

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Les inondations causées par la glace de rivière : un aperçu des mesures d'atténuation

Barrette, Paul; Ghobrial, Tadros; Kolerski, Tomasz

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

Publisher's version / Version de l'éditeur:

<https://doi.org/10.4224/40003538>

Rapport technique (Conseil national de recherches du Canada. Génie océanique, côtier et fluvial); n° NRC-OCRE-2025-TRQ-028F, 2025-07

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=161dd614-1a45-4f09-ab67-d0533d701b4b>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=161dd614-1a45-4f09-ab67-d0533d701b4b>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at

PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

CNRC-NRC

Les inondations causées par la glace de rivière : Un aperçu des mesures d'atténuation

NRC-OCRE-2025-TRQ-028F

Préparé pour :
Logement, Infrastructures et Collectivités Canada (LICC)
Dans le cadre de :
Initiative sur l'environnement bâti résilient aux changements climatiques
(IEBRCC) du CNRC

Auteurs :
Paul Barrette, Ph. D.
Conseil national de recherches du Canada (Ottawa)

Tadros Ghobrial, Ph. D., ing.
Université Laval (Québec)

Tomasz Kolerski, Ph. D.
Gdańsk University of Technology (Pologne)

Juillet 2025



National Research
Council Canada

Conseil national de
recherches Canada

Canada

Suggestion de format pour la référence :

Barrette P., Ghobrial T. et Kolerski T. (2025) *Les inondations causées par la glace de rivière : Un aperçu des mesures d'atténuation*. NRC-OCRE-2025-TRQ-028F, Conseil national de recherches du Canada (Ottawa), 27 p.

© (2025) Sa Majesté le Roi du chef du Canada,
représenté par le Conseil national de recherches du Canada.
N° de cat. : NR16-477/2025F-PDF
ISBN 978-0-660-78257-7

CNRC.CANADA.CA   

Résumé

Dans les pays où les rivières gèlent en hiver, la glace peut provoquer des inondations majeures le long des berges. Ce phénomène se produit parce que la présence de glace réduit le débit de la rivière, ce qui fait monter le niveau de l'eau en amont. Plus le dessous du couvert de glace est rugueux, plus l'augmentation du niveau de l'eau en amont est importante. Les embâcles de glace présentent le plus grand potentiel d'inondation, puisqu'un empilement de fragments de glace peut obstruer le chenal et réduire encore plus l'écoulement de l'eau. Les débâcles peuvent également causer des inondations en aval de l'endroit où l'embâcle s'est formé.

Un ouvrage de protection contre les glaces est un moyen couramment utilisé pour réduire le risque d'inondation. Ces ouvrages peuvent être *amovibles*, comme les estacades, les déversoirs et les filets, ou *fixes*, comme les déversoirs permanents, les piles et les murs de protection contre les inondations. Les travaux de terrassement constituent une troisième option, qui est plus complexe. Ils comprennent la modification des chenaux, les îles artificielles, les épis et les digues. On peut également recourir à des moyens de nature non structurale pour réduire le risque d'inondation, notamment en stimulant la formation d'un couvert de glace avec une surface inférieure lisse ou en favorisant la rupture du couvert de glace (à l'aide de techniques de déglacage, de découpage ou de fonte, d'un traitement de la surface ou d'affluents chauds). On peut aussi déblayer les embâcles pour minimiser le risque d'inondation.

Il est possible d'évaluer la résilience d'un site face aux inondations provoquées par la glace. Pour ce faire, il faut d'abord comprendre l'état général de la rivière à cet endroit et déterminer si elle est en mesure de résister à des montées du niveau de l'eau. Qu'est-ce qui est en place actuellement, ou qui peut facilement être mis en œuvre pour anticiper une inondation ? On peut effectuer cette évaluation dans une perspective à court terme (de quelques jours à quelques semaines) et à long terme, afin d'évaluer les répercussions des changements climatiques au cours des décennies à venir.

Table des matières

Résumé	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	vi
Introduction.....	1
1.1. Contexte	1
1.2. Objectifs	1
1.3. Méthodes, portée et public cible	2
2. Pourquoi et comment la glace de rivière cause des inondations.....	2
2.1. Élévation du niveau de l'eau dans des conditions d'eaux libres.....	3
2.2. Élévation du niveau de l'eau attribuable à la présence de glace	3
2.2.1. Formation d'un couvert de glace uniforme	3
2.2.2. Frasil.....	4
2.2.3. Formation d'un embâcle	4
2.3. Élévation du niveau de l'eau <i>durant la débâcle</i>	5
2.4. Types d'embâcles et période de l'année.....	6
2.5. Ce qu'on peut faire pour contrer les inondations causées par la glace de rivière	6
3. Ouvrages de protection contre les glaces.....	6
3.1. Ouvrages amovibles	7
3.1.1. Estacades.....	7
3.1.2. Estacades immergeables	8
3.1.3. Ouvrages longitudinaux	8
3.1.4. Déversoirs saisonniers	9
3.1.5. Piles et filets	10
3.2. Ouvrages fixes	10
3.2.1. Déversoirs	10
3.2.2. Déversoirs avec colonnes	11
3.2.3. Piles et blocs rocheux	12
3.2.4. Murs de protection contre les inondations	13
3.3. Travaux de terrassement	13
3.3.1. Modifications du chenal.....	13
3.3.2. Îles artificielles	13
3.3.3. Épis	14
3.3.4. Digue	14
4. Mesures de contrôle non structurales	15
4.1. Contrôler la formation d'un couvert de glace	15
4.1.1. Contrôler le débit de l'eau	15
4.1.2. Formation d'un pont de glace.....	16
4.2. Faciliter la rupture d'un couvert de glace	16
4.2.1. Affaiblissement d'un couvert de glace.....	16
Excavatrices	16
Découpage de la glace	17
Brise-glaces.....	17
Charges verticales.....	17

Perforation	17
Dynamitage	17
4.2.2. Traitement de surface	18
4.2.3. Affluents chauds	18
4.3. Rompre ou déblayer un embâcle	18
5. Évaluation de la résilience d'un site contre les inondations causées par la glace	19
5.1. Informations générales	19
5.2. Résilience aux inondations	19
5.2.1. Inondations historiques	19
5.2.2. Gestion des terres	19
5.2.3. Mesures de contrôle structurales et non structurales	20
5.2.4. Protection des bâtiments	20
5.3. Prévion des inondations	20
5.3.1. Comment la prévion des inondations fonctionne-t-elle ?	20
5.3.2. Différence entre les prévions des inondations en <i>eaux libres</i> et des inondations causées par la <i>glace de rivière</i>	20
5.3.3. Préparatifs et alertes	20
5.4. Changements climatiques	21
5.4.1. Impact sur la glace de rivière	22
5.4.2. Conséquences pour les mesures de protection contre les glaces	22
6. Conclusion	22
7. Remerciements	23
8. Références bibliographiques	24
9. Pour de plus amples renseignements	26
9.1. Glace de rivière	26
9.2. Mesures de protection contre les glaces	26
9.3. Impact des changements climatiques	26
9.4. Sources particulières	26

Liste des figures

Figure 1 : Pour prévoir l'étendue d'une inondation à un endroit donné le long d'une rivière, il faut d'abord procéder à un exercice de modélisation hydrologique qui génère un débit d'eau. Ce débit, ainsi que la morphologie du chenal, est introduit dans un modèle hydraulique, qui établit ensuite le niveau de l'eau en fonction de la présence de la glace.	2
Figure 2 : a) La formation d'un couvert de glace uniforme peut se produire lorsque la glace de rive s'étend des berges vers le centre du chenal. b) Des courants plus forts entraînent une rupture du couvert de glace, ce qui provoque un empilement à un endroit donné le long d'une rivière, susceptible de former un embâcle, parfois d'une épaisseur considérable.	3
Figure 3 : Comparaison entre les niveaux d'eau en amont dans les scénarios suivants : A) sans glace (saison des eaux libres), B) lorsque le couvert de glace en aval est uniforme et lisse et C) lorsque la glace rompue en aval forme un embâcle, qui peut devenir très épais.	4
Figure 4 : En haut) Exemple d'un embâcle, dans ce cas constitué d'un empilement épais de fragments de glace – voir Figure 3 A, B et C. En bas) Débâcle, avec la décharge de glace et la vague de débâcle qui y est associée. Échelle verticale exagérée.	5
Figure 5. Déploiement typique d'une estacade, un assemblage linéaire de pontons cylindriques. Adaptation de Perham [7] et Morse [5].	8
Figure 6. Lignes de surface déployées dans le sens du courant pour stimuler la croissance de la glace et promouvoir la formation d'un couvert de glace à l'endroit souhaité. Adaptation de Calkins [15], qui présente cette option comme un concept réalisable.	9
Figure 7 : Exemple de déversoir saisonnier (illustration inspirée de celle dans Tuthill [10]). Ce concept a été mis à l'essai pendant deux hivers. Le déversoir est conçu pour favoriser l'accumulation de frasil et la formation d'un barrage. Après la fonte des glaces au printemps, l'ouvrage peut être retiré.	9
Figure 8 : Deux ouvrages ont été mis à l'essai dans un laboratoire. À gauche : Une estacade fixée à deux piles, avec un filet en dessous. À droite : Des filets entre des piles. Les deux ouvrages sont destinés à retenir les décharges de glace. Tiré de Morse [24], avec l'autorisation de l'éditeur.	10
Figure 9 : Exemple d'un déversoir. (Source)	11
Figure 10 : L'ouvrage de Sartignan au Québec. (Source)	11
Figure 11: Représentation schématique d'un déversoir sur la rivière Chaudière, au Québec. Adaptation de Michel [27] et Perham [16].	12
Figure 12 : Piles en béton et blocs rocheux dans le chenal principal, avec un chenal secondaire qui permet à l'eau de contourner la structure. Adaptation de Tuthill and White [28] et de Tuthill and Lever [29].	12
Figure 13 : Deux catégories générales de murs de protection contre les inondations. À gauche : Type T. À droite : Type I.	13
Figure 14 : Schéma de la coupe transversale de l'une des trois îles artificielles construites dans le fleuve Saint-Laurent en 1980. Ce type d'ouvrage constitue un point d'ancrage pour la glace, stabilisant ainsi l'ensemble du couvert de glace. Adaptation de Perham [16].	14
Figure 15 : Les épis sont des ouvrages de terrassement artificiels qui s'étendent à partir des berges, parfois deux par deux, comme c'est le cas ici. Adaptation de Burrell [30].	14
Figure 16 : Une digue est un ouvrage de terrassement surélevé qui longe une rivière.	15
Figure 17 : La formation d'un pont de glace consiste à découper une étendue de glace de rive et à la laisser dériver jusqu'à ce qu'elle bloque le chenal. Adaptation de Haehnel [31].	16
Figure 18 : Un Amphibex sur les berges de la rivière Rideau à Ottawa. (Photo : CNRC)	17
Figure 19 : Une plaque située à proximité des berges de la rivière Rideau à Ottawa, à la mémoire de trois travailleurs tués lors d'opérations de dynamitage de la glace (Photo : CNRC).	18
Figure 20 : Trois stades d'anticipation, chacun utilisant un modèle approprié. Adaptation de Hicks [36].	21

Introduction

1.1. Contexte

Dans les pays où les rivières gèlent en hiver, la glace peut provoquer des inondations majeures le long des berges. Ces événements sont plus complexes et moins prévisibles que les inondations en eaux libres (pendant les saisons plus chaudes). Ils peuvent également survenir plus rapidement et entraîner plus de dégâts pour une même hausse du niveau de l'eau que les inondations en l'absence de glace (en eau libre). Au cours des dernières décennies, nos collectivités ont élaboré des mesures pour lutter contre ces événements. Toutefois, des inondations attribuables à la glace se produisent encore, notamment dans les cas où aucune mesure n'a été prise pour les éviter ou lorsque les mesures en place ne sont pas suffisantes.

Pour réduire les risques, on recourt à des ouvrages de protection contre les glaces. Certains sont saisonniers, étant déployés à l'automne et retirés au printemps, tandis que d'autres sont fixes, c'est-à-dire permanents. Les barrages, les déversoirs et les estacades en sont des exemples. Il existe de nombreux ouvrages de ce type au Canada, aux États-Unis, en Europe et ailleurs. Ils permettent d'atténuer les inondations et peuvent même les prévenir. Ils le font de trois façons (certains peuvent avoir plus d'une fonction) :

- En contribuant à la formation d'un couvert de glace uniforme et stable. Ce facteur est important, car le résultat contraire, soit un couvert de glace épaisse et rugueuse, est la principale cause de l'élévation des niveaux d'eau.
- En retenant la glace rompue qui se déplace vers l'aval avec le courant de l'eau.
- En limitant la quantité d'eau qui déborde du chenal.

Les moyens utilisés pour réduire les risques d'inondation peuvent également être de nature non structurale. Il peut s'agir, par exemple, de techniques de déglacage, de découpage ou de fonte des glaces, ou encore du contrôle de la quantité d'eau qui traverse un barrage hydroélectrique. Les coûts d'investissement initiaux sont moins élevés que ceux des ouvrages permanents. En revanche, ils exigent par la suite un niveau considérable de ressources humaines pour leur mise en œuvre. Bien qu'ils ne soient pas aussi efficaces que les ouvrages de protection contre les glaces, ils sont utilisés à plusieurs endroits pour renforcer la performance de ces ouvrages.

L'inondation des rives est un processus naturel qui a toujours eu lieu, indépendamment de la présence humaine. Toutefois, c'est justement l'activité humaine qui est à l'origine des changements climatiques, lesquels ont un impact majeur sur l'écologie, sur notre environnement et sur les processus naturels tels que la dynamique des glaces. Il nous incombe donc d'évaluer objectivement l'étendue de cet impact sur les populations et les infrastructures riveraines.

1.2. Objectifs

Le présent rapport a trois objectifs :

- Passer en revue les processus glaciaires qui provoquent les inondations des berges des rivières.
- Résumer les informations disponibles dans la littérature scientifique et d'ingénierie sur les mesures existantes et potentielles visant à remédier aux inondations des berges attribuables à la glace de rivière.
- Présenter les conséquences des changements climatiques sur la dynamique de la glace de rivière.

1.3. Méthodes, portée et public cible

Le dépouillement d'ouvrages spécialisés a été effectué dans la base de données interne du CNRC sur la glace de rivière, dans Scopus¹ et par l'entremise de moteurs de recherche Internet (Google, Bing). La documentation porte sur les cinq dernières décennies. Elle a été triée, examinée et synthétisée pour en arriver au présent document, lequel rassemble les éléments nécessaires à une compréhension générale du sujet. On ne s'est donc pas attardé aux détails reliés à la conception, à la construction et à l'entretien des différentes options, ou aux aspects financiers. Ces sujets dépassent le cadre de ce rapport. On n'a pas non plus abordé les ouvrages de protection contre les glaces reliés à la navigation [ex., 1, 2].

Ce rapport a été rédigé à l'intention d'un public ayant peu ou pas d'expertise dans le domaine de la glace de rivière. Il vise à sensibiliser le lectorat quant aux mesures qui sont prises pour contrôler la dynamique des glaces dans les rivières, et quant aux principaux facteurs dont il faut tenir compte pour atténuer les risques d'inondation. Les références indiquées dans le texte et les sources recommandées (section 0) renvoient à des informations supplémentaires.

2. Pourquoi et comment la glace de rivière cause des inondations

Les inondations le long des berges constituent un phénomène qui se produit tout au long de l'année. Le lieu et la période de l'année où ces inondations ont lieu dépendent de nombreux facteurs, liés principalement aux conditions climatiques (précipitations, température, etc.) et aux caractéristiques du chenal (configuration, géomorphologie, etc.). Chaque zone inondable doit être traitée au cas par cas. Les « modèles hydrologiques », qui simulent des processus tels que les précipitations, le ruissellement, l'évaporation, l'infiltration et la circulation des eaux souterraines, convertissent ces données en un « débit », soit un volume d'eau par unité de temps qui s'écoule dans le chenal de la rivière. Par définition, il y a inondation lorsque le débit entraîne un niveau d'eau supérieur à celui des berges, ce qui provoque un débordement de l'eau au-delà du chenal défini.

Dans le cas des inondations causées par des conditions de glace (en hiver), en plus des modèles hydrologiques, des « modèles hydrauliques » sont nécessaires pour capter les effets de la glace elle-même sur le niveau de l'eau (Figure 1).

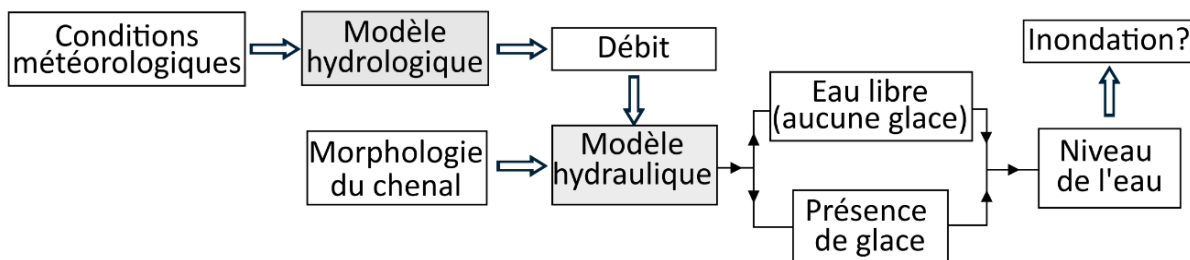


Figure 1 : Pour prévoir l'étendue d'une inondation à un endroit donné le long d'une rivière, il faut d'abord procéder à un exercice de modélisation hydrologique qui génère un débit d'eau. Ce débit, ainsi que la morphologie du chenal, est introduit dans un modèle hydraulique, qui établit ensuite le niveau de l'eau en fonction de la présence de la glace.

¹ Scopus est une plateforme de recherche bibliographique accessible par abonnement, et produite par la maison d'édition académique Elsevier. Cette base de données contient un grand nombre de revues, de livres et d'actes de conférences.

2.1. Élévation du niveau de l'eau dans des conditions d'eaux libres

Dans les eaux libres (lorsqu'il n'y a pas de glace), les inondations se produisent à des endroits où le chenal de la rivière est incapable d'accueillir un volume d'eau supérieur à la normale. C'est souvent le cas après de fortes pluies. Les zones inondées, parfois appelées « plaines inondables », sont souvent plates et de faible élévation. Dans les régions à forte densité de population, ces zones représentent souvent des sites d'une valeur immobilière considérable.

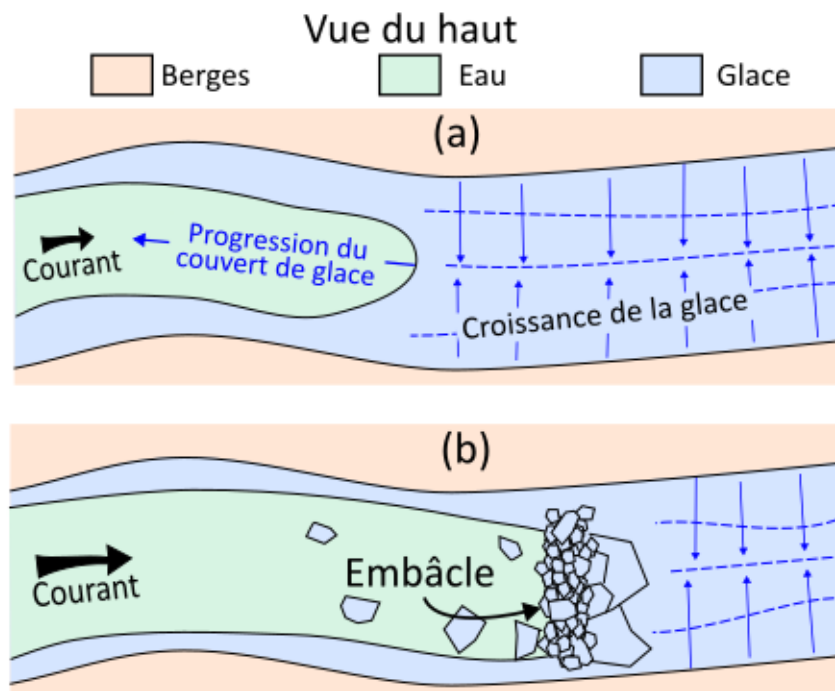
2.2. Élévation du niveau de l'eau attribuable à la présence de glace

En hiver, la présence de glace rend la situation encore plus complexe. En effet, lorsqu'il y a un couvert de glace, l'interface entre l'eau et la surface inférieure de la glace représente une nouvelle et importante source de friction pour l'écoulement de l'eau (qui s'ajoute à la friction le long du lit de la rivière et des berges). Plus l'interface est *rugueuse*, comme c'est le cas quand elle est constituée de blocs de glace, plus la *friction* est élevée. Par conséquent, le courant ralentit, ce qui entraîne une augmentation du niveau de l'eau en amont. Lorsque ce « remous », tel qu'on le désigne en ingénierie, excède ce que peut retenir le chenal, c'est alors qu'il y a inondation. Il est à noter que, à débit égal, le niveau de l'eau en présence de la glace est plus élevé que sans la glace (en eau libre).

2.2.1. Formation d'un couvert de glace uniforme

Dans les endroits où la vitesse du courant est très faible, à proximité des rives et dans les petites baies, la glace se forme à partir de la berge et s'étend vers le centre, comme dans un petit lac. C'est la « glace de rive ». Si ces eaux tranquilles se maintiennent, la glace en bordure de chaque rive se rejoint de manière à former un couvert de glace continue et lisse (Figure 2a). Dans ce cas, la surface inférieure de la glace est relativement lisse, et l'élévation de l'eau en amont (remous) est mineure (Figure 3).

Figure 2 : a) La formation d'un couvert de glace uniforme peut se produire lorsque la glace de rive s'étend des berges vers le centre du chenal. b) Des courants plus forts entraînent une rupture du couvert de glace, ce qui provoque un empilement à un endroit donné le long d'une rivière, susceptible de former un embâcle, parfois d'une épaisseur considérable.



2.2.2. Frasil

Le frasil, un type particulier de glace de rivière, peut également contribuer aux inondations². En général, cette glace est constituée de particules individuelles de la taille d'un millimètre qui se forment sous la surface de l'eau. Ce phénomène se produit lorsque la rivière est moins profonde et lorsque des conditions d'eau libre existent, même par temps très froid, parce que la rivière est agitée (généralement aux endroits où se trouvent des rapides). Le frasil remonte ensuite à la surface pour former des radeaux de glace, lesquels peuvent couvrir toute la surface de la rivière. Il s'agit donc d'une autre manière par laquelle une couche de glace uniforme peut se former. Dans ce cas, la surface inférieure est légèrement plus rugueuse que celle d'un couvert de glace qui se développe à partir des berges (Figure 2a).

2.2.3. Formation d'un embâcle

Lorsque le courant est suffisamment fort (vitesse d'environ 1 m/s ou plus), comme c'est le cas à plusieurs endroits le long de nombreuses rivières, il confiner la glace de rive à la ligne de rivage et poussera vers l'aval les radeaux de glace en dérive, y compris la glace de rive rompue. Cette glace peut entraîner un goulot d'étranglement à un endroit donné, ce qui constitue un « embâcle » (Figure 2b) : une accumulation stationnaire de fragments de glace ou de frasil qui restreint l'écoulement [3]. La glace à la dérive peut alors s'entasser, ce qui a pour effet d'augmenter la rugosité de la surface inférieure de la glace et de faire monter le niveau de l'eau en amont de celle-ci (élévation plus importante que dans le cas d'un couvert de glace uniforme) (Figure 3C). Si ce processus est intense, l'embâcle atteindra une épaisseur considérable, qui obstruera le passage de l'eau sous l'accumulation de glace. Les embâcles présentent donc le plus grand potentiel d'inondation.

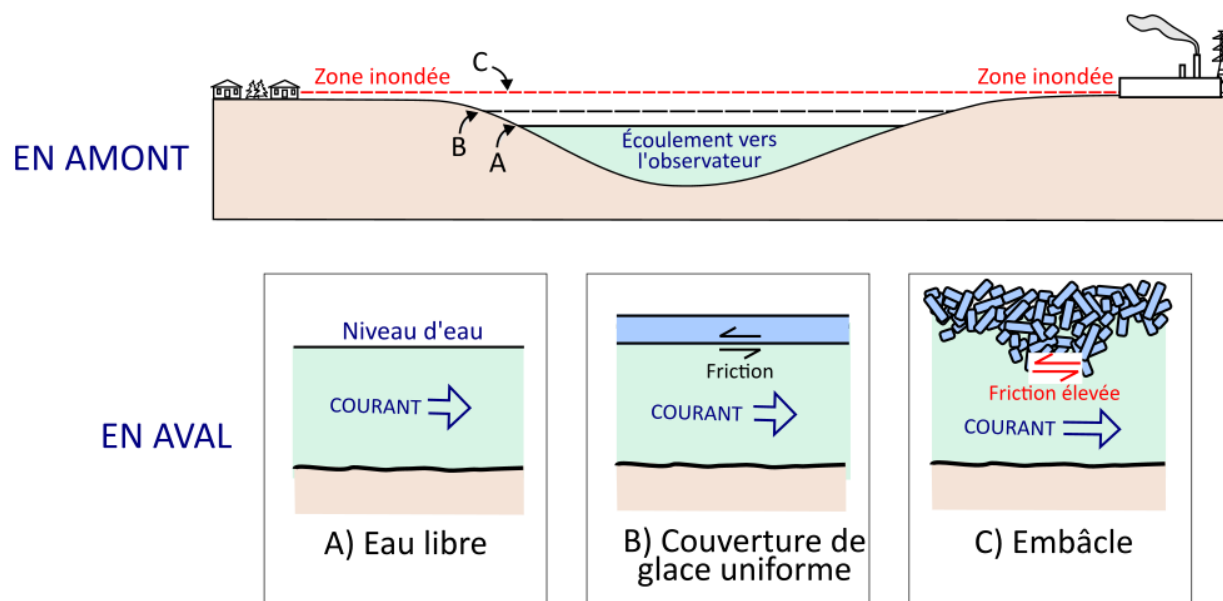


Figure 3 : Comparaison entre les niveaux d'eau en amont dans les scénarios suivants : A) sans glace (saison des eaux libres), B) lorsque le couvert de glace en aval est uniforme et lisse et C) lorsque la glace rompue en aval forme un embâcle, qui peut devenir très épais.

² En plus des risques d'inondation, le frasil représente un risque pour les infrastructures riveraines dont les activités dépendent des prises d'eau (barrages hydroélectriques, stations d'épuration), car il a tendance à réduire l'écoulement.

2.3. Élévation du niveau de l'eau *durant la débâcle*

On a vu précédemment que lorsqu'un embâcle se produit, le niveau de l'eau en amont de l'embâcle monte (remous) et un certain volume d'eau s'accumule derrière l'embâcle. Le volume d'eau dépend de plusieurs facteurs, notamment, le débit, la rugosité de la surface inférieure de la glace, de même que la dimension et la résistance mécanique de l'embâcle. Or, il arrive que cette glace cède sous la poussée exercée par l'eau et la glace en amont. Cela se produit lorsque cette poussée excède la résistance interne de l'embâcle et les forces qui le maintiennent en place. Une grande quantité d'eau et de glace est alors libérée soudainement et se déplace rapidement vers l'aval. Cette « décharge de glace » peut être précédée d'une « vague de débâcle », laquelle provoquera une forte hausse du niveau de l'eau en aval durant son passage. La vitesse de déplacement de cette vague peut être de l'ordre de plusieurs mètres par seconde, avec une élévation du niveau de l'eau de plusieurs décimètres par minute. Les dommages peuvent être les plus graves à proximité du point de débâcle, étant donné l'imprévisibilité de cet événement. Les pertes de vie sont souvent associées à ces circonstances.

Une décharge de glace peut s'arrêter à un point donné, notamment au niveau de certains éléments géomorphologiques, tels que des tournants prononcés ou des îles dans le chenal. Cet événement peut également provoquer des débâcles en série plus loin en aval, suivant un effet de dominos.

Les décharges de glace présentent un risque pour les collectivités riveraines, non seulement en raison de la forte augmentation des niveaux d'eau (et sa rapidité), mais encore en raison des dommages structuraux causés aux propriétés et aux installations riveraines, dommages aggravés par la présence de gros blocs de glace transportés par l'eau.

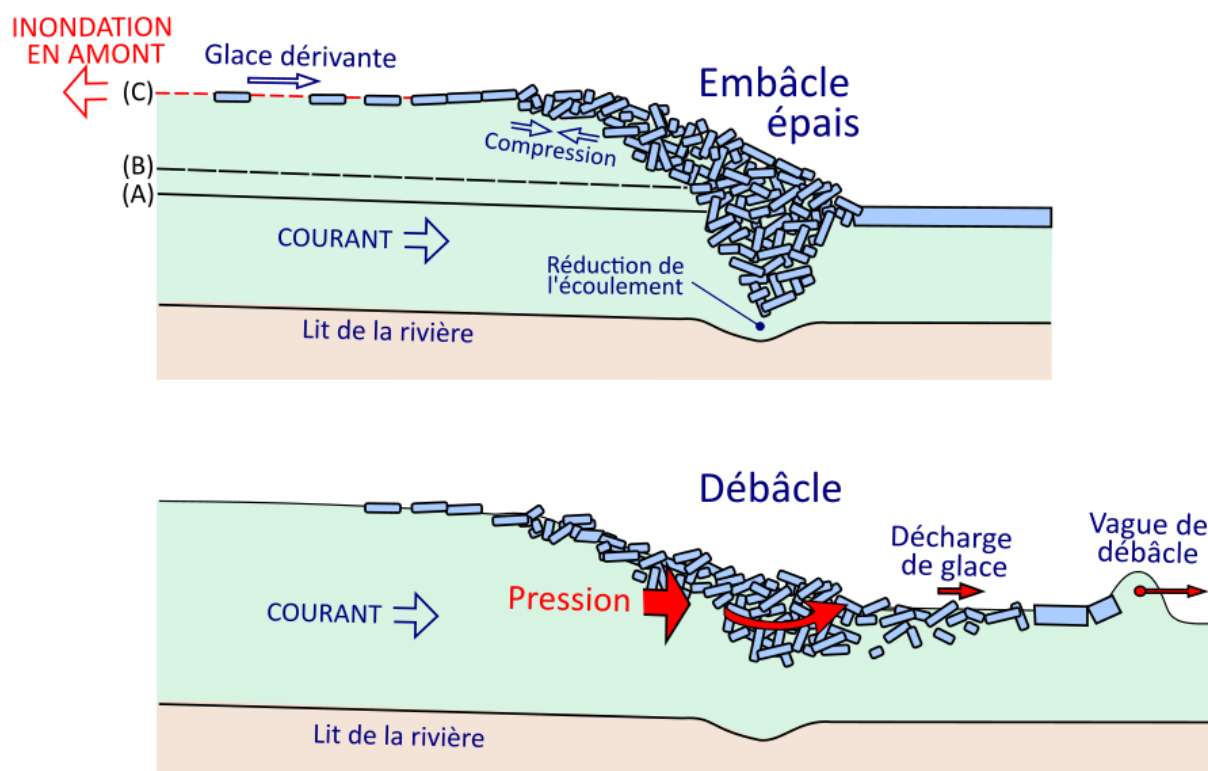


Figure 4 : En haut) Exemple d'un embâcle, dans ce cas constitué d'un empilement épais de fragments de glace – voir Figure 3 A, B et C. En bas) Débâcle, avec la décharge de glace et la vague de débâcle qui y est associée. Échelle verticale exagérée.

2.4. Types d'embâcles et période de l'année

Les inondations causées par la glace sont principalement associées à des embâcles. Ces embâcles peuvent survenir au début de l'hiver, lors du gel de la rivière. Ils sont souvent causés par le frasil. Des embâcles se forment également au printemps, lorsque la rivière passe de conditions glacées à des conditions d'eau libre. Ces embâcles printaniers ont généralement plus de conséquences, en vertu de la quantité de glace qui s'est constituée tout au long de l'hiver. Entre les deux, au milieu de l'hiver, des embâcles sont souvent le résultat d'une hausse de la température accompagnée de pluie.

2.5. Ce qu'on peut faire pour contrer les inondations causées par la glace de rivière

Plusieurs moyens existent pour empêcher la formation d'embâcles et d'en minimiser leur impact une fois formés. Ces moyens sont classés en deux catégories : les mesures *structurales* et les mesures *non structurales*. Les mesures structurales comprennent les barrages, le rehaussement de barrages existants, les réservoirs, les digues, les déversoirs, les estacades, les canaux de dérivation, les piles, etc. Le recours à des mesures structurales peut donner de bons résultats, mais les frais liés à leur conception et à leur mise en œuvre peuvent être élevés. Selon leur nature, elles peuvent également avoir des répercussions importantes sur l'écosystème de la rivière.

Les mesures non structurales comprennent des techniques mécaniques d'affaiblissement de la glace, telles que le dynamitage, le découpage et le cassage de la glace ainsi que le forage de trous. Ces techniques offrent une solution de rechange pratique aux barrières physiques telles que les digues. Bien que ces mesures soient de plus en plus reconnues, leur efficacité réelle pour réduire le risque des inondations par embâcles est incertaine. D'autres mesures non structurales incluent la prévision des inondations par embâcles. Celles-ci peuvent toutes être utilisées de concert avec les mesures structurales.

Ces mesures sont décrites ci-après.

3. Ouvrages de protection contre les glaces

Les ouvrages de protection contre les glaces visent à atténuer les effets de la glace sur les infrastructures riveraines, les inondations étant la principale préoccupation. Pour répondre à cette préoccupation, ces ouvrages ont trois fonctions principales :

- *Contribuer à l'établissement d'un couvert de glace stable avec une surface inférieure relativement plane.* L'ouvrage de protection contre les glaces est situé le long d'une rivière à un endroit où la dynamique des glaces entraînerait autrement un couvert de glace non uniforme qui provoquerait un important remous. On utilise, par exemple, des estacades flottantes qui permettent de retenir la glace à la dérive. Un déversoir est un autre type d'ouvrage de protection, qui permet de faire monter le niveau de l'eau, réduisant ainsi la vitesse du courant. Une élévation du niveau de l'eau peut également neutraliser les eaux libres (notamment des rapides) qui auraient autrement produit du frasil.
- *Retenir les décharges de glace.* L'ouvrage de protection contre les glaces contribuera à la formation d'un embâcle en amont de l'ouvrage. Il est situé à l'endroit où il créera le moins de problèmes, notamment en amont d'une collectivité qui a déjà connu ce type d'inondation. La principale préoccupation, dans ce cas, est la capacité de cet ouvrage à retenir les blocs de glace rompus et à résister aux charges exercées par les morceaux de glace accumulés.
- *Protéger les berges contre l'élévation des niveaux d'eau.* L'ouvrage est construit à la verticale et longe les berges.

La présente section donne un aperçu des ouvrages de protection contre les glaces déployés sur différentes rivières, certains comme prototypes à court terme, d'autres encore au stade de concepts ou testés en laboratoire. Ils sont regroupés en trois catégories :

- Ouvrages amovibles
- Ouvrages fixes
- Travaux de terrassement

3.1. Ouvrages amovibles

Les ouvrages amovibles sont souvent saisonniers, ce qui signifie qu'ils sont généralement déployés à l'automne avant les périodes de gel et retirés au printemps après le dégel, à l'aide d'équipement maritime et terrestre standard (barges, grues, treuils et remorqueurs). Contrairement aux ouvrages permanents, ils n'entravent pas les activités en eau libre, telles que la navigation commerciale et de plaisance, puisqu'on les enlève. Ils sont relativement peu coûteux. De plus, à la différence des ouvrages permanents, qui peuvent provoquer l'affouillement du lit de la rivière et un affaissement des fondations, ils sont plus écologiques et ont un impact minimal sur le débit de l'eau, le déplacement des poissons et le lit de la rivière.

3.1.1. Estacades

Une estacade est constituée de segments flottants attachés bout à bout par des chaînes ou des câbles [4-7] (Figure 5). Il s'agit de la forme la plus courante des ouvrages amovibles. Les segments étaient traditionnellement en bois, puis ils ont évolué vers des éléments en métal avec des rapports diamètre : longueur variant de 1:5 à 1:30 – ces segments sont connus sous le nom de « pontons ». Les estacades remplissent trois fonctions principales :

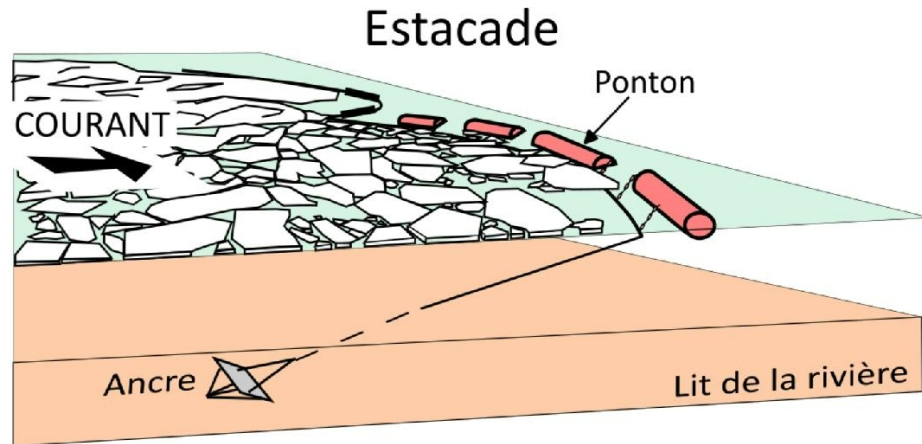
- Empêcher les glaces en dérive de se déplacer vers l'aval, où elles peuvent contribuer à la formation d'embâcles.
- Retenir la glace de manière à permettre la formation d'un couvert de glace en amont pendant la période de gel en automne. Elles contribuent également à maintenir ce couvert en place lors des dégels hivernaux durant l'hiver les années où ça arrive.
- Empêcher les glaces de perturber les prises d'eau des barrages hydroélectriques, la navigation et le fonctionnement des écluses et des barrages.

Les estacades ne sont pas destinées à arrêter les décharges de glace, bien qu'elles puissent être conçues pour s'immerger sous l'action de charges extrême (et ce, afin d'empêcher leur rupture). Elles sont habituellement déployées à des endroits où le courant n'est pas assez fort pour faire passer la glace au-dessous ou au-dessus d'elles, ce qui pourrait être contraire à leur objectif [ex., 8]. Les vitesses de courant doivent être de l'ordre de 0,6 à 1,4 m/s pour utiliser ces structures [4]. Certaines estacades sont utilisées conjointement avec un autre ouvrage dont l'objectif, comme expliqué plus loin, est d'augmenter le niveau de l'eau et de réduire ainsi la vitesse du courant. Leur conception doit tenir compte, entre autres, de la friction de l'eau sous le couvert de glace, de la pente de la ligne d'eau et de l'action éolienne. Le déploiement de ces structures nécessite également une compréhension raisonnable de la façon dont l'accumulation de glace en amont évoluera. Les estacades peuvent s'étendre sur toute la largeur de la rivière ou sur une partie de celle-ci. Elles peuvent être ancrées sur les berges, dans le lit de la rivière ou aux deux endroits. Dans certains cas, elles sont attachées à des ouvrages fixes, tels que des piles.

Une estacade peut se rompre si elle n'est pas conçue pour répondre aux exigences auxquelles elle est exposée [ex., 9]. Des instruments de mesure de la charge peuvent être montés sur ces ouvrages et servir d'indicateurs de la concentration de la glace et de la force du débit.

Une estacade offre plusieurs possibilités en matière de conception, de configuration, d'orientation et de rayon de courbure. Il en va de même pour les câbles d'acier et les systèmes d'ancrage. On doit également tenir compte de la possibilité d'une rupture. Pour parer à cette éventualité, on pourrait, par exemple, incorporer un « maillon faible » dans l'estacade, conçu pour céder avant un câble d'ancrage.

Figure 5.
Déploiement
typique d'une
estacade, un
assemblage
linéaire de pontons
cylindriques.
Adaptation de
Perham [7] et
Morse [5].



Les « estacades en biais » désignent des installations qui servent à orienter la glace, plutôt que de l'arrêter. On les utiliserait dans un scénario de détournement afin de guider la glace autour des barrages et de leurs prises d'eau [1, 10].

3.1.2. Estacades immergeables

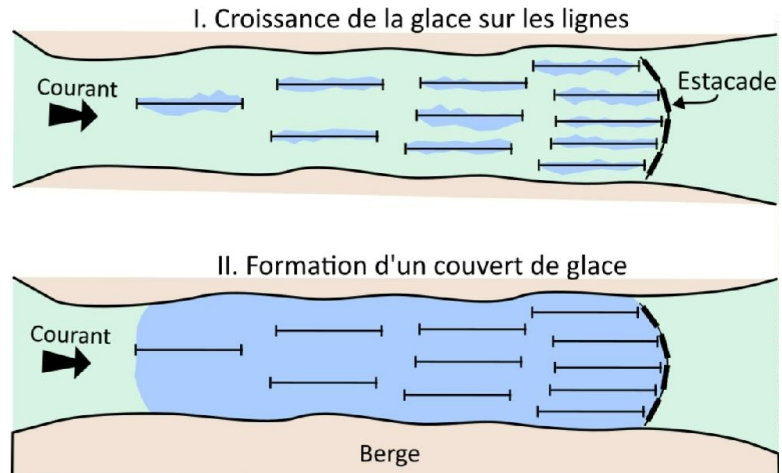
L'un des inconvénients majeurs de l'utilisation des estacades est leur déploiement et leur retrait, qui exigent beaucoup de ressources. Tuthill [11, et travaux antérieurs] évoque un concept d'immersion et de flottaison pour ces ouvrages. Les pontons peuvent être conçus pour être remplis d'eau, ce qui fait couler l'estacade, et ensuite remplis d'air, ce qui la ramène à la surface. Ce concept offre une grande souplesse dans la mesure où le processus d'immersion et de retour à la surface peut être effectué en fonction des besoins. Il a été utilisé au Japon [12, 13]. La section transversale des estacades, de la forme d'une « goutte », les empêche de se retrouver ensevelis par les sédiments au fond de l'eau. Un concept similaire a également été mis à l'essai à certains endroits le long du fleuve Saint-Laurent (Prescott et Lac St-Pierre), où il a donné de bons résultats [14].

3.1.3. Ouvrages longitudinaux

En général, comme nous l'avons vu, on préfère déployer les ouvrages flottants en travers du chenal. Calkins [15] innove avec un concept selon lequel ces ouvrages seraient posés *parallèlement* aux berges. Ils agiraient comme source de croissance de la glace, favorisant ainsi la formation d'un couvert de glace stable (ancrée) plus tôt dans la saison (Figure 6). Comme les estacades sont orientées en direction du courant, elles pourraient être utilisées à des vitesses de courant plus élevées que celles des ouvrages qui traversent les rivières.

Un principe semblable est décrit dans Perham [16]. Ici encore, il s'agit de favoriser le développement d'un couvert de glace. Des ensembles de câbles en nylon, en polypropylène, en polyester ou en métal sont disposés parallèlement au sens du courant. À mesure que le frasil s'accumule sur ces câbles, faisant flotter le cordon, il y a congélation de l'eau entre les câbles. Ce système a été attesté avec succès par Sahlberg [17], puis par Liddiard [18] (mais dont les résultats n'ont pas été concluants).

Figure 6. Lignes de surface déployées dans le sens du courant pour stimuler la croissance de la glace et promouvoir la formation d'un couvert de glace à l'endroit souhaité. Adaptation de Calkins [15], qui présente cette option comme un concept réalisable.

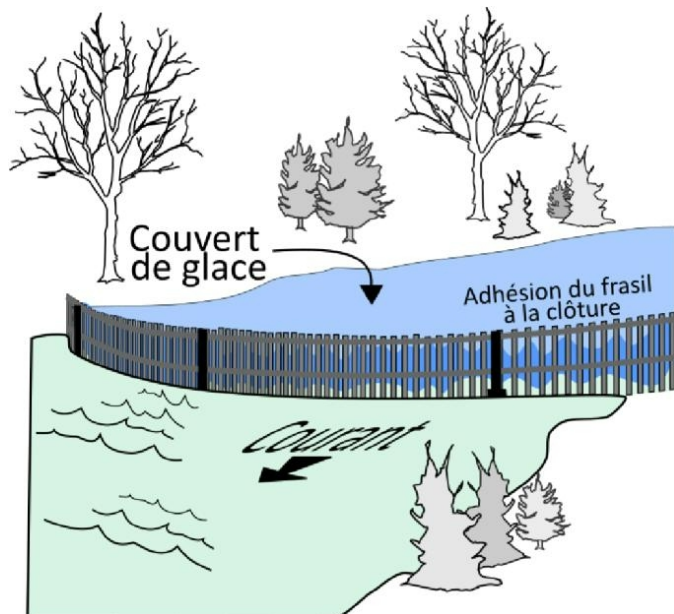


3.1.4. Déversoirs saisonniers

Un « déversoir » est une barrière qui traverse la largeur d'une rivière et dont la hauteur est légèrement supérieure au niveau de l'eau. Il est généralement utilisé pour augmenter le niveau de l'eau afin de réduire la vitesse du courant. Si ces ouvrages sont généralement permanents, ceux dont il est question dans cette section ne le sont pas [10, 11, 19-21].

La clôture flexible décrite initialement par Perham [19] en est un exemple (Figure 7). Elle a fait l'objet d'essais en laboratoire et sur le terrain. La clôture était constituée d'une série de planches orientées verticalement avec un espace entre elles, maintenues par des fils d'acier, ancrés sur les rives. Le principe sous-jacent est que, en cas de production de frasil, cette glace pourrait adhérer et s'accumuler sur la clôture jusqu'à former un barrage. Cette structure permet ainsi l'accumulation d'une certaine quantité d'eau en amont, où un couvert de glace uniforme finirait par se former. Les planches verticales peuvent être remplacées par un grillage métallique [22] ou un tissu imperméable [21, 23], mais sinon, leur conception est très semblable à celle de la Figure 7. Dans ce dernier cas, l'ouvrage a été installé pendant trois hivers, dont un hiver où il a résisté sans dommage à une décharge de glace [19].

Figure 7 : Exemple de déversoir saisonnier (illustration inspirée de celle dans Tuthill [10]). Ce concept a été mis à l'essai pendant deux hivers. Le déversoir est conçu pour favoriser l'accumulation de frasil et la formation d'un barrage. Après la fonte des glaces au printemps, l'ouvrage peut être retiré.



3.1.5. Piles et filets

Ces ouvrages plus légers ont également été utilisés pour contenir les décharges de glace [10]. Un exemple est le filet anti-sous-marin qui retenait des morceaux de glace et agissait ensuite comme une pile, où l'eau s'écoulait autour de la glace. Un autre exemple est celui d'un câble de remontée mécanique pour le ski, auquel sont attachés des pneus et installé chaque hiver à travers la rivière Lamoille dans le Vermont. Morse [24] a mis à l'essai deux concepts dans un laboratoire (Figure 8). Dans un cas, un filet était fixé à une estacade qui traversait le chenal et dans l'autre, un filet était fixé à des piles verticales (sans estacade).



Figure 8 : Deux ouvrages ont été mis à l'essai dans un laboratoire. À gauche : Une estacade fixée à deux piles, avec un filet en dessous. À droite : Des filets entre des piles. Les deux ouvrages sont destinés à retenir les décharges de glace. Tiré de Morse [24], avec l'autorisation de l'éditeur.

3.2. Ouvrages fixes

Les ouvrages fixes sont des installations permanentes. Comme les ouvrages décrits plus haut, ils contribuent à la formation d'un couvert de glace stable, ce qui limite les risques d'augmentation des niveaux d'eau attribuables aux embâcles. Ils peuvent également servir de barrière aux décharges de glace. Toutefois, ils sont coûteux. Ils constituent aussi un problème pour le déplacement des poissons et entravent le mouvement des sédiments – des opérations de dragage périodiques peuvent s'avérer nécessaires. Ils laissent également s'accumuler des débris autres que la glace, qu'il faut nettoyer de temps à autre.

3.2.1. Déversoirs

Un déversoir a pour fonction principale de faire monter le niveau de l'eau en amont. Cet ouvrage peut également retenir la glace en dérive tout en permettant à l'eau de s'écouler au-dessus d'elle (Figure 9). L'augmentation du niveau d'eau réduit la pente de la surface de l'eau en amont et diminue la vitesse du courant, favorisant ainsi le développement d'un couvert de glace stable et atténuant la production de frasil. De plus, l'ouvrage même et le bassin gelé qui se trouve derrière lui sont susceptibles d'absorber les décharges de glace. Les déversoirs permanents sont souvent en béton, mais ils peuvent aussi être construits en pierre ou en bois. Ils sont parfois utilisés de concert avec des estacades.

Tuthill [25] décrit ce que l'on appelle un « barrage gonflable ». Il s'agit d'un système couramment utilisé dans des conditions d'eau libre tout au long de l'année, mais adapté pour contrer les effets de la glace à plusieurs endroits. Il s'agit essentiellement d'un ouvrage cylindrique en caoutchouc installé au-dessus d'un déversoir, et sert à faire varier le niveau de l'eau de plusieurs mètres. En position basse, il peut permettre le passage des eaux de crue et des débris et peut également faciliter le passage des poissons. La glace qui y adhère se détache au moment du gonflage. Ces barrages gonflables peuvent résister à des décharges de glace sans que leur intégrité soit compromise. Ces installations sont toutefois vulnérables aux dommages causés par les débris et les actes de vandalisme. S'ils sont surtout utilisés dans un contexte de production d'électricité, ils peuvent également tenir le rôle d'ouvrage de protection contre les glaces [e.g., 26]. Le plus souvent, ils sont utilisés pour régir les niveaux d'eau.

Figure 9 : Exemple d'un déversoir. ([Source](#))



3.2.2. Déversoirs avec colonnes

Les déversoirs peuvent être combinés à des ouvrages à colonnes, comme l'illustre la Figure 10. Un autre exemple, présenté à la Figure 11, incorpore une grille en amont des colonnes. Dans les deux cas, les ouvrages verticaux peuvent retenir la glace tout en permettant à l'eau de s'écouler par-dessus le déversoir.

Figure 10 :
L'ouvrage de
Sartignan au
Québec. ([Source](#))



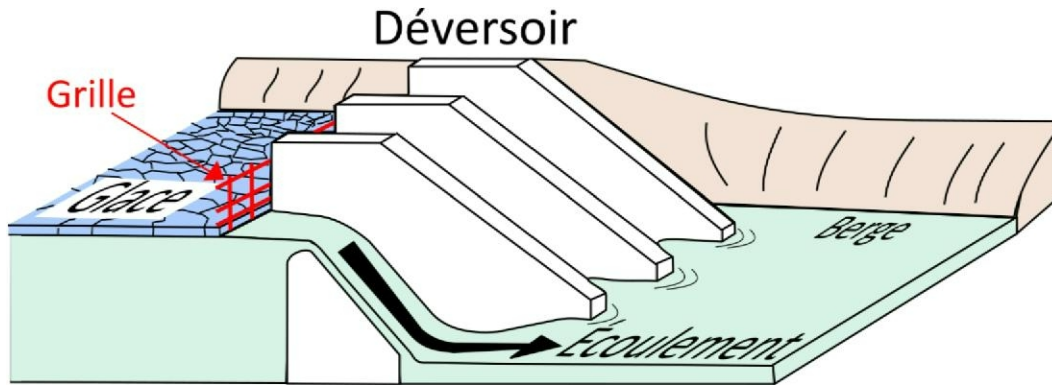


Figure 11: Représentation schématisique d'un déversoir sur la rivière Chaudière, au Québec. Adaptation de Michel [27] et Perham [16].

3.2.3. Piles et blocs rocheux

Des piles, des blocs rocheux et d'autres constructions qui s'étendent à la verticale sont utilisés par endroits pour retenir la glace tout en permettant à l'eau de se faufiler autour de l'ouvrage (Figure 12). Ils peuvent prendre la forme de piles, de pierres préformées, de caissons en bois remplis de roches ou d'autres ouvrages en béton adaptés sur mesure. Dans certains cas, ils peuvent être conçus pour diriger la glace vers le fond de l'eau, pour que sa charge soit transférée au lit de la rivière. Ils peuvent être creusés dans le lit de la rivière ou installés au-dessus d'un déversoir. Le déversoir peut retenir assez d'eau pour permettre la formation d'un couvert de glace stable ou pour stocker la glace dérivant depuis l'amont, alors que les piles peuvent agir comme barrière de rétention pour une décharge de glace.

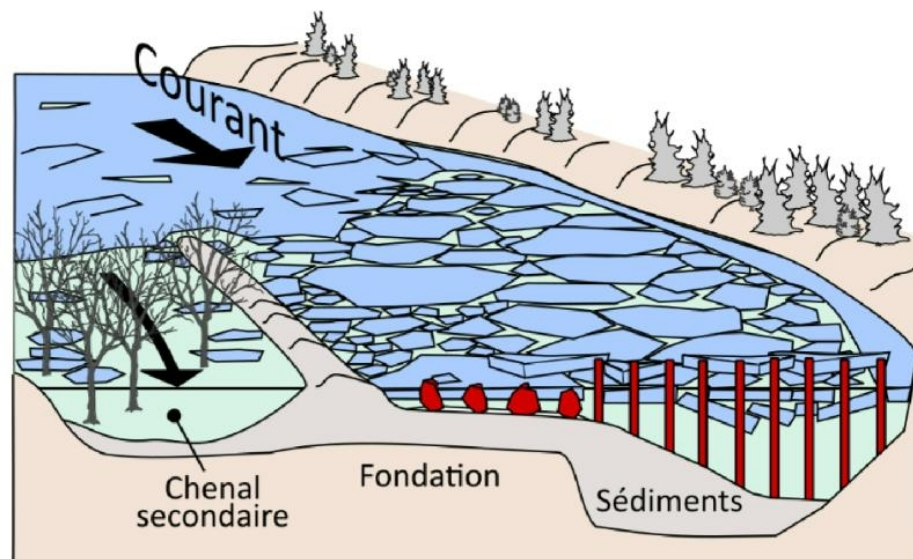


Figure 12 : Piles en béton et blocs rocheux dans le chenal principal, avec un chenal secondaire qui permet à l'eau de contourner la structure. Adaptation de Tuthill and White [28] et de Tuthill and Lever [29].

3.2.4. Murs de protection contre les inondations

Les murs de protection contre les inondations sont des ouvrages destinés à limiter les dommages aux propriétés riveraines attribuables aux inondations (Figure 13). Si ces ouvrages sont habituellement conçus pour les eaux libres, ils peuvent également jouer un rôle dans la protection des berges contre les effets de la glace de rivière. Outre la capacité à résister aux forces exercées latéralement sur eux par l'eau, leur conception doit également tenir compte de l'impact et de l'affouillement de la glace et des débris en dérive. Dans certains cas, on peut prévoir un espace additionnel à l'écart du rivage pour permettre l'accumulation de glace.

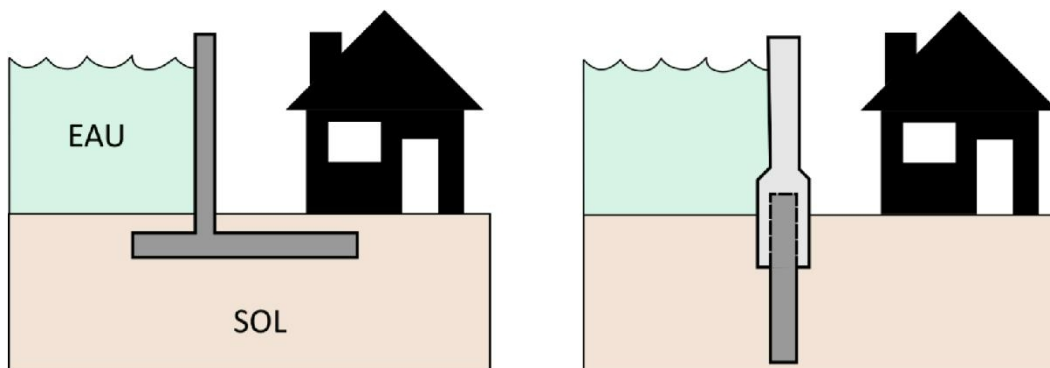


Figure 13 : Deux catégories générales de murs de protection contre les inondations.
À gauche : Type T. À droite : Type I.

3.3. Travaux de terrassement

Cette catégorie d'ouvrages comprend des machines et de l'équipement capables de déplacer de grandes quantités de terre, de gravier et de roches.

3.3.1. Modifications du chenal

Des modifications physiques du chenal pourraient être nécessaires pour faciliter la circulation de la glace. Selon les besoins, ces modifications pourraient également contribuer à la formation d'un couvert de glace stable si elles permettent de ralentir la vitesse des courants et d'éliminer les zones de courants rapides. Elles pourraient permettre au chenal de transporter plus d'eau ou de stocker plus de glace, et de promouvoir la formation d'embâcles à l'écart des zones inondables. Ces modifications peuvent avoir pour but d'approfondir le chenal, d'élargir la rivière, de redresser les tournants prononcés (quand ils le sont trop, la vitesse à l'extérieur du tournant peut devenir très élevée) ou de stabiliser les berges de la rivière. La mise en œuvre de ces mesures nécessite des travaux tels que le dragage et l'excavation. Les coûts sont habituellement élevés et on doit tenir compte de plusieurs facteurs sociaux et environnementaux.

Les travaux de restauration des rivières, tels que ceux qui sont nécessaires pour stabiliser les berges et corriger l'impact négatif de l'intervention humaine au fil du temps ou pour améliorer l'habitat des poissons, peuvent modifier le régime d'écoulement local. La planification doit tenir compte de la dynamique des glaces et de la façon dont le couvert de glace se forme.

3.3.2. Îles artificielles

Les berges, y compris celles des îles situées à l'intérieur d'un chenal de rivière, retiennent généralement une certaine quantité de glace (Figure 14) puisqu'elles agissent comme point d'ancrage, ce qui favorise le développement d'un couvert stable. La construction d'îles artificielles comme moyen de contrôler la dynamique des glaces s'inspire du même principe. Des exemples bien connus de tels ouvrages sur le fleuve Saint-Laurent en amont et en aval de Montréal ont été conçus pour faciliter la navigation. Leur protection par des pierres de carapace est un moyen d'atténuer l'érosion, ce qui réduit l'entretien, mais augmente les coûts initiaux. Ces ouvrages peuvent nécessiter des rechargements périodiques s'ils sont construits sur des sédiments meubles et qu'ils s'enfoncent dans le lit de la rivière au fil du temps.

3.3.3. Épis

Un épi est un ouvrage linéaire construit en pierres et s'étendant à l'écart des berges (Figure 15). Ces ouvrages peuvent servir à stabiliser la glace de rive. S'ils sont jumelés (un sur chaque berge), ils peuvent arrêter les grands radeaux de glace, lesquels, s'ils bloquent la surface du chenal, contribueront à la formation d'un couvert de glace stable. En outre, en rétrécissant le chenal, le jumelage d'épis peut réduire le débit, haussant ainsi le niveau de l'eau en amont, ce qui contribue aussi à former un couvert de glace stable et à la maintenir en place. Ce jumelage d'épis peut également réduire la quantité de glace se déplaçant vers l'aval. Comme un épi ne traverse pas toute la largeur du chenal, il présente un avantage écologique sur les déversoirs et les barrages en ce sens qu'il ne bloque pas totalement la navigation (en eau libre) et ne nuit pas au déplacement des poissons.

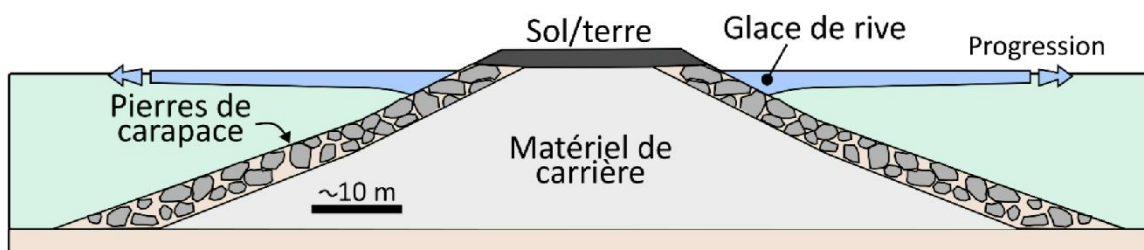


Figure 14 : Schéma de la coupe transversale de l'une des trois îles artificielles construites dans le fleuve Saint-Laurent en 1980. Ce type d'ouvrage constitue un point d'ancrage pour la glace, stabilisant ainsi l'ensemble du couvert de glace. Adaptation de Perham [16].

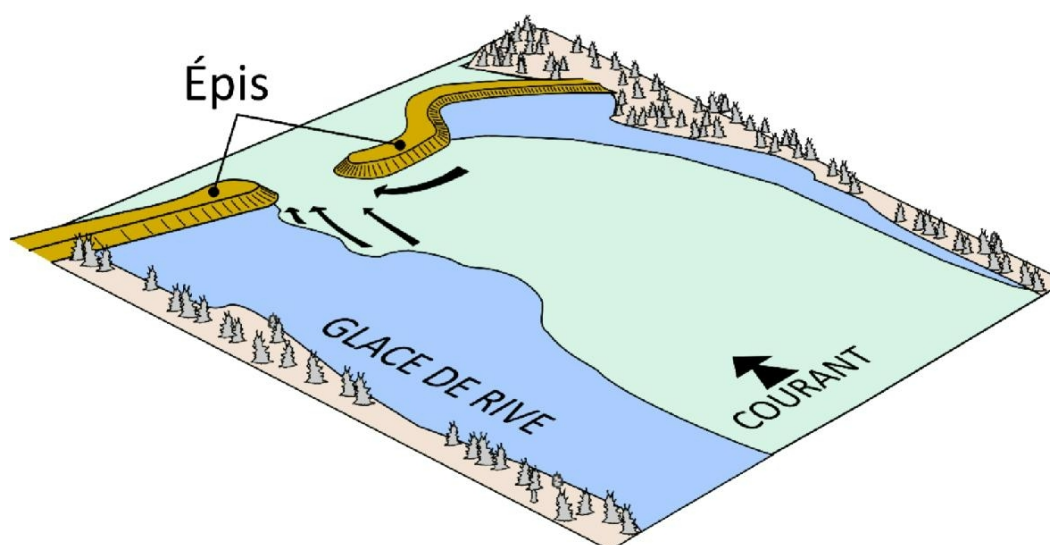


Figure 15 : Les épis sont des ouvrages de terrassement artificiels qui s'étendent à partir des berges, parfois deux par deux, comme c'est le cas ici. Adaptation de Burrell [30].

3.3.4. Digues

Les digues ont une fonction comparable à celle des murs de protection contre les inondations, en empêchant l'eau d'aller où il ne faut pas qu'elle aille (Figure 16). Elles sont disposées parallèlement à la ligne de rivage, parfois sur de grandes distances. Elles sont généralement constituées de terre, de sable, de gravier et de pierres. Les murs de protection contre les inondations peuvent être montés sur une digue afin d'en augmenter la hauteur.

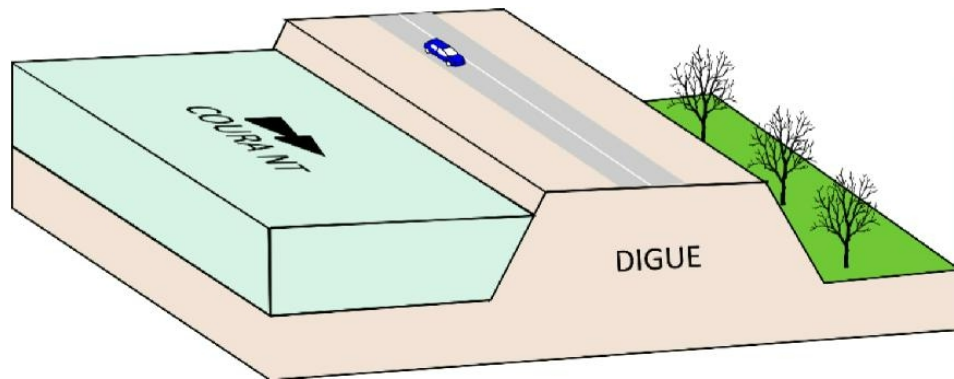


Figure 16 : Une digue est un ouvrage de terrassement surélevé qui longe une rivière.

4. Mesures de contrôle non structurales

Les mesures de contrôle non structurales ne sont pas liées à la construction, au déploiement et à la gestion d'ouvrages physiques. Ces méthodes sont moins coûteuses et moins intrusives sur le plan environnemental. Elles ont un objectif similaire à celui des ouvrages structuraux, à savoir, de réduire le risque d'un embâcle et atténuer les conséquences d'une débâcle. Dans bien des cas, elles peuvent compléter le rôle des ouvrages structuraux. Comme ces méthodes peuvent être exécutées à l'aide d'équipement et de fournitures facilement disponibles, elles peuvent être mises en œuvre rapidement. Cela nécessite une planification adéquate, notamment concernant la disponibilité de l'équipement, la formation nécessaire pour son utilisation et les autorisations.

Avec ces mesures, on vise à atteindre au moins un des objectifs suivants :

1. Contrôler la formation d'un couvert de glace
2. Faciliter la rupture d'un couvert de glace
3. Rompre ou déblayer un embâcle

Les informations présentées ci-dessous proviennent en grande partie de Haehnel [31] et de Simard-Robitaille [32].

4.1. Contrôler la formation d'un couvert de glace

Le principe qui sous-tend cette approche est encore le même : on accepte que la glace se forme dans les rivières, mais que des mesures peuvent être prises pour minimiser l'augmentation des niveaux d'eau en amont (les remous). Pour ce faire, on favorise une surface inférieure lisse plutôt que rugueuse (Figure 3), ce qui se traduira par une moins grande résistance à l'écoulement de l'eau. Ici encore, l'établissement d'un couvert de glace continue, donc sans eau libre, empêchera la formation de frasil.

4.1.1. Contrôler le débit de l'eau

Certains cours d'eau sont traversés par des barrages hydroélectriques ou des installations similaires qui peuvent contrôler la quantité d'eau qui s'écoule dans le chenal de la rivière. Pendant la saison des eaux libres (été), ce régime doit être encadré pour répondre aux besoins en énergie, ce qui signifie que plus on laisse passer d'eau, plus on peut produire d'électricité. Cette gestion aura à son tour un impact sur les niveaux d'eau en amont et en aval de l'installation, ce qui aura une incidence, entre autres, sur la navigation et sur les propriétés privées et publiques le long des berges. La gestion du débit (souvent appelée « régularisation des cours d'eau ») doit répondre aux besoins de l'ensemble des utilisateurs pendant toute l'année.

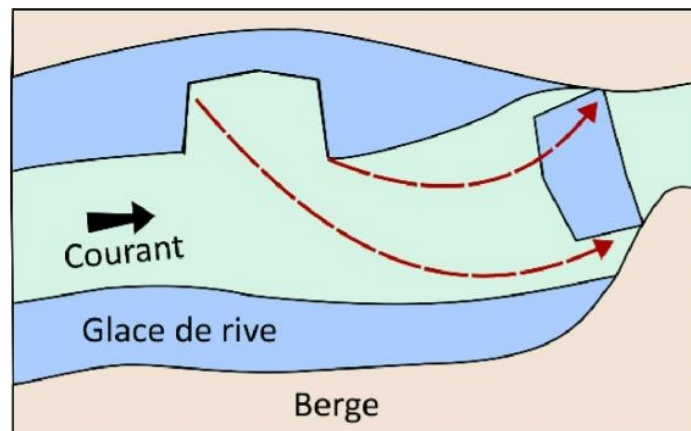
Les conditions hivernales soulèvent un autre facteur : la formation d'embâcles. Par exemple, de forts débits sortant des barrages peuvent rompre un couvert de glace stable en aval, et les courants forts engendrent

des conditions d'eau libre, ce qui est propice au développement du frazil. Pour parer à ces effets, la procédure habituelle consiste à réduire le débit au début de l'hiver jusqu'à ce qu'un couvert de glace stable se soit formé, pour ensuite l'augmenter progressivement afin de compenser la réduction de l'énergie alimentant le réseau électrique. Les rivières régularisées disposent généralement d'un protocole prédéfini pour la gestion des barrages, lequel optimise la production d'énergie tout en assurant la sécurité des collectivités riveraines.

4.1.2. Formation d'un pont de glace

Cette opération consiste à retirer ou à couper un fragment de glace de rive pour lui permettre de dériver vers l'aval de manière à ce qu'il bloque la surface du chenal (Figure 17). Ce procédé est comparable à l'utilisation d'une estacade.

*Figure 17 : La formation d'un pont de glace consiste à découper une étendue de glace de rive et à la laisser dériver jusqu'à ce qu'elle bloque le chenal.
Adaptation de Haehnel [31].*



4.2. Faciliter la rupture d'un couvert de glace

Vers la fin de l'hiver, il peut être utile d'affaiblir un couvert de glace pendant qu'elle est stable afin de faciliter la débâcle et d'éviter les embâcles. Dans le cas d'une éventuelle décharge de glace, un couvert de glace ainsi affaibli cédera plus facilement au lieu de résister et de produire un embâcle, ce qui est particulièrement important dans les endroits où ces événements risquent de se produire. Quelques approches permettent d'atteindre cet objectif.

4.2.1. Affaiblissement d'un couvert de glace

L'un des moyens de réduire l'intégrité structurale d'un couvert de glace est la fragmentation. Les fragments de plus petite taille peuvent mieux s'écouler vers l'aval sans blocage. La fragmentation peut être accomplie de plusieurs manières et sur plusieurs kilomètres, selon les besoins et les méthodes.

Excavatrices

Des équipements de construction tels que des pelles mécaniques et des grues équipées de boulets de démolition peuvent être utilisés pour briser et excaver un couvert de glace à partir des berges ou d'un pont. Des machines flottantes sont aussi spécialement conçues pour effectuer ces tâches. Un exemple est présenté à la Figure 18.

*Figure 18 : Un Amphibex sur les berges de la rivière Rideau à Ottawa.
(Photo : CNRC)*



Découpage de la glace

Le découpage de la glace est effectué à l'aide de divers équipements, y compris des machines autopropulsées équipées de tronçonneuses ou de trancheuses. Certains patrons de coupes peuvent être plus efficaces, notamment une grille en arêtes de poisson pointant vers l'aval. Le découpage de la glace peut permettre à l'eau de remonter à la surface, ce qui favorise la détérioration thermique. Pour éviter le regel, il faut également tenir compte du moment de l'intervention et des températures prévues.

Brise-glaces

Les brise-glaces sont des navires de différentes tailles conçus pour naviguer dans les eaux glacées. Ils brisent la glace en entrant en collision avec elle ou en montant par-dessus. Les aéroglisseurs sont utilisés à des fins similaires.

Charges verticales

Un poids lourd, tel un boulet de démolition, qu'on laisse descendre à plusieurs reprises sur la surface de la glace, représente un autre moyen de rompre la glace, sur une rivière étroite, pour permettre à l'équipement de fonctionner à partir des berges. On a aussi essayé de charger la glace en y faisant atterrir un hélicoptère, ou en laissant tomber une charge de cet appareil.

Perforation

On estime que le perçage de trous dans une couche de glace favorise sa rupture, car il réduit sa solidité [31-33]. Cette opération peut être menée de différentes façons, à l'aide de tarières, de foreuses mécaniques et d'explosifs. Cette méthode est très répandue au Québec [32].

Dynamitage

La pose d'explosifs au bon endroit, sous, sur ou dans le couvert de glace a souvent été utilisée pour rompre cette dernière (ou pour déblayer un embâcle). Ces explosifs ont également été largués sous forme de munitions militaires (artillerie, avions de guerre), une approche mieux adaptée aux endroits éloignés. Le dynamitage du couvert de glace est considéré comme une solution de dernier recours pour des raisons écologiques et de sécurité (Figure 19). Cette approche est encore utilisée, bien que de manière limitée [32, 34].

Figure 19 : Une plaque située à proximité des berges de la rivière Rideau à Ottawa, à la mémoire de trois travailleurs tués lors d'opérations de dynamitage de la glace (Photo : CNRC).



4.2.2. Traitement de surface

Cette procédure vise à affaiblir le couvert de glace et à accélérer sa détérioration thermique. Elle peut être effectuée à des endroits critiques aux premiers stades de la débâcle (printemps). L'épandage d'une fine couche de poussière sur la surface permet de réduire la réflectivité de la glace, augmentant ainsi la quantité de rayonnements solaires qu'elle absorbe. Ce matériau doit être sombre. On utilise à cette fin le sable, les cendres volantes, les colorants et les feuilles. Le sel aurait également été utilisé en raison de sa tendance à réduire la température de fusion de la glace, comme il le fait dans les rues (la glace en contact avec le sel fondra même si la température est nettement inférieure à 0 °C). Pour que cette procédure réussisse, on doit tenir compte de plusieurs facteurs, à savoir la disponibilité d'un matériau approprié, la technique d'épandage et les paramètres climatiques (température de l'air, ensoleillement direct et conditions de vent). Le traitement de surface peut s'avérer problématique sur le plan environnemental.

4.2.3. Affluents chauds

Dans certains cas, la formation d'un couvert de glace à des endroits critiques peut être retardée, ou même empêchée, par le déversement d'eau chaude dans la rivière en amont des endroits en question. Dans ce contexte, le terme « chaud » signifie quelques degrés au-dessus de zéro. Cette eau peut provenir d'installations de chauffage, de centrales nucléaires et de stations d'épuration, ou être puisée dans un lac ou un réservoir profond. Cette mesure repose sur la disponibilité d'une quantité suffisante d'eau chaude à proximité du site concerné, ce qui n'est pas chose courante.

4.3. Rompre ou déblayer un embâcle

Par endroits, il pourrait s'avérer nécessaire de déblayer l'embâcle de sorte à évacuer l'excès d'eau. Il s'agit d'une mesure réactive qui peut être mise en œuvre en cas d'urgence pour faire face à une montée rapide du niveau d'eau. La surface d'un embâcle étant généralement dentelée et irrégulière, il n'est pas toujours possible ou sécuritaire d'y accéder à pied ou à l'aide de machines. Certaines des méthodes de fragmentation décrites précédemment peuvent être utilisées, telles que les brise-glaces et les véhicules amphibies équipés d'une pelle mécanique. Les pelles mécaniques classiques travaillant depuis les berges pourraient jouer ce rôle dans le cas des rivières étroites. Les procédures doivent permettre aux morceaux de glace brisée d'être transportés par l'eau vers l'aval. On y arrive en commençant par l'extrémité aval ou en brisant la glace à l'endroit où le débit est le plus rapide (p. ex., près du centre de la rivière).

5. Évaluation de la résilience d'un site contre les inondations causées par la glace

L'évaluation des risques et l'optimisation de la préparation contre ces événements pour les sites vulnérables peuvent se faire en passant par les étapes suivantes :

1. Recueil des informations générales sur le site.
2. Analyse de la résilience du site face aux inondations.
3. Identification des moyens actuels de prévision, de surveillance et d'alerte.
4. Adaptation à l'impact des changements climatiques.

Les informations recueillies au cours de ces étapes sont décisives. Il s'agit de déterminer si le système mis en place pour protéger les collectivités et les infrastructures riveraines contre la menace d'inondations causées par la glace de rivière, aujourd'hui et à l'avenir, est adéquat ou insuffisant. Ces informations peuvent provenir de plusieurs sources : les bases de données et les rapports gouvernementaux, les documents produits par les ingénieurs-conseils, la littérature scientifique, les journaux et d'autres produits médiatiques, la science citoyenne et les réseaux d'externalisation ouverte.

5.1. Informations générales

Pour pouvoir évaluer l'état actuel d'un site, il faut d'abord avoir une compréhension globale de la rivière. Cela comprend :

- La géomorphologie et le paysage environnant, notamment la bathymétrie, la largeur et la forme du chenal, la topographie du paysage et son évolution dans le temps, en tenant compte de facteurs tels que le transport de sédiments et les ouvrages artificiels traversant la ligne de flottaison (p. ex., les piles de ponts, les travaux de terrassement).
- Le régime d'écoulement en eaux libres, c.-à-d. le débit, les courants, l'état de turbulence (rapides ou eaux calmes) et les variations des niveaux d'eau, qu'elles soient naturelles ou artificielles.
- L'hydraulique de la glace de rivière d'une année à l'autre, pour l'ensemble de la rivière et de ses affluents.
- L'écologie animale et végétale et les aspects environnementaux tels que la qualité de l'eau.
- Le point de vue des communautés autochtones.
- L'utilisation de la rivière pour la navigation (commerciale, loisir).
- Les infrastructures riveraines, soit les installations de purification de l'eau, les centrales électriques, les stations d'épuration des eaux, et la nature et l'utilisation des conduits (passages, entrées et sorties d'eau, canalisations, etc.).
- Les infrastructures en général, par exemple, les projets industriels et résidentiels, les hôpitaux, les réseaux routiers et les parcs.

5.2. Résilience aux inondations

Dans le contexte de ce rapport, la résilience aux inondations est la capacité à résister aux conséquences d'une inondation dans les zones où l'on sait que des embâcles se produisent.

5.2.1. Inondations historiques

Les inondations historiques doivent faire l'objet d'un examen approfondi. Celui-ci portera sur l'étendue des inondations et les dommages qu'elles ont causés, ainsi que sur les mesures d'atténuation mises en place au moment des inondations.

5.2.2. Gestion des terres

Il est important de connaître les zones qui sont les plus à risque. Pour ce faire, il convient de s'appuyer sur les informations obtenues lors des étapes ci-dessus et sur les niveaux d'eau associés aux inondations majeures. Dans des conditions de glace, on pense à une modélisation hydraulique standard et autres travaux similaires. Ces analyses permettent, entre autres, d'établir une carte des courbes de niveau sur laquelle sont délimitées les zones inondées et leur hauteur d'eau. On pourrait ainsi évaluer les risques qui

pèsent sur les infrastructures actuelles et restreindre ou interdire les nouveaux projets d'aménagement dans les zones inondables.

5.2.3. Mesures de contrôle structurales et non structurales

Cette étape consiste à passer en revue les différentes mesures de contrôle structurales et non structurales qui existent ou qui sont utilisées sur le site.

5.2.4. Protection des bâtiments

La protection contre les inondations désigne les mesures locales visant à protéger les bâtiments contre les infiltrations d'eau. Les mesures permanentes comprennent l'élévation du bâtiment sur des remblais de terre, des piles ou des cadres. Les mesures ponctuelles, de secours ou d'urgence comprennent le contreplaqué, les sacs d'étanchéité ou les sacs de sable pour bloquer les ouvertures dans les bâtiments.

5.3. Prévision des inondations

Cette étape vise à répondre à la question suivante : quels sont les moyens qui sont actuellement en place, ou qui peuvent facilement être mis en œuvre, pour prévoir les inondations à court terme (jours ou semaines) et les effets à long terme, soit ceux qui sont liés à l'évolution du climat au cours des décennies à venir ?

5.3.1. Comment la prévision des inondations fonctionne-t-elle ?

Une prévision d'inondation ressemble à une prévision météorologique. Les deux regroupent beaucoup de données et les traitent à l'aide de modèles informatiques complexes.

- *Dans le cas de la météo*, les principaux facteurs sont la température de l'air, la pression atmosphérique, l'humidité, la vitesse et la direction du vent, et le rayonnement solaire. Ces observations sont obtenues à partir d'instruments au sol, de satellites météorologiques et d'aéronefs. Les lois de la physique sont ensuite utilisées pour interpréter l'évolution de ces facteurs dans le temps. Les prévisions météorologiques portent sur *ce qui se passe dans l'atmosphère*.
- *Dans le cas des inondations*, les principaux facteurs sont les précipitations, la température de l'air, le rayonnement solaire et le vent. Il est à noter que les données telles que la température de l'air et les précipitations proviennent des prévisions météorologiques. Différentes lois de la physique sont utilisées parce que celles-ci portent sur *ce qui se passe dans le sol et dans les chenaux des rivières*.

5.3.2. Différence entre les prévisions des inondations en *eaux libres* et des inondations causées par la *glace de rivière*

La prévision des inondations en *eaux libres* dépend des prévisions météorologiques, notamment des précipitations, et d'un modèle hydrologique permettant de traiter ces informations. Elle suppose également que la morphologie du cours d'eau est bien connue. Le modèle hydrologique détermine la quantité d'eau qui se rend jusqu'au chenal. Une inondation se produit aux endroits où le chenal de la rivière est incapable d'accueillir un volume d'eau supérieur à la normale.

Dans des *conditions de glace*, le défi est plus complexe. En effet, en plus des facteurs déjà mentionnés, on doit également tenir compte des facteurs qui ont une influence sur la glace (la température de l'air, les niveaux et les débits d'eau, les caractéristiques du couvert de glace, etc.). Dans ce contexte, on recourt à un modèle hydraulique (Figure 1), lequel détermine la quantité de glace, la manière dont cette glace interagit avec elle-même et avec les rives, et la façon dont elle évolue dans la colonne d'eau. Différents modèles ont été utilisés, chacun portant sur des aspects précis de ces interactions [35].

5.3.3. Préparatifs et alertes

La Figure 20 illustre une procédure comportant trois stades d'anticipation :

1. *Préparatifs à envisager* : À ce stade, on avertit les collectivités de ce qui pourrait se produire quant à la gravité de l'événement. Dans certains cas, le couvert de glace peut fondre sur place, ce qui ne constitue pas une menace. En revanche, les données disponibles peuvent signaler la formation

d'un embâcle qui provoquera un remous jusqu'à un niveau qu'il faudra évaluer, ou la présence d'un embâcle qui risque de se rompre. Selon les résultats de l'exercice de modélisation, la collectivité pourra déjà envisager certaines mesures – les sacs de sable, la mobilisation d'équipements lourds, le transfert des meubles aux étages supérieurs, etc.

2. *Progression du niveau d'eau* : La montée des eaux est en cours, mais sa nature et son ampleur sont en cours d'évaluation.
3. *Mesures d'évacuation* : La modélisation est axée sur la dynamique de l'embâcle afin d'évaluer son comportement. L'introduction des données de la phase de modélisation précédente donne une idée de ce à quoi il faut s'attendre pour la hauteur de l'eau.

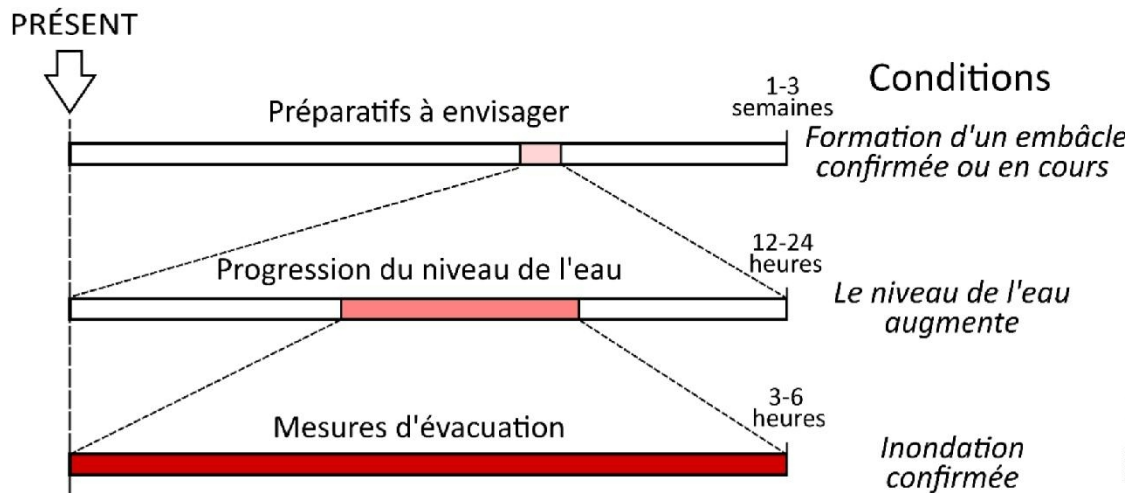


Figure 20 : Trois stades d'anticipation, chacun utilisant un modèle approprié. Adaptation de Hicks [36].

5.4. Changements climatiques

Le réchauffement planétaire est un terme qui désigne l'augmentation de la température du système atmosphérique de la Terre depuis l'ère préindustrielle au milieu du 19^e siècle. La combustion de combustibles fossiles a entraîné une augmentation de la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, notamment le CO₂, mais également le méthane et l'oxyde nitreux. Ces gaz ont fait grimper la température globale de l'atmosphère terrestre d'environ 1 °C. Si ça paraît peu à l'échelle locale, cela a des répercussions majeures sur la répartition des températures à la surface de la planète, la circulation de l'air, les précipitations et de nombreux autres phénomènes : ce sont les « changements climatiques »³ [37].

L'une des conséquences du réchauffement planétaire est l'augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des phénomènes climatiques et météorologiques extrêmes. Ces changements ne sont pas homogènes et sont fonction de l'endroit où ils se produisent. De puissants modèles informatiques, appelés modèles climatiques mondiaux (MCM), sont convertis en modèles climatiques régionaux (MCR), qui sont utilisés pour évaluer ces phénomènes à l'échelle locale. On s'attend à des changements dans les régimes météorologiques, des fluctuations de température et des décalages dans les saisons, qui peuvent influencer sur le moment de la formation des glaces, l'épaisseur du couvert de glace et son étendue sur les rivières et autres plans d'eau.

³ Les changements climatiques représentent des modifications persistantes et à long terme de l'état du climat, mesurées par des changements de l'état moyen et/ou de sa variabilité.

5.4.1. Impact sur la glace de rivière

Pour prévoir l'évolution à long terme de la glace de rivière à un endroit donné, on doit être en mesure de simuler de nombreuses variables à cet endroit plusieurs décennies à l'avance. La température de l'air est la variable la plus déterminante, les autres étant les précipitations (pluie ou neige), le rayonnement solaire et la couverture nuageuse. Un climat changeant aura une incidence sur ces conditions hydroclimatiques, qui à leur tour auront un impact sur le débit des rivières et la dynamique des glaces de rivière. On estime actuellement que les conséquences les plus importantes sont les suivantes :

- Au fil du temps, la formation de la glace peut devenir intermittente ou inexistante, ou les couches de glace peuvent s'amincir.
- Des débâcles peuvent se produire sur les rivières qui ont actuellement un couvert de glace stable.
- Il existe un large consensus quant à la réduction de la durée de la saison des glaces, avec un gel plus tardif et un dégel plus précoce.
- Le nombre de débâcles hivernales devrait augmenter.
- Les épisodes de frasil risquent de se multiplier.
- Les cas d'embâcles extrêmes pourraient se produire plus ou moins fréquemment à différents endroits.
- Ces événements pourraient devenir plus imprévisibles.

5.4.2. Conséquences pour les mesures de protection contre les glaces

En général, des hivers plus chauds et des cycles irréguliers de gel et de dégel pourraient entraîner des conditions de glace moins prévisibles, augmentant ainsi la probabilité d'embâcles, ce qui signifie un risque plus élevé d'inondation. Ces régimes peuvent rendre les méthodes traditionnelles de protection contre les glaces moins efficaces. Pour faire face à ce contexte, on devra adapter les ouvrages de protection contre les glaces existants (comme les estacades ou les barrières de glace de type pile) afin qu'ils puissent résister à des conditions plus variables et, aussi, extrêmes. Les mesures de protection contre les glaces doivent donc être adaptées aux caractéristiques climatiques futures propres à chaque région. Les endroits qui se réchauffent le plus pourraient nécessiter des stratégies différentes des autres. Il est donc nécessaire de réévaluer périodiquement l'efficacité des ouvrages de protection contre les glaces en lien avec les inondations par embâcles, en fonction de l'évolution constante des processus glaciaires à proximité de ces ouvrages [38].

La plupart des ouvrages de protection contre les glaces ont été construits entre les années 1950 et 1980. Les hivers plus courts et la probabilité accrue de débâcles hivernales signifient que de nombreux ouvrages existants sont aujourd'hui confrontés à des conditions différentes de celles pour lesquelles ils ont été conçus. À titre d'exemple, l'espacement entre les piles a été optimisé pour contenir des blocs de glace plus gros et plus épais s'étant formés tout au long de l'hiver. Si le couvert de glace devient plus fin et moins capable de résister à la friction du courant sous le couvert de glace, des blocs de glace de plus petite taille se formeront lors d'une débâcle. Ces blocs passeront à travers l'ouvrage de protection contre les glaces, ce qui signifie que cet ouvrage aura une capacité de rétention limitée. De plus, les variations climatiques pourraient modifier l'efficacité des opérations non structurales, qui devront faire preuve de plus de flexibilité pour s'adapter aux conditions existantes, quelles qu'elles soient. Les stratégies de surveillance en temps réel et de réaction rapide pourraient devoir être renforcées pour mieux se préparer à des changements rapides de l'état des glaces.

6. Conclusion

Des mesures de contrôle efficaces et durables protègent les infrastructures et les collectivités contre les inondations attribuables à la glace. Le présent rapport fournit une vue d'ensemble de ces mesures. Chacune d'entre elles est conçue pour répondre aux exigences particulières à un site donné. Il faut toutefois garder à l'esprit que la glace de rivière à ce site peut varier considérablement d'une année à l'autre. Il est donc important de bien comprendre comment se comporte la glace avant de mettre en œuvre une nouvelle mesure ou d'évaluer l'efficacité des mesures existantes. Pour les stratégies d'adaptation au climat, autrement dit les stratégies à long terme, on doit connaître les tendances climatiques locales et leur influence sur la dynamique des glaces dans la rivière en question.

7. Remerciements

Cette étude a été financée par Logement, Infrastructures et Collectivités Canada (LICC) dans le cadre de l'*Initiative sur l'environnement bâti résilient aux changements climatiques* (IEBRCC). Le rapport est une traduction d'un document publié en anglais, intitulé « *On floods caused by river ice: An overview of mitigation measures* »⁴[56].

⁴ [Hyperlien](#) conduisant à ce rapport.

8. Références bibliographiques

1. Perham, R.E., *Inventory of ice problem sites and remedial ice control structures*. 1988, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) : Hanover (NH), 13 p.
2. Perham, R.E., *Ice control in river harbors and fleeting areas*. 1988, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) : Hanover (NH), 10 p.
3. IAHR, *River ice jams: A state-of-the-art report*, dans *Proceedings of the 8th International Symposium on Ice*. 1986, Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) : Iowa City (IA)
4. Foltyn, E.P. et A.M. Tuthill, *Design of ice booms*. 1996, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory: Hanover (NH), 31 p.
5. Morse, B., *Dynamics of ice forces on booms*. Cold Regions Science and Technology, 2001. 33: p. 29-43.
6. Abdelnour, R., E. Abdelnour, et G. Comfort, *The design, construction, and observation of permanently installed safety booms in ice covered waters*, dans *Proceedings of the 19th International Symposium on Ice*. 2008, Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) : Ann Harbor (MI).
7. Perham, R.E., *Ice sheet retention structures*, dans *Proceedings of the 7th International Symposium on Ice*. 1984, Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) : Hamburg. p. 339-348.
8. Deck, D. et G. Gooch, *Performance of the Allegheny River ice control structure, 1983*, dans *CRREL Special Report (US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory)*. 1984. 15 p.
9. Abdelnour, R., et al., *Ice boom performance: Rare release events during early freeze-up*, dans *Proceedings of the 23rd International Symposium on Ice*. 2016, Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) : Ann Arbor (MI).
10. Tuthill, A.M., *Structural ice control: review of existing methods*. 1995, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) : Hanover (NH) 38 p.
11. Tuthill, A.M., *River ice control*, in *River ice formation*, S. Beltaos, Editor. 2013, Canadian Geophysical Union (CGU) : Edmonton (Alb.) p. 433-471.
12. Imaizumi, A., et al., *Studies on the effect of the sink-&-float-type ice boom (SFIB) in ice flow control and measurements which prevent SFIB from burying in sand*. Transactions on the Built Environment, 1993. 1.
13. Imaizumi, A., et al., *Development of the Sink-and-Float-Type Ice Boom (SFIB) in Ice Floe Control*, dans *Proceedings of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference*. 1994, The International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE) : Osaka. p. 572-577.
14. Abdelnour, R., A. Liddiard, et S. Dumont, *Cost effective alternative for sinking and re-floating ice booms*, dans *Proceedings of the 16th International Symposium on Ice*. 2002, Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) : Dunedin.
15. Calkins, D.J., *Longitudinal floating structures. New concepts in river ice control*. Canadian journal of civil engineering, 1991. 18(6) : p. 933-939.
16. Perham, R.E., *Ice sheet retention structures*. 1983, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) : Hanover (NH), 39 p.
17. Sahlberg, J., *Frazil ice problems at Stornorrfor's water power plant in the Ume River* in *Proceedings of the 10th International Symposium on Ice*. 1990, Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) : Espoo.
18. Liddiard, A., et al., *Design and monitoring of a prototype ice boom for use in an area of high current velocity*, dans *Proceedings of the 16th International Symposium on Ice*. 2002, Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) : Dunedin.
19. Perham, R.E., *Preliminary study of a structure to form an ice cover on river rapids during winter*, dans *Proceedings of the 8th International Symposium on Ice*. 1986, Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) : Iowa City (IA)
20. Mineta, M., M. Yamazaki, et K.-i. Hirayama, *A field study of ice control structure on river rapids*, dans *Proceedings of the 12th International Symposium on Ice*. 1994, Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) : Trondheim, Norvège. p. 139-148.
21. Lever, J.H. et G.E. Gooch, *Low-cost ice control structures for small rivers*, dans *Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering*. 1999. p. 631-640.
22. Foltyn, E.P., *Laboratory and field tests of a wire mesh frazil collector*. 1990, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) : Hanover (NH), 18 p.

23. Lever, G.H., G. Gooch, and E.P. Foltyn, *A seasonally installed weir to control freezeup ice jams*, dans *Proceedings of the 14th International Symposium on Ice*. 1998, Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) : Potsdam (NY)
24. Morse, B., et al., *Ice control structures using piers, booms and nets*. Cold Regions Science and Technology, 2006. 45(2) : p. 59-75.
25. Tuthill, A.M., *Performance survey of inflatable dams in ice-affected waters*. Ice Engineering - CRREL Bulletin, 2001. 30 (novembre) : p. 6.
26. Zufelt, J.E., J.A. Earickson, et L. Cunningham, *Ice jam analysis at Idaho Falls, Snake River, Idaho*. 1990, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL): Hanover (NH), 25 p.
27. Michel, B., *Winter regime of rivers and lakes*. 1971, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) : Hanover (NH), 139 p.
28. Tuthill, A.M. et K.D. White, *Breakup Ice Control Structure for the Salmon River, Connecticut*, dans *Proceedings of the 9th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers*. 1997, CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment (CRIPE) : Fredericton.
29. Tuthill, A.M. et J.H. Lever, *Design of breakup ice control structures*, dans *Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL)*. 2006 : Hanover (NH)
30. Burrell, B.C., *Mitigation*, dans *River ice jams*, S. Beltaos, Editor. 1995, Water Resources Publications : Highlands Ranch, Colorado. p. 205-252.
31. Haehnel, R.B., *Nonstructural ice control*. 1998, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory : Hanover (NH), 44 p.
32. Simard-Robitaille, T., *Mesures d'affaiblissement préventif du couvert de glace*, 2021. Génie des eaux, Université Laval (Québec) 118 p.
33. Haehnel, R.B., C.H. Clark, et S.F. Daly, *The effects of holes drilled in a river ice cover on the heat transfer at the ice/water interface*, dans *Proceedings of the 10th International Conference of Cold Regions Engineering*. 1999, American Society of Civil Engineers (ASCE) : Lincoln (NH), p. 641-652.
34. Fu, H., et al., *River-ice blasting and explosive weight optimization for ice-flooding mitigation: A case study*. Cold Regions Science and Technology, 2020. 177 : p. 103103.
35. Barrette, P.D., A.A. Khan, et K.-E. Lindenschmidt, *A glance at 25 process-based hydraulic models for river ice*, dans *Proceedings of the 27th International Symposium on Ice*. 2024, International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR) (Gdańsk) Pologne.
36. Hicks, F., *An introduction to river ice engineering for civil engineers and geoscientists*. 2016, Charleston (SC).
37. Bush, E. et D.S. Lemmen, *Rapport sur le climat changeant du Canada*. 2019, gouvernement du Canada : (Ottawa) 444 p.
38. Pourshahbaz, H., T. Ghobrial, et A. Shakibaeinia, *Field monitoring of river ice processes in the vicinity of ice control structures in the province of Quebec, Canada*. Revue canadienne de génie civil, 2024. 51(2) : p. 200-214.
39. Lindenschmidt, K.-E., *River ice processes and ice flood forecasting - A guide for practitioners and students*. 2024, (Cham) Suisse : Springer Nature.
40. Ashton, G.D., *River and Lake Ice Engineering*. 1986, Chelsea (Michigan) : Book Crafters Inc.
41. Beltaos, S., *River ice jams*. 1995, Highlands Ranch (Colorado) : Water Resources Publications.
42. Williams, G.P., *Break-up and control of river ice*, dans *Proceedings of the 1st International Symposium on Ice and its action on hydraulic structures*. 1970, Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) : (Reykjavik) Islande.
43. Belore, H.S., B.C. Burrell, et S. Beltaos, *Ice jam mitigation*. Revue canadienne de génie civil, 1990. 17(5) : p. 675-685.
44. White, K.D. et R.L. Kay, *Ice jam flooding and mitigation: Lower Platte River basin, Nebraska*. 1996, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory : Hanover (NH), 93 p.
45. Hopper, H.R., *A natural ice boom*, dans *Proceedings of the Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*. 1998 : Halifax (N.-É.), p. 317-326.
46. Beltaos, S. et T. Prowse, *River-ice hydrology in a shrinking cryosphere*. Hydrological Processes, 2009. 23(1) : p. 122-144.
47. Turcotte, B., B. Morse, et G. Pelchat, *Impact of climate change on the frequency of dynamic breakup events and on the risk of ice-jam floods in Quebec, Canada*. Water, 2020. 12(10) : p. 1-19.
48. Beltaos, S., *Assessing the frequency of floods in ice-covered rivers under a changing climate: Review of methodology*. Geosciences, Suisse, 2021. 11(12).

49. Burrell, B.C., S. Beltaos, et B. Turcotte, *Effects of climate change on river-ice processes and ice jams*. International Journal of River Basin Management, 2022 : p. 1-78.
50. Chen, Y. et Y. She, *Long-term variations of river ice breakup timing across Canada and its response to climate change*. Cold Regions Science and Technology, 2020. 176 : p. 103091.
51. Agafonova, S.A. et A.N. Vasilenko, *Hazardous ice phenomena in rivers of the Russian arctic zone under current climate conditions and the safety of water use*. Geography, Environment, Sustainability, 2020. 13(2) : p. 43-51.
52. Newton, A.M.W. et D.J. Mullan, *Climate change and Northern Hemisphere lake and river ice phenology from 1931-2005*. Cryosphere, 2021. 15(5).
53. Fukš, M., *Changes in river ice cover in the context of climate change and dam impacts: a review*. Aquatic Sciences, 2023. 85(4).
54. Jasek, M. et S. Beltaos, *Ice-jam release: Javes, ice runs and breaking fronts*, dans *River ice breakup*, S. Beltaos, Editor. 2008, Water Resources Publications : Highland Ranch (CO), p. 247-303.
55. Jasek, M. et J. Evans, *Predicted effects of climate change on hydropower operations for freeze-up ice jam flooding mitigation*, dans *Proceedings of the 26th International Symposium on Ice*. 2022, International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR) : Montréal (QC).
56. Barrette, P., T. Ghobrial, et T. Kolerski, *On floods caused by river ice: An overview of mitigation measures*. 2025. NRC-OCRE-2024-TR-027, National Research Council of Canada, Ottawa, 24 p.

9. Pour de plus amples renseignements

Cette section présente une liste de sources comportant de l'information supplémentaire sur la matière couverte dans ce rapport. Ces documents sont surtout destinés à des universitaires ou à des professionnels du secteur privé ayant une formation en génie civil et une certaine connaissance de l'hydraulique de rivière. Toutes ces sources sont en anglais, à l'exception de Simard-Robitaille [32].

9.1. Glace de rivière

La glace de rivière et les défis qu'elle pose aux infrastructures riveraines sont un sujet qui a fait l'objet de recherches approfondies au cours des dernières décennies. Deux manuels d'introduction à la glace de rivière sont recommandés (et décrits ci-dessous) : Hicks [36] et Lindenschmidt [39]. Les sources historiques, qui sont encore souvent citées dans la littérature récente, comprennent Michel [27], Ashton [40] et Beltaos [41].

9.2. Mesures de protection contre les glaces

Ce rapport s'appuie sur plusieurs écrits antérieurs qui font état des classifications et des descriptions plus anciennes des mesures de protection contre les glaces, notamment Williams [42], Michel [27], Perham [16], Belore [43], Tuthill [10], Burrell [30], White and Kay [44], Haehnel [31], Hopper [45], Morse [24], Abdelnour [6], Tuthill and Lever [29], Tuthill [11], Hicks [36], Simard-Robitaille [32] et Lindenschmidt [39].

9.3. Impact des changements climatiques

Beltaos and Prowse [46], Turcotte [47], Beltaos [48] et Burrell [49] sont de bonnes sources d'information sur la glace de rivière incluant les conséquences des changements climatiques sur les processus hydrauliques. Pour des documents avec une emphase sur l'impact des changements climatiques, en voici quelques exemples : Chen and She [50] pour le Canada, Agafonova and Vasilenko [51] pour la Russie, Newton and Mullan [52] et Fukš [53].

9.4. Sources particulières

F. Hicks [36]. *An introduction to river ice engineering for civil engineers and geoscientists*. Cette monographie offre une perspective globale de la glace de rivière et comprend quelques notions de base en hydraulique et en thermodynamique. Elle constitue une bonne source d'informations visuelles (photographies et diagrammes) sur la glace de rivière en général.

K.-E. Lindenschmidt [39]. *River ice processes and ice flood forecasting - A guide for practitioners and students*. Cette monographie est une autre bonne source d'introduction à la glace de rivière et

comprend des informations plus détaillées que [36]. Elle présente d'abord des informations générales sur la glace de rivière et décrit ensuite un modèle hydraulique en particulier conçu pour établir les niveaux d'eau liés à la présence de glace. Ce modèle fait partie d'une série de modèles qui simulent la dynamique des glaces de rivière [35].

S. Beltaos [48]. *Assessing the frequency of floods in ice-covered rivers under a changing climate: Review of methodology*. Une discussion instructive sur la relation entre les niveaux d'eau et les débits en présence de glace.

M. Jasek et S. Beltaos [54]. *Ice-jam release: Javes, ice runs and breaking fronts, in River ice breakup, sous la direction de S. Beltaos*. Une description de ce qui se passe lors de la rupture d'un embâcle, soit la production d'une vague de débâcle, les mécanismes entraînant cette débâcle et ses conséquences.

A.M. Tuthill et J. H. Lever [29]. *Design of breakup ice control structures*. Il s'agit d'une bonne introduction aux ouvrages de protection contre les glaces et aux lignes directrices en matière de conception d'ingénierie.

J. E. Zufelt, J. A. Earickson et L. Cunningham [26]. *Ice jam analysis at Idaho Falls, Snake River, Idaho*. Ce rapport examine un site en particulier. Il constitue un bon exemple des différents facteurs dont il faut tenir compte dans l'évaluation des options permettant d'atténuer les inondations causées par la glace de rivière.

R. B. Haehnel [31]. *Nonstructural control*. Un examen complet et concis des contrôles non structuraux.

B.C. Burrell, S. Beltaos et B. Turcotte [49]. *Effects of climate change on river-ice processes and ice jams*. Ce document offre une perspective instructive sur la glace de rivière en général, sur la variation prévue des différents paramètres (température, précipitations, etc.) en raison des changements climatiques, et sur les conséquences de ces changements sur la dynamique de la glace de rivière.

M. Jasek et J. Evans [55]. *Predicted effects of climate change on hydropower operations for freeze-up ice jam flooding mitigation*. Un exemple récent de modélisation utilisé pour prévoir la dynamique future de la glace de rivière.