des études de l'évaluation de la sécurité des barrages, ou par simulations en continu intégrant les règles de gestion en cours.

² : Une étude de laminage exploitable doit contenir des récurrences de crues considérées dans la cartographie des ZI ou des récurrences permettant de les déduire. Le recours à l'extrapolation des résultats n'est toutefois pas acceptable.

Schéma 6.5 : Cheminement décisionnel pour la délimitation de zones inondables de tronçons en amont de barrages de classe 1

Parmi les trois options proposées dans le schéma 6.5, il y a la possibilité d'utiliser les résultats d'une étude de laminage existante qui respecte les mêmes critères que ceux décrits précédemment (schéma 6.4), en lien avec le plan de gestion, les modifications structurales et le spectre de PAD couvert. Pour les mêmes raisons que celles évoquées pour la détermination des débits évacués, il n'est pas recommandé d'extrapoler des résultats de l'étude de laminage qui se situeraient en dehors des plages de récurrences de crues couvertes par l'ÉÉS existante. La deuxième option consiste à produire une nouvelle étude de laminage, ce qui permet de déterminer des valeurs de niveaux résultant du laminage des volumes d'apports en eaux représentatifs des conditions actuelles et futures selon un plan de gestion potentiellement adapté. La troisième option concerne la réalisation d'une analyse fréquentielle (section 5.5.2) sur des données observées valides. Il est recommandé d'utiliser minimalement deux méthodes d'estimation.

Par ailleurs, il est généralement recommandé de s'assurer que les niveaux d'inondation en amont déterminés pour délimiter la ZI au pourtour du réservoir ne se situent pas en dessous du **niveau maximal d'exploitation (NME)**, lorsque celui-ci est indiqué dans un plan de gestion des eaux retenues du barrage.

Le niveau maximal d'exploitation est une notion non uniforme d'un barrage à l'autre et qui ne peut être associée à aucune récurrence. Parmi ces différentes définitions, on peut citer :

- Le niveau le plus élevé que peuvent atteindre les eaux retenues en exploitation normale (définition donnée dans le Règlement sur la sécurité des barrages);
- Le niveau cible qui entre dans les critères de gestion pour l'ouverture graduelle des appareils d'évacuation;
- Le niveau maximal à ne pas dépasser en raison des droits et servitudes ou de toute autre raison similaire.

En cas de doutes dans la détermination d'une valeur seuil, tel que le NME, il est recommandé de communiquer avec l'exploitant de l'ouvrage.

Barrages de classe 2

• Barrages opérés sur une échelle saisonnière

Tout comme pour la délimitation de la ZI aval aux barrages de classe 2, la délimitation des ZI amont devra prendre en compte des conditions hydrologiques et hydrauliques sécuritaires. À cet effet, l'évaluation de la condition critique à l'égard du niveau d'inondation en amont devra se baser sur une condition du barrage en « mode rétention » de la crue. Pour cela, le mandataire ou le délégué peut réaliser une modélisation de type réservoir avec un seuil en position élevée. Si le potentiel de laminage de l'ouvrage est jugé négligeable, l'évaluation peut être de nature uniquement hydraulique en considérant les débits d'apports dans le calcul des niveaux atteints par le fonctionnement de l'ouvrage de sortie du barrage, en « mode rétention » (poutrelles en position élevée). Bien que cette configuration en « mode rétention » corresponde généralement au mode de gestion estival, l'approche simplificatrice consistant à considérer cette position, quelle que soit la saison au cours de laquelle se manifeste la crue, est une hypothèse prudente et appropriée.

À noter que les données correspondant au « mode rétention », tout comme au « mode évacuation », de ces barrages peuvent être disponibles auprès de l'exploitant du barrage.

• Barrages opérés en temps réel

Pour les barrages de classe 2 opérés en temps réel, le niveau d'inondation en amont doit, tout comme le débit évacué en aval, être évalué en considérant les conditions opérationnelles susceptibles d'entraîner les valeurs les plus élevées. On peut alors faire l'hypothèse d'associer à ce barrage un mode de gestion et un traitement analogue à celui des barrages à gestion saisonnière. Cela dit, la façon la plus prudente de procéder dans ce cas est certainement de consulter préalablement l'exploitant du barrage.

Barrages de classe 3

À l'égard de l'évaluation du niveau en amont de ces barrages, comme aucun effet de laminage n'est envisagé, la considération de la relation d'écoulement sur le seuil déversoir de l'ouvrage, en considérant le débit d'apports, constitue une base sécuritaire appropriée du calcul hydraulique requis pour l'évaluation des niveaux d'inondation de la zone en amont.

Enfin, mentionnons que pour quelque classe de barrage que ce soit dont on veut évaluer le niveau amont, on doit toujours considérer la condition dans laquelle se trouve le débit d'apports provenant du bassin versant. Il importe en effet, comme il est indiqué à la section 6.1.1.1, de pouvoir déterminer si le débit entrant dans le bief amont du barrage subit l'influence d'un ou de plusieurs barrages de classe 1. Si tel est le cas, la délimitation de la ZI amont doit être évaluée en considérant le niveau du réservoir calculé pour les conditions critiques à son égard en combinant ce dernier aux débits d'apports évalués en conditions d'atténuation et d'atténuation restreinte.

6.2.2 Barrages non opérés

6.2.2.1 Délimitation de zones inondables de tronçons sous influence de barrages non opérés

EM 6.7	Exigence minimale
Influence hydrologique potentielle des barrages	Le mandataire ou le délégué devra prendre en compte l'effet hydrologique des barrages non opérés recensés, selon leur potentiel d'influence, dans la délimitation de la zone inondable des tronçons situés en aval.

Des pratiques méthodologiques possibles, utiles à la délimitation des zones inondables pour des tronçons situés en aval et en amont de barrages non opérés, sont présentées dans les sous-sections suivantes. À noter que le mandataire ou le délégué aura le choix d'utiliser ou de proposer d'autres méthodes non mentionnées dans les sous-sections suivantes, mais il devra fournir la documentation justificative. Le mandataire ou le délégué est invité à recourir à plusieurs méthodes de calcul lorsque possible.

Évaluation du débit évacué et délimitation de la zone inondable aval

S'il est déterminé que l'effet de laminage de crue d'un barrage non opéré est suffisamment important pour qu'il soit pris en compte dans le processus de délimitation de la ZI, surtout la ZI située en aval, l'effet de ce barrage peut alors être représenté à l'aide d'une modélisation de type réservoir (pour la description de ce type de modélisation, voir la section 5.6.1).

S'il est déterminé que ces barrages et leurs biefs amont ne procurent pas d'effet de laminage de crue important, l'hypothèse simplificatrice selon laquelle le débit évacué par l'ouvrage est identique aux apports à ce dernier est une approche sécuritaire et appropriée.

Il demeure toujours possible de considérer, lorsqu'elles existent, les évaluations réalisées lors de la conception ou du suivi de l'ouvrage pour extraire les valeurs de débits nécessaires à la délimitation de la ZI aval de ces barrages.

Évaluation du niveau et délimitation de la zone inondable en amont

Pour les tronçons situés en amont de ce type d'ouvrage, les niveaux du réservoir en amont doivent être calculés en considérant la situation la plus critique. Dans ce cas, s'il a été jugé nécessaire de réaliser une modélisation de type réservoir pour déterminer le débit évacué en aval, le niveau en amont sera également déterminé à l'aide de ce modèle (pour la description de la modélisation de type réservoir, voir la section 5.6.1).

S'il est déterminé que ces barrages et leurs biefs amont ne procurent pas d'effet de laminage de crue suffisamment important pour avoir justifié l'usage d'une modélisation de type réservoir, il est approprié de faire l'hypothèse simplificatrice et sécuritaire selon laquelle l'écoulement du débit d'apports passe en totalité par le déversoir de surface en vue d'obtenir une condition maximale du niveau d'eau en amont.

Si l'information est disponible, une analyse fréquentielle sur des données de niveau du réservoir valides et observées sur un historique suffisant peut aussi être considérée.

Il demeure toujours possible de considérer, lorsqu'elles existent, les évaluations réalisées lors de la conception ou du suivi de l'ouvrage pour extraire les valeurs de débits nécessaires à la délimitation de la ZI en amont de ces barrages.

6.2.3 Mesures de gestion des eaux pluviales en milieu urbain, rural ou agricole

On entend ici par mesure de gestion des eaux pluviales l'ensemble des mesures de gestion intégrées au réseau de drainage urbain, rural ou agricole.

Précisons que la prise en compte de ces aménagements n'est décrite que sous l'angle de la détermination des apports de crue des secteurs urbanisés dans les cours d'eau dont les zones inondables sont à cartographier. Les problématiques d'inondations en milieu urbain causées par le dépassement des capacités des ouvrages et des aménagements de drainage urbains ne font pas l'objet du présent guide méthodologique.

BP 6.1	Bonne pratique
Hydrologie urbaine	À moins que le mandataire ou le délégataire ne dispose d'informations quantifiées attestant du fonctionnement et de la pérennité opérationnelle des mesures de gestion des eaux pluviales en présence, il lui est recommandé d'évaluer les débits de crue issus des secteurs urbanisés sans prendre en considération les conséquences sur les cours d'eau des effets atténuateurs de crue découlant de ces mesures de gestion des eaux pluviales.

Tout comme pour les bassins versants de plus grande taille, les bassins versants en milieu urbain peuvent faire l'objet d'une gestion visant l'atténuation des débits de crue. À la manière de certains barrages et réservoirs qui peuvent avoir comme fonction d'atténuer les crues dans de plus grands bassins versants, différentes mesures de gestion des eaux pluviales ont aussi une certaine capacité de contrôle et de laminage des apports de ruissellement acheminés au réseau de drainage et aux plans d'eau récepteurs par la suite. Ces mesures, dont la conception est généralement associée à des objectifs locaux de gestion des eaux de ruissellement, consistent en différents types d'aménagements intégrés au réseau de drainage urbain (bassins de rétention souterrains ou de surface, aires

locales de rétention ou de biorétention, rétention sur les toits ou dans des stationnements assortis ou non de zones perméables, etc.). De ce fait, bien qu'il soit possible de simuler le fonctionnement théorique de chacun de ces multiples aménagements, il peut être difficile d'estimer l'efficacité à long terme de leur contribution résultante à l'atténuation des débits de crue des cours d'eau récepteurs. Pour cette raison, une délimitation prudente des zones inondables des cours d'eau situés en aval devrait en général se faire sans tenir compte de l'atténuation potentiellement attribuable à ces mesures de gestion des eaux pluviales.

Toutefois, dans les cas où le fonctionnement de certains de ces ouvrages est bien documenté et quantifié et que leur pérennité opérationnelle est attestée par la municipalité responsable, il est possible de prendre en compte leur effet d'atténuation des débits de crue des cours d'eau concernés. Ainsi, les débits de crue à considérer pour la cartographie des zones inondables des cours d'eau concernés doivent intégrer les débits laminés par ces aménagements, et ce, pour les récurrences visées. Si la capacité, nominale ou réelle, d'atténuation de l'aménagement est dépassée pour une crue d'une récurrence donnée, le débit résultant au cours d'eau doit conséquemment être déterminé sur la base d'hypothèses sécuritaires.

À noter que des bassins de rétention créés à même un cours d'eau par l'implantation d'un barrage peuvent être conçus et construits à titre de mesure de gestion des eaux pluviales destinée, entre autres, à protéger une zone urbaine soumise à des inondations. Dépendamment des caractéristiques de son ouvrage d'évacuation, manœuvrable ou fixe, ce type d'aménagement peut être traité à l'aide des prescriptions du présent chapitre concernant un barrage opéré ou non opéré.

6.2.4 Prise en compte de l'impact des changements climatiques en hydrologie influencée par des sources de perturbations anthropiques

Les changements climatiques ont un impact sur l'hydrologie des bassins versants : crues, étiages, hydraulicité générale et saisonnalité. En théorie, la prise en compte des changements climatiques devrait être appliquée aux débits d'apports des SPA (barrages ou aménagements de gestion des eaux pluviales), et ce, de façon à pouvoir considérer et estimer les débits sortants comme étant la résultante subséquente de la gestion à l'aide de ces aménagements.

Dans le cas des barrages de classe 1, l'application rigoureusement cohérente de cette démarche nécessite deux éléments de connaissance essentiels : 1) disposer de résultats de simulations provenant de la modélisation d'apports intégrant l'effet des changements climatiques; 2) pouvoir connaître les éléments d'adaptation de cette gestion qui peuvent être affectés non seulement par les modifications attendues des changements climatiques sur les volumes et la structure spatio-temporelle des apports, mais aussi par l'ajustement possible de certains objectifs de cette gestion.

Pour cette classe de barrages, la réalisation d'une étude de laminage partant d'apports représentatifs des conditions climatiques actuelles et futures et tenant compte des changements anticipables dans les règles de gestion est donc le meilleur moyen d'arriver à une estimation ciblée des débits sortants, atténués et avec atténuation restreinte, et des niveaux du réservoir en amont de ces ouvrages.

En l'absence des données, des informations et des outils permettant d'obtenir cette estimation précise, il est acceptable de considérer les impacts hydrologiques documentés des changements climatiques sur l'hydrologie naturelle et de faire l'hypothèse simplificatrice de transposition de l'effet de ces impacts aux valeurs actuelles des débits évacués par les barrages. Selon cette hypothèse, la prise en compte de l'impact des changements climatiques sur les débits évacués serait appliquée de la même façon en condition d'atténuation et en condition d'atténuation restreinte (figure 6.2).

Par ailleurs, et pour délimiter la zone inondable en amont d'un barrage, le niveau amont peut être déduit de la courbe d'évacuation du barrage ou d'une relation statistique reliant le débit évacué et le niveau du réservoir amont. En condition de climat futur, cette même relation peut être exploitée après avoir déterminé le débit évacué couvrant cette condition. Autrement dit, le niveau peut être déduit du débit ajusté à l'aide d'un facteur de majoration déterminé préalablement pour tenir compte de l'impact des changements climatiques (figure 6.3).

Pour les barrages des classes 2 et 3 ainsi que pour les barrages non opérés, la prise en compte de l'impact des changements climatiques peut être réalisée de façon analogue à ce qui a été décrit ci-haut pour le cas des barrages de classe 1, soit en transposant l'impact prévu des changements climatiques sur les apports aux débits sortants.

Pour ce qui est des mesures de gestion des eaux pluviales, et puisque la recommandation générale du présent guide est d'adopter une approche sécuritaire dans la délimitation des zones inondables des tronçons en aval (ne pas considérer l'atténuation apportée par ces aménagements), la prise en compte de l'impact des changements climatiques peut se baser sur les mêmes directives proposées en hydrologie naturelle (voir la section 5.2.1).

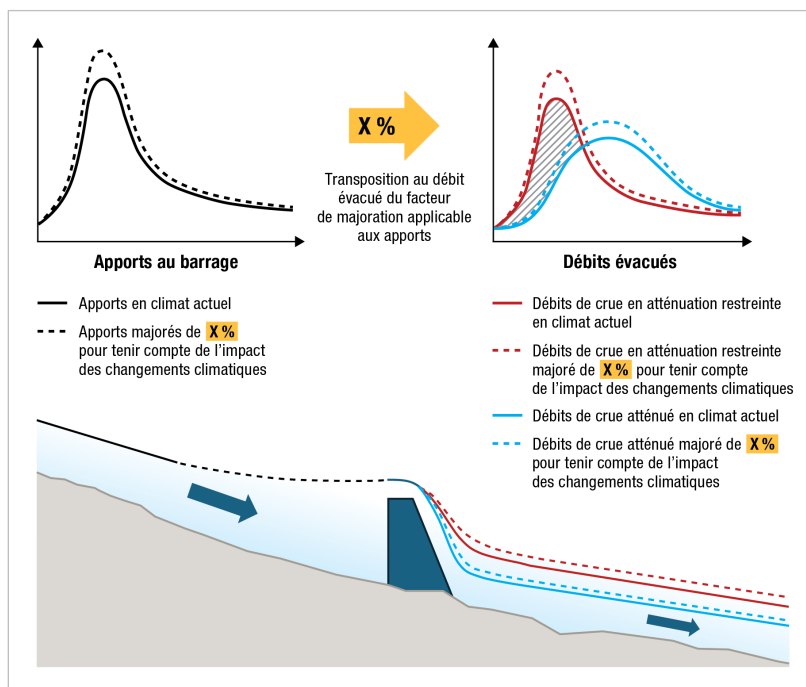


Figure 6.2. Option de prise en compte de l'effet des changements climatiques (CC) sur l'hydrologie des crues en présence de barrages – Transposition au débit évacué du barrage du facteur de changement (majoration) applicable aux apports

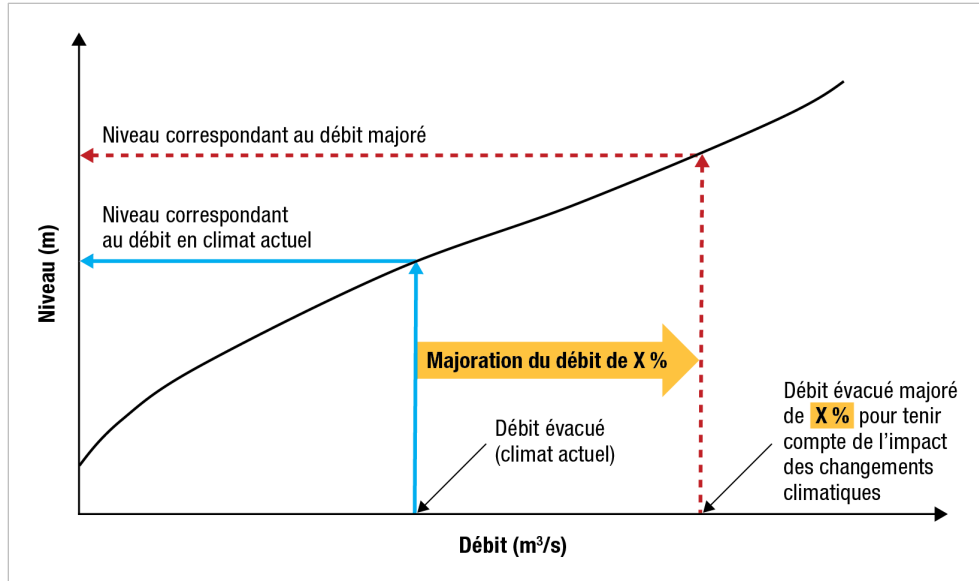


Figure 6.3. Option d'estimation du niveau du réservoir amont en condition de climat futur – Utilisation d'une relation entre le débit évacué du barrage et le niveau de son réservoir amont (courbe d'évacuation ou relation statistique) pour déterminer le niveau amont correspondant au débit évacué estimé en condition de climat futur

7. Simulations hydrodynamiques

7.1 Objectif et résultats attendus

L'objectif du présent chapitre est de présenter les exigences méthodologiques et certaines règles de bonne pratique relatives au processus de simulations hydrodynamiques en eau libre.

Le principal résultat attendu est la création d'un modèle représentatif des conditions hydrodynamiques du cours d'eau ou du plan d'eau étudié, c'est-à-dire calé sur des observations et des mesures sur le terrain. Ce modèle doit permettre de simuler, avec une précision suffisante, les superficies des zones inondables et les niveaux d'eau atteints avec les débits de crue pour des probabilités annuelles au dépassement de 5 %, 1 % et 0,3 %, comme présenté au chapitre 5.

7.2 Étapes de la modélisation hydrodynamique

EM 7.1	Exigence minimale
Schéma de réalisation	Le mandataire ou le délégataire devra, dans son processus de cheminement scientifique, respecter le schéma de réalisation dans la démarche pour le volet simulations hydrodynamiques.

Le schéma 7.1 présente les étapes à suivre pour réaliser des simulations hydrodynamiques. Chacune de ces étapes est détaillée aux sections suivantes en exposant les exigences minimales, les règles de bonne pratique et les cibles de précision à atteindre en lien avec le niveau d'effort cartographique par tronçon.

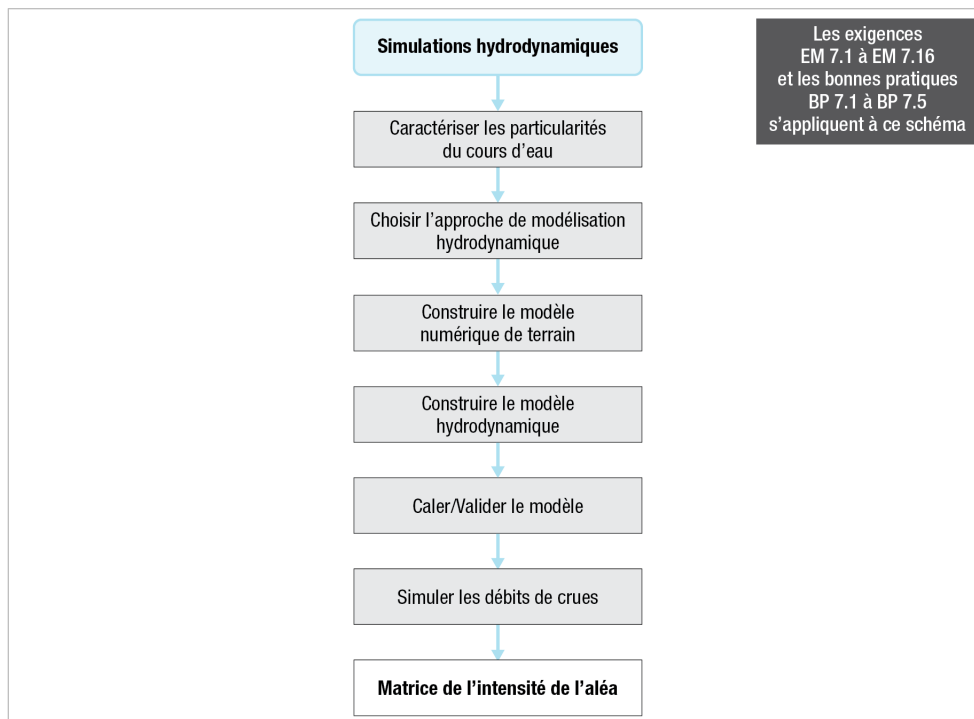


Schéma 7.1 : Schéma de réalisation de simulations hydrodynamiques

7.3 Caractériser les particularités du cours d'eau

Pour choisir l'approche de modélisation la plus appropriée, il est nécessaire de bien connaître les particularités hydrodynamiques et hydrogéomorphologiques du cours d'eau ou du plan d'eau à l'étude.

Pour la caractérisation du bassin versant et du cours d'eau, le mandataire ou le délégataire doit se référer aux paramètres géophysiques présentés au tableau 4.1 du chapitre 4.

7.4 Choisir l'approche de modélisation

7.4.1 Choisir le type de modèle

EM 7.2	Exigence minimale
Modèle hydrodynamique	Le mandataire ou le délégataire devra utiliser un modèle hydrodynamique 1D, 1D-2D ou 2D reconnu pour établir les zones inondables.

Le choix de l'approche de modélisation doit être basé, entre autres, sur le niveau d'effort cartographique (modéré ou majeur) du tronçon à l'étude, présenté à la section 4.3, et sur les caractéristiques hydrodynamiques et hydrogéomorphologiques du cours d'eau. Le type de modèle doit permettre de simuler adéquatement l'étendue et les niveaux d'eau pour les débits de crue avec des PAD de 5 %, 1 % et 0,3 %.

Plusieurs approches de modélisation peuvent être envisagées, comme les modèles 1D qui sont relativement simples, ou les modèles 1D-2D et 2D qui sont généralement utilisés lorsque les conditions hydrodynamiques du cours d'eau étudié sont plus complexes. Dans certains cas particuliers, des modèles 3D et des modèles physiques peuvent être employés, mais ceux-ci ne sont pas détaillés dans la présente version du guide.

Dans le cas de réservoirs ou de lacs, d'autres approches qu'un modèle hydrodynamique peuvent être utilisées, notamment des modèles à réservoir ou des analyses fréquentielles sur les niveaux d'eau à partir de données historiques de stations limnimétriques ou hydrométriques.

Enfin, il faut noter qu'il n'est pas obligatoire de représenter un cours d'eau par un seul modèle en continu. En effet, un modèle global peut inclure plusieurs sous-modèles caractérisés par des approches différentes, mais les niveaux d'eau simulés et les zones inondées doivent concorder et s'arrimer aux points de transition pour l'ensemble des scénarios simulés. Le principe de cohérence spatiale énoncé au chapitre 2 doit donc être respecté à l'échelle du bassin versant.

7.4.1.1 Modèles hydrodynamiques 1D

Les modèles 1D sont généralement rapides à exécuter, notamment pour les cours d'eau dont le chenal principal et les plaines inondables sont bien définis, avec un écoulement unidirectionnel. Plusieurs types de modèles 1D

existent, et la plupart permettent de réaliser des simulations en tenant compte de l'effet de structures ou de particularités hydrauliques tels des seuils ou des cascades.

Les modèles 1D sont donc généralement utilisés dans les cas suivants :

- Cours d'eau et plaines de débordement dans lesquels les directions et les forces d'écoulement dominantes suivent la trajectoire générale de l'écoulement fluvial, et génèrent un écoulement unidirectionnel;
- Cours d'eau où se trouvent des ponts, des ponceaux, des seuils, des déversoirs, des barrages, des digues, etc.;
- Cours d'eau où les données topographiques et bathymétriques disponibles sont limitées.

7.4.1.2 Modèles hydrodynamiques 2D

Les modèles 2D peuvent permettre de mieux simuler les écoulements que les modèles 1D lorsque les conditions hydrodynamiques sont complexes et non uniformes sur l'ensemble d'une section transversale d'un cours d'eau. Aussi, certains modèles 2D permettent de calculer les champs de vitesses d'écoulement, information qui peut s'avérer utile, notamment d'un point de vue de sécurité publique pour planifier des interventions d'urgence en zones habitées en période d'inondations.

Les modèles 2D sont appropriés dans les cas où l'écoulement est peu confiné, ou peut se faire dans plusieurs directions. Ils sont généralement utilisés dans les situations suivantes :

- Secteurs urbanisés où l'écoulement peut se faire entre les bâtiments et les différentes infrastructures;
- Grandes plaines inondables dans lesquelles le patron d'écoulement diffère de celui du chenal principal et où un laminage important peut se produire;
- Secteurs où l'écoulement est complexe (p. ex., méandres serrés, rivières tressées, barrages, etc.);
- Baies ou estuaires, et secteurs influencés par les marées et les inversions de courants.

7.4.1.3 Modèles hydrodynamiques 1D-2D

Dans certains cas, un modèle 1D n'est pas suffisant pour bien représenter les conditions hydrodynamiques d'un cours d'eau sur l'ensemble de sa section d'écoulement. Par exemple, lorsqu'une rivière est bordée de plaines de débordement relativement grandes, et où une part importante des débits peut s'y écouler en période de crues, il peut être d'intérêt d'utiliser un modèle 1D-2D combiné. Dans ce type de modèle, le chenal principal est modélisé en 1D et les plaines de débordement, en 2D. Cette approche permet de mieux représenter les patrons d'écoulement dans les plaines inondables et, ainsi, de générer des niveaux d'eau plus représentatifs des conditions réelles. Un modèle 1D-2D peut aussi être l'option à envisager lorsqu'un modèle numérique de terrain détaillé est disponible, mais que les données bathymétriques ne sont pas assez denses pour produire un modèle 2D représentatif du chenal principal d'écoulement.

7.4.1.4 Modèles à réservoir et statistiques de niveaux d'eau

Lorsqu'il y a présence d'un lac ou d'un réservoir ayant une grande capacité de laminage des crues, une modélisation hydrodynamique peut être réalisée pour établir les niveaux d'eau et les étendues des zones inondables. Dans ces cas, le point de contrôle hydraulique à l'exutoire du plan d'eau doit être défini, qu'il s'agisse d'un seuil naturel ou anthropique, ou d'un barrage avec ouvrages d'évacuation.

Pour les cas plus complexes, il existe certains logiciels de modélisation spécialisés pour les réservoirs. Ceux-ci permettent, entre autres, de simuler différents modes de gestion de barrages, d'ouvrages d'évacuation et de canaux de dérivation, ainsi que de systèmes comprenant la présence d'ouvrages de retenue en série et en parallèle.

Autrement, dans le cas où une série de données de niveaux d'eau suffisamment longue provenant d'une station limnimétrique ou hydrométrique est disponible, il est possible d'effectuer des calculs statistiques pour établir les niveaux pour les PAD de 5 %, 1 % et 0,3 %. Une projection de ces niveaux d'eau sur un modèle numérique de terrain permet ensuite de cartographier l'étendue des zones inondables.

Or, il faut noter que cette méthode comporte certaines limites. En effet, puisque, généralement, une seule valeur de niveau d'eau par récurrence de crue est utilisée pour cartographier les zones inondables sur la totalité du lac ou du réservoir, il peut y avoir des incohérences lorsque la pente du plan d'eau induit un gradient hydraulique significatif. Dans ces cas, des ajustements doivent être apportés pour que les niveaux d'eau projetés en tiennent compte, ou une modélisation hydrodynamique plus précise doit être réalisée afin d'obtenir des niveaux et des étendues d'eau représentatifs sur toute la zone à l'étude.

7.4.2 Choisir le régime d'écoulement

EM 7.3	Exigence minimale
Régime d'écoulement	Le mandataire ou le délégataire devra, dans son processus de cheminement scientifique, adapter le régime d'écoulement des modèles hydrodynamiques de manière à représenter de façon réaliste l'étendue des zones inondables.

En **régime permanent**, on suppose que le débit est constant, mais qu'il peut varier spatialement en fonction des apports latéraux et des tributaires du tronçon à l'étude. Le régime permanent s'applique généralement à des cours d'eau assez confinés pour lesquels il n'y a pas de zones d'accumulation importantes en plaine inondable avec un effet notable sur le laminage des crues. Les simulations hydrodynamiques réalisées avec ce régime d'écoulement donnent des résultats de niveaux et d'étendues d'eau conservateurs. En effet, ce sont généralement des débits de pointe qui sont simulés en continu jusqu'à ce que le modèle se stabilise. Il faut cependant être prudent avec l'utilisation d'un débit constant, car cela peut générer des zones inondables surestimées, entre autres dans les cas où le débit de pointe de la crue simulée dure peu longtemps, ce qui ne génère pas un volume réellement suffisant pour remplir les plaines de débordement.

En **régime transitoire**, l'intrant pour les simulations est un hydrogramme de débit qui varie dans le temps, et qui peut aussi varier spatialement. L'aspect volumétrique d'une crue est donc pris en compte avec ce régime d'écoulement, et il est possible de calculer le temps de submersion en période d'inondations. L'écoulement transitoire est donc à privilégier, entre autres lorsqu'un effet de laminage de débit par stockage en plaine inondable doit être évalué. Il peut aussi s'avérer adéquat lorsqu'une simulation doit être faite dans un lac ou un réservoir, ou pour une étude de rupture de barrage ou une crue éclair dans laquelle l'onde de crue doit être caractérisée.

Il faut noter qu'un débit constant peut aussi être simulé en régime transitoire dans des modèles hydrodynamiques, si nécessaire. Dans ce cas, l'intrant pour les simulations hydrodynamiques est un hydrogramme de débit constant, donc qui ne varie pas dans le temps. Il peut cependant varier spatialement en fonction des apports en eau sur le tronçon modélisé.

7.5 Construire le modèle numérique de terrain

Pour la création du modèle numérique de terrain (MNT) à partir de données topographiques et bathymétriques, le mandataire ou le délégataire doit considérer les exigences minimales et certaines règles de bonne pratique énoncées au chapitre 11.

7.6 Construire le modèle hydrodynamique

Un modèle hydrodynamique peut être constitué d'un ou de plusieurs cours d'eau et plans d'eau. Les données géométriques requises pour le construire dépendent du type de modèle choisi, et aussi des différentes structures hydrauliques présentes sur le ou les tronçons à l'étude.

7.6.1 Limite du domaine de modélisation

EM 7.4	Exigence minimale
Limites du domaine de modélisation	Le mandataire ou le délégataire devra établir les limites du domaine de modélisation du modèle hydrodynamique. Celles-ci doivent être situées à des emplacements adéquats pour l'arrimage avec un secteur adjacent, soit principalement hors d'une plaine inondable d'importance.

L'étape préliminaire à la construction d'un modèle hydrodynamique consiste à établir les limites du domaine de modélisation. Celles-ci sont généralement localisées hors des zones de débordement important et ne doivent pas être établies en fonction des limites administratives d'un territoire comme une municipalité ou une municipalité régionale de comté, par exemple.

7.6.2 Géométrie du modèle hydrodynamique

Lors de la création de la géométrie d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau et de ses plaines inondables dans un modèle hydrodynamique, les éléments suivants, entre autres, doivent être définis :

- Sections d'écoulement et/ou zones de modélisation 2D;
- Délimitation du chenal principal, des berges et des plaines inondables;
- Structures hydrauliques perpendiculaires à l'écoulement, et/ou latérales;
- Divers éléments additionnels de géométrie à définir selon le choix du modèle et de l'approche de modélisation.

7.6.2.1 Effort majeur

EM 7.5	Exigence minimale
Bathymétrie	Le mandataire ou le délégataire devra intégrer la bathymétrie dans l'élaboration du modèle hydrodynamique.

EM 7.6	Exigence minimale
Structures	Le mandataire ou le délégataire devra intégrer les structures (ponts, barrages, seuils, etc.) dans la modélisation hydrodynamique lorsqu'elles influencent de manière notable les niveaux d'eau et les vitesses d'écoulement.

Dans les secteurs à effort cartographique majeur, une bathymétrie détaillée et toutes les structures hydrauliques pouvant avoir un important impact sur les niveaux d'eau et les vitesses d'écoulement doivent être incluses à la géométrie du modèle hydrodynamique. L'objectif est d'assurer une représentativité maximale du modèle par rapport aux conditions réelles d'écoulement aux endroits où il peut y avoir des enjeux plus importants pour les personnes et les biens en période d'inondations.

7.6.2.2 Effort modéré

EM 7.7	Exigence minimale
Bathymétrie	Le mandataire ou le délégataire devra construire un modèle hydrodynamique qui intègre minimalement une approximation de la bathymétrie. Celle-ci devra être élaborée à l'aide d'une méthode structurée permettant de reconstituer un fond de lit mineur suffisamment réaliste pour reproduire de manière cohérente un profil de surface de l'eau documenté qui correspond à un débit estimé.

EM 7.8	Exigence minimale
Structures	Le mandataire ou le délégataire devra minimalement évaluer l'impact des structures hydrauliques sur l'écoulement (ponts, barrages, seuils, etc.) avec une approximation de leur géométrie dans la modélisation hydrodynamique lorsqu'elles influencent de manière notable les niveaux d'eau et les vitesses d'écoulement.

Dans les secteurs à effort cartographique modéré, une approximation de la bathymétrie doit minimalement être intégrée au modèle hydrodynamique. Celle-ci peut être réalisée en creusant un chenal dont la profondeur et la largeur de l'écoulement sont établies à partir des données LiDAR et d'une estimation du débit du cours d'eau lors de l'acquisition de ces données. De plus, les structures hydrauliques pouvant avoir un impact important sur les niveaux d'eau et les vitesses d'écoulement doivent minimalement être intégrées au modèle à l'aide d'une approximation de leur géométrie. Cela peut être effectué, entre autres, en modifiant le MNT pour créer une restriction à l'écoulement similaire à celles des structures hydrauliques présentes sur le tronçon.

7.6.3 Détermination des conditions limites aux frontières

Le choix des conditions limites en amont et en aval du modèle doit permettre de reproduire le plus fidèlement possible les conditions hydrodynamiques du cours d'eau à l'étude pour différents scénarios hydrologiques. Elles doivent idéalement être situées à une distance suffisante des zones d'intérêt afin de limiter leur impact sur les niveaux d'eau. Cette préoccupation est d'autant plus importante lorsque la pente du cours d'eau est faible.

De plus, la limite en aval du modèle hydrodynamique doit idéalement être située dans une zone où la relation niveau-débit est univoque et bien définie (p. ex., un seuil ou un barrage) ou dans un secteur rectiligne uniforme avec une pente relativement constante (généralement après un rapide ou une section de contrôle). Si la condition limite en aval est associée aux marées, un niveau d'eau doit être fixé. Dans certaines conditions de simulations en régime transitoire, le niveau d'eau peut aussi être variable si un cycle de marée donné est choisi comme condition limite. Il en est de même pour un tributaire dont les niveaux peuvent être fortement influencés par le refoulement d'un cours d'eau important ou d'un lac en aval. Dans ce cas, une analyse de la zone d'influence de la condition limite en aval doit être réalisée et la condition limite en aval choisie doit être adaptée aux différents scénarios hydrologiques.

Les conditions limites suivantes sont généralement celles utilisées à l'amont et à l'aval des modèles hydrodynamiques.

Conditions limites en amont

- Débit constant pour un modèle en régime permanent;
- Hydrogramme pour un modèle en régime transitoire.

Conditions limites en aval

- Hydrogramme de niveaux d'eau;
- Courbe de tarage ou relation niveau-débit;
- Profondeur normale d'écoulement;
- Profondeur critique d'écoulement;
- Mode de gestion pour l'ouverture de vannes d'ouvrages de contrôle.

7.7 Caler/valider le modèle

Lorsque le modèle hydrodynamique est construit, il faut s'assurer qu'il représente bien les conditions d'écoulement du cours d'eau à l'étude. Cette étape s'appelle le calage et consiste à ajuster les paramètres du modèle afin que les niveaux d'eau simulés en fonction des débits soient comparables à ceux observés lors des campagnes de mesures sur le terrain réalisées en période de crue.

Pendant le processus de calage, les paramètres du modèle (généralement les coefficients de frottement du lit et des berges) sont ajustés de l'aval vers l'amont, et le modèle est exécuté de nouveau jusqu'à ce que les niveaux d'eau simulés donnent la meilleure reproduction des niveaux d'eau mesurés. Il s'agit donc d'un processus itératif qui peut nécessiter la répétition de certaines étapes selon la performance du calage.

Ce processus peut permettre de cerner des incohérences dans les données de terrain du modèle, et dans les conditions limites. En effet, s'il n'est pas possible d'obtenir une représentation adéquate des données mesurées après plusieurs itérations, ou si cela ne peut être réalisé que par l'utilisation de paramètres d'entrée irréalistes, alors il est nécessaire d'examiner de plus près les éléments suivants :

- Les hypothèses faites dans la sélection du type de modèle hydrodynamique;
- La capacité du modèle sélectionné à reproduire les conditions d'écoulement considérées;
- La fiabilité des conditions limites qui ont été appliquées au modèle hydrodynamique (calcul du débit associé aux événements de calage, choix de la condition limite aval);
- La quantité et/ou la densité, et la qualité des données bathymétriques utilisées;
- Le choix et la façon de représenter les structures hydrauliques dans le modèle hydrodynamique.

Il faut noter aussi que certaines données peuvent ne plus être adéquates pour le calage de modèles récents en raison de leur vétusté, et de l'incertitude en lien avec la méthodologie utilisée à l'époque des relevés. Leur référentiel géodésique peut aussi être différent des données topographiques et bathymétriques les plus à jour. Enfin, si le cours d'eau a subi des modifications significatives depuis la prise des données, comme un déplacement latéral, un élargissement, la formation d'un seuil, etc., il est fort probable qu'elles ne soient plus adéquates et représentatives pour faire le calage du modèle récent.

Certaines informations peuvent être utilisées pour valider, ou préciser le calage des modèles hydrodynamiques :

- Limites observées de la zone inondée (relevés de niveaux d'eau, délaissés de crue, etc.);
- Photographies aériennes;
- Témoignages;
- Niveaux maximums historiques;
- Niveaux d'eau atteints sur un ouvrage hydraulique;
- Présence de débris;
- Renseignements sur le fonctionnement d'ouvrages hydrauliques.

7.7.1 Ajustement des paramètres de calage

7.7.1.1 Coefficient de Manning

Un des principaux paramètres permettant de caler un modèle hydrodynamique pour obtenir des niveaux d'eau simulés similaires à ceux observés et mesurés est le coefficient de Manning. Ce coefficient de rugosité des berges et du chenal est établi en fonction du type de substrat et de l'occupation du territoire.

La sélection de ce coefficient s'effectue en choisissant des valeurs à l'intérieur d'une gamme réaliste en fonction de ce qui est présenté dans les ouvrages de référence. Si l'application d'un coefficient de Manning anormalement élevé, ou faible, est nécessaire pour reproduire les niveaux d'eau observés dans un secteur donné, il est fort probable que certaines caractéristiques du cours d'eau ne soient pas modélisées adéquatement (p. ex., seuil ou haut fond non intégré dans la bathymétrie) ou que le calcul du débit associé aux niveaux d'eau observés soit erroné. Les secteurs nécessitant des coefficients de Manning en dehors des valeurs attendues pour reproduire les niveaux d'eau observés doivent être déterminés puisque l'acquisition de nouvelles données peut être nécessaire pour mieux représenter les conditions hydrodynamiques réelles du cours d'eau dans le modèle. S'il n'est pas possible lors du calage d'opter pour des coefficients de Manning qui sont à l'intérieur de la gamme attendue, cela peut se solder par des niveaux d'eau simulés non représentatifs de la réalité pour des scénarios autres que les événements de crues utilisés pour le calage du modèle.

7.7.1.2 Condition limite en aval

Dans certaines situations, les conditions limites à l'aval du modèle hydrodynamique jouent un rôle important sur le contrôle des niveaux d'eau d'un tronçon de rivière ou d'un plan d'eau. À titre d'exemple, ce peut être le cas dans des secteurs influencés par les marées, par les niveaux d'eau d'un cours d'eau récepteur ou par le mode de gestion d'un barrage.

Dans une situation où un calage s'avère difficile dans une zone où les niveaux d'eau simulés sont influencés par la condition limite en aval, il est nécessaire de réévaluer si la condition limite en aval représente adéquatement le

contrôle hydraulique à l'aval du modèle lors de chaque événement de crue utilisé pour le calage du modèle. L'emplacement et la nature du contrôle hydraulique à l'aval d'un modèle peuvent varier selon l'intensité de l'événement de crue et peuvent nécessiter des données ou relevés supplémentaires hors du domaine de modélisation considéré initialement. L'impact de conditions spécifiques à un événement de crue donné, tel que la présence locale de glace ou de débris, doit aussi être considéré.

7.7.2 Cibles de calage

Les cibles de calage à atteindre varient selon le niveau d'effort cartographique du tronçon modélisé, ainsi que des données de lignes d'eau (niveaux) et de débits disponibles.

Lorsqu'il est impossible de caler convenablement un modèle à certains endroits, la prise de relevés supplémentaires sur le terrain peut s'avérer nécessaire pour mieux caractériser les particularités bathymétriques et hydrodynamiques du cours d'eau. Par exemple, si un seuil n'a pas été inclus initialement au modèle, cela peut faire une grande différence sur les niveaux d'eau simulés avec un débit de crue. Si, après l'ajout de nouveaux relevés au modèle, il est toujours impossible de le caler selon les cibles à atteindre, une justification et des recommandations doivent être fournies dans le rapport d'étude hydraulique, avec un jugement professionnel quant aux conséquences que cela peut avoir sur les résultats de niveaux d'eau et les zones inondables simulés, et quant au niveau de confiance du modèle.

7.7.2.1 Effort majeur

EM 7.9	Exigence minimale
Cibles de calage	Le mandataire ou le délégataire devra respecter la cible générale de calage de ± 150 mm, et ce, pour chaque événement de crue utilisé pour le calage. Il devra également s'assurer d'éliminer tout biais systématique. Toutefois, il pourra moduler les cibles de calage en fonction des particularités du cours d'eau et en justifiant ses choix méthodologiques (p. ex., un cours d'eau peu pentu devrait avoir des cibles de calage plus restrictives).

EM 7.10	Exigence minimale
Événements de calage	Le mandataire ou le délégataire devra utiliser un minimum de deux événements de crue documentés (mesures de débit et de niveaux) pour réaliser le calage d'un modèle hydrodynamique. Les deux événements doivent être indépendants et ne doivent pas être de la même intensité.

BP 7.1	Bonne pratique
Événements de calage	Le mandataire ou le délégataire pourra considérer qu'au moins un des événements de crue doit avoir un débit supérieur à une crue de récurrence 1 : 2 ans.

Information supplémentaire pour les cibles de calage en régime transitoire

Pour des simulations hydrodynamiques réalisées en régime transitoire, les objectifs de calage doivent considérer à la fois le niveau d'eau maximum atteint, la forme de l'hydrogramme, ainsi que la synchronisation de la pointe de débit observée et de la pointe de débit simulée. En général, un écart de l'ordre de 15 à 30 minutes entre la pointe de débit observée et la pointe de débit simulée est jugé adéquat. En ce qui concerne les niveaux d'eau, la cible de calage pour l'effort cartographique majeur est la même que celle en régime permanent, soit celle présentée à l'exigence minimale EM 7.9 (± 150 mm).

7.7.2.2 Effort modéré

EM 7.11	Exigence minimale
Événements de calage	Le mandataire ou le délégataire devra reproduire un profil de la surface de l'eau observé dans le cadre de la méthode d'approximation de la bathymétrie. Cette étape fait office de calage pour ce type d'effort cartographique.

Comme demandé à l'exigence minimale EM 7.7, une approximation de la bathymétrie doit être faite de façon à reproduire le profil de la surface de l'eau mesuré pour le débit s'écoulant lors de l'acquisition de données LiDAR. Les approches qui n'intègrent ni bathymétrie ni notion d'hydraulique des cours d'eau ne sont pas acceptées, car elles ne respectent pas les conditions de l'exigence méthodologique minimale.

7.7.3 Analyse de sensibilité

BP 7.2	Bonne pratique
Analyse de sensibilité	Le mandataire ou le délégataire pourra réaliser une analyse de sensibilité sur les débits de probabilité annuelle au dépassement de 1 % en faisant varier notamment le débit, la condition limite en aval et le coefficient de rugosité (Manning) de 20 %, ou selon le jugement professionnel.

À la suite du calage du modèle hydrodynamique, il est recommandé d'effectuer une analyse de sensibilité afin de mieux comprendre l'impact de différents paramètres sur les résultats obtenus, surtout pour les secteurs où des enjeux d'exposition et de vulnérabilité sont documentés. Cette analyse consiste à faire varier un ou des éléments de modélisation, puis à observer les effets sur les résultats. Cet exercice est particulièrement important lorsque peu de données de calage sont disponibles, de même qu'en présence d'incertitudes associées aux paramètres du modèle et aux données d'entrée.

À titre d'exemple, l'analyse de sensibilité peut être faite en faisant varier les paramètres de la façon suivante :

- ± 20 % le débit de PAD de 1 %;
- ± 20 % les coefficients de rugosité, avec le débit de PAD de 1 %;
- Perturbation du niveau d'eau en aval variable selon le cas (p. ex., $\pm 0,5$ m);
- Blocage partiel d'ouvrages critiques (p. ex., 75 %) pour le débit de PAD de 1 %, s'il y a présence de conditions propices aux embâcles de glace ou de débris.

La réalisation d'une analyse de sensibilité plus détaillée peut être nécessaire si des enjeux particuliers sont connus, ou si l'analyse de base révèle que les résultats du modèle sont particulièrement sensibles à la modification des paramètres de modélisation.

7.7.4 Validation du modèle

BP 7.3	Bonne pratique
Validation du modèle hydrodynamique	Le mandataire ou le délégué pourra réaliser une validation du modèle hydrodynamique à l'aide d'un débit de crue supérieur ou inférieur aux débits ayant servi au calage.

Le processus de validation consiste à simuler, avec le modèle hydrodynamique calé, un événement de crue indépendant du processus de calage afin de vérifier sa représentativité pour diverses conditions hydrodynamiques du cours d'eau. L'exercice de validation constitue une bonne pratique en modélisation hydrodynamique. La présente version du guide ne définit donc aucune exigence méthodologique ni aucune cible de précision à atteindre.

7.7.5 Analyse des incertitudes

BP 7.4	Bonne pratique
Analyse des incertitudes hydrauliques	Le mandataire ou le délégué pourra réaliser une analyse pour quantifier les incertitudes hydrauliques.

Dans le processus de détermination des zones inondables, les résultats de modélisation hydrodynamique sont influencés par plusieurs sources d'incertitudes. Une analyse des incertitudes permet de caractériser leur impact. Cette analyse peut tenir compte de différentes sources selon le niveau de détail souhaité, notamment les suivantes :

- Données topographiques et bathymétriques;
- Modèle numérique de terrain (p. ex., méthode d'interpolation entre les points topographiques et bathymétriques);
- Lignes d'eau et jaugeages;

- Construction du modèle (p. ex., espacement entre les sections, densité du maillage 2D);
- Conditions limites aux frontières à l'amont et l'aval du modèle;
- Conditions initiales (en régime transitoire);
- Coefficients de Manning;
- Coefficients hydrauliques (p.ex : coefficient de seuil, coefficient de pertes de charge);
- Dimensions et géométrie des structures hydrauliques;
- Mode de gestion des barrages;
- Données de calibration-validation du modèle.

Cet exercice constitue une bonne pratique pour bien évaluer une enveloppe de résultats probables pour une simulation donnée. Il nécessite toutefois une bonne connaissance de la distribution des probabilités des différentes sources d'incertitudes intégrées à l'analyse.

7.8 Simuler les débits de crue

Lorsque le modèle du ou des tronçons de cours d'eau ou de plans d'eau est monté, calé et validé selon les exigences minimales et les règles de bonne pratique, la prochaine étape consiste à effectuer les simulations hydrodynamiques permettant d'obtenir les extrants désirés. Il est question ici des niveaux et des étendues d'eau servant à cartographier les zones inondables pour différentes récurrences de crue. Ces zones inondables peuvent ensuite être cartographiées sous forme de matrice d'intensité de l'aléa servant à l'application réglementaire sur le territoire, comme détaillé dans le volet **cartographie réglementaire** du guide.

7.8.1 Récurrences à simuler

EM 7.12	Exigence minimale
Extrants de simulations	Le mandataire ou le délégataire devra réaliser les simulations hydrodynamiques pour les débits de crue ayant des PAD de 5 %, 1 % et 0,3 %.

Les simulations hydrodynamiques doivent être réalisées avec les débits de crue ayant des PAD de 5 %, 1 % et 0,3 %, calculés selon les exigences minimales et règles de bonne pratique présentées au chapitre 5.

Dans le cas où des niveaux d'eau sont utilisés pour mettre en plan l'étendue d'eau des zones inondables (p. ex., statistiques de niveaux d'eau provenant de stations hydrométriques), les mêmes récurrences doivent être calculées et employées.

7.8.2 Prise en compte des apports latéraux

EM 7.13	Exigence minimale
Apports latéraux	Le mandataire ou le délégataire devra considérer les apports latéraux dans les simulations du modèle hydrodynamique.

Dans une optique de cohérence spatiale à l'échelle du bassin versant (voir la section 2.3.3), il est souvent nécessaire de modéliser de longs tronçons de cours d'eau et de plans d'eau. Les débits peuvent donc varier spatialement en fonction des différents apports latéraux, que ce soit par des tributaires, par ruissellement ou par contribution de la nappe phréatique.

Les simulations hydrodynamiques doivent donc en tenir compte en ajoutant sur le tronçon modélisé, dans le cas de tributaires, des débits ponctuels cohérents avec les débits ayant des PAD de 5 %, 1 % et 0,3 % utilisés comme intrants à l'amont du modèle. Dans le cas où les apports latéraux sont diffus, ils peuvent être répartis uniformément sur le tronçon, ou selon certaines proportions choisies ou calculées par le modélisateur en fonction de l'utilisation du territoire, et de particularités locales d'écoulement et de drainage.

Il faut noter que le régime d'écoulement des apports latéraux peut être permanent ou transitoire, au même titre que les débits utilisés en condition limite en amont du modèle.

7.8.3 Combinaison de simulations aux embouchures et aux confluences

EM 7.14	Exigence minimale
Embouchures	Le mandataire ou le délégataire devra simuler des combinaisons de débits et de niveaux en aval réalistes pour le cas d'une embouchure qui donne sur un plan d'eau d'importance. En conformité avec les exigences en hydrologie, les combinaisons de débits et de niveaux doivent engendrer des conditions correspondant aux récurrences à cartographier.

EM 7.15	Exigence minimale
Confluences	Le mandataire ou le délégataire devra simuler des combinaisons de débits réalistes venant des cours d'eau à cartographier aux confluences. En conformité avec les exigences en hydrologie, les combinaisons de débits doivent engendrer des conditions correspondant aux récurrences à cartographier pour chacun des cours d'eau de la confluence.

EM 7.16	Exigence minimale
Combinaison des scénarios de simulations	Le mandataire ou le délégataire devra retenir les niveaux et les étendues d'inondation maximums (enveloppe maximale) lorsque plusieurs simulations sont effectuées pour tenir compte de conditions aux limites différentes, mais ayant la même probabilité de survenir (p. ex., embouchure).

Il existe des configurations de cours d'eau et de plans d'eau qui font en sorte que plusieurs combinaisons de paramètres, dépendants ou indépendants, peuvent donner lieu à un aléa d'inondation d'une même récurrence. Par exemple, à l'embouchure d'un tributaire influencé par les marées, par les niveaux d'eau d'un cours d'eau principal à une confluence ou par un ouvrage de retenue, différentes combinaisons de débits de crue, de niveaux d'eau ou de débits et de niveaux peuvent avoir la même probabilité de survenir. Une analyse statistique combinée de ces paramètres doit donc être faite pour déterminer les scénarios similaires (voir la section 5.6.2).

Ensuite, l'ensemble des scénarios de même récurrence doit être simulé, et ce sont les résultats du scénario, ou de la fusion de scénarios, donnant les niveaux d'eau et les étendues d'inondation maximums qui doivent être utilisés comme intrants pour créer la matrice d'intensité de l'aléa de l'inondation en eau libre décrite au volet **cartographie réglementaire** du guide.

7.8.4 Hydroconnectivité

EM 7.17	Exigence minimale
Hydroconnectivité	Le mandataire ou le délégataire devra considérer de manière réaliste les volumes d'eau dans la zone inondable et les paramètres d'hydroconnectivité, notamment pour les infrastructures linéaires d'importance, afin de refléter la réalité de la zone inondable au-delà de l'infrastructure (p. ex., autoroute, route régionale, boulevard urbain, chemin de fer, etc.).

En période de crues ou de fortes marées, un transfert d'eau peut s'effectuer de part et d'autre d'une infrastructure comme une route, une digue, un aboiteau ou tout autre ouvrage linéaire en raison de la présence de ponts ou de ponceaux, entre autres. En effet, ces ouvrages, qui servent généralement à drainer les secteurs derrière les infrastructures nommées précédemment, peuvent toutefois permettre l'entrée d'eau sur ces territoires lorsque les niveaux du cours d'eau ou du plan d'eau sont élevés, et générer des zones inondées.

Il faut donc prendre en compte cette hydroconnectivité dans la modélisation en permettant le transfert d'eau de part et d'autre d'une infrastructure, ou en intégrant directement les structures hydrauliques comme les ponts, les ponceaux et les conduites afin de permettre la circulation d'eau lors des simulations hydrodynamiques. Dans les cas où l'information sur l'ensemble des structures de drainage n'est pas disponible, il est possible de simuler le transfert d'eau en intégrant dans le modèle une ou des brèches dans les infrastructures anthropiques linéaires qui

séparent un territoire d'un cours d'eau. La section 11.1.3 du chapitre 11 offre des précisions sur la méthodologie à cet effet. Enfin, il est aussi possible de faire une évaluation des volumes d'eau pouvant transiter sur les territoires derrière les infrastructures linéaires, et de les transposer en zones inondables à l'aide du modèle numérique de terrain pour les différentes PAD à analyser de 5 %, 1 % et 0,3 %.

En ce qui concerne les inondations influencées de façon significative par les nappes d'eau souterraines hydroconnectées à un cours d'eau, un plan d'eau, ou une plaine inondable, il faut souligner qu'elles ne font pas partie des éléments traités dans le présent guide méthodologique. Cependant, un mandataire ou délégué peut en faire l'analyse et en prendre compte dans sa modélisation s'il le juge nécessaire.

8. Analyser l'impact de la présence d'OPI

8.1 Objectif et résultats attendus

L'objectif du présent chapitre s'inscrit dans le contexte du Règlement sur les ouvrages de protection contre les inondations (ROPI). Il présente les orientations gouvernementales qui viennent baliser le traitement cartographique du territoire derrière un OPI. Les résultats attendus visent le respect des exigences minimales pour assurer un cheminement scientifique et technique en phase avec le cadre réglementaire.

8.2 Mise en contexte

Les digues, les murs de protection et les autres ouvrages pour contrer les inondations sont des barrières anthropiques mises en place afin de gérer le risque d'inondation de certains territoires, de protéger les populations et de réduire les dommages à leurs biens.

En Europe et aux États-Unis seulement, on dénombre plusieurs centaines de milliers de kilomètres de linéaire de digues en bordure des fleuves et des côtes (CEREMA, 2019). Au Québec, le gouvernement a entrepris de dénombrer ces ouvrages et de les répertorier dans un registre public. Un premier inventaire des OPI présents sur le territoire québécois a été réalisé en 2021 au moyen d'une collecte de données auprès d'instances gouvernementales, de même qu'auprès de municipalités régionales de comté (MRC), de communautés métropolitaines, de municipalités et d'arrondissements. L'entrée en vigueur du ROPI et la constitution d'un registre des OPI permettront de bonifier cet inventaire au fil du temps.

8.3 Identification d'un OPI

8.3.1 Définition d'un OPI

La définition suivante est extraite du ROPI. En cas de divergence, les textes réglementaires prévalent.

L'article 1 du ROPI définit la notion d'OPI et s'applique à tout ouvrage qui satisfait aux conditions suivantes :

1. il a été construit ou modifié afin de limiter l'expansion naturelle des eaux d'un lac ou d'un cours d'eau et de prévenir l'inondation;
2. il a été construit pour être permanent;
3. il vise à protéger un ensemble de biens et de personnes dans une collectivité;
4. il ne crée pas de réservoir permanent.

Différents types d'ouvrages peuvent être considérés comme des OPI. Ils peuvent notamment être constitués d'une digue en terre ou d'un mur de protection contre l'inondation en palplanche, en béton ou en maçonnerie. Ils peuvent également être faits de plusieurs tronçons dont les caractéristiques physiques et structurelles se distinguent les unes des autres ou de celles du milieu physique d'implantation.

8.3.2 Types d'ouvrages exclus de la définition

L'article 2 du ROPI indique que les infrastructures suivantes ne sont pas des OPI au sens du règlement :

- Un barrage assujéti à la Loi sur la sécurité des barrages;
- Un ouvrage de contrôle des glaces contribuant à limiter les inondations (p. ex., les estacades);
- Les ouvrages de gestion des eaux pluviales;
- Une digue agricole, incluant un aboiteau, lorsque celle-ci prévient uniquement l'inondation d'un territoire assujéti à la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles;
- Un ouvrage de stabilisation au sens de l'article 313 du Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement;
- Un mur de soutènement;
- Un ouvrage qui a été construit à d'autres fins que la prévention des inondations et qui n'a pas été converti dans le but de prévenir les inondations.

EM 8.1	Exigence minimale
Identification et caractérisation de l'ouvrage	À partir du registre des OPI, le mandataire ou le délégué devra vérifier s'il y a présence d'OPI sur le territoire à cartographier.

BP 8.1	Exigence minimale
Connaissance des OPI	À partir de sa connaissance du territoire, si le mandataire ou le délégué considère qu'il y a présence d'un OPI non répertorié sur le territoire, il pourra consulter le Règlement sur les ouvrages de protection contre les inondations pour vérifier la conformité à la définition. Il pourra en informer la municipalité qui prendra contact avec le MELCCFP pour que cette infrastructure soit ajoutée au registre des OPI.

8.4 Orientations

Un OPI étant conçu pour réduire le risque d'inondation, l'une de ses fonctions principales est de retenir temporairement l'eau en la maintenant hors de la zone inondable, jusqu'à un niveau d'eau maximal défini (CEREMA, 2019). Il s'agit d'une mesure structurelle de protection contre les inondations constituant une solution de derniers recours à une problématique d'inondation, c'est-à-dire uniquement lorsque toutes les autres options ont été écartées, et ce, pour protéger des secteurs déjà bâtis.

Cependant, bien que ce type d'ouvrage diminue l'exposition des territoires face à l'aléa inondation, les OPI ne sont pas infaillibles et les gens qui vivent derrière demeurent vulnérables en cas de défaillance. La défaillance d'un OPI peut se traduire par des inondations aux conséquences majeures pour les personnes et les biens qui bénéficient normalement de sa protection. Par exemple, la rupture soudaine d'une digue à Sainte-Marthe-sur-le-Lac au

printemps 2019 a généré l'inondation rapide de plus de 2 600 propriétés et l'évacuation en urgence de 6 500 personnes. De même, lors des inondations du printemps 2023 à Baie-Saint-Paul, la rupture d'un muret a provoqué une montée rapide du niveau d'eau, ne laissant aux citoyens que quelques minutes pour quitter leur demeure et provoquant l'inondation des rues environnantes. D'autres événements similaires ont également eu lieu ailleurs dans le monde, notamment en Colombie-Britannique en 2021, démontrant bien l'importance d'encadrer la gestion des OPI. Ces ouvrages représentent donc un élément de risque qu'il est important de considérer.

À l'égard des OPI, la réalisation de la cartographie des zones inondables derrière l'infrastructure est indissociable de l'encadrement réglementaire des OPI proposé par le gouvernement du Québec.

8.4.1 Vérification de l'existence de zones inondables en aval de l'OPI

Cartographie sur la base des modalités de détermination des ZI en eau libre

Dans l'exercice de cartographie des zones inondables, la seule présence d'un OPI n'est pas suffisante. Il peut arriver qu'une crue dépasse la crête de l'ouvrage, ce qui génère une surverse (débordement) ou le contournement de l'ouvrage, provoquant ainsi l'inondation de la zone en aval. Une défaillance technique en raison d'un endommagement pourrait également créer une brèche dans l'ouvrage susceptible de générer une rupture de l'ouvrage, ce qui pourrait causer une inondation aux conséquences potentiellement catastrophiques compte tenu de son risque de défaillance.

Pour que la protection d'un OPI soit reconnue lors de la cartographie des zones inondables, les deux conditions suivantes doivent être respectées :

- Une étude de performance, réalisée par un ingénieur, doit confirmer le respect des normes de conception et de performance énoncées dans le Règlement sur les ouvrages de protection contre les inondations;
- La municipalité doit avoir été déclarée responsable de l'OPI en vertu d'un décret gouvernemental émis selon l'article 46.0.13 de la LQE.

À défaut de respecter ces deux conditions, tout territoire situé en aval d'un OPI doit être cartographié selon le principe de la **transparence hydraulique**, c'est-à-dire sans tenir compte de la protection de l'ouvrage.

Le concept de transparence hydraulique est l'aptitude d'un ouvrage ou d'un aménagement à ne pas faire obstacle aux mouvements des eaux. Ainsi, un ouvrage est dit « transparent » d'un point de vue hydraulique lorsqu'il n'amplifie pas le niveau des plus hautes eaux, ne réduit pas la zone d'expansion des crues, n'allonge pas la durée des inondations ou n'augmente pas leur étendue et n'intensifie pas la vitesse d'écoulement des eaux. Ce concept s'applique à un ouvrage existant ou à construire.

Dans le cadre de la détermination et de la cartographie des zones inondables et de mobilité, le concept est utilisé par analogie pour simuler une situation fictive où un ouvrage « opaque » (qui n'est pas transparent du point de vue hydraulique), en l'occurrence un OPI, serait transformé en ouvrage transparent sur le plan hydraulique. La cible ainsi visée par l'application de ce concept est l'évaluation de l'intensité des aléas d'inondation en aval (côté terre) comme s'il y avait absence physique de l'ouvrage.

Pour y arriver, plusieurs techniques en géomatique ou en ingénierie permettent de simuler le concept de transparence hydraulique pour un OPI, notamment les suivantes, sans s’y limiter :

1. Retrait numérique de la présence de l’ouvrage en se ramenant au niveau du terrain naturel avant implantation de l’OPI et réalisation des simulations hydrodynamiques pour différentes récurrences de crues (PAD 5 %, 1 % et 0,3 %).
2. Bréchage de l’ouvrage ou abaissement de sa crête dans un contexte de simulations hydrodynamiques, et ce, pour différentes récurrences de crues (PAD 5 %, 1 % et 0,3 %).
3. Prolongement géomatique du niveau d’eau de la zone inondable du milieu hydrique (lac, cours d’eau, estuaire maritime, etc.) proximal au-delà de l’ouvrage (coté terre) pour différentes récurrences (PAD 5 %, 1 % et 0,3 %).

La technique n° 1 a le potentiel de s’appliquer pour tous les OPI, alors que les autres techniques sont d’application plus limitées, leur sélection requérant une analyse plus exhaustive. Par exemple, la technique n° 3 convient mieux à un milieu lacustre avec un volume d’eau important. La technique n° 2 peut être appliquée dans un milieu avec un écoulement plus dynamique et dans un contexte où les volumes en eau de la crue sont plus limités. Elle permet aussi de pallier l’absence d’information topographique du terrain naturel avant l’implantation de l’OPI requis pour la technique n° 1.

EM 8.2	Exigence minimale
Cartographie des ZI en considérant la transparence hydraulique	Le mandataire ou le délégué devra commencer par cartographier les ZI en eau libre du territoire en appliquant le principe de transparence hydraulique.

8.4.1.1 Encadrement réglementaire

La gestion des OPI et l’établissement de la cartographie des zones inondables en aval de l’ouvrage (côté terre) doivent prendre en compte l’éventualité d’une défaillance, même si celle-ci demeure peu probable.

La LQE prévoit la possibilité pour une municipalité, suivant une demande déposée auprès du ministre, d’être déclaré responsable d’un OPI par décret du gouvernement. Le ROPI encadre les conditions devant être respectées au préalable pour que le gouvernement procède à cette déclaration. Dans un tel cas, lors de la détermination ou de l’actualisation des cartographies des zones inondables, la LQE prévoit que la protection d’un OPI pourra être considérée dans la cartographie de la zone inondable située en aval de celui-ci.

Le schéma 8.1 présente les étapes et les exigences selon que l’OPI est déclaré sous la responsabilité d’une municipalité ou non. Dans le cas d’une municipalité qui n’est pas déclarée responsable d’un OPI, la protection de l’ouvrage anthropique sur la zone inondable en aval n’est pas considérée. C’est alors le principe de transparence hydraulique, décrit précédemment, qui s’applique à la cartographie des zones inondables. Pour une municipalité

qui est déclarée responsable de l'OPI par décret du gouvernement en vertu de l'article 46.0.13 de la LQE, une zone protégée à risque résiduel (ZPRR) est cartographiée.

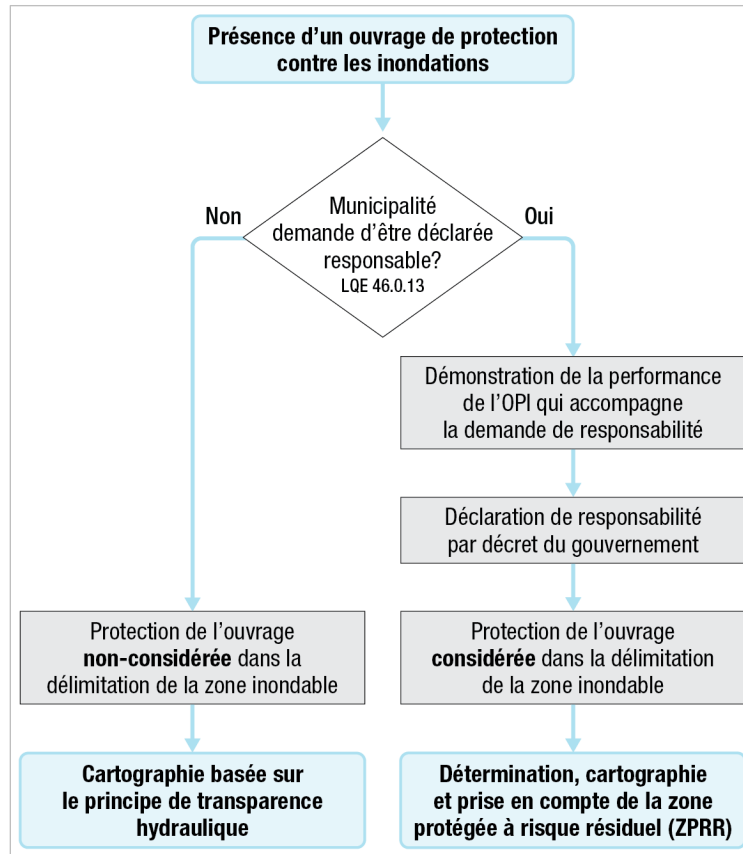


Schéma 8.1 : Démarche de catégorisation des OPI et exigences selon que la responsabilité est demandée ou non par la municipalité

8.4.1.2 Cartographie des zones inondables en aval d'un OPI

EM 8.3	Exigence minimale
<p>Établissement de la zone protégée à risque résiduel (ZPRR)</p>	<p>Pour les OPI déclarés sous la responsabilité d'une municipalité par décret du gouvernement en vertu de l'article 46.0.13 de la LQE, le mandataire ou le délégataire devra déterminer et cartographier la zone protégée à risque résiduel (ZPRR) en aval de l'OPI en suivant les balises du volet cartographie réglementaire du guide méthodologique présentées au chapitre 6.</p>

Une municipalité qui souhaiterait voir reconnaître la protection offerte par un OPI avec la cartographie d'une ZPRR devrait formuler une demande de responsabilité et accompagner sa demande d'une démonstration de la performance de l'OPI. Cette démonstration repose sur la réalisation d'une étude de performance, dont le règlement prescrit les différentes composantes (chapitre II, section III du ROPI).

9. Inondation par embâcle de glace

Les inondations par embâcle se produisent lorsque l'accumulation de glace, tels des embâcles ou des barrages de glace, bloque le cours naturel de l'eau dans les rivières ou autres cours d'eau. Ces phénomènes hivernaux, imprévisibles, créent des risques pour les zones riveraines, menaçant la sécurité publique, les infrastructures et l'environnement. Contrairement aux inondations classiques, les embâcles de glace nécessitent une approche spécifique de gestion des risques, basée sur la compréhension des facteurs hydrauliques et climatiques. Leur cartographie est essentielle pour atténuer ces risques uniques et protéger les communautés exposées.

9.1 Objectif et résultats attendus

L'objectif du présent chapitre est de présenter les résultats attendus, les exigences méthodologiques et certaines règles de bonne pratique liées à la détermination des zones d'inondation par embâcle de glace. On y explique les méthodes permettant de guider la prise de décision lors de la prise en compte de l'hydraulique hivernale, notamment la catégorisation des zones d'intensité de l'aléa. Il est important de noter que, souvent, l'aléa d'embâcle de glace se combine à l'inondation en eau libre.

Les inondations par embâcle sont causées par un amoncellement de glace dans une section de cours d'eau qui empêche la libre circulation de l'eau et qui génère un refoulement. Cela peut inclure plusieurs phénomènes, dont les suivants :

- Les embâcles causés par une débâcle;
- Les barrages de glace;
- La consolidation de couvert de glace;
- Les barrages de frasil;
- Les aufeis.

On peut étendre la notion d'embâcle à toute obstruction due à des débris ligneux (branches, troncs d'arbres) ou à des sédiments grossiers qui pourraient avoir une incidence sur le régime d'écoulement local du cours d'eau. Ces obstructions peuvent créer un refoulement (augmentation des niveaux de l'eau) vers l'amont et une onde de crue vers l'aval lors de la rupture de l'obstruction. Toutefois, les obstructions de débris ligneux ou d'amoncellement de sédiments grossiers sont des structures naturelles souvent pérennes et qui s'engraissent avec le temps, alors que les embâcles de glace ont une durée de vie infraannuelle et disparaissent au contact de températures de l'eau et de l'air plus clémentes, soit par fonte sur place ou par une débâcle vers l'aval. La débâcle des glaces peut alors être une source d'érosion mécanique importante pour les rives.

Les embâcles ne sont pas des phénomènes qui se caractérisent facilement par la statistique, car ils dépendent de plusieurs paramètres. Ils ne se produisent pas chaque année, ils peuvent se former à différents endroits et leur

ampleur peut varier d'une occurrence à l'autre. Toutes ces caractéristiques font qu'en pratique, on ne tente que rarement d'associer une notion de probabilité au dépassement au phénomène d'embâcle.

Même s'il n'est pas possible d'établir avec certitude l'endroit où un embâcle se formera sur un cours d'eau, certaines particularités morphologiques peuvent favoriser des formations récurrentes. Les sites les plus propices aux embâcles sont notamment :

- Des secteurs présentant des obstacles à l'écoulement, tels des piliers de ponts, des hauts-fonds et des îles;
- Des zones de contraintes, tels des méandres prononcés ou des rétrécissements;
- Des sections de changement de pente (la formation d'un embâcle est favorisée dans un secteur où la pente s'adoucit de façon marquée) ou de changement de profondeur;
- Des embouchures de rivières, particulièrement celles qui sont affectées par des mouvements de marées;
- Des secteurs calmes, souvent en aval de zones de rapides, où la formation de frasil est importante;
- Des zones calmes ou restreintes en largeur, en aval de tributaires dont la débâcle se produit avant celle du cours d'eau récepteur.

Plusieurs travaux universitaires récents cherchent à établir une méthodologie reproductible pour évaluer la prédisposition à la formation d'embâcles selon une combinaison qui fait intervenir le régime glaciologique et les caractéristiques morphologiques du cours d'eau. À défaut d'études approfondies qui amènent des solutions transposables peu importe la morphométrie du cours d'eau, la présente version du guide ne considérera les limites de la zone inondable par embâcle de glace qu'aux limites d'un événement historique. Ainsi, le polygone d'un événement d'embâcle de glace avéré sera le seul intrant dans la démarche cartographique lors de l'entrée en vigueur et de la mise en œuvre du cadre réglementaire visant la détermination des zones inondables et de mobilité.

Les changements climatiques amènent leur lot d'impacts sur la problématique des inondations par embâcle de glace. En raison de l'augmentation des températures moyennes, les régions autrefois moins sujettes à ces phénomènes peuvent désormais être touchées. De plus, la variabilité climatique rend difficile la prévision des conditions hivernales, rendant les embâcles plus imprévisibles. Les cycles de gel-dégel de plus en plus irréguliers peuvent également aggraver les embâcles. Enfin, les changements climatiques accélèrent la fonte des glaces, ce qui peut entraîner la rupture soudaine d'embâcles, provoquant des inondations brutales et potentiellement dévastatrices. Ainsi, la prise en compte des changements climatiques est essentielle dans la caractérisation des inondations par embâcle de glace.

Diverses analyses qualitatives et quantitatives sont possibles si l'on souhaite estimer des niveaux d'eau liés aux glaces et aux embâcles. Ces analyses peuvent nécessiter la collecte d'information de nature physique, telle que des traces d'affouillement sur les berges, des cicatrices sur les arbres, des marques laissées sur des bâtiments, etc. Elles peuvent aussi prendre en compte des témoignages de riverains ou des observations directes de l'embâcle. Dans les secteurs affectés à la fois par des inondations en eau libre et par des inondations par embâcle,

une caractérisation des deux aléas doit être réalisée afin d’obtenir une distribution mixte nécessaire à la délimitation du périmètre du secteur inondable. En ce qui concerne la collecte de données, le lecteur est invité à consulter le guide de documentation des inondations au Québec (MSP, 2022).

Pour l’instant, le mandataire ou le délégataire est amené à composer avec l’aléa embâcle de glace en accord avec le principe de précaution et le principe de cumul des aléas précédemment discuté au chapitre 2. Ainsi, il est suggéré au mandataire ou au délégataire de documenter les secteurs d’embâcles reconnus par une enquête auprès des riverains et par une consultation de la base de données sur les embâcles du ministère de la Sécurité publique. Aucune méthodologie contemporaine de cartographie des zones d’inondation par embâcle ne peut actuellement être recommandée à l’échelle du Québec. Dans une telle circonstance, le choix d’une approche probabiliste (s’appuyant sur des séries de niveaux observées ou des séries synthétiques) ou bien déterministe (délimitation d’inondation historique, simulation de scénarios critiques réalistes, etc.) incombe au professionnel qui a analysé les données observées et documentées.

Le schéma 9.1 présente le cheminement scientifique proposé comme premier jalon dans cette démarche évolutive de caractérisation et de cartographie des embâcles de glace.

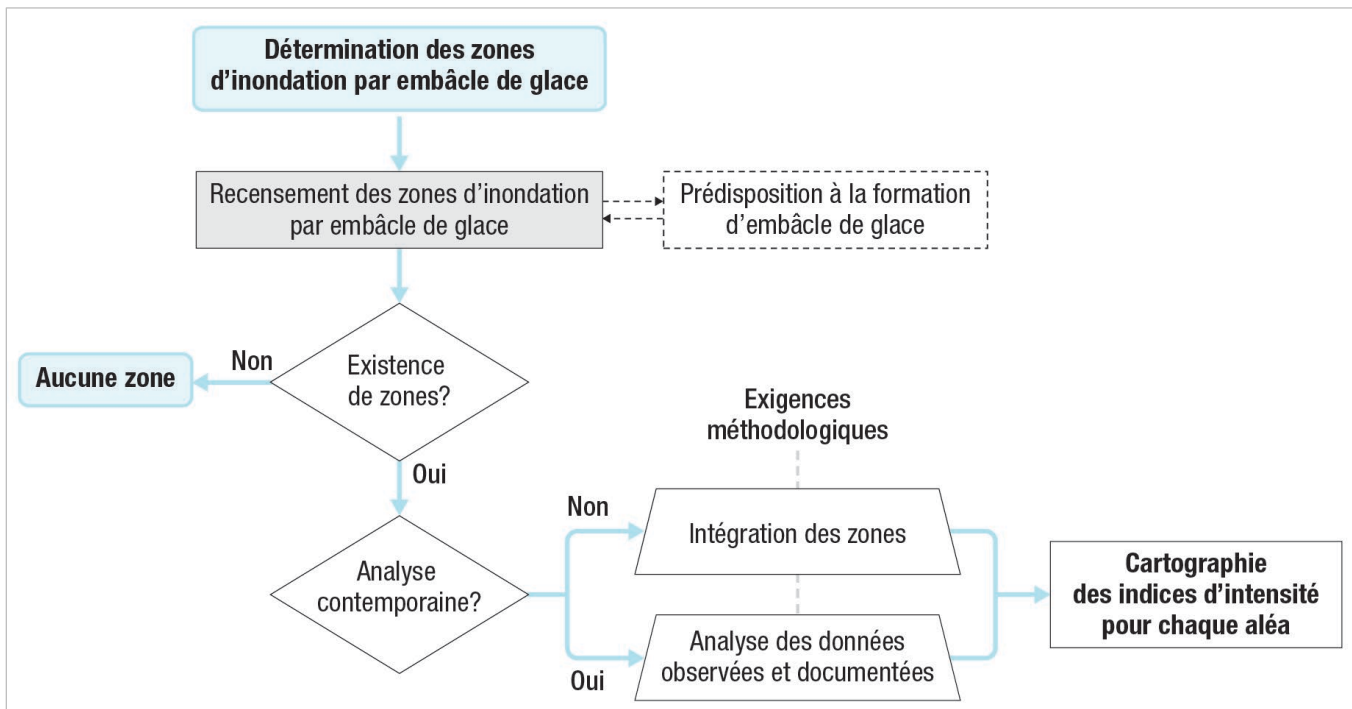


Schéma 9.1 : Schéma de réalisation pour déterminer les zones d’inondation par embâcle de glace

9.1.1 Zones d'inondation par embâcle

EM 9.1	Exigence minimale
Zone inondable par embâcle	<p>Le mandataire ou le délégué devra intégrer les zones d'embâcle déjà connues et réglementées pour les secteurs où elles existent. Cette cartographie délimitée par polygone peut provenir :</p> <ul style="list-style-type: none">• d'un schéma d'aménagement et de développement ou d'un règlement de contrôle intérimaire d'une MRC ou d'une communauté métropolitaine;• d'une carte publiée par le gouvernement du Québec ou approuvée dans le cadre d'une convention conclue entre le gouvernement du Québec et le gouvernement du Canada relativement à la cartographie et à la protection des zones inondables. <p>Une détermination contemporaine des zones d'inondation par embâcle peut aussi remplacer une zone existante lorsqu'elle répond aux exigences méthodologiques.</p>

Seuls les secteurs pour lesquels une zone d'inondation par embâcle connue et/ou réglementée existe sont visés par l'exigence (que ce soit une zone d'embâcle intégrée dans un SAD ou un RCI ou toute autre zone d'embâcle connue et délimitée par un polygone approprié). Les zones à caractère informatif qui indiquent la possibilité de formation d'embâcles sans représenter une étendue d'eau ni comporter de disposition réglementaire, n'ont pas à être considérées.

- La délimitation des zones d'inondation par embâcle peut être réutilisée pour la cartographie des aléas d'inondabilité nouvelle génération, ou remplacée par une délimitation issue d'une détermination contemporaine conforme.

9.1.1.1 Détermination contemporaine des zones d'inondation par embâcle de glace

Une détermination contemporaine des zones d'inondation par embâcle de glace peut être réalisée à la discrétion du mandataire ou délégué, notamment lorsqu'il souhaite remplacer une cartographie existante ou étendre la couverture à de nouveaux secteurs. Cette délimitation doit s'appuyer sur des données hydrauliques hivernales observées et documentées, afin d'assurer une représentation fidèle des étendues inondées par embâcle.

Les données hydrauliques hivernales incluent, sans s'y limiter :

- Des niveaux et des débits jaugés en situation d'embâcle;
- Des délaissés de crues;
- Des cicatrices glacielles;
- Des images satellites;
- Des photographies;

- Des mesures d'épaisseurs de glace;
- La localisation d'embâcles de glace historiques.

9.1.2 Prédiposition à la formation d'embâcle de glace

BP 9.1	Bonne pratique
Secteurs à prédiposition d'embâcles	Une caractérisation des secteurs à prédiposition d'embâcles pourra être réalisée à des fins informatives.

Le tableau 4.1 du chapitre 4 sur la caractérisation biophysique des bassins versants détaille une liste de caractéristiques qu'il est recommandé d'intégrer au rapport technique pour la détermination des secteurs à prédiposition d'embâcles.

9.1.3 Documentation des données hydrauliques hivernales

BP 9.2	Bonne pratique
Données hydrauliques hivernales	Pour les secteurs à effort cartographique majeur avec historique d'embâcles ou prédiposition connue aux embâcles, le mandataire ou le délégué est invité à documenter, en consultant les archives, les bases de données et tout indicateur sur le terrain, tous les éléments se rapportant à l'hydraulique hivernale.

Il est recommandé de consigner des données hydrauliques hivernales pour des événements historiques, et également de commencer à documenter systématiquement les événements futurs. Les données qui seront recueillies lors des événements futurs seront utiles pour les mises à jour ultérieures. Ces données incluent, sans s'y limiter, les éléments énumérés à la section 9.1.1.1 (Détermination contemporaine des zones d'inondation par embâcle de glace).

10. Mobilité des cours d'eau

10.1 L'approche hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones de mobilité

Le présent chapitre propose un cadre d'analyse regroupant des méthodes et des outils issus de l'hydrogéomorphologie qui permettent de caractériser la mobilité des cours d'eau. Cette méthodologie s'applique aux cours d'eau intérieurs, à l'exception de la portion fluviale du fleuve Saint-Laurent, de la rivière des Outaouais et de la rivière Saguenay qui devront faire l'objet d'approches alternatives.

Tous les termes techniques utilisés dans le présent chapitre sont définis dans le glossaire que l'on retrouve à l'annexe 1.

10.1.1 Définition de l'hydrogéomorphologie et de l'approche hydrogéomorphologique

L'hydrogéomorphologie peut être décrite comme une approche interdisciplinaire à la jonction entre l'hydrologie et la géomorphologie. Plus spécifiquement, il s'agit d'une discipline qui s'intéresse à l'étude des processus et des formes du paysage fluvial mis en place par des crues successives. Elle analyse la dynamique de la rivière à une échelle globale et s'intéresse à l'espace fluvial ainsi qu'à son évolution dans le temps. L'hydrogéomorphologie analyse donc la dynamique d'une rivière d'une façon spatiotemporelle (Buffin-Bélanger et collab., 2024; MDDELCC, 2018; Buffin-Bélanger et collab., 2015b).

L'approche hydrogéomorphologique (HGM) peut servir à la cartographie des aléas liés à l'eau courante, tels que la mobilité, l'inondabilité, la torrentialité et les embâcles de glace, car ces aléas peuvent être abordés par l'analyse des formes et des dépôts sédimentaires laissés par la dynamique fluviale à l'intérieur de la plaine alluviale. Elle utilise les fondements de la géomorphologie fluviale, car elle s'ancre dans l'étude conjointe et complémentaire des formes et des processus qui organisent les géosystèmes fluviaux.

10.1.2 Définition de l'aléa mobilité

L'aléa mobilité des cours d'eau est défini comme étant un phénomène par lequel le lit du cours d'eau peut réaliser un déplacement tridimensionnel (horizontale, verticale et longitudinal) résultant de différents processus physiques, dont l'érosion et l'accumulation.

Les mouvements horizontaux se réfèrent aux déplacements du lit d'un côté à l'autre de la vallée, tels que la migration latérale, l'élargissement, l'avulsion (figure 10.1 à figure 10.3), et impliquent l'érosion de la plaine alluviale ou d'une terrasse. Les mouvements verticaux font référence aux variations en altitude du lit, comme l'incision et l'aggradation (figure 10.4) et se produisent lorsqu'il y a un déséquilibre entre l'apport en sédiments et la capacité de transport. Les mouvements longitudinaux, pour leur part, se rapportent aux déplacements du lit dans la direction

de son cours, soit en amont ou en aval, tels la translation des méandres, le transport sédimentaire, etc. (Hooke, 1977).

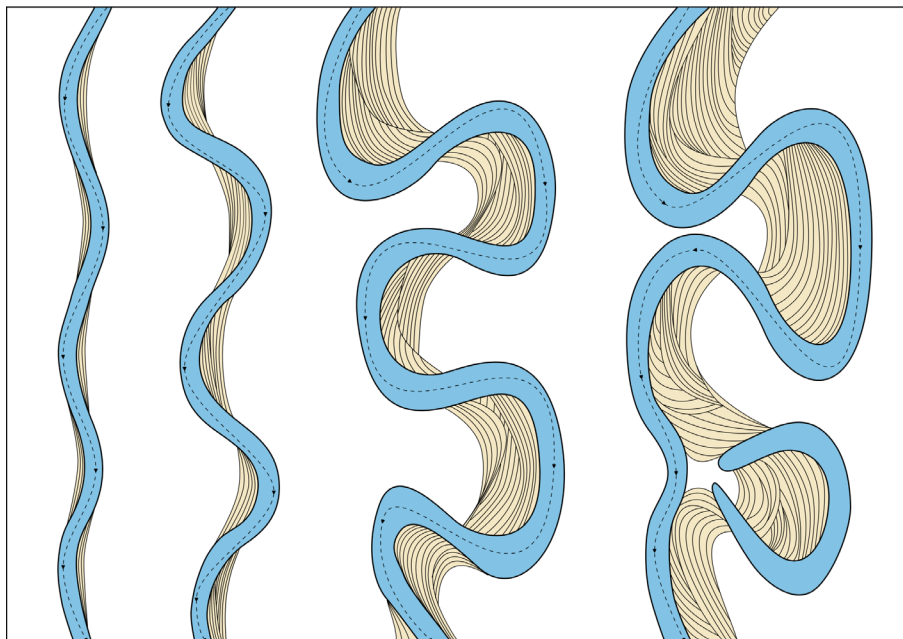


Figure 10.1. Exemple d'évolution de méandres par migration latérale et recouplement (adaptée de Siddique, 2014)

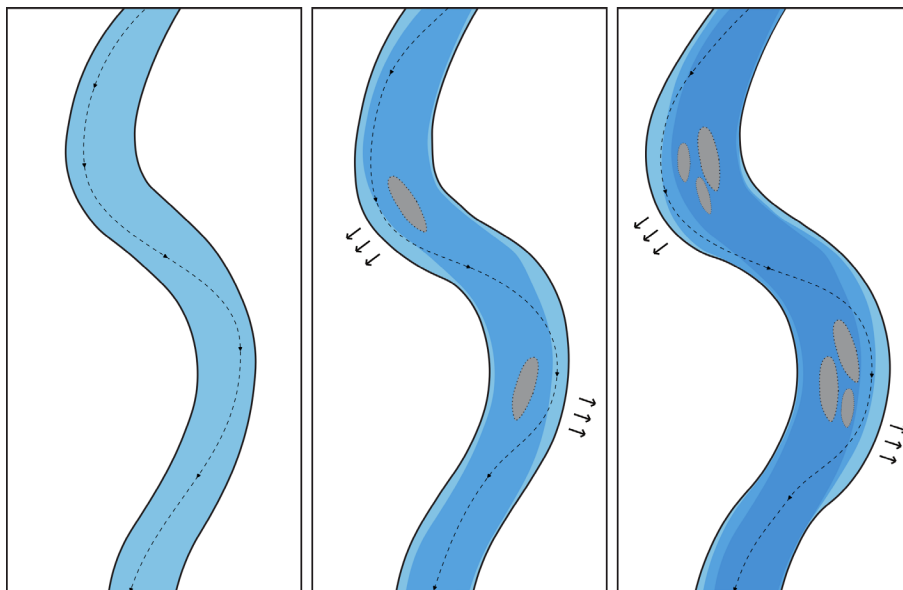


Figure 10.2. Exemple de migration latérale et d'élargissement

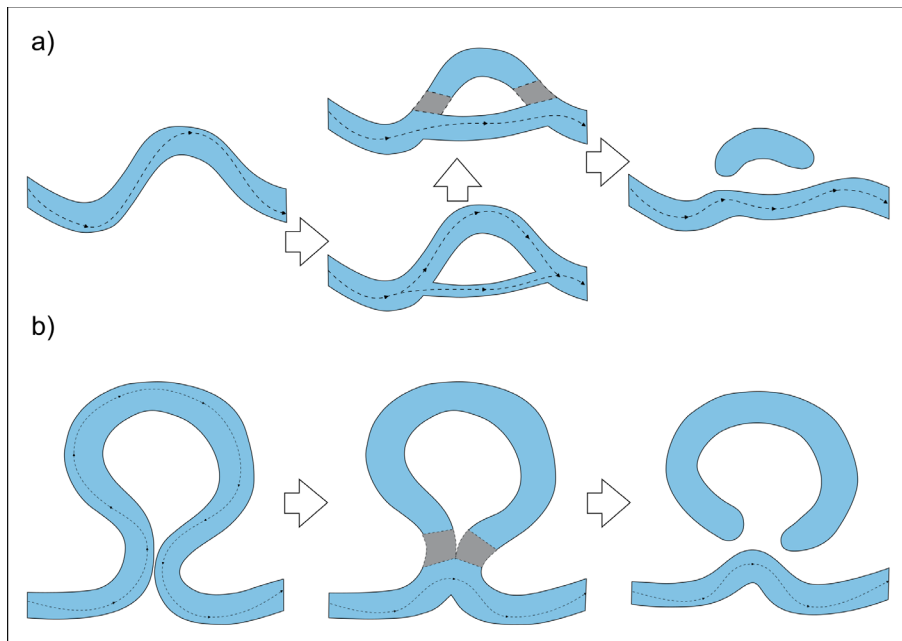


Figure 10.3. Exemples de recouplement de méandre, a) par érosion régressive/fluviale (chute cut-off) et b) par migration latérale (neck cut-off)

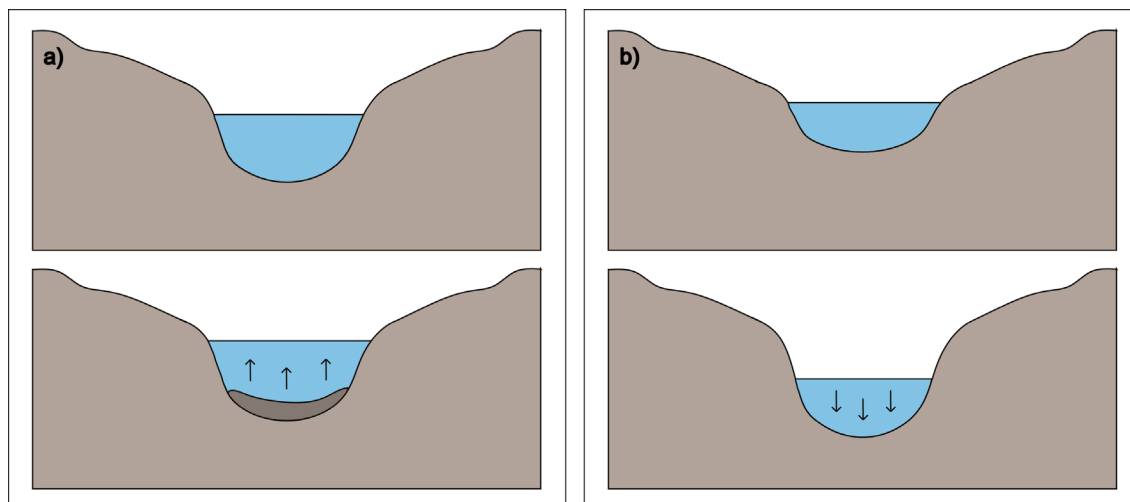


Figure 10.4. Exemples de modifications verticales du lit d'une rivière par a) aggradation et b) incision

10.2 Principes généraux, résultats attendus et exigences méthodologiques de l'approche HGM

Lors de la réalisation de la cartographie de l'aléa mobilité à l'aide de l'approche HGM, certaines analyses sont considérées comme des « exigences minimales » (désignées par EM dans les tableaux et figures) et devront absolument être réalisées. En contrepartie, certaines analyses ne sont pas obligatoires et sont plutôt suggérées

comme « éléments de bonne pratique » (désignées par BP dans les tableaux et figures), mais pourraient répondre à certaines problématiques plus spécifiques.

Les résultats attendus de la cartographie de l'aléa mobilité à l'aide de l'approche HGM visent à répondre aux exigences méthodologiques minimales (EM), qui seront détaillées dans les sections suivantes.

10.2.1 Étapes de réalisation de l'approche HGM pour la détermination des zones de mobilité

EM 10.1	Exigence minimale
Schéma de réalisation de l'approche HGM	Le mandataire ou le délégataire devra, dans son processus de cheminement scientifique, respecter le schéma de réalisation de l'approche HGM dans la démarche de cartographie de l'aléa « mobilité ».

Le cadre d'analyse que propose le présent guide comporte deux grandes étapes importantes pour la caractérisation et la compréhension de la dynamique fluviale : 1) la cartographie hydrogéomorphologique; 2) la détermination des zones de mobilité (schéma 10.1).

L'étape de la cartographie hydrogéomorphologique inclut la délimitation des unités de paysage (cônes alluviaux et deltas), la détermination du style fluvial et la validation terrain. Ces dernières permettent de segmenter le cours d'eau en tronçons homogènes, qui seront à leur tour divisés en deux catégories, soit stables ou mobiles. Les tronçons catégorisés mobiles serviront de base à la seconde étape de détermination des zones de mobilité. Sur ces tronçons, les zones de mobilité à court et long terme seront caractérisées. Dans le cas des tronçons catégorisés stables, les zones de mobilité ne sont pas déterminées.

La complexité d'analyse et les efforts cartographiques et de terrain augmentent graduellement. Chacune des étapes comporte une appréciation qualitative et une quantification plus détaillée, qui apportent une connaissance supplémentaire sur le fonctionnement des cours d'eau.

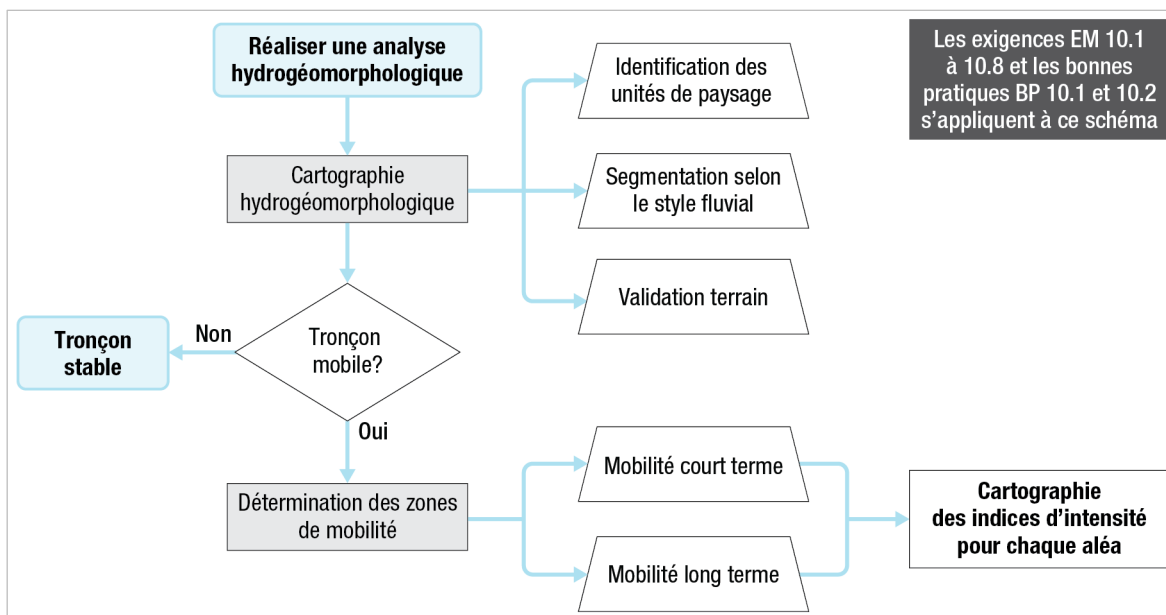


Schéma 10.1 : Schéma de réalisation de l'approche HGM pour la caractérisation et la cartographie de l'aléa mobilité

10.2.1.1 La cartographie hydrogéomorphologique

Lors de la cartographie hydrogéomorphologique, il est exigé d'identifier minimalement les cônes alluviaux et les deltas, et de segmenter le cours d'eau en fonction du style fluvial. Le travail d'interprétation et les analyses hydrogéomorphologiques réalisés préalablement sont par la suite validés sur le terrain.

Identification des unités de paysage

EM 10.2	Exigence minimale
Identification des unités de paysage	Le mandataire ou le délégataire devra cartographier les unités de paysage associées aux cônes alluviaux et aux deltas.

Tous les cônes alluviaux et les deltas présents dans la vallée ainsi que sur les terrasses perchées doivent être cartographiés. Il est obligatoire d'identifier au minimum les cônes alluviaux et les deltas situés dans une zone de 1 km de part et d'autre des tronçons stables et mobiles.

Les cônes alluviaux

Les cônes alluviaux sont des dépôts en forme d'éventail constitués de sédiments hétérométriques transportés par des petits cours d'eau et déposés au pied du versant d'une vallée principale (figure 10.5). En raison des fortes pentes et des faibles superficies de drainage, la réponse hydrologique de ce type de cours d'eau est prompt et intense. Les cônes alluviaux doivent être identifiés lors de la cartographie HGM puisque les processus torrentiels

qui en sont responsables sont associés à une mobilisation importante de sédiments et de bois en rivière. De plus, les épisodes de crues torrentielles sont de plus en plus fréquents et sont susceptibles de s'accroître encore davantage dans le futur en raison des changements climatiques (Dawdy et collab., 1989; MDDELCC, 2015; Buffin-Bélanger et collab., 2017; Demers et collab., 2018).

La formation des cônes alluviaux est liée à une rupture de pente lorsqu'un cours d'eau émerge d'un relief escarpé en amont et se déverse dans une plaine en aval. Les sédiments charriés dans la section à forte pente se déposent et s'accumulent dans le secteur plat en raison de la perte d'énergie engendrée par la diminution de la pente. Lors d'événements torrentiels, les quantités importantes de sédiments transportés par ces cours d'eau en crue peuvent provoquer des changements subits et imprévisibles de la forme du cône et du tracé des chenaux d'écoulement sur ce dernier (processus d'inondation, d'avulsion et d'aggradation). L'intensité des processus dépend des caractéristiques du bassin versant (occupation du territoire, connectivité sédimentaire) et du cône alluvial lui-même (alluvions, végétation, dynamique du cours d'eau récepteur) (Trudel et collab., 2021).

La détermination des secteurs à forte probabilité de torrencialité sur les cours d'eau, tels que les cônes alluviaux, permet donc de rendre compte de la présence d'enjeux liés à la torrencialité, la mobilité et l'inondabilité (MDDELCC, 2015; MDDELCC, 2018). La cartographie des cônes alluviaux est essentielle, car il s'agit de milieux hautement imprévisibles qui sont sensibles et réagissent très rapidement (crue éclair ou soudaine) lors de forts événements climatiques ou lors de la fonte des neiges.

Dans la méthodologie proposée par Biron et ses collaborateurs (2014), les cônes sont intégrés à l'espace d'inondabilité $F_{\text{élevé}}$. Étant donné que les aspects d'inondabilité traités dans le présent guide n'incluent pas les cônes alluviaux, il est pertinent de les inclure dans la cartographie de l'aléa mobilité.

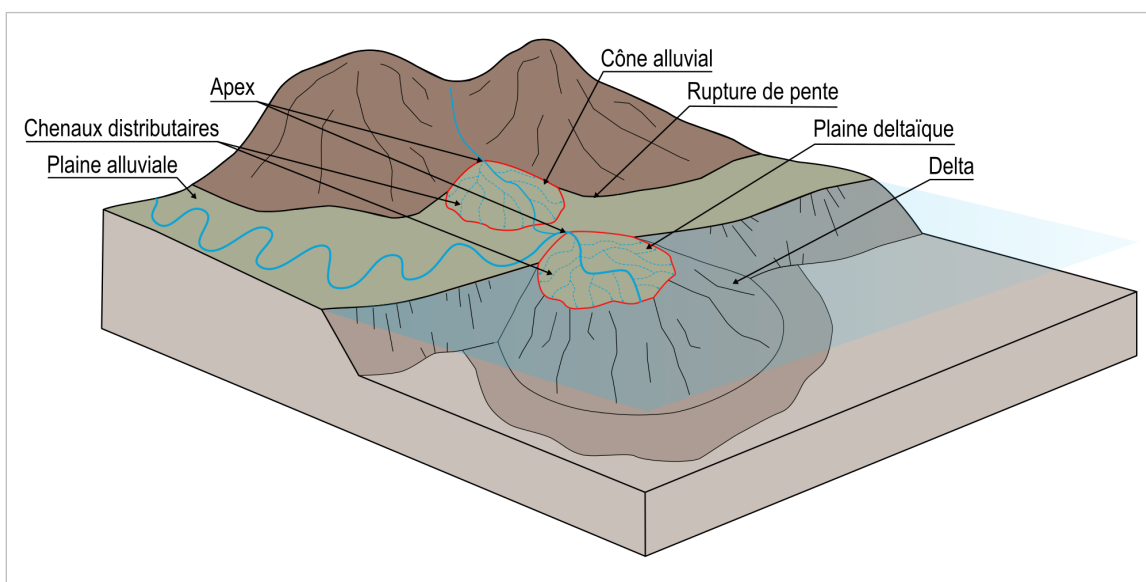


Figure 10.5. Les cônes alluviaux et les deltas sont des formes d'accumulation de sédiments en forme d'éventail déposés au pied d'un versant ou dans un plan d'eau récepteur. Le tracé rouge correspond à la morphologie des cônes alluviaux et deltas qui seront intégrés à la cartographie.

Les deltas

Le delta est une accumulation de sédiments (alluvions), généralement en forme d'éventail, transportés par un cours d'eau à son embouchure (Jobin et collab., 2021) (figure 10.5). La formation d'un delta est causée par l'accumulation de sédiments d'un tributaire due à la diminution de la vitesse de l'eau à son entrée dans le plan d'eau récepteur (rivière, lac, mer, etc.). Lors de crues ou d'événements torrentiels, le delta est alimenté en matériaux grossiers (sables, galets et blocs) et prograde dans le plan d'eau récepteur, qui redistribuera les matériaux par la suite, par les forces des vagues et des marées (Paskoff, 2010).

À l'instar des cônes alluviaux, certains types de deltas sont sujets à plusieurs processus, dont l'aggradation, l'avulsion, la torrentialité et l'inondabilité. Dans cette optique, deux types de deltas, soit les deltas en éventail (*fan delta*) et les deltas en tresses (*braid deltas*), sont propices à la mobilité et visés par la cartographie (McPherson et collab., 1987). Cette dernière n'intégrera que la partie subaérienne du delta, correspondant à la plaine deltaïque, jusqu'à la limite plein bord (ou limite du littoral). Les deltas cartographiés seront intégrés, au même titre que les cônes alluviaux, dans la zone de mobilité court terme.

10.2.1.2 Segmentation du cours d'eau selon le style fluvial

EM 10.3	Exigence minimale
Styles fluviaux	Le mandataire ou le délégataire devra déterminer les styles fluviaux pour chaque tronçon homogène.

Déterminer le style fluvial d'un cours d'eau permet d'inférer les processus géomorphologiques qui contrôlent sa morphologie et de comprendre sa réponse lors d'inondations. La détermination du style fluvial des cours d'eau se fait à partir des caractéristiques dominantes du chenal et des formes présentes sur un tronçon homogène (figure 10.6). Dans cette perspective, on entend par tronçon homogène une portion de rivière caractérisée par un style et une morphologie relativement uniforme résultant de conditions et de caractéristiques similaires (Fryirs et collab., 2007).

La segmentation s'effectue sur le filamenteux du réseau hydrographique. Il est recommandé d'utiliser celui disponible dans la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ). Aussi, une segmentation selon les unités écologiques aquatiques (UEA), qui inclut le style fluvial, est offerte sur plusieurs tronçons du Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ). Afin de faciliter le travail de segmentation, il est recommandé de vérifier préalablement la disponibilité de ces données sur le site de [Données Québec](#).

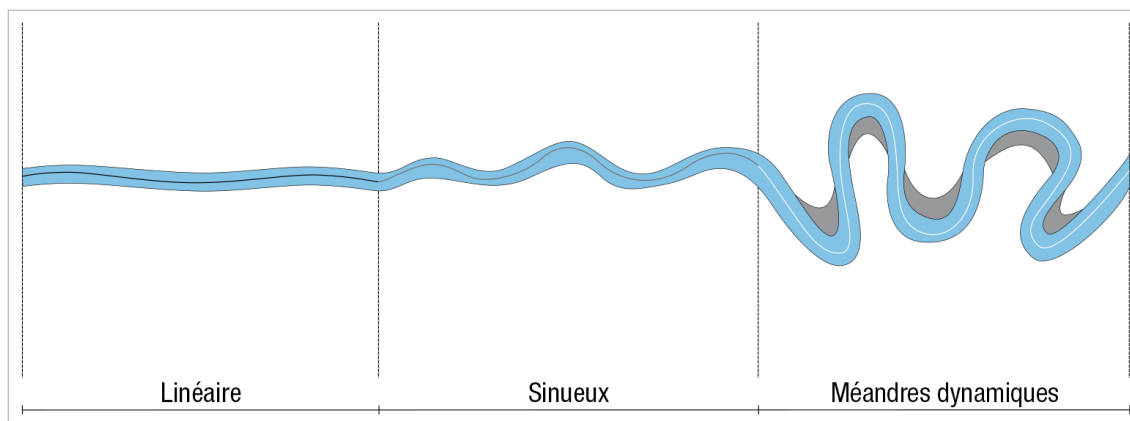


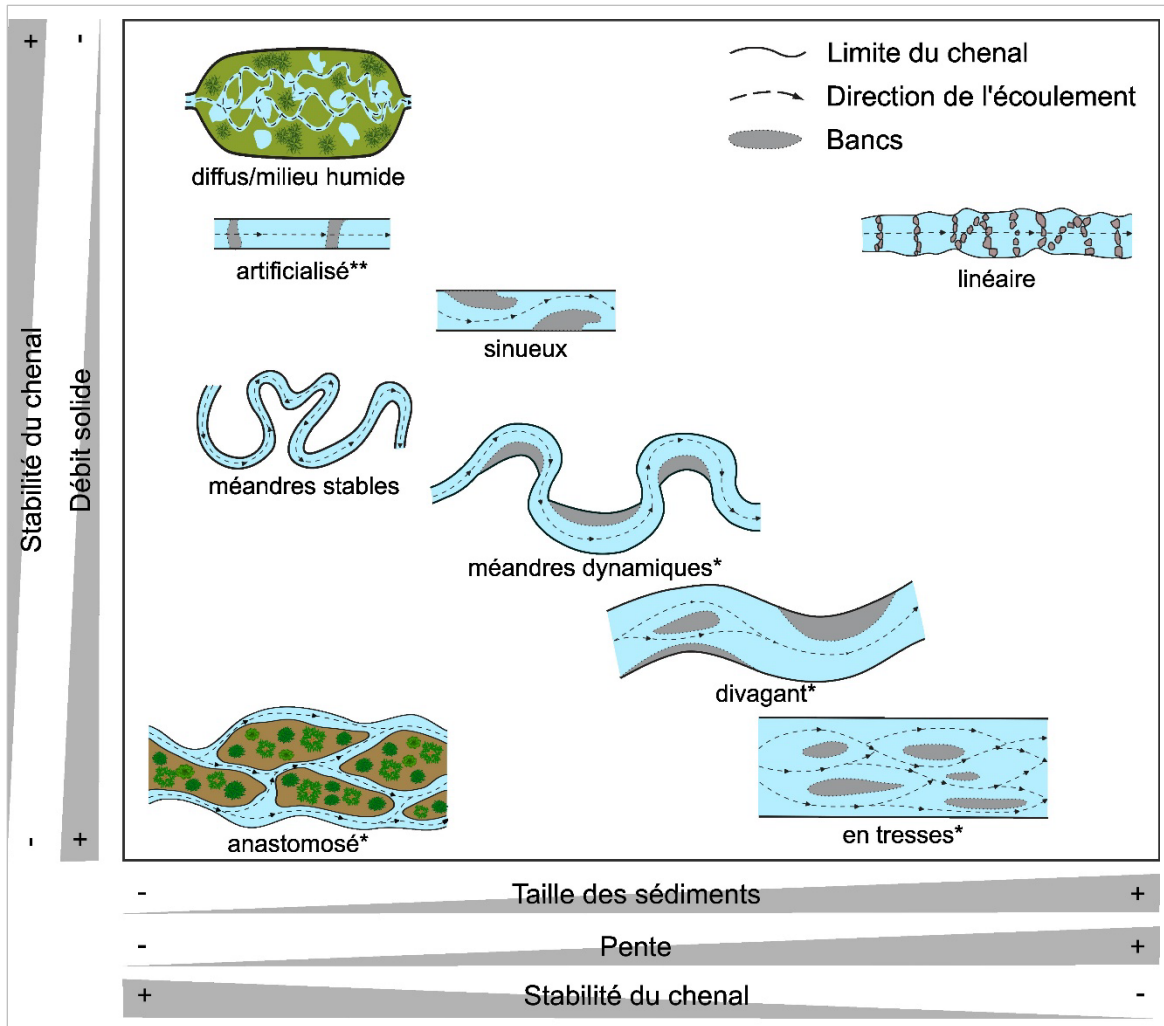
Figure 10.6. Exemple simplifié d'une segmentation d'un cours d'eau selon le style fluvial. La segmentation du cours d'eau s'effectue sur le réseau hydrographique linéaire du GRHQ ou du CRHQ.

Les styles fluviaux sont le résultat des diverses caractéristiques d'une rivière (pente, puissance spécifique, confinement, sinuosité, granulométrie, etc.). Dans le cadre du présent guide, l'étape de la segmentation consiste en une appréciation visuelle de l'apparence du cours d'eau afin d'évaluer de façon qualitative les processus dominants dans l'évolution du cours d'eau (transport, charge sédimentaire en transit, etc.) qui contrôlent en partie l'évolution morphologique du cours d'eau.

De manière générale, le style fluvial change de l'amont vers l'aval en fonction des apports sédimentaires, des variations dans la pente et des changements de matériaux dans lesquels le cours d'eau évolue. Les styles fluviaux ne sont pas des catégories fermées puisqu'il y a souvent une transition d'un style à un autre. Il s'agit d'un continuum résultant des différentes variables de contrôle, qui sont à leur tour dynamiques dans le temps et dans l'espace.

Les styles fluviaux proposés pour réaliser la segmentation sont les suivants : linéaire, sinueux, méandres stables, méandres dynamiques, divagant, en tresses, anastomosé, artificialisé et diffus/milieu humide. Une description détaillée de ces derniers se trouve dans la « clé d'identification des styles fluviaux » fournie à l'annexe 5.

Les styles linéaires, sinueux, méandres stables et diffus sont considérés comme stables et les styles méandres dynamiques, divagants, en tresses et anastomosés sont considérés comme étant mobiles (figure 10.7). On estime qu'un tronçon stable aura des mouvements lents, de faible ampleur et fortement prédictibles ou qu'il restera au même endroit pendant les prochaines décennies (p. ex., dans le cas d'un cours d'eau encaissé dans le roc). Il est à noter que les rivières en tresses sont peu fréquentes au Québec. Elles se développent majoritairement dans les secteurs montagneux, là où l'apport en sédiments est important. Concernant le style artificialisé, le potentiel de mobilité devra être déterminé au cas par cas. En cas de doute entre un style fluvial mobile et un style fluvial stable, il est recommandé, selon le principe de précaution, de catégoriser le segment comme étant mobile.



*Style fluvial avec potentiel de mobilité élevé; **Potentiel de mobilité à déterminer

Figure 10.7. Typologie des styles fluviaux (adaptée de Schumm, 1985, et de Pouliot et collab., 2024.)

La détermination des styles fluviaux peut parfois être difficile à réaliser à l'œil. Dans de tels cas, les styles fluviaux peuvent être classés de façon plus objective à l'aide de paramètres quantitatifs, tels que la puissance spécifique, la pente, etc. Par exemple, à partir de la pente du chenal, du confinement et du débit, il est possible de faire une distinction entre les styles à méandres, divagants ou en tresses. Cela permet de rendre compte du caractère attendu d'un cours d'eau selon le cadre physique dans lequel il se trouve, indépendamment des modifications apportées par les interventions anthropiques. Plusieurs autres études (Rosgen, 1994; Van den Berg, 1995; Alabyan et Chalov, 1998; Eaton et collab., 2010) ont également proposé des fonctions discriminantes permettant de caractériser de façon plus objective et spécifique les différents styles fluviaux (Buffin-Bélanger et collab., 2015b).

10.2.2 La validation terrain

EM 10.4	Exigence minimale
Validation de la mobilité sur le terrain	Le mandataire ou le délégué devra effectuer des observations et des mesures sur le terrain afin de valider le travail d'interprétation ainsi que les analyses HGM effectuées par géo-interprétation, telles la présence ou l'absence de mobilité.

Les observations et les mesures réalisées sur le terrain permettent de valider le travail d'interprétation et les analyses HGM effectués par géo-interprétation. Les relevés terrain offrent également la possibilité de collecter des informations supplémentaires permettant de préciser et d'enrichir les analyses. La validation terrain est essentielle à l'approche HGM et est une exigence minimale dans le cadre de la caractérisation de l'aléa mobilité.

Une visite terrain devrait être faite après la segmentation du cours d'eau en tronçons homogènes à l'aide du style fluvial. Le travail d'interprétation réalisé lors de cette étape permet de déterminer les secteurs d'intérêt et de cibler les tronçons nécessitant une validation. La validation terrain devrait être réalisée sur les tronçons stables et sur les extrémités des tronçons mobiles. Elle a pour objectifs de s'assurer qu'aucune forme de mobilité n'a été écartée (horizontale et verticale) ainsi que de confirmer l'exactitude des limites définies du tronçon.

Grille de validation terrain

Lors de la validation terrain, plusieurs éléments peuvent être caractérisés. Il est recommandé de remplir la grille de terrain élaborée par Maltais et Buffin-Bélanger (2023) et fournie à l'annexe 6. Des photos géoréférencées doivent également accompagner la grille pour documenter les différentes observations.

Les éléments à caractériser à l'échelle du tronçon et du site incluent, sans s'y restreindre :

1. La dynamique du cours d'eau
2. Le chenal principal;
3. Les bancs d'accumulation;
4. La plaine alluviale;
5. La section transversale;
6. Les berges;
7. La présence d'éléments anthropiques;
8. La présence de cônes alluviaux ou de deltas.

Identification des tronçons sujets à la mobilité verticale (incision et aggradation)

L'incision du lit du cours d'eau survient lorsqu'il y a un déséquilibre entre le débit liquide et le débit solide d'un cours d'eau, par exemple lorsque l'apport en sédiments est inférieur aux quantités qui sont évacuées, ce qui peut entraîner l'érosion du lit. Ce bilan négatif peut survenir lorsque les sources de sédiments en amont sont moins

actives (p. ex., diminution du débit solide) ou encore lorsqu'il y a une augmentation de la puissance spécifique (p. ex., augmentation du débit liquide ou de la pente) dans le tronçon provoquant une plus grande mobilisation de sédiments.

Les tronçons en incision sont caractérisés par un abaissement du niveau du lit ainsi qu'une déstabilisation des berges et des versants causés par la mobilisation importante de sédiments sur le lit. Parfois, le chenal formera une nouvelle plaine alluviale à l'intérieur même de l'ancien chenal érodé (Rapp et Abbe, 2003; Demers et collab., 2018). La mobilité verticale peut difficilement être déterminée par photo-interprétation. La validation terrain est primordiale pour déterminer des secteurs en incision. Les principaux indicateurs d'une phase d'incision récente pouvant être observés sur le terrain sont les suivants (Demers et collab., 2018) :

- Bacs d'accumulation perchés;
- Chenaux abandonnés;
- Anciens glissements de terrain;
- Affouillement des infrastructures;
- Racines d'arbres exposées;
- Chenal étroit et profond;
- Deux berges en érosion par des décrochements;
- Lit compact et présence de pavage;
- Matériaux du lit surexposés dans les berges en érosion.

L'aggradation du lit du cours d'eau survient aussi lors d'un déséquilibre entre le débit liquide et le débit solide d'un cours d'eau, par exemple lorsque l'apport en sédiments est supérieur aux quantités qui sont évacuées, ce qui entraîne un dépôt. Ce bilan positif peut survenir lorsque les sources de sédiments en amont sont plus actives (p. ex., augmentation du débit solide) ou encore lorsqu'il y a une diminution de la puissance spécifique (p. ex., diminution du débit liquide ou de la pente) dans le tronçon provoquant une plus grande accumulation de sédiments.

Les secteurs en aggradation sont caractérisés par la présence d'importants bacs d'accumulation, non compactés et non végétalisés dans un cours d'eau large. Des chenaux secondaires peuvent parfois être présents. Lorsque l'aggradation est rapide, les berges du chenal sont basses, des dépôts épais de débordement recouvrent le sol et des marques laissées par des chenaux de débordement sont présentes dans la plaine inondable. Dans certains cas, mais pas obligatoirement, les zones d'aggradation peuvent être localisées en amont d'obstacles réduisant le transit sédimentaire vers l'aval. Ces obstacles peuvent être, par exemple, du bois en rivière, un barrage, le confinement de la vallée, la perte de capacité de transport ou un replat contrôlé par la lithologie (Fryirs et collab., 2007; Demers et collab., 2018). Les principaux indicateurs d'une zone d'aggradation pouvant être observés sur le terrain sont les suivants (Demers et collab., 2018) :

- Infrastructures ensevelies;
- Bacs de graviers larges, non compacts et sans végétation;

- Berges en érosion dans un secteur peu profond (seuil);
- Espaces réduits sous les ponts;
- Épaisse couche de sédiments fins par-dessus la couche de matériaux du lit;
- Sol enfoui sous des dépôts de débordement;
- Dragages fréquents.

10.2.2.1 Détermination des zones de mobilité

Échelle temporelle

La détermination des zones de mobilité correspond à l'étape où une évaluation est réalisée sur le cours d'eau afin de comprendre comment ce dernier pourrait évoluer dans le temps. Sur une échelle de temps dite géomorphologique, les processus responsables de la mobilité des cours d'eau peuvent s'échelonner sur plusieurs dizaines, voire centaines d'années, selon le contexte. Dans une optique de planification et de gestion du territoire, objectif du présent guide, l'échelle d'analyse et de détermination de la mobilité à court et à long terme fait plutôt référence à celle de l'aménagement du territoire. L'aménagement du territoire se concentre généralement sur des échelles de temps plus courtes, en général quelques décennies, axées sur la prise de décisions. Il s'agit de planifier et de gérer l'utilisation des terres, des ressources et des infrastructures pour répondre aux besoins actuels et futurs de la société.

À cet égard, la mobilité court terme correspond aux zones prédisposées à l'érosion ou aux avulsions dans un horizon de 50 ans (Biron et collab., 2014), alors que la mobilité long terme correspond à la zone de mobilité maximale dans laquelle le cours d'eau pourra migrer sur un horizon de 100 ans et plus (figure 10.8).

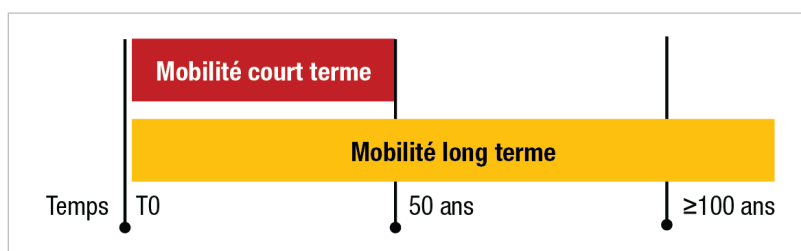


Figure 10.8. Échelle temporelle couverte par les zones de mobilité

Mobilité court terme du chenal

EM 10.5	Exigence minimale
Mobilité court terme	Le mandataire ou le délégataire devra déterminer les zones de mobilité court terme.

Cette étape d'analyse s'effectue seulement sur les tronçons homogènes déterminés préalablement comme étant des tronçons mobiles. Il est exigé de déterminer minimalement la zone projetée de migration latérale sur 50 ans, calculée à l'aide des taux historiques. Cette zone correspond essentiellement à l'espace M_{50} , tel que présenté par Biron et ses collaborateurs (2014). La zone projetée de migration latérale sur 50 ans se distingue légèrement de l'espace M_{50} quant à la façon dont les ouvrages de stabilisation et les cônes alluviaux sont intégrés ainsi qu'à l'ajout d'une marge de sécurité annualisée qui tient compte de l'incertitude liée au géoréférencement.

Un schéma de réalisation présenté au schéma 10.2 indique la procédure à suivre pour la détermination de la zone de mobilité court terme.

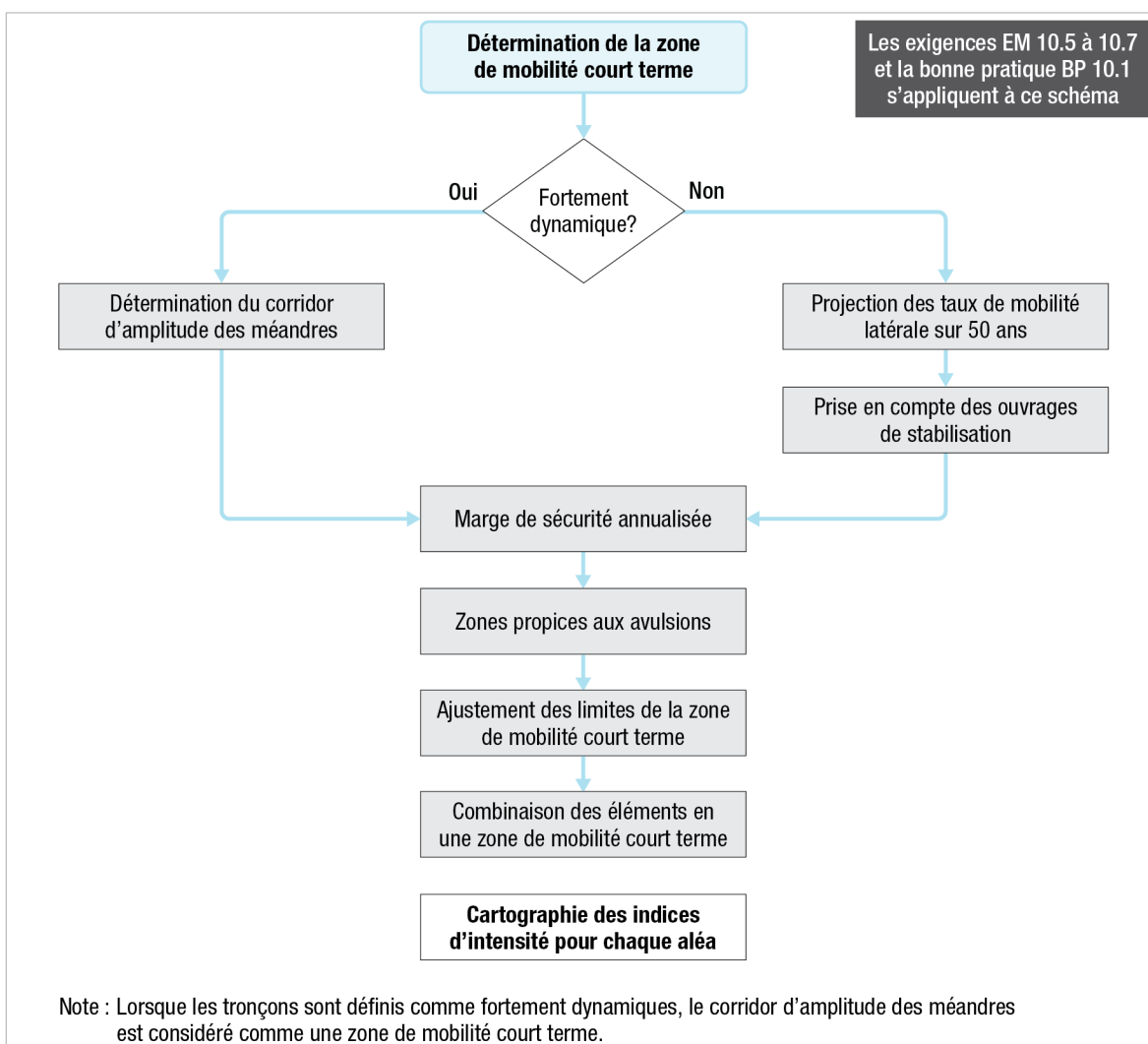


Schéma 10.2 : Schéma décisionnel menant à la réalisation de la zone de mobilité court terme

Prise en compte des tronçons à fort dynamisme

Dans certains cas, le dynamisme du cours d'eau est trop important et les taux de migration latérale historiques projetés ne sont pas représentatifs de la mobilité. C'est notamment le cas pour les tronçons fortement dynamiques

et les secteurs qui ont subi une avulsion à l'intérieur de la période couverte par les images aériennes servant au calcul. Pour être considéré comme fortement dynamique, le tronçon doit avoir connu des changements rapides de la position du chenal dans la plaine. Le dynamisme peut être déterminé minimalement au jugé à l'aide de photographies aériennes ou par la méthode proposée par Biron et ses collaborateurs (2014). Lorsqu'il est déterminé au jugé, trois séries de photos aériennes historiques au minimum doivent être utilisées pour repérer les changements de la position du chenal dans la plaine. Lorsque les tronçons sont définis comme fortement dynamiques, le corridor d'amplitude des méandres est considéré comme une zone de mobilité court terme (voir la figure 10.9; les détails méthodologiques du corridor d'amplitude des méandres sont décrits à la section « Détermination du corridor d'amplitude des méandres ») (Biron et collab., 2014).

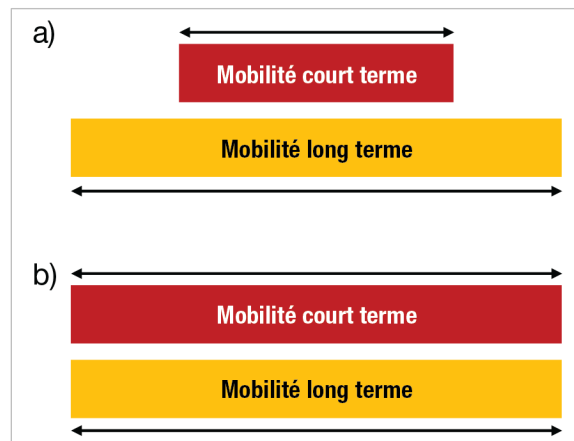


Figure 10.9. Empiètement des zones de mobilité court et long terme dans le cas d'un cours d'eau a) non fortement dynamique et b) dont le dynamisme est fort

Calcul des taux de migration latérale historiques

La détermination des taux de migration latérale historiques s'effectue par photo-interprétation d'images aériennes multitudes. Ces images doivent couvrir l'ensemble des tronçons jugés mobiles et permettre de délimiter clairement les tracés fluviaux.

Pour une projection sur 50 ans, la période minimale suggérée entre la photo la plus ancienne et la photo la plus récente pour l'évaluation du taux de migration latérale est d'une cinquantaine d'années. La période retenue peut également être déterminée en fonction des changements survenus à l'intérieur du bassin versant. Selon les caractéristiques particulières du cours d'eau et du bassin versant étudiés, des périodes d'analyse différentes (p. ex., 30 ans) peuvent s'avérer plus pertinentes. Des travaux de recherche sont en cours pour explorer cette variabilité et définir les critères de sélection de la période d'analyse optimale.

La comparaison systématique des positions des berges entre différentes années permet de quantifier des taux de migration moyens pour un tronçon homogène ou des taux de migration spécifiques pour une section transversale en particulier. Cette méthode fait actuellement le consensus chez les scientifiques pour la détermination de la

mobilité court terme (Malavoi et collab., 1998; Choné, 2013; Biron et collab., 2013; Biron et collab., 2014; Buffin-Bélanger et collab., 2015b; MDDELCC, 2015; Demers et collab., 2017; Demers et collab., 2018).

Une attention particulière doit être portée à la précision du géoréférencement le long du cours d'eau (voir les sections « Exigences minimales concernant le niveau de précision du géoréférencement des images » et 10.4.1.2 pour les précisions techniques). Toute imprécision de référencement entraînera directement une erreur dans le calcul des taux de migration puisque ceux-ci sont estimés à partir de la distance entre une même berge à deux dates distinctes.

Les taux de migration latérale historiques du cours d'eau doivent être calculés selon des transects espacés à intervalles réguliers soit :

- À partir de la ligne centrale interpolée des tracés fluviaux, au niveau plein bord;
- Pour chacune des berges individuellement, au niveau plein bord.

Les chenaux anciens et récents doivent être numérisés à partir des images aériennes multitudes (figure 10.12 – a). L'espace occupé par la rivière pour chacune de ces années est établi en utilisant la limite correspondant au niveau plein bord. Les sections « Exigences minimales concernant le niveau de précision du géoréférencement des images » et « Les sources d'incertitudes liées à l'approche HGM » apportent des précisions sur la résolution spatiale et temporelle ainsi que sur le géoréférencement des images historiques.

Le niveau plein bord correspond à la limite au-delà de laquelle l'eau déborde dans la plaine alluviale. Il correspond au niveau du débit morphogène qui détermine la taille et la géométrie du cours d'eau sur le long terme. Le débit plein bord est à l'origine de la formation, de la dynamique des faciès d'écoulement et des remaniements morphologiques du cours d'eau (Demers et collab., 2014). En milieu alluvial, la récurrence de ce débit se situe le plus souvent entre un et deux ans (Leopold et collab., 1964). Il est important de cartographier le chenal correspondant au niveau plein bord afin de mieux comprendre les relations entre la taille du cours d'eau, son style fluvial et sa morphologie.

Le niveau plein bord peut être repéré sur la photographie par la limite de la végétation arborescente ou arbustive ainsi que par la rupture de pente entre le haut de berge et la plaine de débordement du cours d'eau. Cette numérisation réalisée sur des photographies aériennes ou de l'imagerie aéroportée (p. ex., LiDAR) doit être faite en suivant certaines règles générales :

- 1) Les bancs alluviaux dénudés de végétation sont inclus;
- 2) Les couronnes des arbres sont exclues du tracé du cours d'eau;
- 3) Les ponts et autres traverses de cours d'eau sont ignorés.

Les taux de mobilité historiques sont calculés à l'aide de la ligne centrale (figure 10.12 – b) ou à partir de chacune des berges individuellement. Le calcul s'effectue de la même manière dans les deux cas. L'utilisation de la ligne

centrale, pouvant être plus rapide dans certains cas, correspondra à une moyenne des deux berges. Afin d'obtenir des taux représentatifs et adaptés aux besoins, il est recommandé de faire des transects tous les 10 m environ. Plusieurs logiciels et outils existent pour faire le calcul (p. ex., DSAS, RVR Meander, SCS Toolbox et Planform Statistic Toolbox). Une liste de boîtes à outils spécifiques aux systèmes d'information géographique (SIG) pour la caractérisation des cours d'eau, incluant une description et le lien vers l'outil, est fournie par Rusnák et ses collaborateurs (2025).

Une fois les taux historiques calculés, les taux annuels de migration latérale sont obtenus en divisant la valeur de déplacement par le nombre d'années entre la série de photos la plus ancienne et la série la plus récente (figure 10.12 – c).

Prise en compte des ouvrages de stabilisation

EM 10.6	Exigence minimale
Ouvrages de stabilisation des berges	Le mandataire ou le délégataire, lorsqu'un ouvrage de stabilisation est repéré, devra le cartographier et l'intégrer à la cartographie de la mobilité court terme.

Il est exigé de cartographier les ouvrages de stabilisation repérés par photo-interprétation ou sur le terrain pour les tronçons catégorisés mobiles. Une zone sera ajoutée derrière ces ouvrages et sera intégrée à la zone de mobilité court terme.

Dans le cadre du présent guide, un ouvrage de stabilisation est défini comme un ouvrage permettant d'accroître la résistance mécanique d'un sol ou d'une infrastructure afin de les protéger contre l'érosion (adapté de Gouvernement du Québec, 2022).

Diverses techniques existent pour réaliser une stabilisation de rives. Voici les principaux types :

- Les ouvrages de stabilisation mécaniques, qui sont des ouvrages constitués de matériaux solides (roche, béton, acier, bois traité), capables de résister aux forces érosives actives comme les vagues, les courants et les glaces (p. ex., enrochement, perré, mur de soutènement);
- Les ouvrages de stabilisation végétalisés, c'est-à-dire des ouvrages faits à partir de végétaux vivants (fagots, fascines, matelas de branches, plançons, etc.);
- Les ouvrages de stabilisation combinés, soit tout ouvrage utilisant à la fois des végétaux vivants et des éléments minéraux, tels qu'un enrochement.

Différentes approches peuvent être utilisées pour intégrer les ouvrages de stabilisation dans la cartographie des zones de mobilité. Voici les deux méthodes proposées :

1) Application des taux de migration latérale pré-ouvrage

Lorsque les informations pré-ouvrages sont disponibles (p. ex., lorsque des photographies aériennes historiques sont disponibles pour la période précédant la construction de l'ouvrage), la cartographie des aléas fluviaux ne tient pas compte des ouvrages de stabilisation. Ce sont les taux de migration latérale historiques réels prévalant avant l'installation des ouvrages de stabilisation qui sont projetés sur 50 ans (figure 10.10 – a) (Vin-Deslauriers, 2024).

2) Application d'une zone tampon derrière l'ouvrage de stabilisation

Lorsque l'information pré-ouvrage n'est pas disponible, une zone tampon derrière les ouvrages de stabilisation peut être appliquée. Pour considérer le dynamisme latent des zones stabilisées pour lesquelles la mobilité historique peut ne pas être représentative de la mobilité naturelle, Choné (2013), Biron et ses collaborateurs (2014) et Buffin-Bélanger et ses collaborateurs (2015) proposent l'ajout d'une zone tampon derrière les ouvrages de stabilisation. La largeur de la zone tampon est fonction des données statistiques sur les taux de mobilité du tronçon homogène. Pour chaque tronçon, le 90^e percentile supérieur des taux d'érosion interpolés sur le tronçon est appliqué sur 50 ans pour obtenir la largeur de l'espace des aléas de mobilité à ajouter (figure 10.10 – b).

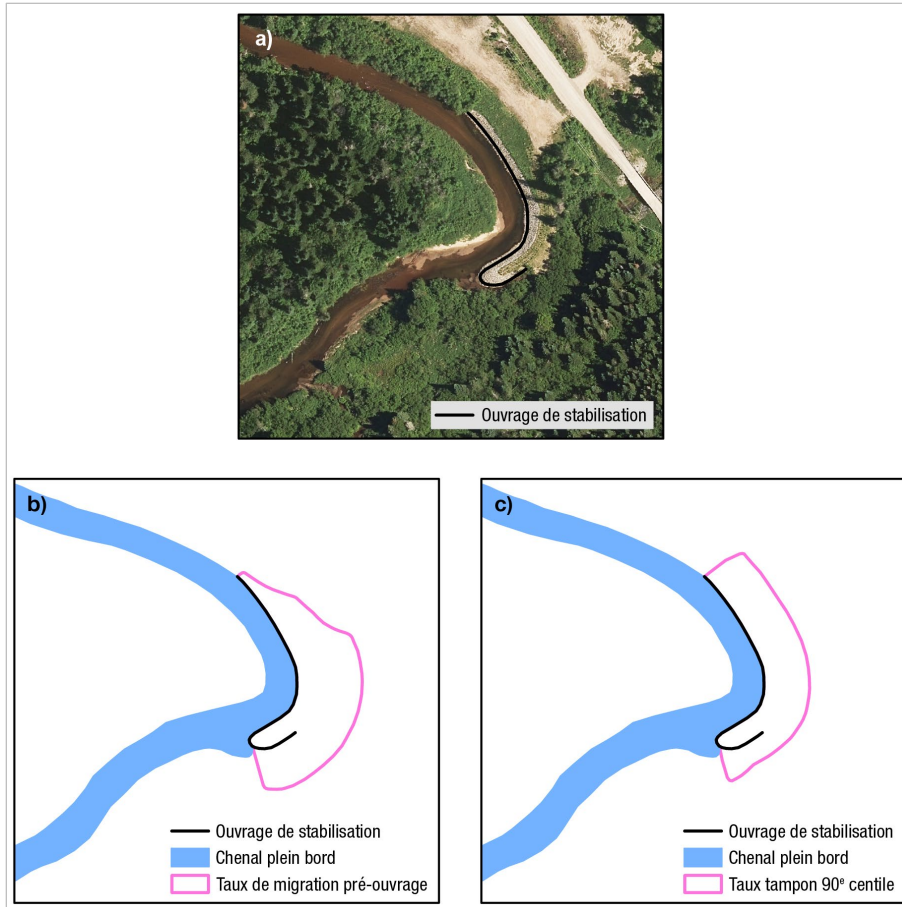


Figure 10.10. a) Localisation d'un ouvrage de stabilisation au niveau plein bord et exemple de l'application. b) Des taux de mobilité pré-ouvrage et c) une zone tampon correspondant au 90^e centile afin d'intégrer les ouvrages de stabilisation dans la cartographie des zones de mobilité

Quantification de l'incertitude liée au géoréférencement et application d'une marge de sécurité

EM 10.7	Exigence minimale
Quantification de l'incertitude liée au géoréférencement	Le mandataire ou le délégataire devra quantifier l'incertitude liée au géoréférencement afin d'intégrer cette incertitude aux ZM court terme et long terme sous forme de marge de sécurité.

L'analyse diachronique de la mobilité des cours d'eau à partir d'images aériennes et d'orthomosaïques comporte des incertitudes inhérentes au processus de géoréférencement. Ces incertitudes, si elles ne sont pas quantifiées et intégrées aux analyses, peuvent conduire à une estimation inexacte des zones de mobilité, que ce soit par sous-estimation ou surestimation selon la direction des erreurs. Pour obtenir une estimation de la mobilité qui tient compte de ces incertitudes, il faut les intégrer aux zones de mobilité court terme et long terme sous forme de **marge de sécurité**. La méthode de la racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM, ou RMSE, de l'anglais *root mean*

square error) est largement utilisée comme indicateur de la précision du géoréférencement, bien qu'elle ne capture pas toutes les sources d'erreur potentielles (Gurnell et collab., 1994; Hugues et collab., 2006; Rhoades et collab., 2009; Lea et Legleiter, 2016; Congalton et Green, 2019; ASPRS, 2024). Des exemples détaillés de calcul de la marge de sécurité à appliquer sont fournis à l'annexe 9.

Les étapes à réaliser pour ajouter la marge de sécurité annualisée aux ZM court terme sont :

- 1) Évaluation statistique de la précision du géoréférencement à l'aide de la $REQM_h$;
- 2) Combinaison de l'erreur des images comparées;
- 3) Calcul de la marge de sécurité annualisée pour la ZM court terme.

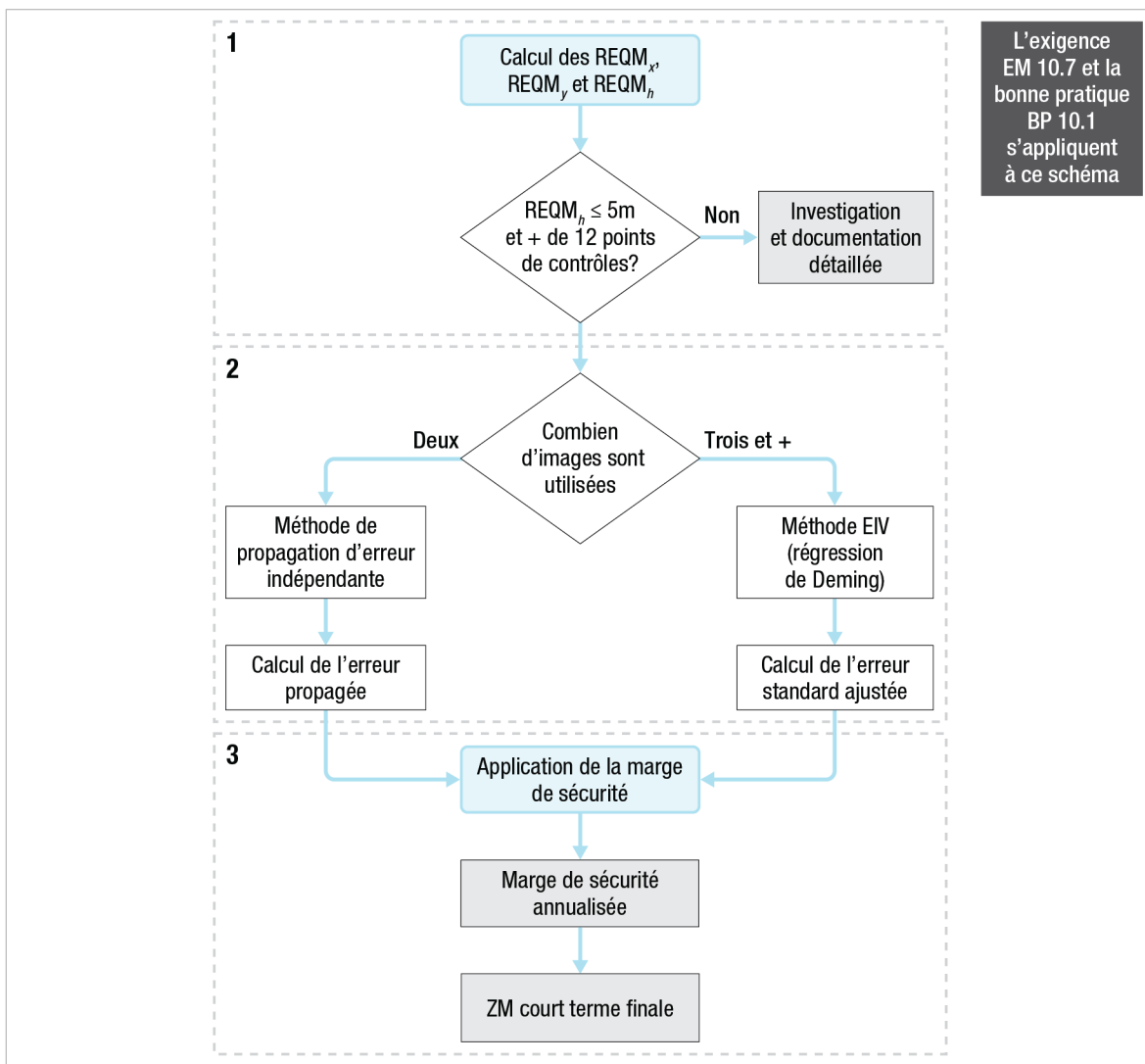


Schéma 10.3 : Schéma décisionnel menant au calcul de la marge de sécurité annualisée de la zone de mobilité court terme

Évaluation statistique de la précision du géoréférencement à l'aide de la $REQM_h$

La plupart des logiciels de géoréférencement utilisent la $REQM$ comme mesure pour évaluer la précision du géoréférencement. Généralement, ils présentent par défaut les **erreurs résiduelles** (Lea et Legleiter, 2016), soit les $REQM_x$ et les $REQM_y$ (erreurs quadratiques moyennes en x et en y séparément).

Les erreurs résiduelles individuelles correspondent à :

$$e_x = x_i - x_r$$

Où x_i et y_i correspondent aux coordonnées de l'image géoréférencée et x_r et y_r , aux coordonnées de l'image de référence.

Les $REQM_x$ et $REQM_y$ ou l'erreur quadratique moyenne en direction de x et y ($REQM_x$ et $REQM_y$) se calculent de la manière suivante :

$$REQM_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_r)^2}$$
$$REQM_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_r)^2}$$

Où n correspond au nombre de points de référence et i est un entier allant de 1 à n .

La $REQM_h$ permet de calculer l'écart global de positionnement en combinant les erreurs entre les coordonnées de l'image géoréférencée et celles de l'image de référence, ce qui reflète mieux les écarts importants en raison de l'élévation au carré des erreurs (ASPRS, 2024) :

$$REQM_h = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2]}$$
$$REQM_h = \sqrt{REQM_x^2 + REQM_y^2}$$

Tous les calculs doivent être relatifs au Datum et au système de coordonnées spécifiés dans le volet cartographique réglementaire.

Exigences minimales concernant le niveau de précision

Les images géoréférencées doivent présenter un **$REQM_h$ maximal de 5 m** et les **$REQM_x$ et $REQM_y$ ne doivent pas excéder 3,5 m**. L'ensemble de données ne sera considéré comme conforme que si ces critères sont respectés. Tout dépassement devra faire l'objet d'une investigation détaillée et être explicitement documenté dans le rapport technique.

Le nombre de points de contrôle minimum exigé pour la qualité du géoréférencement est de 12 à 15 (Hughes et collab., 2006; Rhoades et collab., 2009). Cependant, il est recommandé d'atteindre 30 points pour améliorer la qualité des statistiques dérivées des $REQM_h$ (Hughes et collab., 2006) (voir le Tableau 10.1). Ce nombre, basé sur le théorème limite central, garantit une distribution statistique représentative et permet une quantification précise de l'incertitude (ASPRS, 2024). Dans les cas où il n'est pas possible d'obtenir 30 points, notamment en milieu forestier peu anthropisé, des méthodes alternatives statistiquement valides peuvent être utilisées (p. ex., distribution t de Student pour les petits échantillons ou méthode de Monte Carlo). Si des méthodes statistiques alternatives sont appliquées, elles doivent être documentées en détail dans le rapport technique.

Tableau 10.1 : Spécifications relatives à la qualité du géoréférencement

Qualité du géoréférencement	$REQM_x$ et $REQM_y$ (m)	$REQM_h$ (m)	Nombre minimum de points de contrôle
Minimale	$\leq 3,5$	≤ 5	12 à 15
Optimale	$\leq 1,4$	$\leq 2,0$	≥ 30

Combinaison de l'erreur des images comparées

Cette étape consiste à combiner l'erreur de géoréférencement des différentes images afin de quantifier l'incertitude globale qui sera intégrée aux zones de mobilité. Deux approches méthodologiques distinctes peuvent être utilisées, selon le nombre d'images disponibles pour l'analyse :

1. **La méthode de propagation d'erreur indépendante.** Cette approche est recommandée lorsque l'analyse implique **uniquement deux images**. Elle utilise une propagation mathématique des erreurs de mesure pour déterminer l'**erreur propagée** calculée directement à partir des $REQM_h$ des deux images.
2. **La méthode EIV (erreurs dans les variables).** Cette approche, basée sur la régression de Deming, est plus adaptée lorsqu'on dispose de **trois images ou plus**. Elle prend en compte simultanément les erreurs dans les mesures de position lors de l'estimation du taux de mobilité et considère l'ensemble des observations pour déterminer une tendance globale. L'incertitude est alors quantifiée par l'**erreur standard ajustée** issue de l'intervalle de confiance de la régression.

Calcul de l'erreur combinée selon la méthode de propagation d'erreur indépendante

Les $REQM_h$ des images historiques ($REQM_{h1}$ et $REQM_{h2}$) peuvent être combinées selon les principes statistiques de propagation d'erreur indépendante (Mount et Louis, 2005) afin d'obtenir l'erreur propagée lorsque l'on compare seulement deux images.

L'erreur propagée se calcule comme suit :

$$\text{Erreur propagée} = \sqrt{\text{REQM}_{h1}^2 + \text{REQM}_{h2}^2}$$

L'erreur propagée obtenue est ensuite annualisée (Demers et collab., 2014) et ajoutée aux taux de mobilité historiques annualisés déterminés à la section « Calcul des taux de migration latérale historiques ». L'annualisation de l'erreur propagée permet de s'assurer que l'erreur ajoutée est proportionnelle à la période d'observation.

$$\text{Erreur annualisée} = \frac{\text{Erreur propagée}}{\text{Période d'observation}}$$

L'erreur annualisée doit être ajoutée à tous les taux de mobilité historiques annualisés qui sont calculés à chaque transect, sur l'ensemble du tronçon homogène, y compris dans les sections où les taux mesurés sont nuls ou très faibles.

$$\text{Taux de mobilité ajusté} = \text{Taux de mobilité historique} + \text{Erreur annualisée}$$

Calcul de l'erreur combinée selon la méthode EIV (erreurs dans les variables)

La méthode EIV utilise la régression de Deming qui estime les paramètres d'une droite $y = \alpha + \beta x$ en tenant compte des erreurs de mesure dans les deux variables (années et positions). La pente β de la régression de Deming est donnée par la formule suivante :

$$\beta = \frac{S_{yy} - \lambda S_{xx} + \sqrt{(S_{yy} - \lambda S_{xx})^2 + 4\lambda S_{xy}^2}}{2S_{xy}}$$

$$\beta \approx \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

Où :

- $S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ est la somme des carrés des écarts des années;
- $S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ est la somme des carrés des écarts des positions;
- $S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ est la somme des produits croisés entre années et positions;
- \bar{x} et \bar{y} sont les moyennes des années et des positions;
- $\lambda = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2}$ est le ratio des variances des erreurs de mesure.

L'absence d'incertitude associée aux années (x) justifie l'utilisation d'un λ approché à zéro ($\lambda \approx 0$) dans les calculs.

L'ordonnée à l'origine est calculée par :

$$\alpha = \bar{y} - \beta \bar{x}$$

L'erreur standard de la pente est établie par l'équation suivante :

$$SE(\beta) = \sqrt{\frac{\sigma^2}{S_{xx}}}$$

Où la variance résiduelle σ^2 estimée est calculée comme suit :

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \alpha - \beta x_i)^2}{n - 2}$$

L'intervalle de confiance à 95 % est calculé comme suit :

$$IC_{95\%} = \beta \pm t_{(n-2,0.975)} \cdot SE(\beta)$$

Où $t_{(n-2,0.975)}$ est le quantile de la distribution t de Student avec $n-2$ degrés de liberté à 97,5 .

À partir de cet intervalle de confiance à 95 %, on détermine l'erreur standard ajustée qui correspond à l'amplitude de l'intervalle divisée par 2, ou plus directement :

$$\text{Erreur standard ajustée} = t_{(n-2,0.975)} \cdot SE(\beta)$$

Cette erreur standard ajustée représente la marge de sécurité qui sera utilisée pour ajuster le taux de mobilité. Elle tient compte à la fois de la variabilité des données et de l'incertitude due au petit nombre d'observations.

Une fois l'erreur standard ajustée déterminée, elle doit être ajoutée à tous les taux de mobilité historiques annualisés qui sont calculés à chaque transect, sur l'ensemble du tronçon homogène, y compris dans les sections où les taux mesurés sont faibles ou statistiquement non significatifs¹.

$$\text{Taux de mobilité ajusté} = \text{Taux de mobilité historique} + \text{Erreur standard ajustée}$$

Calcul de la marge de sécurité annualisée pour la ZM court terme

Le taux de mobilité court terme ajusté doit être projeté sur 50 ans afin d'obtenir la zone de mobilité court terme finale.

$$\text{ZM court terme finale} = \text{Taux de mobilité court terme ajusté} \times 50 \text{ ans}$$

Note¹ : Dans les cas où la mobilité mesurée est inférieure à l'erreur estimée (qu'il s'agisse de l'erreur propagée ou de l'erreur standard ajustée), cela indique que le déplacement observé n'est pas statistiquement significatif. Toutefois, il est recommandé de maintenir l'ajout de la marge de sécurité annualisée, quelle que soit la méthode utilisée, même dans ces situations. Cette approche s'inscrit dans une logique de prudence et de précaution, déjà évoquée. Elle privilégie la réduction des erreurs d'omission (ne pas cartographier une zone mobile) même si cela

augmente le risque d'erreurs de commission (cartographier comme mobile une zone qui ne l'est pas). Dans un contexte d'aménagement du territoire et de gestion préventive du risque, ce compromis est justifié par les conséquences potentiellement plus graves associées à l'omission des zones de mobilité des cours d'eau qu'à leur commission excessive.

Délimitation des secteurs à fort potentiel d'avulsion

L'avulsion est un processus par lequel le cours d'eau change soudainement ou graduellement de trajectoire (Smith et collab., 1989; Jones et Schumm, 1999; Slingerland et Smith, 2004).

Après une analyse visuelle des résultats issus des projections sur 50 ans, certains tronçons ou certaines zones particulières au sein de ces tronçons présenteront un potentiel élevé d'avulsion, même s'ils ne répondent pas au critère pour être considérés comme fortement dynamiques. Les zones à fort potentiel d'avulsion peuvent être alors délimitées par photo-interprétation, en intégrant les chenaux secondaires et les méandres abandonnés situés dans la plaine alluviale actuelle, car ils constituent des chemins préférentiels pour l'eau (figure 10.11). Cette nouvelle limite remplacera celle des projections sur 50 ans dans la zone de mobilité court terme.

Les secteurs à fort potentiel d'avulsion peuvent inclure :

- Les recoupements de méandres en cours par migration latérale (*neck cut-off*) et par érosion régressive/fluviale (*chute cut-off*);
- Les secteurs en forte aggradation;
- Les secteurs ayant un historique d'avulsion;
- Les secteurs favorables aux glissements de terrain.

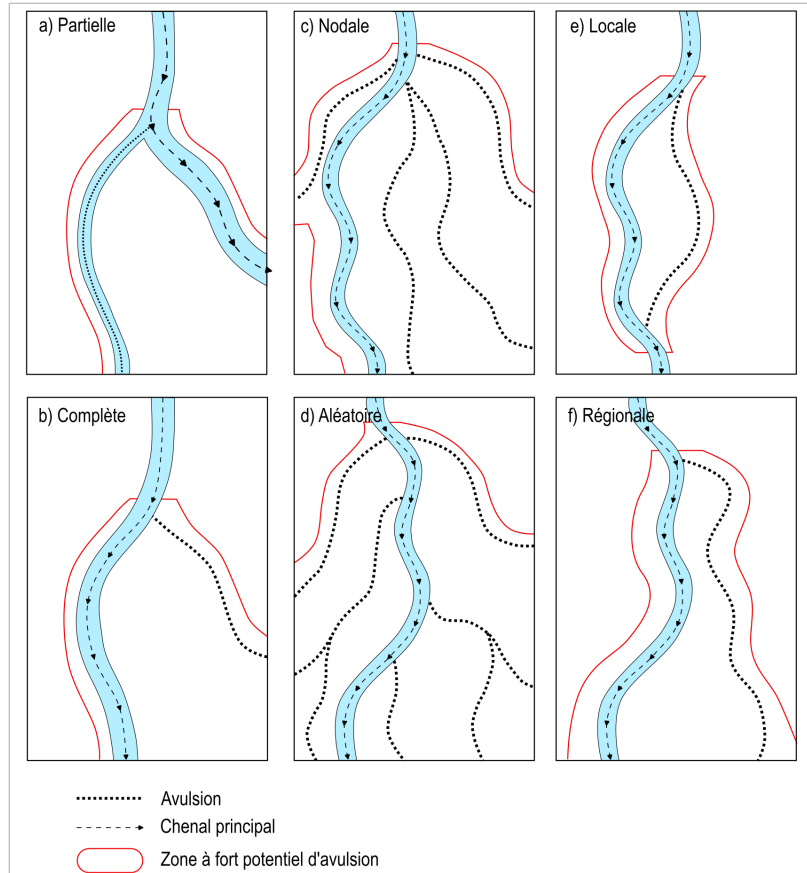


Figure 10.11. Typologie des avulsions (adaptée de Slingerland et Smith, 2004)

Les paires A-B, C-D et E-F illustrent respectivement la proportion du débit dévié, soit a) partielle ou b) complète, l'emplacement des sites d'avulsion, soit c) nodale ou d) aléatoire, et l'échelle spatiale de l'avulsion, soit e) locale ou f) régionale. L'enveloppe rouge indique la zone à fort potentiel d'avulsion (ceinture d'avulsion).

Les méandres où l'on observe un recoupement en cours par migration latérale (*neck cut-off*) et qui présente un pincement entre les secteurs de mobilité projetés sur 50 ans dont la largeur est inférieure à environ quatre fois la largeur moyenne du cours d'eau sont également ajoutés à la zone de mobilité court terme (Biron et collab., 2014) (figure 10.12 – f).

Combinaison des éléments en une zone de mobilité court terme

Tous les éléments suivants doivent être combinés afin de produire la zone de mobilité court terme (figure 10.12 – g et h) :

- 4) Le chenal plein bord récent à partir duquel les projections ont été effectuées;
- 5) Les taux de migration latérale historiques projetés sur 50 ans incluant la marge de sécurité annualisée ou la zone définie par le corridor d'amplitude des méandres;
- 6) Les zones derrière les ouvrages de stabilisation;
- 7) Les secteurs à fort potentiel d'avulsion, tels que les recoupements de méandres en cours;
- 8) Les cônes alluviaux et deltas identifiés.

Une analyse visuelle des résultats doit être effectuée afin de retirer les zones situées en dehors des dépôts non érodables. Aussi, si la limite de la zone de mobilité obtenue traverse des méandres abandonnés situés dans la plaine alluviale actuelle, ces derniers doivent également être intégrés dans la zone de mobilité court terme, car ils constituent des chemins préférentiels pour l'eau (Demers et collab., 2017).

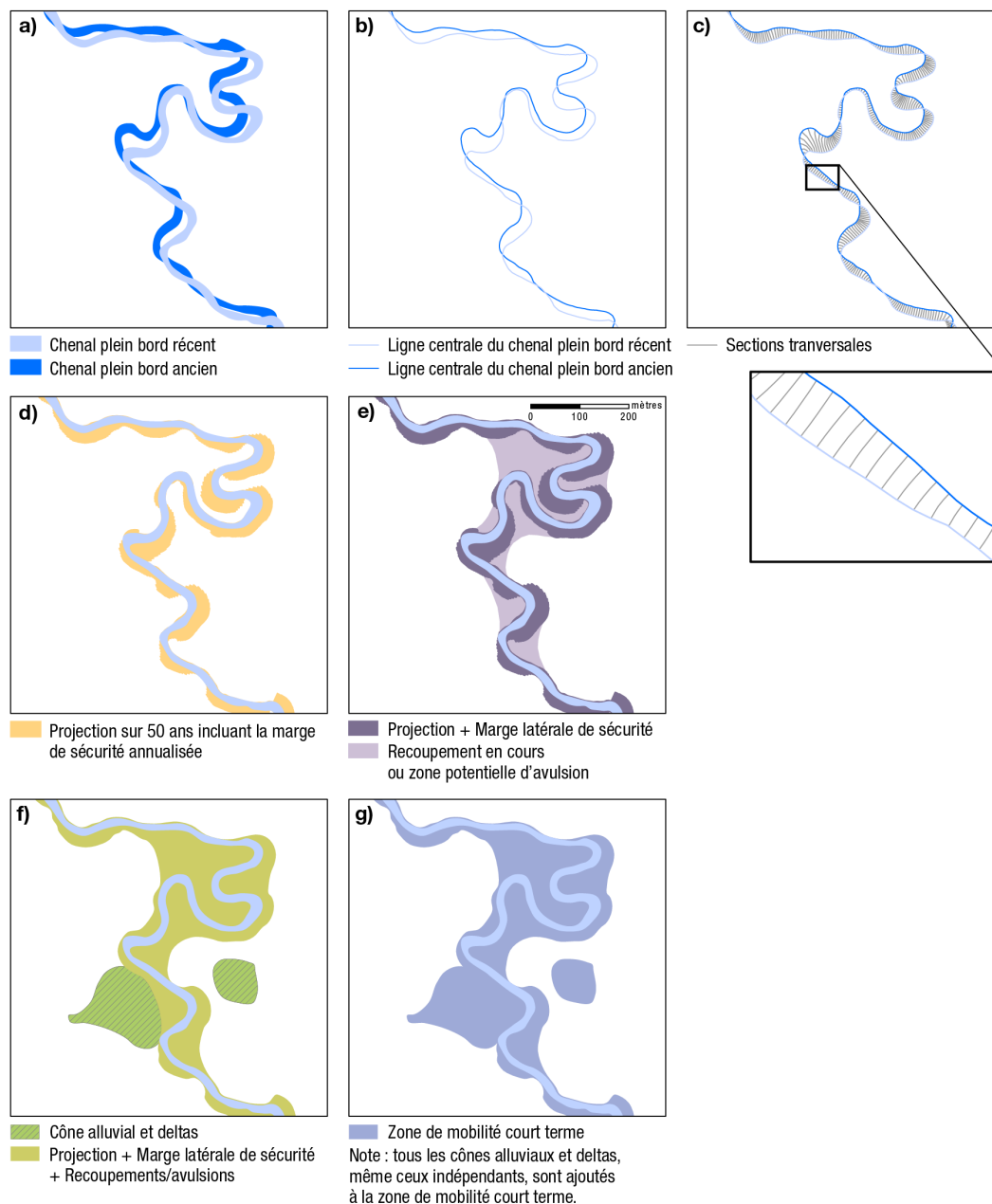


Figure 10.12. Exemple de réalisation de la zone de mobilité court terme
a) à d) Calcul des taux historiques, calcul de la marge de sécurité annualisée et projection sur 50 ans;
e) Délimitation des secteurs de recoupement en cours; f) Ajout des cônes alluviaux et deltas, y compris ceux indépendants; g) Zone de mobilité court terme intégrant tous les éléments.

Mobilité long terme du chenal

EM 10.8	Exigence minimale
Mobilité long terme	Le mandataire ou le délégataire devra déterminer les zones de mobilité long terme.

Le choix de la méthode utilisée afin de déterminer la zone de mobilité long terme est laissé au mandataire ou au délégataire effectuant la détermination des ZM. Il est cependant exigé de déterminer minimalement le corridor d'amplitude des méandres auquel il doit ajouter une marge latérale de sécurité. Quoique représentant le phénomène de façon générale, la délimitation de cet espace permet de visualiser le potentiel de déplacement de la rivière à long terme, en fonction de la dynamique des méandres.

Différentes méthodes alternatives, dont le niveau d'effort nécessaire à leur application varie, sont proposées afin de déterminer la zone de mobilité long terme. Parmi ces méthodes, on retrouve notamment la plaine alluviale fonctionnelle et les modèles numériques de migration de méandre (Meander Migration Model, RVR Meander, ChannelMapper, SRH-Meander, etc.). Dans l'éventualité où une méthode utilise un horizon temporel prédéterminé (p. ex., à l'aide de modèles numériques de migration de méandres), ce dernier devrait correspondre à l'horizon 2100 (voir la section Intégration des changements climatiques à l'hydrologie).

Un schéma décisionnel présenté au schéma 10.4 indique la procédure à suivre pour la détermination de la zone de mobilité long terme.

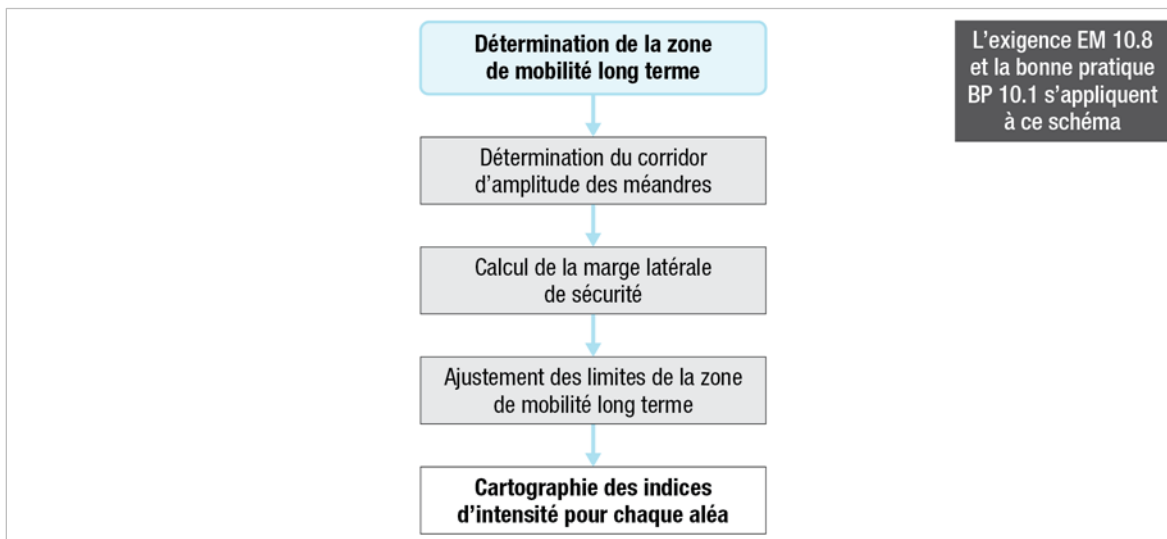


Schéma 10.4 : Schéma décisionnel menant à la réalisation de la zone de mobilité long terme

Détermination du corridor d'amplitude des méandres

Le corridor d'amplitude des méandres est obtenu à partir des orthophotographies aériennes les plus récentes du tronçon homogène déterminé mobile, mais l'utilisation d'une couche ombragée issue du LiDAR et des photographies aériennes historiques est recommandée pour faciliter sa délimitation (p. ex., la présence de méandres abandonnés visibles sur les levés LiDAR). Le corridor d'amplitude des méandres correspond à l'espace requis pour la conservation de l'ensemble des processus fluviaux dans la plaine alluviale et où la rivière peut potentiellement migrer à long terme (Piégay et collab., 1997; Malavoi et collab., 1998; Rapp et Abbe, 2003; Parish Geomorphic, 2004; Piégay et collab., 2005; Kline et Dolan, 2008; Kline et Cahoon, 2010; Biron et collab., 2014).

Cette zone correspond essentiellement au M_{plaine} , comme présenté par Biron et ses collaborateurs (2014). La zone de mobilité long terme est un corridor centré sur l'axe principal des méandres et duquel sont soustraits les dépôts non érodables. Ce corridor est suffisamment large pour englober les boucles de méandres actuelles et les méandres abandonnés situés dans la plaine alluviale actuelle en y intégrant les projections sur 50 ans. Il inclut également une marge latérale de sécurité. La largeur du corridor d'amplitude des méandres est déterminée et appliquée pour tout le tronçon homogène.

Il est à noter que l'échelle de temps (≥ 100 ans) attribuée à la zone de mobilité long terme dans le cadre du présent guide l'est dans une optique d'aménagement du territoire. Cependant, les processus fluviaux actifs dans ce corridor peuvent s'étendre sur plusieurs centaines d'années.

Les étapes de réalisation de la zone de mobilité long terme comprennent :

1. Le tracé de l'axe principal des méandres;
2. La détermination de la largeur du corridor en incluant toutes les boucles de méandres et les projections sur 50 ans;
3. L'ajout de la marge latérale de sécurité
4. La soustraction des secteurs non érodables (excluant les ouvrages de stabilisation);
5. L'inclusion des méandres abandonnés situés dans la plaine alluviale actuelle;
6. L'ajustement du corridor lorsqu'une limite de vallée est rencontrée;

En premier lieu, l'axe principal des méandres est tracé à partir de la ligne centrale du chenal plein bord (obtenue à l'étape précédente de la mobilité court terme) en passant par le point d'inflexion entre chaque méandre (figure 10.13 – a). Ce point d'inflexion correspond à l'endroit où s'opère un changement de concavité dans le chenal et où le talweg passe d'une berge à une autre. Dans les sections de la rivière où le tracé méandre peu ou ne méandre pas, un point centré sur la ligne centrale est placé toutes les 7 à 10 largeurs moyennes du chenal (p. ex., pour un chenal d'une largeur moyenne de 20 m, un point sera mis tous les 140 à 200 m) (VANR, 2008).

La largeur du corridor doit être déterminée à partir de l'axe principal des méandres (figure 10.13 – b). Elle doit être mesurée perpendiculairement à l'axe principal des méandres et englober toutes les boucles de méandres ainsi que les projections sur 50 ans. Le résultat obtenu correspond à un polygone d'égale distance de part et d'autre de l'axe principal des méandres.

Calcul de la marge latérale de sécurité pour la ZM long terme

Pour la zone de mobilité long terme, une marge latérale de sécurité doit être ajoutée de part et d'autre du corridor d'amplitude des méandres. Cette marge correspond à la $REQM_h$ de l'image ayant servi à déterminer l'amplitude maximale des méandres.

$$\text{Marge latérale de sécurité} = REQM_h \text{ image récente}$$

Dans la majorité des cas, l'orthophotographie aérienne la plus récente est utilisée comme référence principale pour la détermination du corridor d'amplitude des méandres, bien que les photographies historiques et les données LiDAR puissent également être consultées pour faciliter l'identification des méandres abandonnés.

La marge latérale de sécurité ainsi définie est ajoutée en totalité des deux côtés du corridor d'amplitude des méandres, c'est-à-dire qu'elle n'est pas répartie, mais bien répliquée intégralement des deux côtés.

$$\text{ZM long terme finale} = \text{corridor d'amplitude des méandre} + 2 \times \text{marge latérale de sécurité}$$

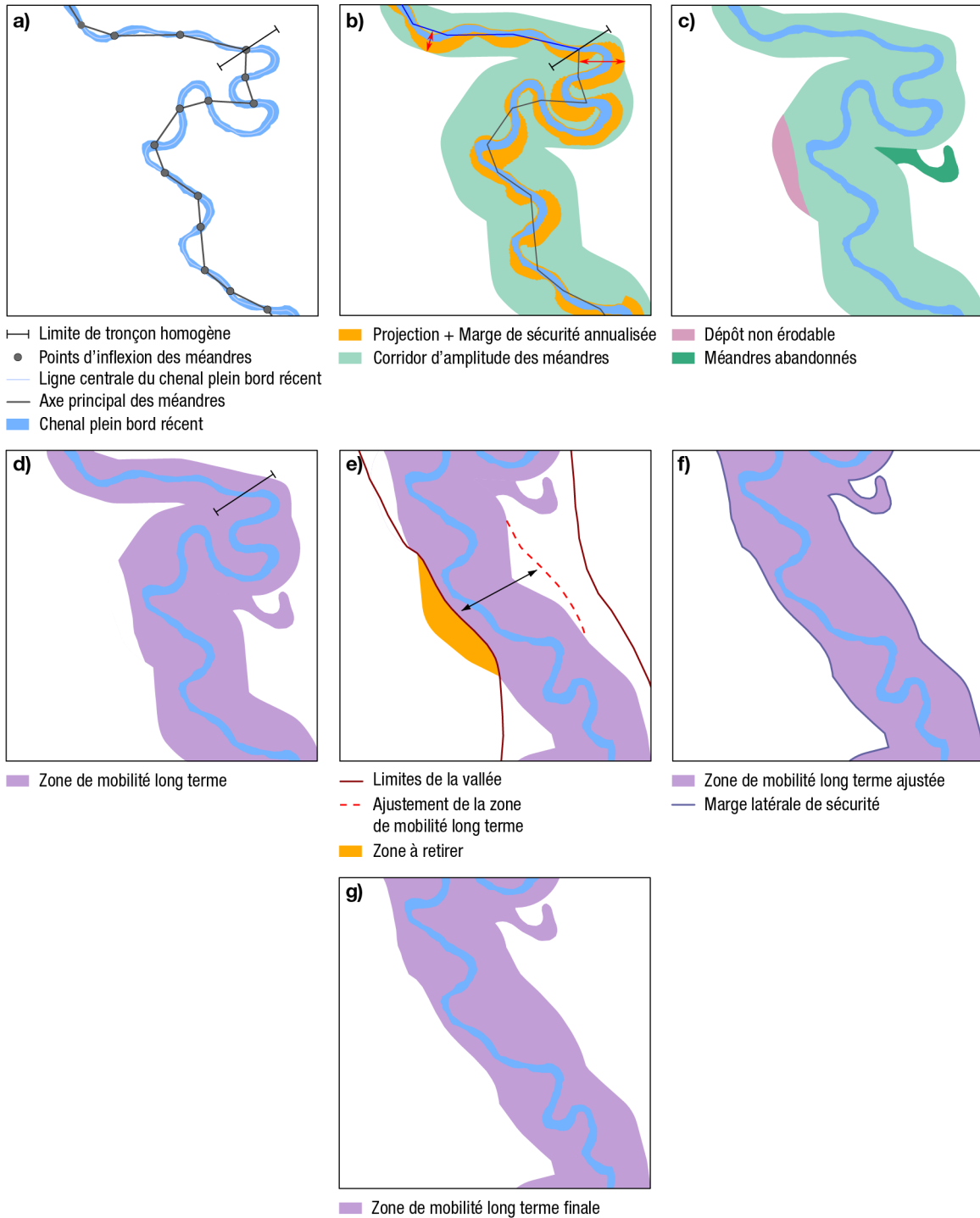


Figure 10.13. a) Points d'inflexion et axe principal des méandres. b) Corridor englobant toutes les boucles des méandres ainsi que les projections sur 50 ans; les flèches rouges correspondent au méandre le plus ample et indiquent le point de mesure pour déterminer la largeur du corridor par tronçon homogène (adapté de VANR, 2008). c) Ajustement du corridor d'amplitude des méandres afin d'y soustraire les secteurs non érodables et d'y ajouter les méandres abandonnés situés dans la plaine alluviale actuelle. d) Corridor d'amplitude des méandres corrigé. e) Ajustement de la zone de mobilité long terme afin d'y soustraire et de déplacer les secteurs qui s'étalent au-delà des limites de la vallée. f) Ajout de la marge de sécurité latérale g) Zone de mobilité long terme corrigée et finale

Ajustement des limites de la zone de mobilité long terme

Une correction du corridor d'amplitude des méandres doit être effectuée afin de retirer les zones situées dans des dépôts non érodables (figure 10.13 – c et d). Il est recommandé d'utiliser une carte des dépôts de surface afin de faciliter cette étape. Lorsque la limite de la zone de mobilité long terme traverse des méandres abandonnés situés dans la plaine alluviale actuelle, ces derniers doivent également être intégrés dans la zone de mobilité long terme, car ils constituent des chemins préférentiels pour l'eau (figure 10.13 – c et d).

Lorsque la zone de mobilité long terme s'étend au-delà des limites de la vallée, celle-ci doit être ajustée. Les limites de la vallée correspondent à tous éléments délimitant les contraintes latérales aux déplacements du cours d'eau (versants, affleurement rocheux important, terrasse non érodable, etc.). Ces limites sont définies par les dépôts de surface, la topographie et la plaine alluviale. Les ouvrages de stabilisation ne sont pas pris en compte. Il est recommandé d'utiliser une carte des dépôts de surface et le MNT issu du LiDAR pour définir les limites de la vallée. La zone de mobilité long terme qui s'étale au-delà d'une limite de vallée doit être retirée puis décalée parallèlement du côté opposé d'une superficie égale à celle soustraite (figure 10.13 – e et f) (VANR, 2008).

10.3 L'impact des changements climatiques sur la mobilité des cours d'eau

Au Québec, les modifications anticipées du régime hydrologique en lien avec les changements climatiques incluent notamment (Guay et collab., 2015; Alberti-Dufort et Desjardins, 2022; Alberti-Dufort et collab., 2022) :

- Pour les crues
 - Des pointes de crues plus hâtives au printemps;
 - Une évolution des volumes et des pointes de crues printanières (variables selon les régions, mais généralement plus forts dans le nord de la vallée du Saint-Laurent et plus faible dans le sud du Québec);
 - Une augmentation des pointes de crues estivales et automnales (sur une large portion du Québec méridional).
- Pour les étiages
 - Une augmentation de la sévérité et de la durée des étiages estivaux et automnaux;
 - Une diminution de la sévérité des étiages hivernaux.
- Pour l'hydraulicité
 - Une augmentation générale de la moyenne annuelle, avec tendances divergentes selon les saisons, soit :

- Une augmentation de l'hydraulicité hivernale;
- Une diminution de l'hydraulicité estivale.
- Pour les embâcles
 - Une augmentation des occurrences d'embâcles de glace.

Ces modifications du régime hydrologique ont un impact sur la mobilité des cours d'eau dont la dynamique morphologique s'ajuste naturellement et graduellement à ces fluctuations (Ashmore et Church, 2001; Boyer et Roy, 2014; Buffin-Bélanger et collab., 2015a; Shrestha et collab., 2020; Alberti-Dufort et Desjardins, 2022).

Cet ajustement est difficile à prévoir, mais il est attendu qu'il ait une incidence sur la dynamique hydrosédimentaire du bassin versant qui, à son tour, aura un impact sur :

- Les taux d'érosion et de migration latérale du chenal;
- L'aggradation ou l'incision du chenal;
- La dimension et la forme du chenal;
- La stabilité des berges et des limites ou parois de la vallée.

Dans ce contexte où des changements dans la dynamique morphologique des cours d'eau sont anticipés, la cartographie HGM, déterminée en fonction des conditions climatiques actuelles, se distingue par sa robustesse et son indépendance aux projections hydroclimatiques (Massé et collab., 2020).

Les travaux réalisés par Biron et ses collaborateurs (2013) et par Buffin-Bélanger et ses collaborateurs (2015a) précisent que, en ce qui a trait à la mobilité et à ses méthodes de cartographie, la zone de mobilité court terme (M_{50} dans l'étude) est sensible aux changements de débit, alors que la zone de mobilité long terme (M_{plaine} dans l'étude) ne l'est pas. Autrement dit, la zone de mobilité court terme doit être considérée comme prédisposée à l'érosion en fonction des taux de migration latérale historiques, si ces derniers demeurent similaires. Étant donné que des changements dans les taux de migration latérale sont anticipés, la cartographie utilisant les taux de migration latérale historiques devra être mise à jour régulièrement, selon le principe de précaution et de prudence, afin d'en ajuster la limite. Par ailleurs, la robustesse de la zone de mobilité long terme face aux changements de débit renforce la pertinence d'utiliser cet espace dans un contexte d'aménagement du territoire à long terme (Buffin-Bélanger et collab., 2015a).

10.4 Autres bonnes pratiques pour la cartographie des aléas fluviaux

10.4.1 Autres sources d'incertitudes liées à l'approche HGM

BP 10.1	Bonne pratique
Analyse des incertitudes HGM	Le mandataire ou le délégataire pourra documenter et prendre en compte toutes les sources d'incertitude lors de la réalisation de la cartographie de l'aléa « mobilité » comme élément de bonne pratique.

L'approche hydrogéomorphologique présente les formes observées et interprétées par le géomorphologue ainsi que leur évolution temporelle. À l'instar d'autres méthodes de cartographie de zones inondables, l'approche HGM comprend également des sources d'imprécisions et d'incertitudes qui lui sont propres. Ces dernières se doivent d'être connues et prises en compte lors de la réalisation des étapes de l'approche HGM. Il est d'ailleurs possible d'éviter plusieurs d'entre elles en faisant des choix adaptés aux besoins de la cartographie.

Lors de la cartographie HGM, les principales sources d'incertitudes et d'imprécision sont :

1. Hypothèse d'une mobilité linéaire temporelle et spatiale
2. Résolution spatiale et temporelle de l'imagerie;
3. Géoréférencement des images historiques;
4. Échelle utilisée et qualité du traçage;
5. Anthropisation du territoire et couvert végétal.

10.4.1.1 Hypothèse d'une mobilité linéaire temporelle et spatiale

L'une des principales sources d'incertitude dans la détermination des zones de mobilité court terme repose sur l'hypothèse d'une mobilité linéaire, tant dans le temps que dans l'espace. Cette hypothèse, qui suppose que la dynamique passée d'un cours d'eau peut être directement extrapolée pour prédire sa mobilité future, ne correspond pas toujours à la réalité des processus fluviaux. Les cours d'eau peuvent en effet connaître des changements rapides et imprévisibles sous l'influence de facteurs tels que des événements hydrologiques extrêmes, des modifications anthropiques ou des ajustements morphologiques. Certains cours d'eau historiquement stables peuvent également devenir mobiles. Ces dynamiques non linéaires peuvent entraîner des écarts non négligeables entre les projections basées sur les taux de migration historiques et les trajectoires réelles des cours d'eau. Il est donc important de considérer cette limitation dans l'analyse et d'intégrer, lorsque possible, des outils ou des approches complémentaires pour mieux refléter la variabilité de la dynamique des cours d'eau. Des travaux et des réflexions sont en cours pour préciser l'intégration de cette incertitude à la méthode, notamment sur la notion

d'événement extrême et son implication dans le calcul des taux d'érosion historiques. Les avancées scientifiques sur le sujet seront intégrées progressivement aux prochaines versions du guide, qui se veut itératif et évolutif.

10.4.1.2 Résolution spatiale et temporelle de l'imagerie

Afin de minimiser l'incertitude liée à la résolution spatiale, il est recommandé d'utiliser l'échelle spatiale la plus fine possible (c.-à-d. une résolution à grande échelle) lors du choix de l'imagerie (p. ex., orthophotographies, LiDAR, images satellites et historiques, etc.). En effet, plus l'échelle sera fine, plus l'image sera nette et plus les détails topographiques seront visibles lors de la photo-interprétation. Dans certains cas, il n'est pas nécessairement avantageux d'utiliser l'échelle la plus fine, notamment lorsque l'objectif est de couvrir un large territoire (p. ex., le nombre de photos aériennes pourrait être trop élevé pour les besoins, augmentant par le fait même les coûts d'acquisition et le temps de géoréférencement).

Concernant la couverture temporelle, il est recommandé d'avoir minimalement trois séries de photos qui couvrent idéalement une période similaire à ce qui sera projeté, donc environ 50 ans. Cette période peut également être ajustée en fonction des changements observés dans le bassin versant. Les séries de photos devraient idéalement s'étendre de la date la plus ancienne disponible à la plus récente. Ces deux séries serviront à calculer les taux de mobilité latérale. Une série supplémentaire, d'une année intermédiaire, pourra être utilisée afin de déterminer les tronçons fortement dynamiques. Les taux de migration peuvent aussi être modulés en ajoutant des années intermédiaires dans le but de déterminer si la tendance du phénomène est à l'accélération ou à la diminution.

10.4.1.3 Géoréférencement des images historiques

Lors de l'acquisition de l'imagerie historique, il est recommandé de favoriser les images ayant été géoréférencées à l'aide d'approches photogrammétriques et orthorectifiées. Ce procédé permet de corriger les distorsions associées à la déformation radiale des images, aux mouvements de l'avion ainsi qu'à la topographie et de positionner les clichés avec une précision supérieure. Il est attendu que l'incertitude des images plus anciennes soit plus grande étant donné les changements plus importants sur le territoire qui rendent difficile la localisation de points de contrôle ainsi que l'absence d'information sur l'acquisition des images.

Recommandations générales concernant le géoréférencement :

La stratégie de placement des points de contrôle, bien que flexible selon le contexte, devrait suivre certains principes pour minimiser l'erreur de géoréférencement. Il est recommandé de concentrer prioritairement les points dans le corridor fluvial afin d'optimiser la précision locale dans cette zone d'intérêt. Ces points doivent être sélectionnés sur des éléments stables et clairement identifiables dans le temps, tels que des intersections routières ou des coins de bâtiments permanents. Il convient également de privilégier des repères nets et précis, en évitant les zones floues ou ambiguës qui pourraient introduire des erreurs supplémentaires (ASPRS, 2015). Si nécessaire, l'image peut être découpée autour du site d'intérêt lorsque les secteurs éloignés n'offrent pas de points de référence

pertinents, ce qui permet de concentrer l'effort de géoréférencement sur la zone d'étude principale et de réduire potentiellement l'erreur de positionnement.

Le type de transformation utilisé pour déterminer l'emplacement correct des coordonnées cartographiques pour chaque cellule de l'image matricielle est laissé à la discrétion de chacun (p. ex., polynomiale, par spline, par ajustement, projective ou d'Helmert). Ce choix devra être optimisé en fonction de la topographie et de la répartition des points de contrôle. De manière générale, les terrains plus complexes nécessitent un type de transformation d'ordre supérieur et un plus grand nombre de points de contrôle. Le type de transformation utilisé devra être mentionné dans le rapport technique (ASPRS, 2015, Lea et Legleiter, 2016).

10.4.1.4 Échelle utilisée et qualité du traçage

Lors de la numérisation des formes et des éléments de cartographie HGM, l'échelle d'affichage devra être suffisante afin de minimiser l'erreur de positionnement. Il est recommandé d'effectuer la numérisation à une échelle la plus fine possible selon la qualité des images.

De même, le tracé devra avoir un nombre suffisant de points, particulièrement dans les courbes, afin d'éviter de trop généraliser les formes. Comme les taux de migration sont calculés à partir des tracés anciens et récents des chenaux plein bord, une attention particulière devra leur être portée.

10.4.1.5 Anthropisation du territoire et couvert végétal

L'utilisation du territoire liée aux activités humaines (urbanisation, agriculture, etc.) ainsi que le couvert végétal peuvent rendre difficile la photo-interprétation et introduire de l'incertitude quant au tracé. C'est le cas entre autres en milieux urbains ou en milieux fortement agricoles très plats où les différentes formes sont difficilement perceptibles. L'utilisation d'un MNT issu du LiDAR entraîne une réduction des incertitudes par rapport à la photo-interprétation seule, de sorte que la combinaison des deux méthodes est recommandée. Aussi, il est fortement recommandé d'ajouter un champ dans la table attributaire afin d'y indiquer le niveau de certitude du tracé. Dans la majorité des cas, le tracé est certain et suit un marqueur géomorphologique évident. Quelquefois, le tracé peut être interpolé (p. ex., à partir de l'altitude du marqueur repéré sur la berge opposée) ou estimé lorsque le contact est moins franc. Ces derniers pourront être considérés comme « approximatifs ». Le choix des classes d'incertitude est laissé au mandataire ou au délégué.

10.4.1.6 La cartographie de la plaine alluviale fonctionnelle

BP 10.2	Bonne pratique
Plaine alluviale fonctionnelle	Le mandataire ou le délégué pourra cartographier la plaine alluviale fonctionnelle afin de circonscrire les limites à l'intérieur desquelles peuvent survenir des aléas fluviaux dans le futur.

Par définition, la plaine alluviale fonctionnelle (PAF), aussi appelée *genetic floodplain* ou lit majeur, correspond à la partie de la plaine alluviale qui est actuellement sous l'emprise des aléas fluviaux. La PAF est une forme d'accumulation construite par la combinaison des processus de mobilité et de débordement des cours d'eau. Les alluvions peuvent être remaniées par l'ensemble des processus liés à la morphogénèse de la plaine alluviale, soit l'érosion des berges, les recoupements de méandres, l'avulsion et le décapage lors de crues extrêmes (Demers et collab., 2018). La PAF est par conséquent indicative des limites à l'intérieur desquelles peuvent potentiellement survenir dans le futur des aléas fluviaux. Dans cette optique, il est important de préciser que la PAF fait référence à l'espace qui est actuellement en équilibre avec le régime hydroclimatique actuel et que sa limite peut fluctuer et être discontinue en fonction des variations hydrologiques et géomorphologiques (p. ex., la PAF pourrait se déplacer au fur et à mesure que le chenal érode les terrasses perchées en dépôts meubles érodables). La limite de la PAF est donc associée à la zone d'inondabilité potentielle géomorphologique.

La limite opérationnelle de la PAF est tracée en utilisant la frontière entre les unités géomorphologiques présentant des indicateurs d'inondabilité et de non-inondabilité (figure 10.14) (Demers et collab., 2018). Comme la limite opérationnelle de la PAF repose sur la présence d'indicateurs d'inondabilité ou de non-inondabilité, il est possible que cette limite soit difficile, voire impossible à déterminer (p. ex., en milieu urbain ou agricole, lorsque les indicateurs ont été remaniés par l'activité humaine). Si tel est le cas, il est recommandé que le mandataire ou le délégué appose une limite au meilleur de ses connaissances, en suivant le principe directeur de précaution et de prudence (p. ex., en utilisant une approche complémentaire). Il est recommandé de documenter la décision d'apposer une limite établie en fonction d'un niveau de confiance (confiance faible, moyenne ou élevée) ou de ne pas fixer la limite de la PAF, le cas échéant.

Lors de la détermination de la PAF, il est possible de distinguer cette dernière des terrasses alluviales anciennes, lesquelles sont aujourd'hui hors de portée des inondations (MDDELCC, 2015). Au Québec, les plaines alluviales, mises en place lors du retrait des glaciers, ont été incisées par les cours d'eau à la suite de l'abaissement du niveau de base causé par le rehaussement isostatique de la croûte terrestre. Les terrasses fluviales perchées peuvent être reconnues par un talus et se trouvent à l'extérieur de la PAF. À cet effet, l'extérieur de la PAF peut donc être désigné sous le nom de plaine alluviale non fonctionnelle (PANF). La combinaison de la PAF et de la PANF compose la plaine alluviale proprement dite (Besnard, 2016).

La PAF est donc une zone potentiellement inondable, mais dont on ne connaît ni la récurrence ni les débits correspondants. Elle est déterminée à partir des formes laissées sur le terrain par d'anciennes crues. Ces formes fluviales sont l'objet de la cartographie hydrogéomorphologique et peuvent être d'anciens talus d'érosion, des formes sédimentaires d'érosion ou d'accumulation, des bras de rivière abandonnés, des coupures de méandre, etc. D'autres indicateurs peuvent aussi être utilisés afin de délimiter la PAF, tels que la granulométrie, la pédologie, la botanique et la présence de milieux humides. Des outils numériques, tels que le *Valley Bottom Extraction Tool* (V-BET) de Gilbert et ses collaborateurs (2016), peuvent aussi aider à cerner et délimiter la PAF.

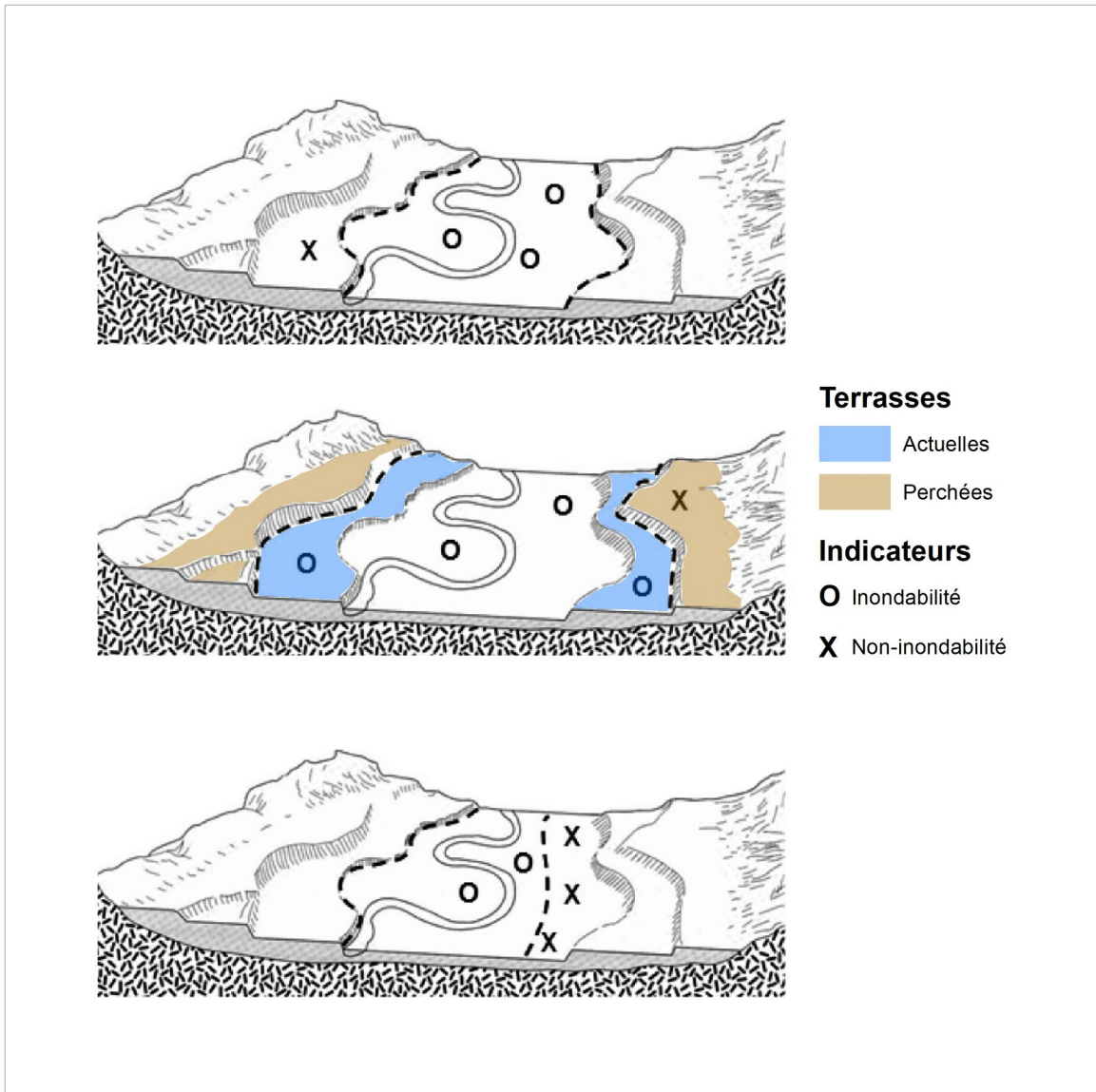


Figure 10.14. Plaine alluviale fonctionnelle et terrasses alluviales (adaptée de Demers et collab., 2018)

11. Gestion, acquisition et traitement des données géospatiales

11.1 Objectif et résultats attendus

L'objectif du présent chapitre est de présenter les exigences méthodologiques et certaines règles de bonne pratique relatives à l'acquisition, au traitement et à la gestion des données géospatiales menant à la cartographie des ZI et des ZM. Cette démarche vise à garantir une collecte de données cohérentes et uniforme, tout en facilitant l'intégration, le stockage et l'interopérabilité des données.

11.1.1 Format et structure des données géospatiales

La gestion des données géospatiales exige une standardisation du processus complet, de l'acquisition au stockage en passant par la distribution des données. Afin de simplifier l'intégration et l'application de ces normes, des gabarits sont mis à la disposition des mandataires et des délégataires pour garantir la conformité des formats et de la structure des données requises. La présente section offre des précisions complémentaires pour les cas où ces éléments ne sont pas directement inclus dans les gabarits fournis et présentés à l'annexe 7.

Format de champs de données

EM 11.1	Exigence minimale
Format de champ de données	Le mandataire ou le délégataire devra respecter les formats des champs de données pour les éléments de date et d'heure, de nombre et d'unités et de valeurs inconnues ou non applicables.

Date et heure

La norme ISO 8601 est exigée pour les champs de donnée « date » et « heure ». Le champ « date » est structuré comme suit : « AAAA-MM-JJ » pour l'année (AAAA), le mois (MM) et le jour (JJ). Par exemple, le 1^{er} mai 2024 serait représenté comme « 2024-05-01 ». Le champ « heure » suit le modèle « HH:MM:SS » pour l'heure, les minutes et les secondes. Par exemple, 14:30:00 représente 14 heures, 30 minutes et 0 seconde. Le fuseau horaire exigé est l'heure normale de l'Est (HNE). Il est à noter que, pendant la période entre le deuxième dimanche de mars et le premier dimanche de novembre, le Québec passe à l'heure avancée de l'Est (HAE). Il est conseillé de vérifier le format en vigueur afin de l'ajuster à l'HNE, le cas échéant (tableau 11.1).

Tableau 11.1 : Spécifications relatives au format de la date et de l'heure

Éléments	Spécifications
Format de la date	AAAA-MM-JJ (calendrier grégorien)
Format de l'heure	HH:MM:SS (système horaire de 24 heures)
Fuseau horaire	HNE (heure normale de l'Est)

Nombre et unités

Les nombres et les unités doivent être représentés en utilisant le Système international des unités décrites dans la norme ISO 80000. Le séparateur de décimales exigé est le point « . » par souci de compatibilité avec les logiciels utilisés. De même, le séparateur de milliers doit être une espace insécable (tableau 11.2).

Tableau 11.2 : Spécifications relatives au format des nombres et des unités

Éléments	Spécifications
Séparateur de décimale	Point « . »
Séparateur de milliers	Espace insécable

Valeurs non applicables ou inconnues

Lorsqu'il y a un champ de type numérique inconnu ou non applicable, le mandataire ou le délégataire doit laisser le champ vide afin qu'il n'y ait pas d'erreur liée à l'interprétation. Dans le cas d'un champ de type texte inconnu ou non applicable, le mandataire ou le délégataire doit inscrire « NULL ».

11.1.1.1 Format des données matricielles (rasters)

EM 11.2	Exigence minimale
Formats des données matricielles	Le mandataire ou le délégataire devra livrer les éléments matriciels utilisés dans le présent mandat et acquis par ses propres moyens dans les formats demandés.

Les données matricielles incluent toutes les données numériques représentées sous forme de grille régulière de cellules rectangulaires (pixels), organisées en lignes et en colonnes. Les formats exigés sont le GeoTIFF pour les images géoréférencées et les MNT, le JPEG pour les photographies numériques et le MP4 pour les vidéos. Toutes les données matricielles doivent avoir une résolution suffisante en fonction des objectifs d'analyse, de la précision requise, de l'échelle d'utilisation et de la nature des données. Une résolution recommandée pour chaque type de données matricielles est indiquée au tableau 11.3.

Les vidéos doivent avoir une durée permettant de bien visualiser les rives et le cours d'eau. La durée recommandée est de 10 secondes. La qualité d'enregistrement doit permettre de visualiser clairement une image lors d'un arrêt sur image. Le résultat doit permettre de distinguer la dynamique de l'écoulement de l'eau.

Tableau 11.3 : Spécifications relatives aux données matricielles

Éléments	Spécifications
MNT	GeoTIFF
Format des orthophotographies, des photos aériennes et des images satellitaires	GeoTIFF
Format des photos	JPEG
Format des vidéos	MP4
Résolution recommandée	<ul style="list-style-type: none"> MNT : 1 m dont les coordonnées des pixels sont arrondies au mètre pour les secteurs à effort cartographique majeur – 4 m pour les secteurs à effort cartographique modéré Images satellitaires et orthophotographies : 30 cm Photographies aériennes historiques : 50 cm

11.1.1.2 Format des données vectorielles

EM 11.3	Exigence minimale
Format des données vectorielles	Le mandataire ou le délégué devra livrer les éléments vectoriels, utilisés dans le présent mandat et acquis par ses propres moyens, dans les formats demandés, soit shapefile, géodatabase, géopackage, LAS ou LAZ.

Les données vectorielles incluent toutes les données numériques qui représentent des entités géographiques sous forme de points, de lignes et de polygones. Les formats exigés pour les données vectorielles sont le shapefile (.shp), le fichier de formes inclus dans une géodatabase (.gdb) ou un géopackage (.gpkg), à l'exception des données LiDAR brutes qui doivent être en format LAS ou LAZ (tableau 11.4). Le mandataire ou le délégué n'a pas à livrer des données LiDAR auxquelles il aurait eu accès par le biais du MRNF ou du MELCCFP.

Tableau 11.4 : Spécifications relatives aux données vectorielles

Éléments	Spécifications
Format (données vectorielles)	Shapefile (.shp), géodatabase (.gdb) ou géopackage (.gpkg)
Format (données LiDAR)	LAS ou LAZ

11.1.1.3 Nomenclature des fichiers

EM 11.4	Exigence minimale
Nomenclature des fichiers	Le mandataire ou le délégataire devra respecter la nomenclature des fichiers telle qu'elle est présentée dans le référentiel de données.

L'identification des couches de données, ainsi que des champs de la table attributaire, à l'aide d'un classement de documents efficient, améliore l'exploitation et la gestion du projet global et permet une interopérabilité de ces dernières. Le référentiel de données dont l'arborescence est présentée à l'annexe 7 précise les éléments en lien avec la nomenclature des fichiers.

Voici quelques éléments à prendre en considération pour la nomenclature des fichiers :

- Tout en minuscules;
- Aucun caractère accentué (p. ex., é, à, î, etc.);
- Aucun caractère spécial (p. ex., =, œ, ..., %, ½);
- Aucun espace; il faut utiliser la barre de soulignement « _ » (p. ex., fichier_XXX_XXX);
- Ne pas commencer par un chiffre;
- Éviter les mots superflus (p. ex., conjonctions, déterminants, etc.).

Dans le cas de données géospatiales qui seront utilisées dans un système d'information géographique, il faut limiter le nombre de caractères à 13 pour un raster à un seul canal et à 9 caractères pour un raster à canaux multiples.

Domaines de valeurs de certaines données descriptives

Information relative aux bassins versants et aux cours d'eau

Les bassins versants et les numéros de cours d'eau devront être utilisés afin d'organiser la nomenclature et la structure des données. Ces derniers peuvent être téléchargés dans les formats FGDB, SQLite et PDF à partir du site de données ouvertes du gouvernement du Québec, plus spécifiquement dans la base de données des lacs et cours d'eau ou encore celle des bassins hydrographiques:

- Bassins hydrographiques multiéchelles du Québec – Jeux de données – Données Québec :
<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/bassins-hydrographiques-multi-echelles-du-quebec>
- Base de données des lacs et cours d'eau – Jeux de données – Données Québec
<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/base-de-donnees-des-lacs-et-cours-d-eau-lce>

Codes des découpages administratifs

Si les codes de municipalités ou de MRC sont utilisés, ils doivent correspondre à ceux que l'on retrouve dans le répertoire des municipalités au <https://www.mamh.gouv.qc.ca/repertoire-des-municipalites/>.

11.1.1.4 Référentiels altimétriques et planimétriques

EM 11.5	Exigence minimale
Référentiels altimétriques et planimétriques	Le mandataire ou le délégataire devra se conformer aux référentiels altimétriques et planimétriques déterminés par le MELCCFP afin d'assurer une cohérence cartographique sur l'ensemble du territoire.

L'utilisation d'un système de référence approprié est indispensable afin d'intégrer correctement les données géospatiales. Ainsi, toutes les données produites, telles que les levés topographiques et bathymétriques, ainsi que toutes les données matricielles et vectorielles obtenues devront être identifiées à l'aide des références géodésiques et altimétriques présentées au tableau 11.5.

Toutes les données géospatiales, ainsi que leurs intrants (levés LiDAR et levés bathymétriques), devront être projetées dans le système de coordonnées planes du Québec selon le fuseau correspondant du système de projection Mercator transverse modifiée (MTM) du territoire à l'étude. Lorsque le territoire d'étude couvre deux fuseaux, il faut privilégier la projection dans le fuseau où se situe la plus grande partie du territoire. Le fuseau dans lequel ont été projetées les données devra clairement être identifié dans les métadonnées.

Tableau 11.5 : Spécifications relatives aux références altimétriques et planimétriques des données géospatiales

Éléments	Spécifications
Système de référence géodésique	Nord-Américain de 1983 (NAD83) du Système canadien de référence spatiale (SCRS)
Système de référence altimétrique	Système canadien de référence altimétrique de 1928 (CGVD28) et déterminé avec le modèle hybride du géoïde HTv2.0 époque 1997,0
Projection cartographique	Système de coordonnées planes du Québec (SCOPQ), numéro de fuseau du système de projection Mercator transverse modifiée (MTM)

11.1.2 Acquisition des données géospatiales

Les données géospatiales générées pour un mandat de détermination et de cartographie des ZI et ZM doivent être adéquatement documentées et assemblées selon le format des gabarits fournis par le MELCCFP et dont l'arborescence du référentiel de données est présentée à l'annexe 7.

11.1.2.1 Acquisition de données terrain

Jaugeages, relevés des lignes d'eau, relevés bathymétriques et relevés des infrastructures

EM 11.6	Exigence minimale
Description et structure des données acquises sur le terrain	<p>Le mandataire ou le délégué devra se conformer à la description et à la structure des fichiers de données brutes, telles que : 1) les jaugeages; 2) les relevés des lignes d'eau; 3) les relevés bathymétriques; 4) les relevés des infrastructures (p. ex., pont).</p> <p>Pour chacun de ces relevés, des photos ou des vidéos peuvent être demandées. Ces relevés doivent respecter les gabarits fournis par le MELCCFP et être regroupés par bassin versant.</p>

Les gabarits pour la collecte de données brutes sont fournis pour les jaugeages, les relevés des lignes d'eau, les relevés bathymétriques et les relevés des infrastructures, tous au format SHP. Pour des informations plus détaillées sur la description et la structure des données recueillies sur le terrain, le mandataire ou le délégué devra se référer aux documents descriptifs fournis par le MELCCFP et dont l'arborescence du référentiel de données est présentée à l'annexe 7.

LiDAR terrestre et topobathymétrie

EM 11.7	Exigence minimale
Description et structure des données LiDAR terrestre et topobathymétrie	<p>Le mandataire ou le délégué devra se conformer à la description et à la structure des fichiers de données LiDAR terrestre et topobathymétrie fournis par le ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF).</p>

Lorsque de nouvelles acquisitions de données LiDAR sont nécessaires, le mandataire ou le délégué doit se conformer aux exigences spécifiées dans le devis d'acquisition LiDAR le plus récent émis par le MRNF et disponible sur demande à l'adresse courriel Info-DGIG@mrfn.gouv.qc.ca.

11.1.3 Traitement des données géospatiales

Le traitement des données qui serviront à la production du MNT est laissé à l'expertise du mandataire ou du délégataire. Il est cependant exigé que le MNT soit produit à l'aide de données topographiques à haute résolution, telles que le LiDAR et la photogrammétrie, et que la classe eau soit validée.

Une séquence de traitement est proposée au schéma 11.1, afin de produire un MNT répondant aux exigences minimales.

11.1.3.1 Production du MNT

EM 11.8	Exigence minimale
Modèle numérique de terrain (MNT)	Le mandataire ou le délégataire devra produire un MNT utilisant des données topographiques à haute résolution (LiDAR, photogrammétrie).

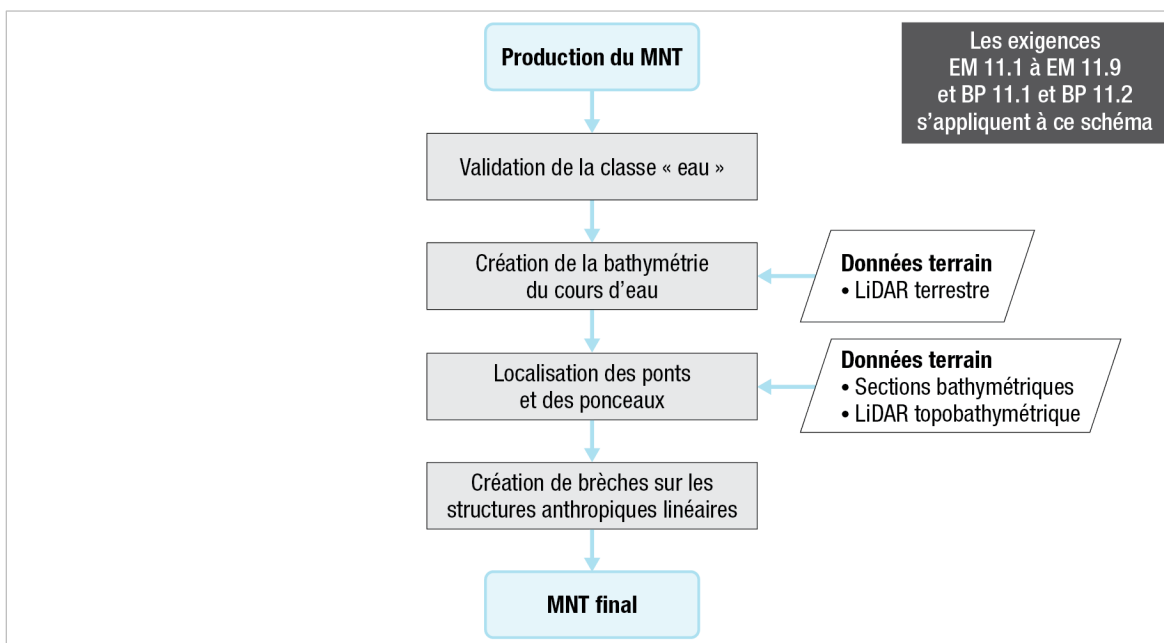


Schéma 11.1 : Séquence de traitements recommandée pour produire le MNT

Validation de la classe « eau »

EM 11.9	Exigence minimale
Validation de la classe « eau »	Le mandataire ou le délégataire devra valider les points LiDAR qui se trouvent à la surface de l'eau et classer au besoin dans la classe « eau ».

Le MNT doit être créé à partir de données LiDAR conformes aux normes minimales du MRNF. Cependant, une attention particulière doit être portée aux classes 2 et 9 issues de ces normes. Les données LiDAR topographiques et bathymétriques sont classées comme il est montré au tableau suivant.

Tableau 11.6 : Classification des données LiDAR

Classe	Signification
0	Points jamais classifiés (lignes transversales et points à l'extérieur du territoire d'intervention)
1	Points non classifiés à l'intérieur du territoire d'intervention
2	Sol
6	Bâtiments
7	Bruit (Points trop bas)
9	Surface de l'eau (provenant du lidar proche infrarouge)
17	Pont et tablier (points qui ne seront pas inclus au MNT)
18	Bruit (Points trop hauts)
40	Fond bathymétrique
41	Surface de l'eau (provenant du lidar vert)
42	Surface de l'eau synthétique (Bit de classification synthétique activé)
43	Objets submergés
45	Colonne d'eau

Classe 1 « Points non classifiés à l'intérieur du territoire d'intervention »

Tous les points non classifiés ainsi que les points excédant l'angle de balayage permis doit se retrouver dans la classe 1 « Points non classifiés à l'intérieur du territoire d'intervention ».

Classe 6 « Bâtiments »

Tous les points correspondants à une construction permanente d'une superficie de plus de dix (10) m² comportant un toit et des murs doivent être classifiés dans la classe 6 « Bâtiments ». Les éléments suivants sont des exemples de structures qui devraient être classées dans la classe « Bâtiments » : maison, usine, entrepôt, commerce, bâtiment agricole, abris permanents, garage, stationnement à étage, silo, grand réservoir couvert. Tous les points correspondants à la toiture principale, la toiture permanente des galeries, terrasses et annexes adjacentes touchant la structure principale, ainsi que les murs sont considérés comme faisant partie du bâtiment et doivent être classés

ainsi. Les points correspondants aux terrasses et aux galeries (autres que leur toiture permanente correspondante, si existante) ne doivent pas être classifiés dans la classe « Bâtiments ». Les points correspondant à des antennes ou des mâts de drapeaux au-dessus ou sur les côtés des bâtiments ne doivent pas être classifiés dans la classe « Bâtiments ».

Le tableau suivant dresse une liste non exhaustive des objets et structures qui ne doivent pas être classifiés comme bâtiments.

Tableau 11.7 : Liste non exhaustive des objets et structures à ne pas classifier comme bâtiments

Exemples d'objets ou structures à <u>ne pas</u> classifier comme bâtiments
Pont
Véhicule de transport (Autobus, train, remorque, avion, bateaux)
Conteneur à cargo
Haie de cèdres
Empilement de matériaux
Quai
Balle de foin
Cabanon de moins de 10 m ²

Classes 9 et 41 « Surface de l'eau »

Tous les points correspondant à la surface de l'eau de rivières et étendues d'eau respectant les tailles minimales demandées doivent être classifiés dans la classe 9 « Surface de l'eau » pour les points provenant du laser proche infrarouge et dans la classe 41 « Surface de l'eau » pour les points provenant du laser vert. Les tailles minimales demandées sont les suivantes : une superficie supérieure à 10 000 m² pour les surfaces d'eau et une largeur de plus de 30 m pour les cours d'eau. La classification « eau » doit refléter le niveau d'eau directement observé lors de l'acquisition de données. La classification de cette classe doit également être basée directement sur la géométrie du nuage de points. Elle ne doit pas être dérivée d'une donnée auxiliaire de moins bonne précision comme une représentation vectorielle de la surface d'un lac ou d'une rivière, par exemple.

Classe 45 « Colonne d'eau »

La classe 45 représente les points de la colonne d'eau compris entre le fond bathymétrique et la surface de l'eau.

Classes 2 et 40 « Sol » et « Fond bathymétrique »

Dans la classe 2 « sol », les points au sol identifiés comme points clés pour le modèle numérique du terrain doivent être identifiés par l'entremise du bit de classification 1 de Key-points (flag)

Ils doivent contenir les données du signal (retours singuliers et derniers retours) après élimination des points qui ont une différence d'élévation de moins de 25 centimètres, et ce, dans un rayon d'un mètre.

Notez que les points au sol identifiés à la classe 2 « Sol » et 40 « Fond bathymétrique » doivent être de vrais points de sol. Pour s'assurer que ces critères sont respectés, le prestataire de services devra les valider, par exemple, en s'assurant que les modèles numériques de terrain en relief ombré (MNT ombré) ou avec le réseau de triangles irréguliers (TIN) ne représentent pas d'artéfacts et suivent bien le relief du terrain. La transition entre la bathymétrie et la topographie doit être homogène et cohérente.

Les délimitations entre le milieu aquatique et terrestre doivent être utilisées qu'à titre indicatif : elles ne doivent pas être considérées catégoriquement en tant que lignes de rupture (breaklines). Cette transition entre la bathymétrie et la topographie ne s'avère pas toujours franche. Pour certaines zones (bandes riveraines), le sol peut s'avérer être une combinaison de points de fond bathymétrique et de points de sol topographiques.

En effet, les données LiDAR ne sont pas parfaitement classifiées comme « eau » correspondant à la classe 9. Seuls les points répondant aux normes minimales imposées par le MRNF sont inclus dans cette catégorie. Par conséquent, il est essentiel de vérifier attentivement les points situés en surface de l'eau qui pourraient avoir été classés par erreur dans la catégorie « sol » et qui devraient être réaffectés à la catégorie « eau » le cas échéant.

Les données LiDAR situées à la surface de l'eau doivent être catégorisées dans la classe « eau » pour les sections du cours d'eau où une bathymétrie doit être produite. Cette étape facilitera la sélection des données LiDAR appropriées en vue de la création du MNT qui intégrera la bathymétrie du cours d'eau.

Création de la bathymétrie du cours d'eau

EM 11.10	Exigence minimale
Création de la bathymétrie du cours d'eau	Le mandataire ou le délégataire devra produire la bathymétrie du cours d'eau. Cette dernière présentera la réalité sur le terrain.

Les données bathymétriques peuvent être acquises à l'aide de trois méthodes : par LiDAR topobathymétrique, par échosondeur en couvrant le secteur d'intérêt ou par des relevés de sections bathymétriques localisées à des endroits stratégiques. La bathymétrie des endroits sans information peut être interpolée à partir des secteurs pour lesquels l'information est disponible.

Localisation et correction du MNT au niveau des ponts et des ponceaux

BP 11.1	Bonne pratique
Localisation des ponts et ponceaux	Le mandataire ou le délégataire pourra localiser les ponts et les ponceaux qui croisent les cours d'eau et les affluents et corriger l'élévation afin de permettre la circulation de l'eau de la zone d'étude selon le principe d'hydroconnectivité.

Lors de l'acquisition des données LiDAR, les structures comme les ponts et les ponceaux peuvent ne pas être représentées correctement. Le processus de « bréçage » de ponts et de ponceaux consiste à corriger les données d'élévation afin de refléter de manière cohérente la circulation de l'eau à travers ces structures lors de la création du MNT.

11.1.3.2 Traitement des incertitudes

BP 11.2	Bonne pratique
Traitement des incertitudes	Le mandataire ou le délégataire pourra fournir la source d'incertitude des données produites pour ensuite la qualifier et la quantifier afin de déterminer les implications et les limitations qu'elle aura sur le livrable cartographique.

À toutes les étapes d'acquisition et de sélection des données, le mandataire ou le délégataire devrait tenir compte de l'exactitude, et donc de l'incertitude, ainsi que de la précision afin de pouvoir les quantifier (p. ex., les inclure dans les métadonnées, dans un champ de données d'une table attributive et dans un rapport technique).

12. Conclusion

Le présent document expose le fondement technique et scientifique qui permet de traiter l'ensemble des données requises pour produire la cartographie des ZI et des ZM à des fins d'aménagement du territoire. Il constitue le premier ouvrage officiel du MELCCFP depuis la première version du *Guide d'interprétation de la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables* paru en 1998.

Il fournit aux ingénieurs et aux professionnels du domaine les principes phares, les schémas de réalisation de la démarche scientifique ainsi que les exigences méthodologiques minimales et les éléments de bonne pratique dans la collecte, la préparation et le traitement des données et des informations requises pour procéder à cartographies des ZI et des ZM. Le présent document sera évolutif. Les mises à jour permettront de capter les avancées scientifiques, notamment celles reliées à l'hydraulique hivernale et aux zones à prédisposition d'embâcles de glace. Elles viendront également élargir la portée des thématiques couvertes, notamment par l'ajout des aléas d'érosion/submersion des secteurs maritimes qui ne sont pas couverts dans cette première mouture du guide.

Le volume suivant (**volet cartographie réglementaire**) présente la manière dont ces données seront traitées pour produire la cartographie de l'intensité des aléas d'inondation et de mobilité qui étayeront l'application réglementaire.

Références bibliographiques

INONDABILITÉ

- ALBERTI-DUFORT, A., et R. DESJARDINS (2022). *Guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022*, Québec, ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, 40 p. Disponible au <https://cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/guide-atlas-hydroclimatique-2022.pdf>
- ANCTIL, F., N. MARTEL et V. D. HOANG (1998). « Analyse régionale des crues journalières de la province de Québec », *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 25, n° 2, p. 360-369.
- ANCTIL, F., J. ROUSSELLE et N. LAUZON (2012). *Hydrologie : Cheminements de l'eau*, Presses internationales Polytechnique, 418 p.
- BALL, J., et COLLAB. (2019). *Australian Rainfall and Runoff : A Guide to Flood Estimation*, Commonwealth of Australia (Geoscience Australia), 294 p.
- BELTAOS, S. (1983). « River Ice Jams: Theory, Case Studies, and Applications », *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 109, n° 10, p. 1338-1359.
- BIZHANIMANZAR, M., G. RONDEAU-GENESSE et L. P. CARON (2021a). *Analyse statistique des inondations conjointes aux exutoires des rivières visées par les travaux d'INFO-Crue dans le tronçon maritime du Saint-Laurent dans le contexte de changements climatiques*, rapport présenté à la Direction de l'expertise hydrique du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 55 p. + annexe.
- BIZHANIMANZAR, M., G. RONDEAU-GENESSE et L. P. CARON (2021b). *Analyse statistique des inondations conjointes aux exutoires des rivières visées par les travaux d'INFO-Crue dans le tronçon maritime du Saint-Laurent dans le contexte de changements climatiques – LOT2*, rapport présenté à la Direction de l'expertise hydrique du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 67 p. + annexe.
- BIZHANIMANZAR, M., G. RONDEAU-GENESSE et L. P. CARON (2022). *Analyse statistique des inondations conjointes aux exutoires des rivières visées par les travaux d'INFO-Crue dans le contexte des changements climatiques*, rapport présenté à la Direction principale des prévisions hydriques et de la cartographie du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, 2^e livrable du LOT3, 31 p. + annexe.
- BRL INGÉNIERIE (2014). *Étude de dangers du système de protection du val de Briare contre les inondations de la Loire*, France, rapport d'étude.
- CEREMA (2018). *Étude de dangers de système d'endiguement – Concepts et principes de réalisation des études*, France.
- CEREMA (2019). *Guide international sur les digues « The International Levee Handbook (2013) »*, France, 1485 p.

- CHEN, J, R. ARSENAULT, F. P. BRISSETTE et G. S. ZHANG (2021). « Climate Change Impact Studies: Should We Bias Correct Climate Model Outputs or Post-Process Impact Model Outputs? », *Water Resources Research*, vol. 57, n° 5, article e2020WR028638.
- DE MUNCK, S., et COLLAB. (2017). « River predisposition to ice jams: a simplified geospatial model », *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 17, n° 7, p. 1033-1045.
- ENGLAND, J. F., et COLLAB. (2018). « Guidelines for Determining Flood Flow Frequency–Bulletin 17C » (ver. 1.1, May 2019), US Geological Survey Techniques and Methods, Book 4, *Hydrologic Analysis and Interpretation*, Chap. B5, United States Department of the Interior, United States Geological Survey, 148 p.
- FEMA (2019). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping, Dams/Reservoirs and Non-Dam Features*, Federal Emergency Management Agency. Disponible au [https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-02/Dams Reservoirs and Non Dam Features Guidance Nov 2019.pdf](https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-02/Dams_Reservoirs_and_Non_Dam_Features_Guidance_Nov_2019.pdf).
- FEMA (2021). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping – Levees*, Guidance document No 95, Federal Emergency Management Agency, 155 p.
- FEMA (2022). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping: Combined Coastal and Riverine Floodplain*, Combined Coastal and Riverine Floodplain, Guidance Document No. 32, Federal Emergency Management Agency, 6 p.
- GOVERNEMENT DU CANADA (2019). *Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables* (version 1.0), Ressources naturelles Canada et Sécurité publique Canada, Produit d'information générale 113f, 87 p.
- GOVERNEMENT DU QUÉBEC (2018). *Lignes directrices pour la cartographie des zones inondables et des risques associés aux inondations* (document de référence) (version 1.0).
- GOVERNEMENT DU QUÉBEC (2021). *Lignes directrices pour la cartographie des zones inondables et des risques associés aux inondations* (document de référence) (version 1.1).
- GOVERNEMENT DU QUÉBEC (2022). *Guide de réalisation du diagnostic initial des ouvrages de protection contre les inondations* (document de référence), 40 p.
- GOVERNMENT OF ALBERTA (2021). *A new approach to mapping floodways in Alberta*, Alberta. Disponible au <https://open.alberta.ca/publications/new-approach-mapping-floodways-in-alberta>.
- GOVERNMENT OF ALBERTA (2022). *Flood Hazard Identification Program Flood Study Technical Guidelines*, Alberta Environment and Parks River Engineering and Technical Services.
- JAMES, T. S., C. ROBIN, J. A. HENTON et M. CRAYMER (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*, Open File, vol. 8764, n° 10.4095, p. 327878.

- LACHANCE-CLOUTIER, S., R. TURCOTTE et J.-F. CYR (2018). « Combining streamflow observations and hydrologic simulations for the retrospective estimation of daily streamflow for ungauged rivers in southern Quebec (Canada) », *Journal of Hydrology*, vol. 550, p. 294-306.
- LADOUCEUR, J.-R. (2021). *Détermination des cotes de crues en présence de glace sur la rivière Chaudière*, Mémoire (M. Sc.), Université Laval, 182 p.
- MAILHOT, A., et COLLAB. (2018). « Assessing the potential impacts of dam operation on daily flow at ungauged river reaches », *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 18, p. 156-167.
- MAILHOT, A., S. BOLDUC, G. TALBOT et P. VAITTINADA AYAR (2023). *Estimation des débits de crues de petits bassins versants dans le cadre du projet INFO-Crue*, rapport final, Québec, Institut national de la recherche scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, 208 p.
- MDELCC (2015). *Détermination des zones inondables par une approche combinée : rivière de la Fourche, municipalités d'Armagh et de Notre-Dame-Auxiliatrice-de-Buckland*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 83 p.
- MELCC (2020). *Calcul des facteurs de pointe à différentes stations hydrométriques du Québec*, Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, rapport technique de la Direction de l'expertise hydrique et atmosphérique, 10 p. et annexe.
- MELCCFP (2024). *Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022 – Rapport technique*, rapport technique de la Direction de l'hydrologie et de l'hydraulique, 76 p. et annexes.
- MEYLAN, P., A.-C. FAVRE et A. MUSY (2008). *Hydrologie fréquentielle : une science prédictive*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Ingénierie de l'environnement, 184 p.
- MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE (2019). « Décret PPRI – Modalités d'application du décret No 2019-715 du 5 juillet 2019, relatif aux plans de prévention des risques concernant les aléas débordement de cours d'eau et submersion marine », France.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE (2012). « Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en œuvre de la phase "cartographie" de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation », Légifrance. Disponible au <https://www.legifrance.gouv.fr/circulaire/id/35706>.
- MORSE, B., ET B. TURCOTTE (2018). *Risque d'inondations par embâcles de glaces et estimation des débits hivernaux dans un contexte de changements climatiques (Volet A)*, rapport soumis à Ouranos, 79 p. Disponible au https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-07/proj-201419-ge-morse_rapportfinal.pdf.
- MSP (2022). *Guide de documentation des inondations – aux fins de l'appel d'offres public. Annexe 4 : Les délaissés naturels et leur interprétation*, Québec, ministère de la Sécurité publique, Direction générale de la prévention et de la planification, Sous-ministériat de la sécurité civile et de la sécurité incendie, 11 p.

- NICOLET, R., et COLLAB. (1997). *Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages*, Rapport, Sécurité publique Canada.
- ONTARIO MINISTRY OF NATURAL RESSOURCES (2002). *Technical Guide – River and Stream Systems: Flooding Hazard Limit*, 88 p. + 6 annexes.
- OUARDA, T. B. M. J., H. GINGRAS, B. BOBÉE et M. LEMONIER (2001). *Synthèse des méthodes simples de régionalisation*, rapport de recherche n° R-600, Chaire Hydro-Québec/CRSNG/A1can en Hydrologie Statistique, Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau, 65 p.
- OUARDA, T. B. M. J., A. ST-HILAIRE et B. BOBÉE (2008). « Synthèse des développements récents en analyse régionale des extrêmes hydrologiques », *Revue des sciences de l'eau*, vol. 21, n° 2, p. 219232.
- POIRIER, C., GODIN, D., DUBÉ, S. (2024). Synthetic hydrographs valuing the hydroclimatic variability for reliable reservoir flood routing analysis. Canadian Dam Association (CDA) Annual Conference. September 22-25, 2024, Niagara, ON.
- SERINALDI, F., et C. G. KILSBY (2015). « Stationarity is undead: Uncertainty dominates the distribution of extremes », *Advances in Water Resources*, vol. 77, p. 17-36.
- TURCOTTE, B. ET B. MORSE (2013). *Ice jam mitigation at the St. Félicien Zoo*, CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, 17th Workshop on River Ice, Edmonton, Alberta, July 21-24, 2013.
- TURCOTTE, B., et B. MORSE (2013). « A global river ice classification model », *Journal of Hydrology*, vol. 507, p. 134-148. TUTHILL, A. M., et J. H. LEVER (2006). *Design of Breakup Ice Control Structures*, Cold Regions Research and Engineering Laboratory – ERDC/CRREL TR-06-7, US Army Corps of Engineers, 31 p.
- WU, W., ET COLLAB. (2023). Beyond engineering: A review of reservoir management through the lens of wickedness, competing objectives and uncertainty, *Journal of the International Environmental Modelling & Software Society*, Volume 167, September 2023, 105777, Elsevier. Beyond engineering: A review of reservoir management through the lens of wickedness, competing objectives and uncertainty - ScienceDirect.

MOBILITÉ

- ALABYAN, A. M. et R. S. CHALOV (1998). « Types of river channel patterns and their natural controls », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 23, n° 5, p. 467-474.
- ALBERTI-DUFORT, A., et R. DESJARDINS (2022). *Guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022*, Québec, ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, 40 p. Disponible au <https://cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/guide-atlas-hydroclimatique-2022.pdf>.
- ALBERTI-DUFORT, A., et COLLAB. OURANOS (2022). « Québec », chapitre 2 dans F.J. Warren, N. Lulham, D. L. Dupuis et D. S. Lemmen (éd.) *Le Canada dans un climat en changement : Le rapport sur les perspectives régionales*, Ottawa, gouvernement du Canada.

- ASHMORE, P., et M. CHURCH (2001). *The impact of climate change on rivers and river processes in Canada*, Ottawa, Geological Survey of Canada Bulletin 555, 58 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). (2024). ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data, Edition 2, Version 2. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 81(3), A1-A26.
- BAGNOLD, R. A. (1966). *An approach to the sediment transport problem from general physics*, US Government Printing Office, Geological Survey, Prof. paper.
- BAKER, V. R. (1994). « Geomorphological understanding of floods », *Geomorphology*, vol. 10, n° 1-4, p. 139-156.
- BAKER, V. R. (2008). « Paleoflood hydrology: Origin, progress, prospects », *Geomorphology*, vol. 101, n° 1-2, p. 1-13.
- BALLAIS, J. L., S. CHAVE, V. DELORME et C. ESPOSITO (2011). « Le lit majeur exceptionnel : premier bilan », *Revue Géographique de l'Est*, vol. 51, no 3-4.
- BÉRUBÉ, J., et M. BOIVIN (2021). *Étude hydrogéomorphologique d'un cours d'eau influencé par des barrages de castor (Castor canadensis) et analyses des contraintes migratoires pour le saumon atlantique (Salmo salar) dans la rivière Ouella*, rapport de recherche présenté à l'Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR), Laboratoire d'expertise et de recherche en géographie appliquée de l'Université du Québec à Chicoutimi, 83 p. et annexes.
- BESNARD, C. (2016). *Application et développement de l'approche hydrogéomorphologique aux plaines alluviales du Québec méridional*, Mémoire (M. Sc.), Université du Québec à Rimouski, 216 p.
- BIRON, P. M., et COLLAB. (2014). « Freedom space for rivers: a sustainable approach to enhance river resilience », *Environmental Management*, vol. 54, n° 5, p. 1056-1073.
- BIRON, P. M., et COLLAB. (2013). *Espace de liberté : un cadre de gestion intégrée pour la conservation des cours d'eau dans un contexte de changements climatiques*, rapport d'Ouranos no 510014-101, 125 p.
- BOYER, C., et A. G. ROY (2014). *Intégration des données spatiales et temporelles pour une gestion optimale des berges dans un contexte de changements environnementaux*, Ouranos, 72 p.
- BROOKES, A. B. (1987). « River channel adjustments downstream from channelisation works in England and Wales », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 12, n° 4, p. 337-351.
- BUFFIN-BÉLANGER, T. (2018). *Hydrogéomorphologie et analyse des dynamiques fluviales*, présentation au Rendez-vous des OBV.
- BUFFIN-BÉLANGER, T., et COLLAB. (2015a). « Freedom space for rivers: an economically viable river management concept in a changing climate », *Geomorphology*, vol. 251, p. 137-148.

- BUFFIN-BÉLANGER, T., S. DEMERS et T. OLSEN (2015b). *Diagnostic hydrogéomorphologique pour mieux considérer les dynamiques hydrosédimentaires aux droits des traverses de cours d'eau : guide méthodologique*, Laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale, Université du Québec à Rimouski, 55 p. Disponible au <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1168356.pdf>.
- BUFFIN-BÉLANGER, T., S. DEMERS et A. MONTANÉ (2017). « Hydrogeomorphology: Recognition and evolution of the flood phenomenon », *Floods*, vol. 1, p. 167-191.
- BUFFIN-BÉLANGER, T., LACHAPELLE, F., P. BIRON et M. BOIVIN (2024). Trajectoires et visées de l'hydrogéomorphologie au Québec. *Canadian Geographies / Géographies canadiennes*, 68(2), 196-211. <https://doi.org/10.1111/cag.12893>.
- CEREMA (2020). *Ruissellement sur l'Arc Méditerranéen – Application de la méthode ExZEco*, France, Notice du 25 mai 2020, 4 p.
- CHONÉ, G. (2013). *L'espace de mobilité des rivières du sud du Québec : implications pour les écosystèmes et la gestion des rivières dans une perspective de changements climatiques*, mémoire (M. Sc.), Université Concordia, 125 p.
- CHURCH, M. (2002). « Geomorphic thresholds in riverine landscapes », *Freshwater Biology*, vol. 47, n° 4, p. 541-557.
- CONGALTON, R. G., & GREEN, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. CRC press.
- COSTA, J. E. (1983). « Paleohydraulic reconstruction of flash-flood peaks from boulder deposits in the Colorado Front Range », *Geological Society of America Bulletin*, vol. 94, n° 8, p. 986-1004.
- CROKE, J., K. FRYIRS et C. THOMPSON (2016). « Defining the floodplain in hydrologically-variable settings: implications for flood risk management », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 41, n° 14, p. 2153-2164.
- DAWDY, D. R., J. C. HILL et K. C. HANSON (1989). « Implementation of FEMA guidelines on alluvial fans », dans *Hydraulic Engineering* (p. 64-69), ASCE.
- DEMERS, S., S. MASSÉ et C. BESNARD (2018). *La représentation cartographique des processus hydrogéomorphologiques : cinq initiatives pour une meilleure gestion des aléas fluviaux au Québec*, Université du Québec à Rimouski, Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale, rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, 64 p.
- DEMERS, S., S. MASSÉ et T. BUFFIN-BÉLANGER (2017). *Cartographie des aléas fluviaux de la rivière Coaticook : diagnostic, méthodologie et recommandations*, Université du Québec à Rimouski, Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale, rapport remis à la MRC de Coaticook et au ministère de la Sécurité publique du Québec, 39 p.

- DEMERS, S., et COLLAB. (2014). « L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid : l'exemple de la rivière Matane (Québec) », *Physio-Géo*, vol. 8, p. 67-88.
- DUFOUR, S., et H. PIÉGAY (2009). « From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits », *River Research and Applications*, vol. 25, n° 5, p. 568-581.
- EATON, B. C., R. G. MILLAR et S. DAVIDSON (2010). « Channel patterns: braided, anabranching, and single-thread », *Geomorphology*, vol. 120, n° 3, p. 353-364.
- FRYIRS, K. A., G. J. BRIERLEY, N. J. PRESTON et M. KASAI (2007). Buffers, barriers and blankets: the (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades », *Catena*, vol. 70, n° 1, p. 49-67.
- GILBERT, J. T., W. W. MACFARLANE et J. M. WHEATON (2016). « The Valley Bottom Extraction Tool (V-BET): A GIS tool for delineating valley bottoms across entire drainage networks », *Computers & Geosciences*, vol. 97, p. 1-14.
- GOVERNEMENT DU QUÉBEC (2022). *Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement (REAFIE) – Loi sur la qualité de l'environnement – Cahier explicatif – Le REAFIE : interventions en milieux humides et hydriques*, Québec, ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. Disponible au <https://www.environnement.gouv.qc.ca/lqe/autorisations/reafie/fiches/cahier-explicatif-reafie-milieux-humides-hydriques.pdf>.
- GUAY, C., M. MINVILLE et M. BRAUN (2015). « A global portrait of hydrological changes at the 2050 horizon for the province of Québec », *Canadian Water Resources Journal*, vol. 40, n° 3, p. 285-302.
- GURNELL, A. M., DOWNWARD, S. R., & JONES, R. (1994). Channel planform change on the River Dee meanders, 1876–1992. *Regulated Rivers: Research & Management*, 9(4), 187-204.
- HUGGETT, R. J. (2003). *Fundamentals of Geomorphology*, Routledge, London, 386 p.
- HUGHES, M. L., MCDOWELL, P. F., & MARCUS, W. A. (2006). Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, 74(1-4), 1-16.
- JARRET, R. D., et J. J. F. ENGLAND (2002). « Reliability of paleostage indicators for paleoflood studies. Dans : Ancient floods, modern hazards: principles and applications of paleoflood hydrology », *Water Science and Application Series*, vol. 5, p. 91-109.
- JOBIN, A., et COLLAB. (2021). *Cartographie des écosystèmes côtiers du Québec maritime – Rapport méthodologique*, Université du Québec à Rimouski, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Chaire de recherche en géoscience côtière, rapport remis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 74 p.
- KLINE, M., et B. CAHOON (2010). « Protecting river corridors in Vermont ». *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 46, n° 2, p. 227-236.

- KLINE, M., et K. DOLAN (2008). *River Corridor Protection Guide: Fluvial Geomorphic-Based Methodology to Reduce Flood Hazards and Protect Water Quality*, Vermont Agency of Natural Resources, Waterbury, 23 p.
- LASTRA, J., E. FERNÁNDEZ, A. DÍEZ-HERRERO et J. MARQUÍNEZ (2008). « Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: an example in the Northern Iberian Peninsula », *Natural Hazards*, vol. 45, n° 2, p. 277-293.
- LEA, D. M., & LEGLEITER, C. J. (2016). Refining measurements of lateral channel movement from image time series by quantifying spatial variations in registration error. *Geomorphology*, 258, 11-20.
- LEOPOLD, L., M. G. WOLMAN et J. P. MILLER (1964). *Fluvial processes in geomorphology*, San Francisco, W.H. Freeman Co., 522 p.
- LEOPOLD, L. B., et M. G. Wolman (1957). « River channel patterns: braided, meandering and straight », *Geological Survey Professional Paper 282-B*, p. 39-85.
- MALAVOI, J. R., et COLLAB. (1998). *Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau*, Guide technique n° 2, SDAGE RMC.
- MALTAIS, M. (2021). *Développement de connaissances et d'outils pour l'analyse et la gestion des aléas hydrogéomorphologiques (HGM2). Volet 2 : Cartographie des aléas hydrogéomorphologiques*, rapport final présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec, 80 p.
- MALTAIS, M. et T. BUFFIN-BÉLANGER (2023). *Application d'une grille de caractérisation terrain des zones de mobilité - Fiches de caractérisation*. Rapport déposé au MELCCFP dans le cadre de l'entente 380681644, Université du Québec à Rimouski.
- MASSÉ, S., et COLLAB. (2020). « Development of a mapping approach encompassing most fluvial processes: Lessons learned from the freedom space for rivers concept in Quebec (Canada) », *River Research and Applications*, vol. 36, no 6, p. 947-959.
- McPHERSON, J. G., S. SHANMUGAM et R. J. MOIOLA (1987). « Fan-deltas and braid deltas: varieties of coarse-grained deltas », *Geological Society of America Bulletin*, vol. 99., n° 3, p. 331-340.
- MDDELCC (2018). *Guide des bonnes pratiques en matière de détermination de zones inondables*, 1^{re} édition (V1.0), à l'intention des MRC et des municipalités, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 70 p.
- MDDELCC (2015). *Détermination des zones inondables par une approche combinée – Rivière de la Fourche, Municipalités d'Armagh et de Notre-Dame-Auxiliatrice-de-Buckland*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction de l'expertise hydrique, DEH 4132-0231-05-1401. 87 p. et 7 annexes.
- MONTGOMERY, D. R. (1999). « Process domains and the river continuum », *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 35, n° 2, p. 397-410.

- MRC BROME-MISSISQUOI (2020). *Règlement de remplacement 04-0520 remplaçant le Règlement 02-0120 modifiant le Règlement de contrôle intérimaire 06-1117 visant à établir le cadre normatif relié à la cartographie des aléas fluviaux dans le périmètre urbain de la Ville de Sutton*, 28 p.
- NAGEL, D. E., et COLLAB. (2014). *A landscape scale valley confinement algorithm: Delineating unconfined valley bottoms for geomorphic, aquatic, and riparian applications*, General Technical Report, RMRS-GTR-321, Fort Collins, CO : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 42 p.
- NANSON, G. C., et J. C. CROKE (1992). « A genetic classification of floodplains », *Geomorphology*, vol. 4, n° 6, p. 459-486.
- OLSON, P. L., et COLLAB. (2014). *A Methodology for Delineating Planning-Level Channel Migration Zones*, Publication No. 14-06025, Washington, Department of Ecology, 71 p.
- PARISH GEOMORPHIC (2004). *Belt Width Delineation Procedures*, Report 98-023 submitted to the Toronto and Region Conservation Authority, 68 p. + annexes.
- PARKER, C., C. R. THORNE et N. J. CLIFFORD (2015). « Development of STREAM: A reach-based stream power balance approach for predicting alluvial river channel adjustment », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 40, n° 3, p. 403-413.
- PASKOFF, R. (2010). *Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution*, Armand Colin, 264 p.
- PIÉGAY, H., M. CUAZ, E. JAVELLE et P. MANDIER (1997). « Bank erosion management based on geomorphological, ecological and economic criteria on the Galaure River, France », *Regulated Rivers: Research & Management: An International Journal Devoted to River Research and Management*, vol. 13, n° 5, p. 433-448.
- PIÉGAY, H., S. E. DARBY, E. MOSSELMAN et N. SURIAN (2005). « A review of techniques for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion », *River Research and Applications*, vol. 21, p. 773-789.
- POULIOT, L-G., BOIVIN, M. et S. DEMERS (2024). *Guide québécois d'application de l'Indice de Qualité Morphologique (IQM) des cours d'eau*. Firme Rivières et Laboratoire d'expertise et de recherche en géographie appliquée. LERGA-UQAC. 96 pages et annexes.
- RAPP, C. F., et T. B. ABBE (2003). *A framework for delineating channel migration zones*, Ecology Publication no. 03-06-027, Washington State Department of Ecology and Department of Transportation, Olympia, WA, 66 p.
- RHOADES, E. L., O'NEAL, M. A., & PIZZUTO, J. E. (2009). Quantifying bank erosion on the South River from 1937 to 2005, and its importance in assessing Hg contamination. *Applied Geography*, 29(1), 125-134.
- RINALDI, M., et COLLAB. (2016). *Guidebook for the evaluation of stream morphological conditions by the Morphological Quality Index (MQI)*, Université de Florence, 187 p.

- ROSGEN, D. L. (1994). « A classification of natural rivers », *Catena*, vol. 22, n° 3, p. 169-199.
- SCHUMM, S. A. (1985). « Patterns of alluvial rivers », *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 13, p. 5-27.
- SCOAZEC, C. (2019). *Développement d'un indice préliminaire pour l'évaluation des processus sédimentaires appliqué à la gestion des traverses de cours d'eau, en Gaspésie, au Québec*, rapport de stage pour l'obtention de la première année de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 31 p.
- SEAR, D. A., M. D. NEWSON et A. BROOKES (1995). « Sediment-related river maintenance: The role of fluvial geomorphology », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 20, n° 7, p. 629-647.
- SHOLTES, J. S., S. E. YOCHUM, J. A. SCOTT et B. P. BLEDSHOE (2018). « Longitudinal variability of geomorphic response to floods », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 43, n° 15, p. 3099-3113.
- SHRESTHA, S., et COLLAB. (2020). « Multimodelling approach to the assessment of climate change impacts on hydrology and river morphology in the Chindwin River Basin, Myanmar », *Catena*, vol. 188, article 104464.
- SIDDIQUE, M. R. (2014). « Geological Action of River », présentation multimédia. Disponible au <https://www.slideshare.net/rizsiddique/geological-action-of-river>.
- SLINGERLAND, R., et N. D. SMITH (2004). « River avulsions and their deposits », *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 32, p. 257-285.
- TRUDEL, M., T. BUFFIN-BÉLANGER, A. PRUNEAU et M. MALTAIS (2021). *Cônes alluviaux prioritaires sur le territoire de la MRC de Coaticook : Caractérisation physique et évaluation des mesures de gestion du risque possible*, rapport préliminaire présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec.
- VAN DEN BERG, J. H. (1995). « Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers », *Geomorphology*, vol. 12, n° 4, p. 259-279.
- VANR (2008). *Vermont River Corridor Protection Guide – Technical Appendix*, Vermont Agency of Natural Resources, River Management Program.
- VIN-DESLAURIERS, J. (2024) Acquisition de connaissances sur la dynamique hydrogéomorphologique de la rivière à Mars pour la restauration des habitats fluviaux. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi).
- YOCHUM, S. E., J. S. SHOLTES, J. A. SCOTT et B. P. BLEDSOE (2017). « Stream power framework for predicting geomorphic change: The 2013 Colorado Front Range Flood », *Geomorphology*, vol. 292, p. 178-192.

*Environnement,
Lutte contre
les changements
climatiques,
Faune et Parcs*

Québec 