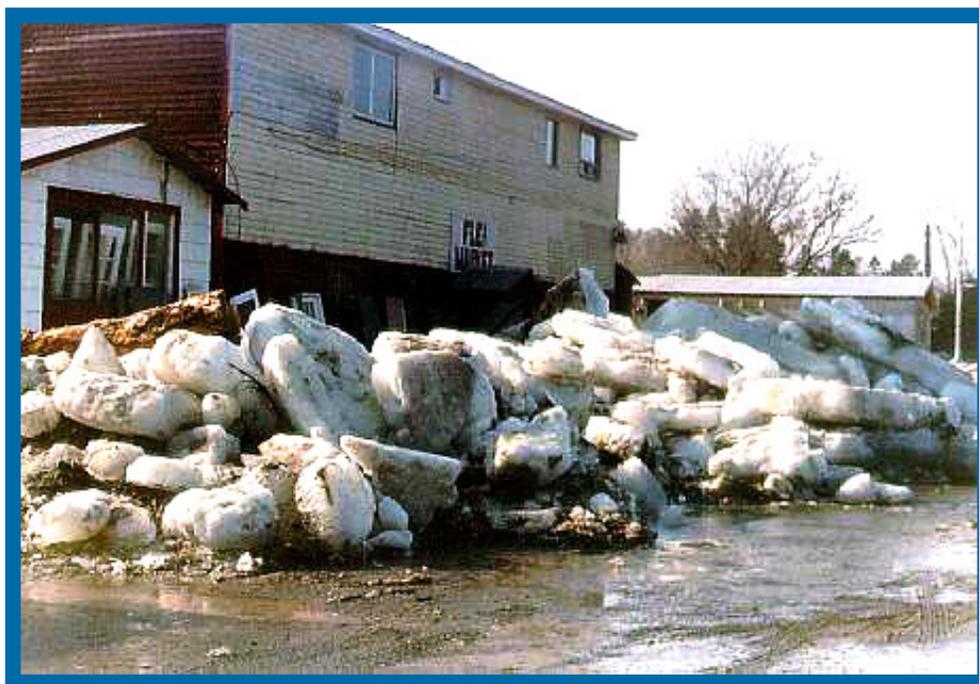




Guide des glaces fluviales au Nouveau-Brunswick



Préparé par
LE SOUS-COMITÉ RESPONSABLE DES GLACES DE COURS D'EAU DU NOUVEAU-BRUNSWICK
Environnement Canada Ministère de l'Environnement
Direction des eaux intérieures du N.-B.
Août 1989

Ce document a été reformaté et publié à nouveau en 2011.



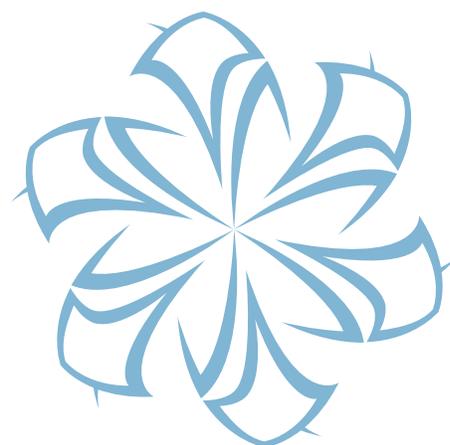
Guide des glaces fluviales au Nouveau-Brunswick

Publié par : Communication Nouveau-Brunswick

225 rue King
Frédéricton N.-B.
E3B 1C8
Canada

CNB-7926

PRÉFACE	2
REMERCIEMENTS	3
1.0 INTRODUCTION	3
2.0 PROCESSUS DE LA GLACE FLUVIALE	4
• 2.1 Gel	4
» 2.1.1 Glace de Rive	5
» 2.1.2 Frasil	5
» 2.1.3 Nappe de glace thermique	6
• 2.2 Débâcle	7
» 2.2.1 Dégel d'hiver	7
» 2.2.2 Dégel du printemps	8
• 2.3 Embâcles	8
3.0 RÉGIME DE LA GLACE FLUVIALE	9
• 3.1 Climat	9
• 3.2 Morphologie	12
• 3.3 Régions Glaciales du Nouveau-Brunswick	12
4.0 SURVEILLANCE DE LA GLACE FLUVIALE	14
• 4.1 Surveillance au Sol	14
» 4.1.1 Emplacement des sites d'observation	15
» 4.1.2 Fréquence des observations	15
» 4.1.3 Observation de la période de gel	15
» 4.1.4 Observations pendant l'hiver	16
» 4.1.5 Observations avant le dégel	16
» 4.1.6 Observations de la débâcle	17
» 4.1.7 Observations des embâcles	17
» 4.1.8 Observations après la débâcle	18
• 4.2 Observations par Satellitg	19
• 4.3 Relevés Aériens	19
5.0 MÉTHODES DE PRÉVISION	20
• 5.1 Embâcles provoqués par le gel	20
• 5.2 Débâcles	22
» 5.2.1 Décroissance de la glace	22
» 5.2.2 Début d'une débâcle	22
• 5.3 Embâcles Formés par la rupture	23
6.0 CONTRÔLE DE LA GLACE	28
• 6.1 Réduction des Embâcles	28
» 6.1.1 Ouvrages fixes	29
» 6.1.2 Estacades	29
» 6.1.3 Modifciation du canal	30
» 6.1.4 Épandage	30
» 6.1.5 Dynamitage	30
» 6.1.6 Rupture de la glace	31
» 6.1.7 Enlèvement mécanique de la glace	31
• 6.2 Adhérence de la glace	32
• 6.3 Navigation en hiver	32
BIBLIOGRAPHIE	33



• PRÉFACE



Embâcle à un pont ferroviaire.

Le Sous-comité responsable des glaces de cours d'eau du Nouveau-Brunswick a été mis sur pied par le Comité technique chargé de la prévision des inondations en vertu du Programme Canada-Nouveau-Brunswick de réduction des dommages causés par les inondations (PRDCA). Les organismes suivants en font partie : ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick (MENB), Commission d'Énergie électrique du Nouveau-Brunswick (CEENB), Université du Nouveau-Brunswick (UNB) et Environnement Canada représenté par l'Institut national de recherche sur les eaux (INRE), l'Institut national de recherches en hydrologie (INRH), le Service de l'environnement atmosphérique (SEA), la Direction des ressources en eau (DRE) et la Direction de la planification des eaux (DPE).

Le sous-comité joue un rôle de premier plan dans l'identification des problèmes reliés à la glace et dans la coordination des activités visant à trouver des solutions. Ce guide a été préparé pour renseigner le public sur les processus généraux de la glace fluviale, sur les caractéristiques particulières du régime de la glace fluviale du Nouveau-Brunswick, sur les techniques de surveillance et les méthodes de prévision et de contrôle.

• REMERCIEMENTS

Ce guide n'aurait pas été réalisé sans l'étroite collaboration des organismes membres du sous-comité sur la glace fluviale. Un merci spécial est adressé aux personnes suivantes :

Redacteurs:

- » N.E. Elhadi, MENB
- » J.G. Lockhart, PRDCA

Auteurs:

- » S. Beltaos, INRE
- » B.C. Burrell, MEN
- » K.S. Davar, UNB
- » J. Dublin, SEA
- » S. Ismail, CEENB
- » R.J. Lane, DRE
- » T.D. Prowse, INRH

Examineurs:

- » J.E. Anderson, MENB
- » T.M. Humes, DPE



Pont s'effondrant sous la force des glaces

• 1.0 INTRODUCTION

Les problèmes causés par la glace fluviale sont communs au NouveauBrunswick en hiver et au printemps, à partir du début de l'hiver, lorsque le frasil et la glace de fond se forment, en passant par la formation et la croissance de la glace de surface, jusqu'aux éventuelles débâcles et embâcles au printemps. Dans plusieurs régions de la province, les embâcles causent souvent des inondations qui détruisent des ponts et entraînent des dommages socio-économiques importants.

Il n'est pas nécessaire de rappeler aux résidents du NouveauBrunswick les récents événements reliés à la glace qui ont pris des dimensions presque catastrophiques. En 1970, les descentes de glaces et les embâcles ont détruit 32 ponts et causé des dommages pour une valeur de 14 millions de dollars en dollars constants de 1987. En 1976, les embâcles sur le fleuve SaintJean ont causé de graves inondations et dommages à PerthAndover et Woodstock totalisant 3,6 millions de dollars. Plus récemment, en 1987, un embâcle à la hauteur et en aval de PerthAndover a causé des dommages de 30 millions de dollars. Les dommages non documentés et incalculables augmenteraient énormément ces chiffres.

Récemment, d'énormes progrès ont été réalisés en ce qui a trait à la compréhension et à la prévision des problèmes de glace et à la réduction au minimum des dommages socio-économiques connexes. Il convient de mettre ces nouvelles connaissances scientifiques à la disposition du public intéressé, puisqu'il est essentiel que le public comprenne ces problèmes et collabore à leur gestion efficace. Le présent guide vise avant tout à présenter les éléments de base des phénomènes des glaces fluviales ainsi qu'à identifier les problèmes que celles-ci entraînent ainsi que les techniques de réduction; il présente une simple et courte analyse des connaissances sur le sujet. La partie 2, donne une description des divers "procédés de glace". Un résumé des conditions météorologiques et une description du régime des glaces au NouveauBrunswick sont fournis dans la partie 3. La partie 4 donne diverses techniques de surveillance de la glace de même que les données essentielles à recueillir à l'aide de programmes de surveillance terrestre. Les méthodes de prévision et les applications quantitatives sont résumées dans la partie 5, tandis que les méthodes de contrôle de la glace sont décrites dans la partie 6. Bon nombre des analyses scientifiques et d'ingénierie exigent des procédures théoriques et informatiques complexes qu'il est impossible de décrire dans un document comme celui-ci. Le lecteur qui désire plus d'information peut consulter la bibliographie ci-incluse.

• 2.0 PROCESSUS DE LA GLACE FLUVIALE

• 2.1 Gel

- » 2.1.1 Glace de Rive
- » 2.1.2 Frasil
- » 2.1.3 Nappe de glace thermique

• 2.2 Débâcle

- » 2.2.1 Dégel d'hiver
- » 2.2.2 Dégel du printemps

La plupart des rivières du NouveauBrunswick sont recouvertes de glaces pendant la majeure partie de l'hiver. Le phénomène de la glace fluviale est habituellement répartie en périodes de gel et en périodes de dégel. Ses caractéristiques dépendent des conditions météorologiques et de débit qui surviennent lors des périodes de gel et de dégel. Les processus et caractéristiques de la glace fluviale prédominants observés dans les rivières du NouveauBrunswick sont présentés dans les parties suivantes.

• 2.1 GEL

La température de l'air et la vitesse du débit sont les deux plus importants facteurs affectant le processus de glace au cours de la période de gel. L'échange calorifique à la surface d'eau libre est le principal processus par lequel la température de l'eau de la rivière chute à l'automne. Le transfert de chaleur dépend des radiations solaires ou à ondes courtes, du rayonnement de grandes ondes, de l'évaporation ou de la condensation, de la convection et des précipitations. Les taux de pertes thermiques correspondants (taux de la chaleur transférée par superficie unitaire) peuvent être calculés selon les principes hydrothermiques et météorologiques (Michel 1971). Des échanges calorifiques mineurs peuvent également survenir dans le lit du cours d'eau en raison de l'écoulement souterrain, de la chaleur emmagasinée dans les sédiments de fond, de la chaleur géothermique et de la friction du débit. Ces moyens d'échange calorifique sont généralement négligeables mais peuvent devenir importants en présence d'une nappe de glace.

Le taux de perte thermique est souvent calculé comme étant le produit de la différence entre les températures de l'air et de l'eau, et le facteur démontrant les conditions locales et météorologiques. Par exemple, ce facteur variait de 20 à 60 watts/m²°C pour le fleuve Saint- Laurent (Shen et autres, 1984; Prowse, 1987). En connaissant le taux de perte de chaleur et les conditions hydrologiques du cours d'eau, on peut prévoir la température de l'eau. La formation de glace est imminente lorsque la température de l'eau chute à près de 0°C.

Vous trouverez ci-dessous une description du processus de gel pour les types de glace les plus fréquemment observés dans les rivières du NouveauBrunswick.

• 2.1.1 Glace de Rive

La première glace à apparaître sur une rivière se forme habituellement le long des rives où la vitesse est faible (Illustration 1). La glace de rive s'accroît verticalement et latéralement vers le milieu du cours d'eau. La croissance latérale peut avoir lieu même si la température de l'eau principale est légèrement au-dessus du point de congélation, selon la vitesse du débit et les conditions météorologiques, fig. 1 (Devik, 1964). Actuellement, la meilleure façon de prévoir le taux de croissance latérale est d'utiliser les relations empiriques mises au point par Newbury, 1968 et Matousek, 1984.



Formation de la glace de rive.

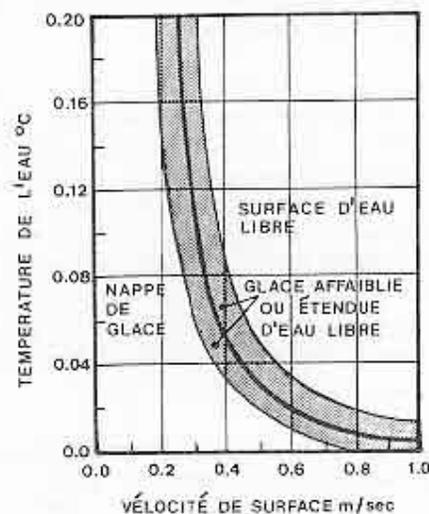


FIG. 1. Conditions pour la formation de la glace de rive.

• 2.1.2 Frasil

Il apparaît souvent du frasil dans les rivières du Nouveau Brunswick durant la période de gel et tout au long de l'hiver dans les tronçons turbulents sans glace. Il est formé de petites particules à la suite d'un léger refroidissement rapide de l'eau (à environ $-0,05$). La quantité de frasil est proportionnelle à l'étendue de la surface d'eau libre et au taux de perte thermique.

Dans l'eau rapidement refroidie, les particules de frasil adhèrent les unes aux autres, formant les "rochers" ou "flocons" de frasil qui flottent et remontent à la surface. Cette propriété de l'adhérence de particules entraîne habituellement une des formes d'accumulation de glace suivantes (fig. 2)

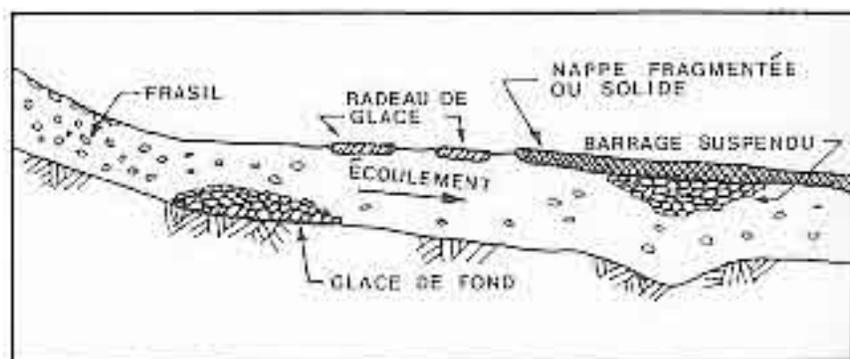


FIG. 2 Formation de la glace fluviale.

- **Radeaux de glace :** Au fur et à mesure que les rochers de frasil prennent de l'expansion, ils forment des radeaux de glace (Illustration 2). Ces radeaux de glace peuvent s'arrêter à un étranglement de canal ou s'échouer contre une nappe de glace dans les parties de la rivière où la vitesse est inférieure à 0,6 m/s ou quand le nombre de Froude est inférieur à 0,08. Le nombre de Froude est défini par $(V/(gH)^{0.5})$; V étant la vitesse moyenne, g l'accélération de la gravité et H la profondeur moyenne. Lorsque l'eau de surface continue de perdre de sa chaleur dans l'atmosphère, ces radeaux de glace gèlent ensemble pour former une nappe de glace continue.

- **Barrages suspendus :** L'accumulation de frasil contre une nappe de glace progresse vers l'amont lorsque la vitesse du bord en amont de la nappe de glace est faible. À de grandes vitesses, le frasil est transporté en aval sous la nappe de glace où il adhère au dessous de la glace dans une zone à faible vitesse. À mesure que l'approvisionnement en frasil continue, l'accumulation de glace sous la nappe s'accroît, formant un "barrage suspendu". Un barrage suspendu peut provoquer un vaste blocage extensif du débit dans la zone pour causer une augmentation des niveaux d'eau en amont et d'éventuelles inondations.



Accumulation de frasil (radeaux de glace)

- **Glace de fond :** dans les tronçons turbulents des rivières larges et peu profondes, les particules de frasil peuvent adhérer au lit de la rivière et s'agglomérer pour former de la glace "de fond". La glace de fond se forme généralement en soirée lorsque le taux de pertes thermiques est le plus élevé et que le refroidissement rapide se produit. La glace de fond peut provoquer un blocage important de la coupe transversale du débit qui entraînerait une inondation locale. On possède peu de données sur la formation, l'expansion et le détachement de la glace de fond.

• 2.1.3 Nappe de glace thermique

Dans les rivières ayant des vitesses inférieures à 0,6 m/s et des températures sous le point de congélation, des cristaux de glace se forment à la surface et se lient ensemble pour créer une mince feuille de glace. Une fois formée, cette glace commence à s'accroître vers le bas en gelant à l'interface de la glace et de l'eau. La perte thermique est retardée par la nappe de glace elle-même et par la nappe de neige qui peut s'y trouver. Lorsqu'une accumulation de frasil gèle, le taux d'épaississement de la couche de glace solide est inversement proportionnelle à la porosité de l'accumulation. Une simple formule semi-empirique est souvent utilisée pour calculer l'épaisseur de la glace solide, h_i , en centimètres comme dans :

$$h_i = a_i (DF)^{0.5} (1)$$

DF = degrés-jours accumulés de congélation (oC-jours) et a_i = coefficient empirique. Les valeurs de a_i se définissent ainsi : $a_i = 2,7$ pour un lac venteux sans neige; $1,7$ à $2,4$ pour un lac moyen avec neige; $1,4$ à $1,7$ pour une rivière moyenne avec neige; et $0,7$ à $1,4$ pour une petite rivière abritée avec un débit rapide.

Dans le centre du Nouveau Brunswick, l'épaisseur des nappes de glace thermiques varie généralement de 38 à 80 cm; selon la rigueur de l'hiver.

• 2.2 DÉBÂCLE

Le temps doux fait habituellement fondre la couverture de neige et affaiblit la nappe de glace. De plus, les fissures longitudinales et transversales, illustration 3, réduisent davantage la force de la nappe. Le taux de fonte nivale et de précipitations et le ruissellement subséquent sont les principaux facteurs qui entravent le processus de dégel. Un taux élevé de fonte nivale et de précipitations suivi d'une augmentation rapide du débit de la rivière, entraîne normalement une débâcle prématurée d'une nappe de glace relativement forte. Ce type de débâcle peut survenir au milieu de l'hiver ou tôt au printemps, et elle provoque généralement les pires inondations. Par contre, une fonte nivale lente provoque une augmentation graduelle du débit de la rivière et une détérioration graduelle de la nappe de glace, entraînant des pointes de niveaux d'eau beaucoup moins élevées.



Fissures longitudinales

• 2.2.1 Dégel d'hiver

Le centre et le sud du Nouveau-Brunswick connaissent souvent des périodes de temps doux peu saisonnières à la fin de janvier et au début de février. Ces temps sont à l'occasion accompagnées de quantités moyennes de pluie, ce qui entraîne un taux élevé de fonte nivale, et par conséquent, des débits fluviaux élevés. Les forces en aval accrues sont donc exercées sur la nappe de glace, causant des dégels localisés et, dans certains cas, des embâcles et des inondations. Lorsque les températures de congélation du milieu de l'hiver reviennent, l'embâcle peut geler et figer sur place. Dans bon nombre de cas, ce phénomène entraîne des embâcles et des inondations plus graves le printemps suivant.

• 2.2.2 Dégel du printemps

À la fin de mars ou au début d'avril, un réchauffement général fait fondre la couverture de neige et dégèle graduellement la nappe de glace. Ce processus est souvent aggravé par les précipitations; il diminue la force de la nappe de glace et augmente le débit du cours d'eau ainsi que les niveaux d'eau. Ces phénomènes augmentent les forces exercées sur la nappe de glace et entraînent la formation de fissures en charnières parallèles aux deux rives, ce qui diminue la résistance de la nappe de glace. À un certain point, à mesure que les forces en aval exercées sur la nappe augmentent pendant que les forces de résistance diminuent, la nappe de glace entame son mouvement qui occasionne la désintégration de la nappe de glace en morceaux se dirigeant vers l'aval. La distance que parcourt la glace dépend des conditions du débit, de la géométrie de la rivière et des conditions météorologiques immédiatement avant et pendant la période de dégel.

À mesure que la glace brisée poursuit son chemin en aval, sa vitesse contribue davantage au dégel de la nappe de glace jusqu'à ce qu'elle se dépose à un point offrant une plus grande résistance; comme à un étranglement de canal, au bord d'une forte nappe de glace, ou au mélange des deux. La durée de séjour de la glace à un endroit spécifique a un impact significatif sur la progression de la débâcle, les niveaux d'eau en amont et l'étendue de l'inondation.

• 2.3 EMBÂCLES

Les embâcles sont les événements les plus dramatiques provoqués par le dégel et l'accumulation rapide de la glace fluviale fragmentée. Ils provoquent souvent de soudaines augmentations massives du niveau d'eau, entraînant de graves dommages causés par les inondations, dans certains cas supérieurs à ceux reliés aux inondations d'eau libre. Au Nouveau-Brunswick, environ 70 pour cent des dommages causés par les inondations signalées sont provoqués par des inondations reliées à la glace.

Certains endroits sont plus propices à la formation d'embâcles que d'autres : le confluent de deux rivières, les étranglements de canaux, les tournants prononcés, les îles, les ponts, les tronçons de rivières peu profonds, le bord d'une nappe de glace solide, et les changements soudains de la pente de la surface d'eau. Les embâcles sont souvent provoqués par une combinaison de deux ou plusieurs de ces facteurs.

La gravité d'un embâcle est généralement influencée par le débit de la rivière, le volume et la force de la glace fluviale, la durée de la période de dégel, le taux de transfert thermique, la profondeur de la neige et les précipitations. Le débit de la rivière est le plus important facteur déterminant de la gravité d'un embâcle..

• 3.0 RÉGIME DE LA GLACE FLUVIALE

- 3.1 Climat
- 3.2 Morphologie
- 3.3 Régions Glaciales du Nouveau-Brunswick

• 3.1 CLIMAT

Le climat est un facteur important qui affecte la formation, la croissance et le dégel de la nappe de glace. Le climat du Nouveau-Brunswick est influencé par sa proximité de l'océan Atlantique et, à un moindre degré, par le Golfe du Saint-Laurent. Toutefois, à l'exception des régions avoisinantes de la Baie de Fundy et du Golfe du Saint-Laurent, le climat est principalement continental, les étés étant chauds et humides et les hivers longs et froids, sans saison sèche.

Les températures varient considérablement dans la province, les températures annuelles moyennes diminuant en remontant vers le nord, allant de 6°C dans l'extrême sud-ouest de la province, à 2°C dans la région au nord d'Edmundston. En janvier, le mois le plus froid de l'année, les températures moyennes annuelles varient de -6°C dans le sud-ouest de la province, à -13°C dans les régions du nord. En hiver, on note souvent des températures minimales de -35°C dans le nord de la province. La période exempte de gel varie d'environ 100 jours dans le nord à 140 jours dans le sud. La moyenne annuelle accumulée de degrés-jours de congélation, figure 3, peut servir d'indice de la rigueur des hivers. Les valeurs varient de 500 °C-jours dans le sud-ouest à 1 500 °C-jours dans le nord-ouest.

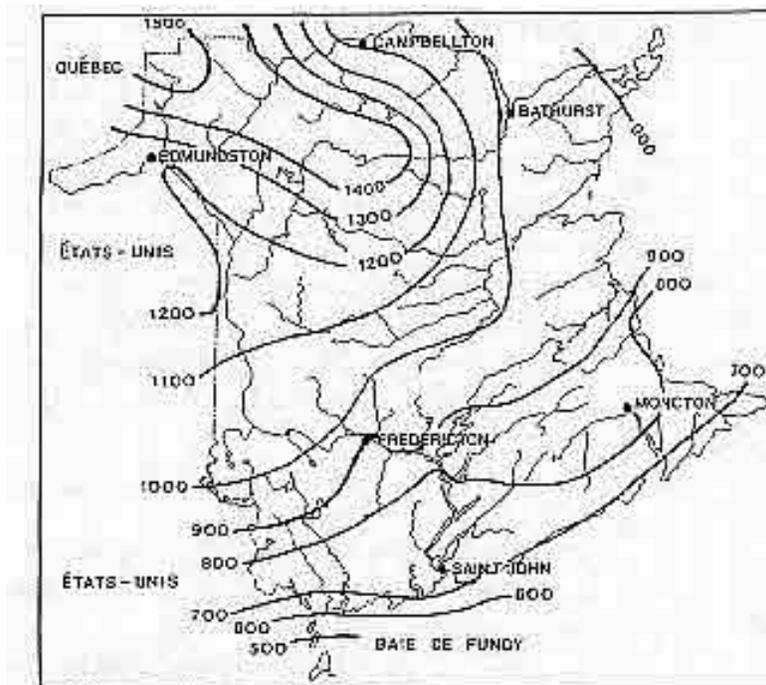


FIG. 3. Moyenne annuelle accumulée de degrés-jours de gel (°C-jours)

Les précipitations annuelles dans la province varient de 950 mm à certains endroits dans le nord-ouest, à 1 450 mm dans le sud, juste au nord de la Baie de Fundy, et dans les hautes terres au centre du Nouveau Brunswick, figure 4. La chute de neige totale annuelle au Nouveau-Brunswick varie de 200 cm dans le sud à 400 cm dans le nord et dans les hautes terres au sud de Moncton, figure 5. Le pourcentage des chutes de neige de la précipitation totale varie généralement de 15 dans les régions du sud à 40 dans celles du nord. En moyenne, le Nouveau-Brunswick reçoit plus de chutes de neige que la plupart des autres régions du Canada. La couche de neige de l'hiver fond et s'écoule habituellement en avril et souvent au cours des deux premières semaines de mai.

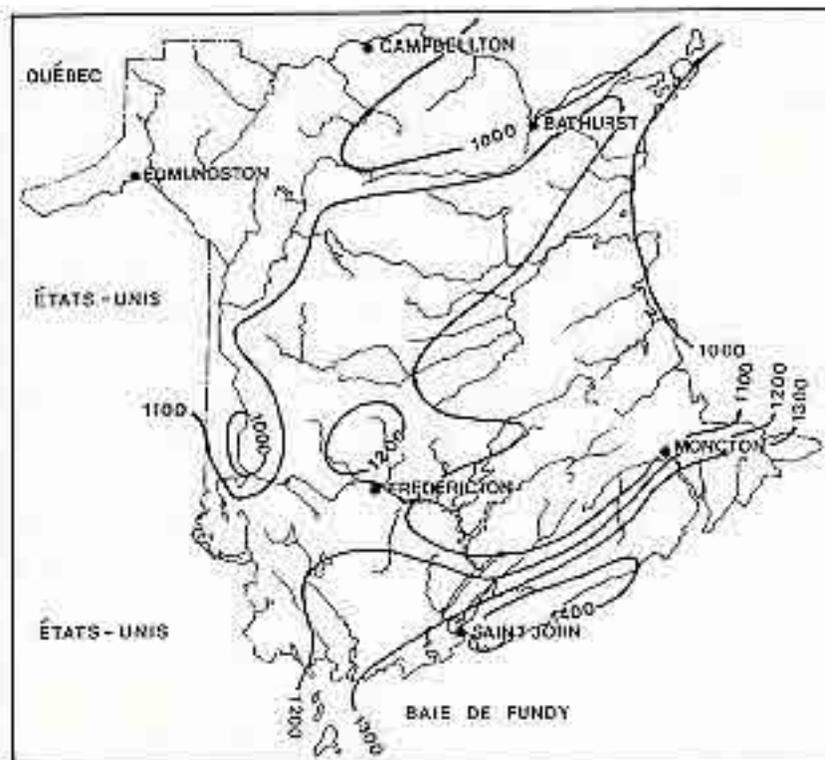


FIG. 4. Précipitations totales annuelles (mm)

La province est située dans la trajectoire de bon nombre de tempêtes extratropicales qui ont pris naissance le long de la côte est des États-Unis. Les tempêtes extratropicales peuvent survenir à n'importe quel moment de l'année, mais les plus fréquentes et sévères se produisent en hiver lorsque le contraste entre l'air froid continental et l'air marin plus chaud est le plus marqué. Les puissants débits d'air froid qui se forment derrière les tempêtes en formation contribuent grandement à l'intensification de ces tempêtes. Le corridor de tempête a une orientation sud-ouest-nord-est, et son parcours de précipitation tend à s'allonger en direction du corridor de la tempête. Bien que les précipitations puissent être générales pour la majeure partie de la province dans le cas d'une tempête en particulier, les fortes précipitations sont habituellement concentrées dans une bande plutôt étroite, et l'intensité et les quantités tombent rapidement en direction du sud-est et du nordouest de la trajectoire de la tempête.

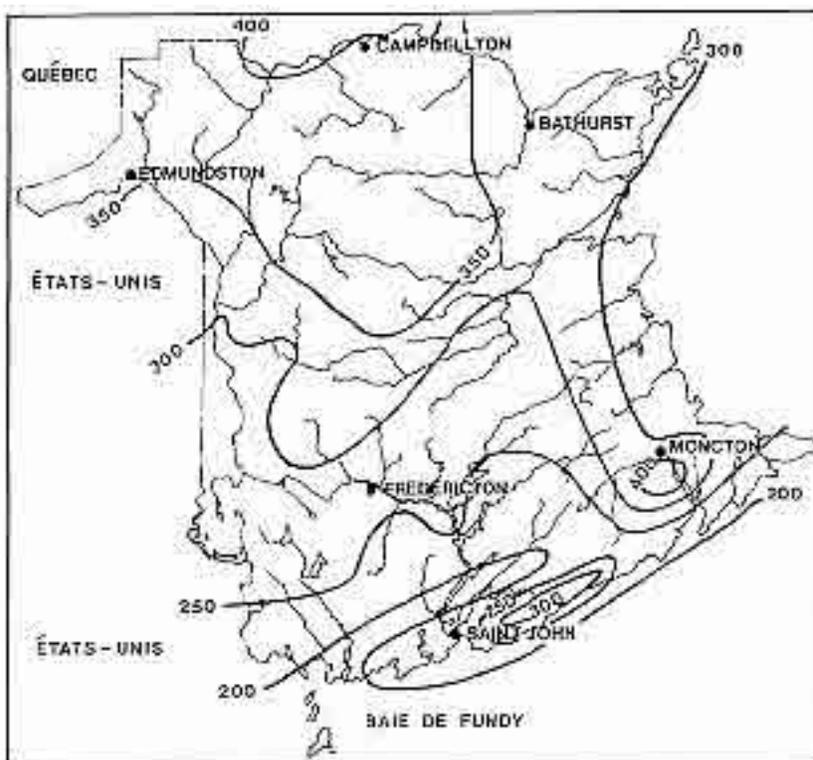


FIG. 5. Chutes de neige annuelles totales (cm)

Les dégels au coeur de l'hiver qui entraînent d'importantes fontes de neige sont plus fréquents dans les régions du sud de la province, leur fréquence diminuant en remontant vers le nord. Les fontes de neige importantes causées par un dégel au coeur de l'hiver, tout comme les pluies d'hiver, sont rares dans les régions du nord de la province.

• 3.2 MORPHOLOGIE

Les caractéristiques physiques d'un bassin versant et la géométrie du canal jouent un rôle important dans le régime des glaces fluviales. Bien que la plupart des rivières du Nouveau-Brunswick soient recouvertes d'une certaine forme de nappe de glace une bonne partie de l'année, il y a quelques rivières sous lesquelles aucune couche de glace solide ne se forme. Il se peut qu'aucune forte nappe de glace ne se forme à la sortie d'eau des lacs ou des réservoirs lorsque l'eau est légèrement plus chaude et plus turbulente. Un bon exemple est la rivière Saint-François près de la sortie d'eau du lac Glasier. Les nappes de glace peuvent également ne pas se former dans des escarpements, des affluents à débit rapide, même si de grandes quantités de frasil sont produites. Par exemple, Dunbar Stream, un petit affluent escarpé de la rivière Nashwaak, demeure ouvert pendant la majeure partie de l'hiver. Enfin, il se peut qu'aucune nappe de glace ne se forme dans des cours d'eau qui ont un approvisionnement en eau plus chaude provenant du lit ou des rives. Par exemple, une couche de glace ne se forme habituellement pas sur la plupart des tronçons du Cold Stream (Au nord-est de la ville de Hartland) bien que d'épaisses nappes de glace solide se forment sur les rivières avoisinantes.

Bon nombre de rivières du Nouveau-Brunswick se déversent dans la mer et les tronçons inférieurs sont à marées. Elles sont souvent caractérisées par des coupes transversales plus larges que les tronçons en amont. On croit que des accumulations importantes de glace dans ces estuaires surviendront quand une période de températures de congélation coïncidera avec les plus grands écarts entre les marées de mer morte et les marées de vive eau subséquentes. Au cours de cette période, des murs de glace verticaux peuvent se former le long des rives en quelques jours, comme dans les tronçons supérieurs des rivières Petitcodiac et Memramcook où les murs de glace peuvent atteindre une hauteur de 5 m. Au printemps, la glace cassée s'accumule souvent près des limites en amont de l'estuaire, mais il est rare qu'il se produise de graves embâcles (Desplanque et Bray, 1984).

• 3.3 RÉGIONS GLACIALES DU NOUVEAUBRUNSWICK

Une délimitation des régions avec des régimes de glace fluviale semblables est présentée à la figure 6. Cette illustration est basée sur les données historiques de l'épaisseur de la glace (l'épaisseur moyenne de la glace est d'environ 50 cm), sur l'observation visuelle des conditions de la glace ainsi que sur les caractéristiques climatiques. Cette figure illustre également les régions propices aux embâcles majeurs dans la province.

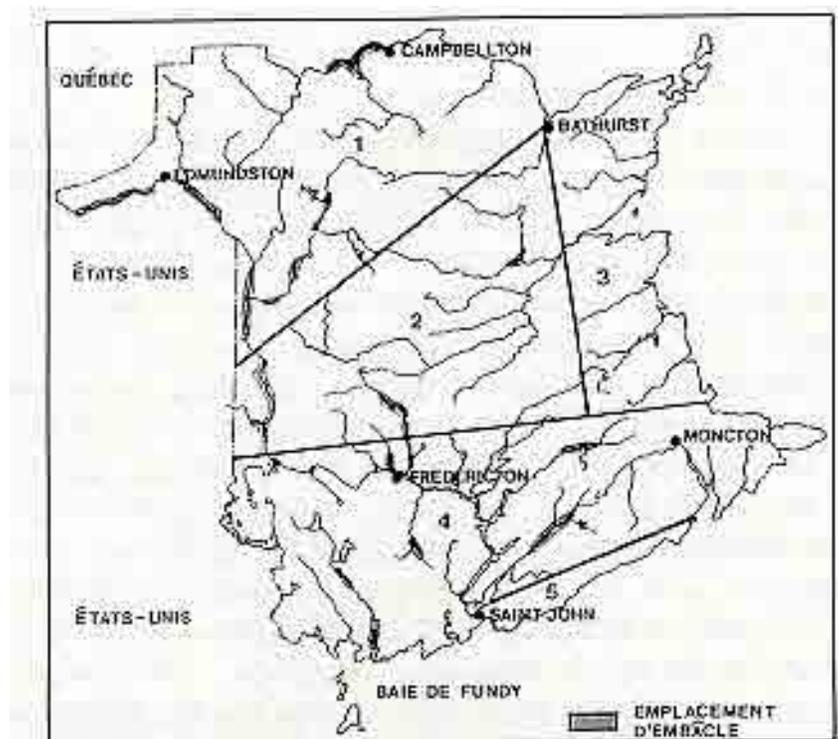


FIG. 6. Régions des glaces fluviales et zones des principaux embâcles.

La région 1, dans le nordouest du Nouveau Brunswick, est reconnue en raison de son épaisseur de glace supérieure à la moyenne et d'une épaisse couche de neige. Les importants dégels au milieu de l'hiver et les embâcles connexes sont très rares. La débâcle se produit habituellement à la suite d'une fonte de neige à la mi-avril. Les embâcles que cela entraîne sur les rivières comme la rivière Restigouche peuvent être très graves.

Dans la région 2, au centre du Nouveau Brunswick, l'épaisseur de la glace fluviale est en général égale ou supérieure à la moyenne susmentionnée, et la couche de neige est également dans la moyenne. Parfois la région subit des dégels au milieu de l'hiver qui entraînent une débâcle, mais des débâcles de modérées à graves prédominent au printemps.

Les rivières de la région 3 qui longe la côte est ont une nappe de glace moyenne et une couche de neige supérieure à la moyenne. Les dégels du milieu de l'hiver sont rares et les embâcles du printemps ne sont habituellement pas graves.

Dans la région 4 qui traverse le sud du Nouveau Brunswick, les rivières ont normalement une nappe de glace de mince à moyenne ainsi qu'une couche de neige encore plus mince que dans les régions du nord. Les dégels au milieu de l'hiver et les pluies sont plus fréquentes, provoquant des dégels précoces et parfois de graves embâcles semblables à ceux survenus en février 1981 sur la rivière Kennebecasis et ayant causé de graves inondations dans la région de Sussex.

Dans la région 5, le long de la Baie de Fundy, les rivières forment une nappe de glace moyenne avec une épaisse couche de neige. Parfois, il survient de fortes pluies au milieu de l'hiver provoquant des dégels précoces et des embâcles de nature spectaculaire. Une hausse du niveau d'eau de 6 m a été enregistrée dans la rivière Point Wolfe durant un tel incident.

Il y a des différences importantes dans les dates de gel et de dégel entre les cours d'eau du nord et du sud de la province. La glace commence à se former sur les rivières du nord, comme la Restigouche, environ deux semaines avant celles du sud, comme la Kennebecasis. Normalement, le dégel des rivières du nord ne survient pas avant le milieu d'avril, tandis que les cours d'eau du sud sont habituellement libres de glace vers la mi-mars.

Bien qu'il soit possible de généraliser concernant les régimes de la glace fluviale en se fondant sur le climat, il est impossible d'appliquer ces généralisations à des cours d'eau particuliers. On peut mieux comprendre les caractéristiques d'une nappe de glace sur une rivière en particulier en surveillant les conditions de glace pendant un certain nombre de saisons.

• 4.0 SURVEILLANCE DE LA GLACE FLUVIALE

• 4.1 Surveillance au Sol

- » 4.1.1 Emplacement des sites d'observation
- » 4.1.2 Fréquence des observations
- » 4.1.3 Observation de la période de gel
- » 4.1.4 Observations pendant l'hiver
- » 4.1.5 Observations avant le dégel
- » 4.1.6 Observations de la débâcle
- » 4.1.7 Observations des embâcles
- » 4.1.8 Observations après la débâcle

• 4.2 Observations par Satellite

• 4.3 Relevés Aériens

• 4.1 Surveillance au Sol

Dans les pays les plus au nord, une certaine forme de surveillance des glaces fluviales est assurée, soit dans le cadre d'un programme général de collecte de données ou pour appuyer des études spécifiques. La surveillance de la glace peut être effectuée à l'aide de satellites, de photos aériennes ou d'études au sol.

À l'échelon national, deux organismes d'Environnement Canada -le Service de l'environnement atmosphérique (SEA) et la Division des relevés hydrologiques du Canada (DRHC) de la Direction générale des eaux souterraines - assurent des Programmes de surveillance de glace pour des études générales sur la glace fluviale. Au NouveauBrunswick, le SAE recueille de l'information sur la glace à environ 12 endroits, dont 8 rivières et 4 lacs. La DRHC exploite 84 stations hydrométriques, dont 18 sont le site d'études détaillées sur l'épaisseur de la glace.

De l'information plus détaillée sur certaines rivières du NouveauBrunswick comme la rivière Restigouche, le fleuve SaintJean et les rivières Meduxnekeag, Nashwaak et Kennebecasis, a été recueillie par des organismes provinciaux comme la Commission d'énergie électrique du NouveauBrunswick; le département du génie civil de l'Université du NouveauBrunswick, et la Direction de la planification des ressources en eau du ministère de l'Environnement du NouveauBrunswick. Un résumé des données historique sur l'épaisseur de la glace est présenté dans le rapport LeBrun-Salonen (1983). La surveillance de la glace fluviale peut être effectuée en utilisant diverses méthodes selon les objectifs et les ressources disponibles. La viabilité des techniques de surveillance des études au sol, par satellite et techniques aériennes pour évaluer les conditions des glaces fluviales au NouveauBrunswick est examinée cidessous.

• 4.1 SURVEILLANCE AU SOL

La plupart des programmes de surveillance opérationnelle des glaces fluviales dépendent des études au sol pour la majeure partie des données sur la glace. La cueillette d'information détaillée sur la glace à partir des stations terrestres nécessite habituellement un engagement à long terme de la part des observateurs de la glace. Les lignes directrices pour la surveillance au sol des glaces fluviales sont présentées dans les parties suivantes.

• 4.1.1 Emplacement des sites d'observation

Les sites d'observation de la glace devraient être dans des endroits surélevés avec plus d'un point de surveillance à partir duquel on peut effectuer des observations en amont et en aval. Il serait également préférable d'avoir une station hydrométrique et une station météorologique à proximité. L'accès à un pont est idéal et permet aussi d'obtenir des mesures du débit immédiatement après, et possiblement pendant la débâcle.

• 4.1.2 Fréquence des observations

La fréquence des visites sur place devrait correspondre avec le degré d'activité de la glace fluviale. Au cours de la période de gel, des visites devraient être effectuées tous les jours. Dès qu'on a établi une nappe de glace intacte, les visites peuvent être réduites à une fois tous les deux ou quatre semaines, en augmentant la fréquence à l'approche de la période de dégel. Au Nouveau-Brunswick, le début de la période de dégel peut être très rapide lorsqu'elle est précédée d'une période de pluie sur la neige. Dès qu'une fonte appréciable est survenue ou lorsqu'une période de réchauffement importante est prévue, les observations devraient être reprises sur une base quotidienne, autant d'observations par jour que possible devant être effectuées au cours de la période de dégel.

• 4.1.3 Observation de la période de gel

Il importe de connaître le processus de gel pour l'interprétation des enregistrements de niveau, l'évaluation du débit et ultimement la modélisation prédictive de la période de gel et la prévision du début de la période de dégel. Les principaux types d'observation à effectuer lors de la période de gel comprennent :

- **Niveau et débit** : Surveiller l'étape menant à la période de gel, particulièrement lors de la formation de la première nappe de glace permanente. Évaluer ou estimer le débit avant et après le gel.
- **Types de glace et concentration** : Noter le type, l'épaisseur et l'étendue latérale de la glace de rive. Évaluer les dimensions, la distribution et la concentration de frasil (ou autre) passant dans le tronçon de la rivière. Lorsqu'une inspection minutieuse de la glace est possible, fournir une estimation qualitative de la force et de la porosité de la glace et noter l'épaisseur et la dimension des radeaux de glace.
- **Méthode de gel** : Indiquer si la formation de la nappe de glace complète finale découle de l'accumulation de particules de glace à travers la section ou de l'accumulation de particules de glace contre une nappe en aval.
- **Apparence de la glace** : Décrire la surface de la nappe de glace finale en faisant mention particulièrement du relief de la surface et des types de glace. Estimer l'épaisseur en général.

• 4.1.4 Observations pendant l'hiver

La croissance de la glace au cours de la saison d'hiver détermine la quantité et la force de la glace au moment du dégel. Les principales observations effectuées au cours de la période d'hiver comprennent :

- **Niveau et débit** : Suveiller l'étape durant l'hiver, en faisant particulièrement attention aux périodes où la nappe de glace tombe, en formant des fissures en charnière. Le débit peut être mesuré moins souvent (environ une fois par mois).
- **Épaisseur de la neige et de la glace** : Mesurer la profondeur de la surface de la nappe de neige et l'épaisseur de la nappe de glace endessous à un certain nombre d'endroits dans la rivière.
- **Composition de la nappe** : En mesurant l'épaisseur de la glace, noter l'épaisseur des différentes couches de glace et la présence d'accumulation de frasil sous la couche de glace principale.
- **Apparence de la glace de surface** : Noter le relief de la surface de la nappe de glace, y compris l'emplacement des crêtes de pression ainsi que la présence de lignes de cisaillement le long de la rive.

• 4.1.5 Observations avant le dégel

- **Niveau et débit** : Le niveau devrait être mesuré quotidiennement jusqu'à ce que le niveau d'eau approche celui enregistré lors de la période de gel. La fréquence devrait être ensuite augmentée (toutes les huit à douze heures) particulièrement si le temps doux est arrivé et qu'un écoulement important est prévu. Des efforts particuliers devraient être faits pour obtenir une évaluation du débit aussi près que possible du moment de la débâcle.
- **Épaisseur de la neige et de la glace** : Dès le début de la principale période de fonte de neige, une étude finale de l'épaisseur de la neige et de la glace dans le tronçon devrait être effectuée avant que le passage sur la surface ne soit plus sécuritaire.
- **Composition de la nappe** : Tout comme pour l'étude de l'épaisseur finale, noter l'épaisseur des différentes couches de glace et les accumulations de frasil sous la nappe de glace.
- **Conditions de la surface** : Dès que le déplacement en surface est insécuritaire, noter le pourcentage de la zone recouverte de neige, la présence d'eau de fonte stagnante, et le moment du renvoi d'eau de la surface.
- **Conditions de la rive** : Noter la profondeur et la largeur de toute eau qui s'accumule près de la rive et la présence d'un écoulement. Décrire également la formation, la dimension et l'emplacement de toute fissure importante, et noter le moment où la nappe de glace principale s'élève et se détache de la rive.

• 4.1.6 Observations de la débâcle

Pour toutes les observations de la débâcle, des efforts particuliers doivent être faits afin d'obtenir des registres précis de l'étape maximale. L'échelle limnimétrique maximale et les appareils de photo à exposition retardée peuvent être utilisés efficacement pour surveiller l'étape de débâcle.

- **Niveau :** Les niveaux d'eau doivent être surveillés aussi souvent que possible. Les points d'intérêt particulier comprennent : le taux d'augmentation du niveau d'eau avant le bris initial et le mouvement de la couche de glace, les niveaux d'eau au premier mouvement de la glace, le niveau d'eau maximum et les changements du niveau d'eau au moment où la glace brisée s'éloigne du tronçon.
- **Début de la débâcle :** Le caractère du début de débâcle (en amont) peut varier considérablement, mais il existe habituellement deux styles distincts. Le premier comprend une transition rapide d'une nappe de glace intacte à une glace extrêmement brisée. Dans de tels cas, estimer le taux de déplacement de ce début d'embâcle fracturé en aval. Le deuxième type est caractérisé par une couche de glace fracturée à grande échelle suivie d'un mouvement en aval de plus grands radeaux qui tournent en se brisant. Dans ce deuxième cas, estimer la vitesse de déplacement des radeaux initiaux en aval.

• 4.1.7 Observations des embâcles

Parce que les embâcles sont responsables des niveaux d'eau plus élevés sur bon nombre de rivières, des données devraient être recueillies concernant leur mode d'initiation et de défaillance, leur effet sur le niveau et même leur dimension en fonction des paramètres élémentaires comme la longueur, la profondeur et la largeur.

- **Niveau et débit :** Les niveaux d'eau devraient être surveillés le plus souvent possible. Les points d'intérêt particulier comprennent : La hausse du niveau d'eau lorsque la glace qui se déplace s'arrête, le niveau d'eau maximum lorsque l'embâcle est en place, et le niveau d'eau lorsque l'embâcle se brise et que la glace commence à s'éloigner du tronçon. Prendre des notes ou des photographies du niveau d'eau sur le lieu de l'embâcle par rapport aux objets locaux. Tout changement physique significatif de l'état de l'embâcle au cours de l'étude des niveaux d'eau devrait être noté. Estimer la vitesse du début de la débâcle qui mène à la formation de l'embâcle et la vitesse de la glace de surface lorsque l'embâcle cède.
- **Superficie de l'embâcle :** Noter si la glace bloque complètement ou partiellement les rivières. Si elle est visible, noter également l'emplacement des extrémités en aval (début) et en amont (fin) de l'embâcle.
- **Condition au début de l'embâcle :** Indiquer si l'embâcle a été arrêté par une obstruction en aval quelconque, par exemple, une nappe de glace intacte, un ouvrage bâti par l'homme, un haut fond, une courbe prononcée, l'étranglement du canal, etc., ou arrêté par des glaces flottantes logées à travers le canal de la rivière.
- **Conditions au début de l'embâcle :** Déterminer la dimension et la concentration de la glace qui arrive. Noter également si la glace s'accumule et contribue à la progression en amont de l'embâcle ou si elle est transportée en aval sous l'embâcle.
- **Conditions de la surface :** Noter le relief et la texture de la surface de l'embâcle. Évaluer la distance de la rive des lignes de cisaillement qui se sont formées à partir des mouvements différentiels dans l'embâcle. Tenter de déterminer si l'embâcle est formé d'une simple couche de glaces flottantes ou si un compactage ainsi qu'un épaissement de l'embâcle sont visibles. Noter également si la surface est "ceinturée" ou si elle a des montagnes de glace localisées. Ce phénomène peut indiquer que la glace est fixée au lit de la rivière.

• 4.1.8 Observations après la débâcle

- **Niveau et débit** : Poursuivre la surveillance régulière des niveaux d'eau jusqu'à ce que la majeure partie des glaces flottantes soient sorties complètement du tronçon. Lorsqu'il y a un accès, tel qu'un pont, le débit devrait être mesuré dès que la rivière est suffisamment libre de glaces flottantes. Des détails devraient être fournis concernant la stabilité du débit au moment de la mesure et à l'emplacement relatif d'accumulations de glace dans la rivière en amont et en aval du lieu de mesure. Les observations du niveau et du débit devraient continuer jusqu'à ce que les effets de remous en raison de la glace disparaissent.
- **Épaisseur de la glace** : Mesurer l'épaisseur des glaces flottantes échouées le long de la rive. Dans la mesure du possible, utiliser les glaces flottantes non déformées par les forces des embâcles. Fournir une courte description de la qualité ou de l'intégrité de la structure des glaces flottantes, par exemple, à savoir si la glace est en aiguilles ou demeure relativement compétente.
- **Dimensions des murs de cisaillement** : Après le dégagement de la glace il reste souvent de grandes masses de glace grandement difformes qui ont été plâtrées le long de la rive, illustration 4. Le bord extérieur de ces masses, le mûr de cisaillement, donne normalement un bon indice de l'épaisseur de l'embâcle. Dès que le niveau de l'eau a baissé au point où les mûrs de cisaillement sont exposés, mesurer ou estimer la hauteur globale du mûr et sa distance de la rive du canal.



Mûr de cisaillement après la débâcle

• 4.2 OBSERVATIONS PAR SATELLITE

Les satellites peuvent fournir des données sur l'état de la glace fluviale les jours où le ciel est dégagé. La couverture peut être assurée par un des satellites suivants : GOES (Satellite géostationnaire opérationnel pour l'étude du milieu), Landsat II (anciennement ERTS, Satellite d'observation des ressources de la terre), NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) et SPOT (Système pour l'Observation de la Terre).

La meilleure limite de résolution au sol (10 à 20 m) est assurée par le nouveau satellite français SPOT qui est également doté d'une fréquence orbitale élevée et d'une capacité d'observation avant et arrière. À l'aide des commandes de direction des instruments, il est possible de prendre des images successives du Nouveau-Brunswick environ tous les trois jours. Le principal inconvénient du système SPOT, est le coût exorbitant de l'image visible et des produits de filmage sur ordinateur.

La deuxième limite de résolution au sol efficace (40 à 80 m) est assurée par le satellite sur orbite polaire Landsat. Toutefois, l'intervalle de dix-huit jours entre les tours du satellite exclut son utilisation pour l'observation des changements à court terme liés à l'activité de la glace fluviale.

L'imagerie la plus fréquente, pouvant atteindre une fréquence de 30 minutes, est fournie par GOES. La résolution du GOES (imagerie visible 1-km, imagerie thermique 8km) est beaucoup moins bonne que celle de Landsat ou de SPOT. Le Nouveau-Brunswick est aussi près de la limite nord de l'imagerie utile (environ 50° N).

La couverture quotidienne peut également être obtenue à partir des satellites sur orbite polaire NOAA à une résolution de 1 km. Les données sur l'AVHRR (Radiomètre perfectionné à très haute résolution) recueillies par ces satellites sont particulièrement utiles pour la surveillance de la glace fluviale.



Image de radar aéroporté du fleuve Saint-Jean en aval de Fredericton (l'emplacement d'embâcles, le 3 avril 1987).

• 4.3 RELEVÉS AÉRIENS

La majeure partie des relevés aériens de l'état de la glace ont fait appel à un mode de photographie oblique dont on peut obtenir des renseignements relativement détaillés, tels que l'état et la concentration de la glace, ou les niveaux de l'eau par rapport aux caractéristiques locales. Les relevés aériens peuvent également fournir de l'information quantitative beaucoup plus détaillée lorsque la photographie verticale, plutôt qu'oblique, est utilisée. Des explications détaillées pour l'obtention de relevés aériens sont fournies par Watson (1988). La photographie verticale permet l'utilisation de l'analyse par stéréo-photogrammétrie qui consiste à mesurer directement les formes de relief et les élévations de l'eau et de la glace. La stéréophotogrammétrie peut également être utilisée pour obtenir les mesures détaillées des vitesses des glaces de surface qui peuvent servir à calculer l'écoulement durant les périodes de gel et de dégel (Prowse et autres 1986; Sherstone 1980).

• 5.0 MÉTHODES DE PRÉVISION

- » 5.1 Embâcles provoqués par le gel
- » 5.2 Débâcles
 - 5.2.1 Décroissance de la glace
 - 5.2.2 Début d'une débâcle
- » 5.3 Embâcles Formés par la rupture

Les aspects pratiques concernant la glace fluviale comportent habituellement la prévision et les avertissements d'inondations ainsi que le choix de mesures de redressement. On peut, dans certains cas, assurer ces aspects par l'application simple des concepts et des formules quantitatifs résumés dans cette partie.

Les modèles numériques conviennent très bien à la résolution d'une vaste gamme de problèmes liés à la glace fluviale; toutefois, certaines conditions peuvent rendre leur utilisation impossible. La modélisation physique pourrait donc être une autre approche ou une approche complémentaire. La grande difficulté dans ce cas repose sur la réduction des caractéristiques de force des nappes de glace intactes (Michel, 1978).

Il est souvent toutefois essentiel de simuler tout le régime des glaces en détail. On peut réaliser cette simulation à l'aide de modèles numériques qui peuvent tenir compte de la géométrie détaillée de la rivière, des variations météorologiques, et des processus physiques de la glace qui se produisent. Il faut souligner, toutefois, que la documentation qui existe actuellement sur la glace fluviale présente de sérieuses lacunes. Ces lacunes sont communément comblées par des hypothèses empiriques "plausibles" appuyées d'observations précises sur place.

• 5.1 EMBÂCLES PROVOQUÉS PAR LE GEL

Des nappes de glace recouvrant toute la largeur de la rivière peuvent être provoquées par le prolongement et la fermeture graduelles de glace de rive, par l'arrêt de glace feuilletée en mouvement et par la congestion de radeaux de glace en mouvement. Le dernier est le procédé le plus commun au Nouveau-Brunswick, mais il n'est pas prévisible de façon fiable sans observations sur place.

Lorsqu'une congestion survient et que la vitesse du débit ou le nombre de Froude est inférieur à une valeur critique, une nappe de glace dégagée composée d'une seule couche de glaces flottantes est créée. Les vitesses critiques varient d'environ 0,6 à 0,7 m/s pour le frasil et la neige fondante, tandis que les nombres critiques de Froude varient normalement de 0,08 à 0,1. Cette nappe se solidifie ensuite par le gel de l'eau interstitielle. Si le bord avant, illustration 5, de ce genre de nappe arrive dans une zone où la vitesse du débit ou le nombre de Froude est supérieur à la valeur critique, les glaces flottantes arrivant sont submergées et deux types d'embâcles peuvent se produire, selon les conditions locales.

Le premier type est généralement formé lorsque la vitesse du débit est suffisamment faible pour causer le dépôt des glaces flottantes submergeantes situées en dessous de la nappe de glace actuelle. Une nappe de glace épaisse et poreuse se formera ensuite et progressera en amont en épaisissant, t (Michel, 1971), comme

$$t = 6,25 V_U^2 / (1-p) g \quad (2)$$

où V_U est la vitesse moyenne du débit en dessous de l'accumulation, g = l'accélération de la gravité et p = la porosité de l'accumulation. Ce type de nappe est également connu comme un embâcle "étroit" (Pariset autres., 1966).

Au fur et à mesure qu'une accumulation poreuse de glace ou un embâcle se propage en amont, la force qui y est exercée augmente et, dans certains cas, peut excéder la capacité de résistance de l'embâcle. Les forces exercées résultent principalement de la friction causée par le débit au plus bas niveau de l'embâcle et la composante poids de la glace. L'embâcle s'écroule ou "pousse" et épaisse jusqu'à ce qu'il ne puisse presque plus résister aux forces exercées. Ce type de processus de la glace se produit souvent dans les rivières hydrologiquement "larges". Un bon indicateur pour classer les rivières comme "larges" ou "étroites" est le rapport $(V^2 C^2 / B)$; V = la vitesse en amont de l'accumulation en m/s, C signifie la rugosité de Chézy en $m^{0,5}/s$ et B représente la largeur de la rivière en m (Acres International Ltd., 1980). Les embâcles des rivières "larges" se produisent généralement lorsque le rapport ci-dessus est inférieur à 24; autrement, un embâcle d'une rivière "étroite" se produit.

Le deuxième type d'embâcle survient lorsque les glaces flottantes submergeantes sont transportées par le débit jusqu'à ce qu'elles parviennent à une zone de vitesse réduite et soient déposées sous la nappe. De très grandes accumulations appelées barrages suspendus, peuvent ainsi se former de cette façon.



Formation de la glace (bord avant).

• 5.2 DÉBÂCLES

La décroissance, la fracture, le transport et le dégagement éventuel de la glace dans une rivière, sont les principaux processus qui surviennent pendant la période de débâcle. La débâcle est provoquée par des températures plus chaudes et elle est très importante, parce qu'elle cause souvent de graves embâcles susceptibles de causer beaucoup de dommages.

• 5.2.1 Décroissance de la glace

Les températures plus chaudes réduisent l'épaisseur et la force de la glace. La fonte de la nappe peut se produire sur les surfaces supérieures et inférieures; il s'agit d'un processus hydrométéorologique complexe. Billello (1980) a proposé une simple formule pour la réduction de l'épaisseur en cm, h_i en raison du climat tempéré :

$$\Delta h_i = a_2 D_T \quad (3)$$

accumulation de degrés - jours de D_T "fonte" (Supérieure à une base de -5°C); et a_2 = coefficient empirique, se situant entre 0,4 et 1,0 cm/oC-d des rivières du nord canadien et de l'Alaska.

La force de la glace est réduite par la radiation solaire pénétrante, après la hausse des températures de la glace à 0°C . Les températures élevées fondent la glace aux frontières de cristaux (Bulatov, 1972; Ashton, 1983). Dans des cas extrêmes, le résultat est la glace en aiguilles qui n'a presque aucune force. La prévision de la diminution de la force de la glace est toutefois complexe et incertaine lorsqu'il n'existe aucune donnée de calibrage (Prowse, 1987).

• 5.2.2 Début d'une débâcle

Lorsqu'un écoulement est prévu pour un tronçon de rivière particulier, il importe de pouvoir prédire s'il provoquera le dégel de la nappe de glace ou non. Pour régler ce problème quantitativement, il faut définir le déclenchement de l'embâcle. Il s'agit du moment à partir duquel la nappe de glace à un endroit précis est mise en mouvement pour une période prolongée.

Une approche empirique a été utilisée selon laquelle le déclenchement de la débâcle est censé commencer lorsque le niveau de l'eau monte, d'une quantité "critique", H_B au-dessus du niveau du dégel précédent. Cette hausse dépend à son tour de l'épaisseur et de la force de la nappe de glace, h_i , Beltaos, 1984; et Shulyakovskii, 1963) et est représentée comme suit :

$$H_B = c h_i \quad (4)$$

c = coefficient adimensionnel spécifique à un site. Le coefficient c dépend de plusieurs variables, telles que la courbe et l'inclinaison de la rivière, la contrainte de cisaillement du débit, la perte de force et d'épaisseur de la glace et l'inclinaison des rives. Dans les cas où les effets thermiques (pertes d'épaisseur et de force) sur la glace sont faibles, la valeur de c a un maximum de c_0 à un site précis; c_0 varie de 2,2 à 3,5 (Beltaos, 1989). Lorsque les effets thermiques sont considérables, la différence, $c h_i - H_B$, a été liée empiriquement à un indice thermique (la version la plus simple étant les degrés-jours accumulés de fonte). Ces rapports sont propres à un site (Beltaos, 1984; Tang et Davar, 1984; Burrell et autres, 1986) et il faut avoir plus de données sur le site pour établir des généralisations.

• 5.3 EMBÂCLES FORMÉS PAR LA RUPTURE

Une fois le dégel commencé, des embâcles peuvent se former et contrôler largement les événements qui s'ensuivent. Peu de mesures peuvent être prises maintenant concernant la prévision de l'endroit et du moment où les embâcles vont se former; on peut seulement se fier aux expériences déjà vécues. Les embâcles causés par la rupture sont généralement gardés en place par des sections de nappe de glace intactes, illustration 6, et peuvent se former n'importe où dans un tronçon précis. Il y a néanmoins des sites préférés et répétés de formation, selon la présence des formes géomorphologiques et des caractéristiques artificielles propices à la formation d'embâcles (par exemple, courbes prononcées, piliers de ponts, hautsfonds, baisse de l'inclinaison, etc.)



Embâcle formées par la rupture.

En présumant ou sachant qu'un embâcle s'est formé quelque part dans une rivière, il est possible de prédire les niveaux d'eau qu'il entraîne. Pariset et autres (1966) ont établi la distinction entre des embâcles de cours d'eau "étroits" et "larges", selon leur capacité de résister aux forces exercées, tel qu'il a été déjà expliqué. Le type "étroit" est stable, vu l'épaisseur obtenue dans l'équation 2, tandis que l'embâcle "large" se forme après l'effondrement d'un embâcle "étroit". Règle générale, les embâcles formés par la rupture sont les moins aptes à résister aux forces exercées et tendent à être du type "larges" (Beltaos, 1983); ils présentent donc des risques accrus d'inondations et de dommages. De plus, le débit lors du dégel est habituellement plus élevé que pendant le gel, ce qui augmente les risques d'embâcles formés par la rupture pouvant causer des inondations.

Le calcul des niveaux d'eau actuels causés par les embâcles peut être complexe au point d'exiger des applications d'un modèle numérique; toutefois, des prévisions rapides des niveaux possibles peuvent être établies à l'aide d'une condition "équilibre" qui définit la plus grande profondeur d'eau possible (H_1), figure 7. Cette profondeur peut être estimée à l'aide de la figure 8 (Beltaos, 1983); ou à l'aide de théories plus complexes qui tiennent compte de la géométrie du canal et de la rugosité de l'embâcle

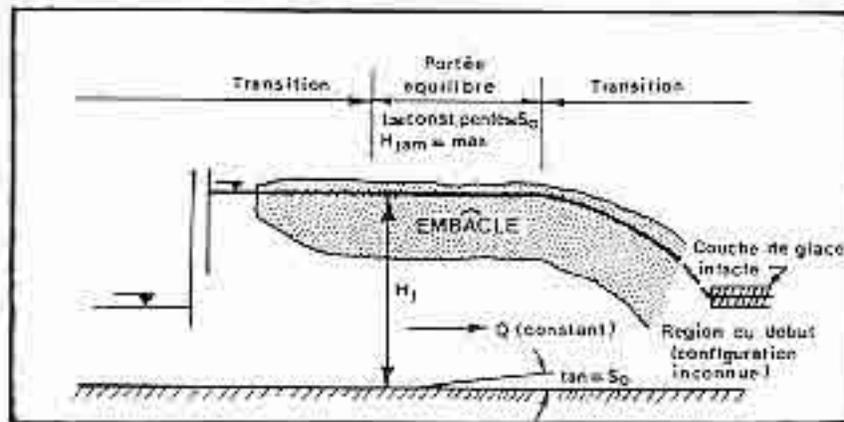


FIG. 7. Profil d'un embâcle flottant avec une portée équilibre.

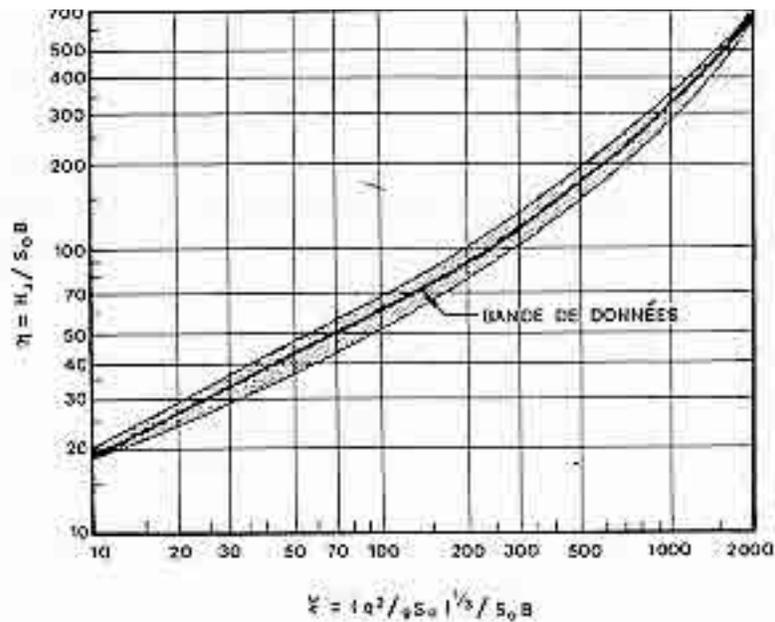


FIG. 8. Rapport adimensionnel pour les niveaux d'équilibre des embâcles formés par la rupture.

Lorsqu'un embâcle débloque soudainement, une vague d'eau raide coulant rapidement en aval de la rivière comme une crue peut causer de graves dommages avec peu d'avertissement. Les conditions menant au dégagement de l'embâcle ne sont généralement pas bien connues, toutefois, Ferrick et autres (1986) ont présenté des données sur place concernant ce phénomène. Il est possible toutefois de prédire approximativement les caractéristiques des crues à l'aide de principes hydrodynamiques. Normalement, cette méthode exige l'application d'un modèle informatique hydrodynamique unidimensionnel du débit non constant (Beltaos et Krishnappan, 1982); toutefois, des estimations rudimentaires peuvent être établies à l'aide de la simple théorie de Henderson et Gerard (1981), résumée dans les figures 9 et 10. À noter que la gravité de la crue augmente parallèlement à la dimension du cours d'eau. Les grandes rivières devraient connaître de plus grandes crues, ce qui correspond à l'expérience..

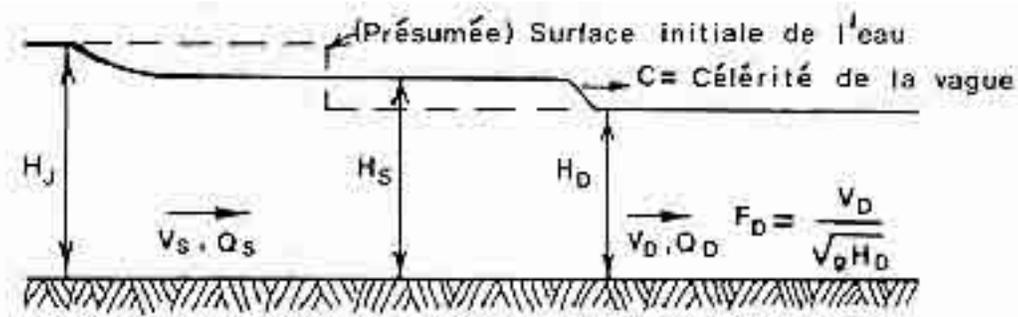


FIG. 9. Schéma des caractéristiques des crues.

On peut étudier les faits suivants pour la prévision de l'étape éventuelle d'un embâcle :

Largeur de la rivière (B) = 600 m

Inclinaison (S_0) = 0,0003

Débit (Q_D) = 1 800 m³/s

Unité de débit ($q = Q_D/B$) = 3,0 m²/s

Donc, à l'aide de la formule à la figure 8

$$\xi = 81$$

À l'aide de la figure 8

$$\eta = 55$$

Ensuite, $H_J = 9,9$ m

Afin de démontrer ce qui pourrait se produire en aval lors du dégagement de l'embâcle décrit dans l'exemple cidessus, présumons une valeur de $H_D = 4,1$ m, Donc, $FD = 0,12 H_J/H_D = 2,4$

À l'aide de la Figure 10

$$(H_S - H_D)/(H_J - H_D) = 0,41$$

Ainsi, $H_S = 6,5$ m

Aussi, à partir de la Figure 10

$$C/V_D = 13,4 \text{ Ainsi, } C = 9,8 \text{ m/s}$$

$$V_S/V_D = 6 \text{ Ainsi, } V_S = 4,1 \text{ m/s}$$

$$Q_S/Q_D = 9 \text{ Ainsi, } Q_S = 16\,200 \text{ m}^3/\text{s}$$

À noter que V_s estimée cidessus (environ 6 fois la vélocité en aval) est une vélocité de l'eau très élevée qui peut se produire dans des conditions d'eau libre, lors de grandes inondations seulement. La célérité de la vague, C , est également très élevée et entraînerait une hausse très rapide des niveaux d'eau en aval. Le débit à la suite du dégagement de l'embâcle est 9 fois le débit de l'eau en aval.

Par contre, dans un cours d'eau d'une largeur de 100 mètres, d'une inclinaison et d'une unité de débit identiques, et d'une valeur prévue de $H_D = 4,1$ m, il est possible de démontrer que les effets en aval de la crue sont moins graves, tel qu'il est démontré cidessous :

$$H_J = 5,2 \text{ m}$$

$$H_S = 4,6 \text{ m}$$

$$C/V_D = 10,5 \quad C = 7,7 \text{ m/s}$$

$$V_S/V_D = 2 \quad V_S = 1,5 \text{ m/s}$$

$$Q_S/Q_D = 3 \quad Q_S = 900 \text{ m}^3/\text{s}$$

Il faut souligner ici que les techniques cidessus servent à établir des prévisions préliminaires des caractéristiques des embâcles et une évaluation du phénomène de la formation et du dégagement d'embâcles. Les lecteurs intéressés aux techniques détaillées de la prévision des embâcles peuvent consulter la liste bibliographique contenue dans ce guide.



Route bloquée par de la glace fluviale.

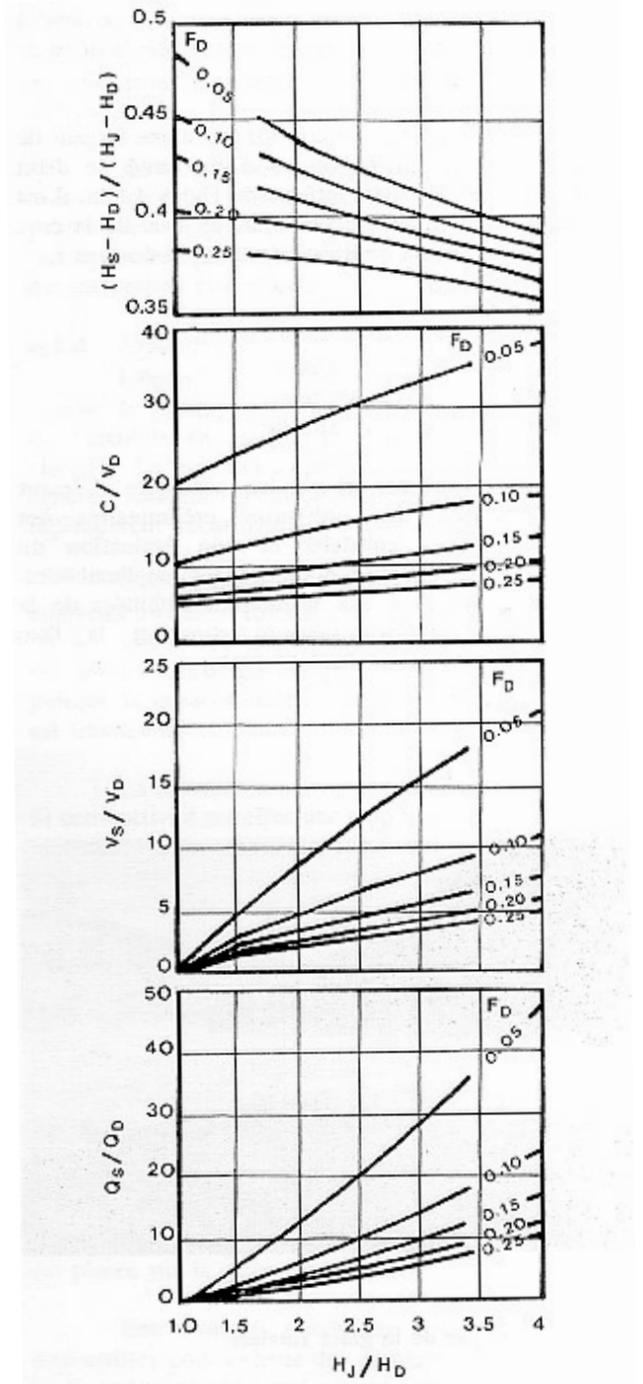


Figure 10. caractéristiques des crues

• 6.0 CONTRÔLE DE LA GLACE

- » 6.1 Réduction des Embâcles
 - 6.1.1 Ouvrages fixes
 - 6.1.2 Estacades
 - 6.1.3 Modification du canal
 - 6.1.4 Épandage
 - 6.1.5 Dynamitage
 - 6.1.6 Rupture de la glace
 - 6.1.7 Enlèvement mécanique de la glace
- » 6.2 Adhérence de la glace
- » 6.3 Navigation d'hiver

Il est parfois souhaitable de contrôler le régime des glaces afin d'éliminer ou de réduire les effets des problèmes entraînés par la glace. Ces problèmes comprennent entre autres : inondations provoquées par des embâcles, perte de production d'énergie hydroélectrique, blocage des voies navigables et dommages aux ouvrages hydrauliques. Cette partie présente les diverses méthodes de contrôle.

• 6.1 RÉDUCTION DES EMBÂCLES

La réduction des embâcles comprend les mesures prises pour supprimer ou réduire les problèmes qui pourraient survenir à la suite de la formation ou du déblocage d'un embâcle. Il faut faire preuve de beaucoup de compréhension du régime des glaces afin de mettre en oeuvre une des techniques de réduction suivantes.

• 6.1.1 Ouvrages fixes

Les ouvrages fixes sont utilisés pour stabiliser une nappe de glace ou empêcher le mouvement en aval des bris de glace. La stabilisation d'une nappe de glace empêche ce bris prématuré, ce qui augmente les risques de fonte de glace sur le site, alors que la rétention des glaces flottantes réduit l'approvisionnement de glace aux sites d'embâcles éventuels en aval de la rivière.

Les ouvrages fixes doivent être conçus de façon à résister aux forces exercées. Les forces comprennent l'impact des glaces flottantes en mouvement et l'expansion thermique des glaces feuilletées. La modélisation hydraulique physique peut s'avérer nécessaire lors de la conception et de l'installation des ouvrages fixes destinés à contrôler la glace (Perham, 1984).

Les épis et les jetées peuvent être utilisés pour rétrécir la largeur du cours d'eau (CummingCockburn & Associates Limited, 1986) afin de favoriser l'union des glaces flottantes lors du gel et d'augmenter les niveaux d'eau en amont, améliorant ainsi les conditions hydrologiques en amont pour assurer la stabilité de la nappe de glace. Ces ouvrages créent également un entrepôt pour les glaces flottantes lors de la débâcle, ce qui réduit le volume de glace se déplaçant en aval.

Un barrage de contrôle de la glace obstrue le passage de la glace afin d'empêcher la formation d'embâcles en aval de la rivière (Michel, 1971). Selon la capacité d'entreposage disponible par rapport à l'ampleur de l'inondation du printemps, l'ouvrage de contrôle des inondations peut retenir toute la glace en amont, jusqu'à ce qu'elle fonde. La plupart du temps, toutefois, cette capacité d'entreposage disponible suffit seulement à retarder le passage des glaces plus faibles. Les ouvrages de contrôle de la glace peuvent toutefois provoquer des embâcles près de la limite en amont du bassin d'amont puisque la force vive de la glace est ralentie considérablement par la glace du bassin d'amont plus forte et une réduction importante du gradient hydraulique. Un barrage de contrôle de la glace assure une fiabilité élevée avec un minimum de surveillance et de fonctionnement; toutefois, d'autres conditions environnementales ou économiques peuvent empêcher son utilisation.

Les déversoirs sont des barrages déversoirs bas aménagés perpendiculairement au cours d'eau pour hausser les niveaux d'eau en amont afin de créer des conditions qui favorisent la formation d'une nappe de glace stable ou l'accumulation de frasil ou de radeaux de glace. Les déversoirs bien conçus peuvent fournir un bon contrôle de la glace à des sites choisis sur de petites rivières pendant les périodes de gel et de dégel.

• 6.1.2. Estacades

Les estacades sont aménagées perpendiculairement au cours d'eau afin de contrôler le mouvement de la glace. Elles peuvent être utilisées pour réduire la quantité de glace aux endroits où des embâcles peuvent se former en aval de la rivière en limitant le mouvement de la glace en amont de la rivière et en prolongeant la période d'écoulement des glaces. Les estacades sont utilisées le plus souvent toutefois pour stabiliser ou retenir une nappe de glace en amont de la rivière, lorsque les vitesses sont moins de 0,6 m/s ou que les nombres de Froude sont inférieurs à 0,08. Les estacades sont des pieux attachés ensemble par des chaînes et soutenus par des câbles fixés au lit fluvial. On peut aussi aménager des estacades fixées au quai. Par exemple, l'ouvrage de contrôle de la glace de Montréal utilise des estacades ou des batardeaux placés entre des piliers de béton fixes afin de capter les glaces flottantes et d'aider à stabiliser la nappe de glace plus tôt dans l'hiver, ce qui ne serait pas le cas autrement.

• 6.1.3. Modification du canal

Les études et les observations (Calkins et autres, 1976) révèlent que les embâcles ont tendance à se former à des endroits où il y a : obstructions à la surface, courbes dans la rivière, modifications à l'inclinaison du canal d'écoulement de la rivière, étranglements, étangs à faible vitesse et sections de rivière peu profondes.

Des modifications peuvent être apportées au canal d'écoulement afin de réduire le risque de formation d'embâcles. Ces modifications comprennent entre autres : enlèvement des étranglements et des obstructions de surface tels que pilotis, piliers de ponts et îles naturelles ainsi qu'enlèvement de barres et de bancs de gravier. Des ouvrages de dérivation du canal peuvent également être aménagés afin de contourner un obstacle à l'écoulement de la glace ou de l'eau. Toutefois, les modifications au canal devraient être évaluées d'après un site particulier.

Au Nouveau Brunswick, il faut obtenir un permis avant de modifier le lit ou les rives d'un cours d'eau. Les projets sont étudiés afin de protéger les particuliers ou les ouvrages ainsi que l'habitat du poisson et l'environnement qui pourraient être affectés par la modification.

• 6.1.4 Épandage

L'épandage est l'action d'épandre une mince couche de substance foncée sur une nappe de glace afin de l'affaiblir en raison de l'absorption accrue de la chaleur. Le matériel d'épandage peut être du sable, des cendres volantes ou une autre substance foncée qui ne représentent aucun risque pour l'environnement.

L'épandage peut être effectué afin de prévenir les embâcles aux sites connus pour la formation d'embâcles ou des zones inondables. L'épandage n'est pas efficace sur des surfaces de glace rugueuses telles que les embâcles puisque la capacité de ces surfaces d'absorber la chaleur est très faible.

La coordination de l'épandage est très importante. Si cette activité est effectuée trop tôt, la couche peut être recouverte d'une chute de neige tardive, ce qui diminue son efficacité. Si cette activité est pratiquée trop tard, la glace peut devenir trop faible et pas assez sécuritaire pour permettre l'épandage de la substance; ou la glace pourrait dégeler et provoquer un embâcle avant que la substance d'épandage ne produise un effet.

• 6.1.5 Dynamitage

Le dynamitage peut être utilisé pour briser une nappe de glace en glaces flottantes qui peuvent être transportées par l'eau en aval ou pour affaiblir une nappe de glace solide avant l'arrivée de la glace en amont. Les explosifs sont habituellement placés dans l'eau en dessous de la glace. Une plus grande charge est nécessaire si elle est placée sur la glace ou à l'intérieur.

Des explosifs placés aux bons endroits peuvent être utilisés pour enlever des embâcles par le dynamitage de la nappe de glace qui retient l'embâcle. Le moment propice pour débloquer un embâcle est immédiatement après sa formation. Si le débit a diminué, le dynamitage de l'embâcle sera inefficace en raison de l'insuffisance d'eau pour transporter les morceaux de glace en aval.

Le dynamitage des embâcles est rarement efficace et pose des risques pour l'équipe de dynamitage et les biens avoisinants. Le placement de la charge d'explosifs est une tâche dangereuse qui doit seulement être effectuée par un personnel compétent. Des mesures adéquates de sécurité, de sauvetage et de premiers secours devraient être en place avant le début des travaux.

• 6.1.6. Rupture de la glace

La rupture de la glace désigne la rupture, le sciage ou la séparation d'une nappe de glace pour la faire fondre plus vite ou pour la briser en petits morceaux plus faciles à transporter lors de la montée des niveaux d'eau. La rupture de la glace peut seulement être effectuée si la nappe de glace est assez forte pour supporter l'équipement de rupture et les équipes.

La ville d'Ottawa a un programme de coupe et de dynamitage de la glace sur la rivière Rideau afin d'empêcher la formation d'embâcles. Des bandes d'une largeur d'environ 15 à 20 m sont coupées là où la glace a tendance à demeurer solide. Les équipes forent et dynamitent ensuite la glace à l'extrémité en aval avant l'arrivée des écoulements du printemps. On a également eu recours à la rupture de la glace pour empêcher les embâcles dans la rivière Beauvage près de la ville de Québec. La rupture de la glace présente de nombreux avantages comparativement aux techniques de dynamitage; elle brise plus de glace que le dynamitage, son coût est un tiers de celui du dynamitage, elle n'a pas d'impacts environnementaux et elle est généralement sécuritaire.

• 6.1.7. Enlèvement mécanique de la glace

Pour les petits cours d'eau accessibles à partir des rives, il est possible d'enlever la glace à l'aide de matériel de construction, tel que des pelles mécaniques à godet retourné et des grues à benne traînante, avant que des embâcles ne se forment. L'enlèvement efficace et sécuritaire de la glace dépend en partie de l'opérateur de l'équipement qui doit faire preuve de jugement au fur et à mesure des opérations d'enlèvement.

• 6.2 ADHÉRENCE DE LA GLACE

L'adhérence du frazil surefroidi aux ouvrages (grilles de retenue des débris, écluses hydrauliques, etc.) présente un autre problème important. Il y a plusieurs solutions à ce problème. Une des approches consiste à chauffer la surface à laquelle adhère la glace. Pour ce faire, il faut mettre de la vapeur ou de l'eau tiède sur la zone touchée ou incorporer une résistance électrique ou chauffer celui-ci à l'eau chaude ou à la vapeur. On vise à maintenir la température de la surface au-dessus du point de congélation afin que la glace n'y adhère pas.

Une autre approche consiste à utiliser des matériaux de construction et des revêtements auxquels la glace adhère très peu, ce qui la rend facile à enlever. Un revêtement en plastique fabriqué à partir d'une solution copolymère de toluène et d'huile de silicone (Ashton, 1986) s'est avéré efficace.



Maisons entourées de glace et d'eau montante

• 6.3 NAVIGATION EN HIVER

Il y a très peu de navigation intérieure, voire aucune, sur les rivières du Nouveau Brunswick pendant la saison des glaces, sauf celle des traversiers et des navires océaniques à l'embouchure des rivières. Les brise-glaces sont couramment utilisés pour lutter contre les glaces et permettre la navigation sur les rivières.

Des diffuseurs de bulles d'air peuvent également prévenir efficacement la formation d'une couche de glace consolidée dans les écluses et les installations portuaires et sur le parcours des traversiers, mais ils ne sont guère pratiques sur de longs tronçons de rivière. Le jet d'eau chaude propulsé par de l'air comprimé provenant d'un diffuseur est dirigé vers la surface pour faire fondre la glace ou empêcher sa formation. Le panache d'eau chaude créé par la montée des bulles d'air se répand et fait fondre la couche de glace (Ashton, 1986). L'accès à de l'eau chaude près du chenal constitue l'élément le plus important pour assurer l'efficacité d'un diffuseur de bulles d'air (département de l'Armée américaine, 1982).

- Acres International Ltd. (1980), "Behavior of Ice Covers Subject to Large Daily Flow and Level Fluctuations", pour l'Association canadienne de l'électricité.
- Ashton, G.D. (1983), "First Generation Model of Ice Deterioration", Délibérations de la Conference on Frontiers in Hydraulic Engineering, ASCE, New York, pp. 273278.
- Ashton, G.D. (1986), "River and Lake Ice Engineering", Water Resources Publications, Littleton, Colorado, É.U.
- Beltaos, S. et Krishnappan B.B. (1982), "Surges from Ice Jam Releases: A Case Study", Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 9, no 2, pp. 276284.
- Beltaos, S. (1983), "River Ice Jams: Theory, Case Studies and Applications", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 109, no 10, pp. 13381359.
- Beltaos, S. (1984), "Study of River Ice Breakup using Hydrometric Station Records", Actes d'un atelier sur l'hydrologie de la glace fluviale, Fredericton, N.B., Canada, pp. 4159.
- Beltaos, S. (1989), "Initial Fracture and Breakup of River Ice Control", Institut national de recherche sur les eaux, Burlington, Ontario.
- Bilello, M.A. (1980), "Maximum Thickness and Subsequent Decay of Lake and Fast Sea Ice in Canada and Alaska", U.S. Army CRREL Report 806, Hanover, N.H.
- Bulatov, S.N. (1972), "Computation of the Strength of the Melting Ice Cover of Rivers and Reservoirs and Forecasting of the Time of its Erosion", Actes du Symposium on the Role of Snow and Ice in Hydrology, Banff, Canada, pp. 575580.
- Burrell, B.C., Tang, P.W., Lane, R., et Beltaos, S. (1986), "Study of Ice Breakup in the Meduxnekeag River, N.B., Using Hydrometric Station Records", Actes du 4e colloque sur l'hydrologie de la glace fluviale, Montréal.
- Calkins, D.J., Hulton, M.S. et Marlar, T.L. (1976), "Analysis of Potential Ice Jam Sites on the Connecticut River at Windsor, Vermont", Report 7631, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers. Hanover, New Hampshire.
- CummingCockburn & Associates Ltd. (1986), "Ice Jams on Small Rivers, Remedial Measures and Monitoring", Willowdale, Ontario.
- Desplanque, C. et Bray, D.I. (1984), "Winter Regime in the Tidal Estuaries of the Northern Portion of the Bay of Fundy, N.B.", Actes d'un colloque sur l'hydrologie de la glace fluviale, Fredericton, N.B.
- Devik, O. (1964), "Present Experience on Ice Problems Connected with the Utilization of Water Power in Norway", Journal de l'Association internationale des recherches hydrologiques, vol. 2, no 1, pp. 2540.
- Ferrick, M., Lemieux G., Mulherin N. et Dement W. (1986), "Controlled River Ice Cover Breakup, Part 1. Hudson River Field Experiments", Symposium de l'AIRH sur la glace, ville d'Iowa, Iowa, É.U.

- Henderson, F.M. et Gérard R. (1981), "Flood Waves Caused by Ice Jam Formation and Failure", Actes du Symposium de l'AIRH sur la glace, Québec, Canada, vol. 1, pp. 277287.
- Le BrunSalonen, M.L. (1983), "Average Solid Ice Thickness in New Brunswick Rivers", Rapport no 2.03, Préparé dans le cadre du Programme de relance de l'aide à l'emploi, Fredericton, N.B.
- Matousek, V. (1984), "Regularity of the Freezingup of the Water Surface and Heat Exchange Between Water Body and Water Surface", Actes du Symposium de l'AIRH sur la glace, Hamburg.
- Michel, B. (1971), "Winter Regime of Rivers and Lakes", U.S. Army CRREL Monograph 111B1a, Hanover, N.H.
- Michel, B. (1978), "Ice Mechanics", Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada.
- Newbury, R.W. (1968), "The Nelson River: A Study of Subarctic River Processes", Thèse de Ph.D., Université John Hopkins.
- Pariset, E., Hausser R. et Gagnon A. (1966), "Formation of Ice Covers and Ice Jams in Rivers", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 92 (HY6), pp. 124.
- Perham, R.E. (1984), "Ice Sheet Retention Structures", Actes du Symposium de l'AIRH sur la glace, Association internationale de recherches hydrologiques, Hambourg, Allemagne de l'ouest. vol. I, pp. 339348
- Prowse, T.D., Anderson, J.C. et Smith R.L. (1986), "Discharge Measurement During River Ice Breakup", Actes de la 43e Conférence de l'est sur la neige, Hanover, New Hampshire, pp. 5569.
- Prowse, T.D. (1987), "Monograph on River Ice Jams, River Ice Processes", soumis par le NRCC Working Group on River Ice Jams.
- Shen, H.T., Foltyn, E.P. et Daly, S.F. (1984), "Forecasting Water Temperature Decline and Freezeup in Rivers", U.S. Army, CRREL Report 8419, Hanover, N.H.
- Sherstone, D.A. (1980), "Photogrammetric Measurement of Discharge in Icechoked Northern Streams During Spring Breakup" Thèse M.A., Département de géographie, Université de Carleton, Ottawa, Canada.
- Shulyakovskii, L.G. (1963), "Manual of Forecasting Ice Formation for Rivers and Inland Lakes", Israel Program for Scientific Translations, Jérusalem.
- Tang, P.W. et Davar K.S. (1984), "Forecasting the Initiation of Ice Breakup on the Nashwaak River, N.B.", Actes de l'atelier sur l'hydrologie de la glace fluviale, Fredericton, N.B., pp. 6593.
- U.S. Department of the Army (1982), "Ice Engineering", Engineers Manual, Corps of Engineers, Washington, D.C.
- Watson, S.A. (1988), "Interpreting River Ice Breakup History from Photogrammetric Measurements of Ice Jams in the LiardMackenzie Rivers, Northwest Territories", Thèse de M.Sc., Watershed Ecosystems Program, Université Trent, Peterborough, Ontario.