

**Introduction des caractéristiques physico-mécaniques des glaces  
dans la modélisation de l'onde de rupture  
des barrages en cascade**

**Integration of Ice Mechanical Properties  
for the Modelling of a Winter Dam Break Wave  
in a Series of Dams in Cascade**

*Fuamba, Musandji<sup>†</sup>; Marche, Claude<sup>†</sup> et Quach, Tung<sup>‡</sup>*

*<sup>†</sup>École Polytechnique de Montréal*

*<sup>‡</sup>Ingénieur chez Hydro-Québec*

*Département de génie civil, géologique et des mines  
Campus de l'Université de Montréal, case postale 6079,  
Succursale Centre-Ville, Montréal, QC H3C 3A7, Canada  
Courriel: [mfuamba@courriel.polymtl.ca](mailto:mfuamba@courriel.polymtl.ca)*

**Résumé:** Dans les régions aux conditions hivernales prolongées, la présence du couvert de glace par temps hivernal modifie la nature géométrique du bief et les caractéristiques hydrauliques régissant l'écoulement, de sorte que la sollicitation du barrage d'aval est plus forte, plus rapide et plus violente et qu'elle pourrait être plus critique pour la stabilité de l'ouvrage en question que celle évaluée en condition d'eau libre. Une modélisation d'une rupture hivernale de barrages, tenant compte des caractéristiques physico-mécaniques des glaces et du comportement du couvert de glace soumis au passage de cette onde de rupture, est présentée dans cette communication.

**Abstract:** The presence of an ice cover in regions with long winters modifies the geometric nature of the reservoir between two dams and also the flow properties. This results in loads on the downstream structure that are intensive and impulsive in nature and thus relatively critical to the general stability of the structures than ones without cover. The main objective of this study is to model a winter dam break wave occurring in a series of dams established in cascade by taking the ice mechanical properties of the ice cover into account, in order to predict the interaction between the dam break wave and the ice cover behaviour.

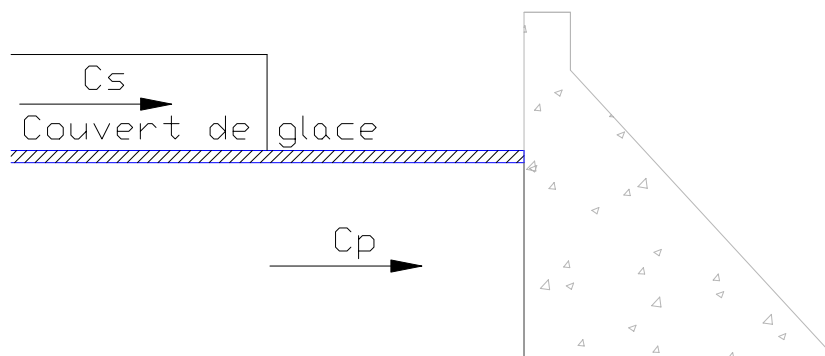
## 1. Introduction

Les effets de l'onde de rupture des barrages en cascade varient selon que la situation climatique est estivale ou hivernale. La présence du couvert de glace par temps hivernal sur le réservoir entre deux barrages successifs modifie fondamentalement le comportement de cette onde autant dans sa propagation que dans ses effets sur l'ensemble des ouvrages en présence. Étant donné l'impact de la présence du couvert de glace sur l'évaluation de la sécurité des ouvrages exposés à l'onde de rupture, il devient pertinent d'inclure les caractéristiques physico-mécaniques des glaces dans la modélisation de l'onde; afin de cerner au mieux le phénomène et prendre ainsi les mesures qui s'imposent. La présente étude se propose donc d'introduire les paramètres de la glace dans la modélisation de la propagation de l'onde de rupture et d'en déduire le comportement général du couvert.

## 2. Impact de la présence du couvert de glace dans la sécurité hivernale des barrages en cascade

### Sollicitations dynamiques du barrage d'aval

Lors de l'arrivée d'une onde de rupture, la présence du couvert de glace modifie profondément la nature des sollicitations au niveau du barrage d'aval; et les risques de rupture du barrage d'aval peuvent être plus désastreux que ceux résultant d'une rupture identique se produisant en l'absence de glace (CIGB-ICOLD 1998). En effet l'onde, qui était entièrement une onde de surface dans le cas d'un réservoir à ciel ouvert, est à présent subdivisée en deux: une onde de pression et une onde de surface. L'onde de pression se propageant sous le couvert peut ressembler à un coup de bélier selon le niveau de rigidité et le degré de fixation du couvert de glace considérés. Le comportement rigide du couvert accélère la vitesse de propagation de cette onde et peut éventuellement accroître la surpression jusqu'à 20% alors que certains comportements flexibles peuvent doubler la surpression sans couvert (Fuamba et *al.* 2000). L'onde de surface se propageant sur le couvert est moins rapide que l'onde de pression; et sa vitesse dépend largement de la rugosité de la glace.

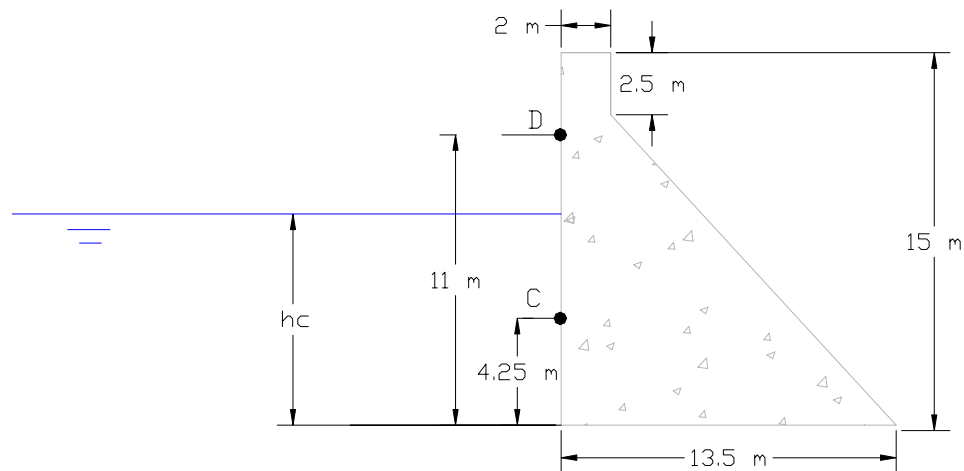


**Figure 1: Sollicitations dynamiques du barrage d'aval**

L'effet combiné des sollicitations dynamiques au niveau du barrage d'aval (Blocage de l'onde de pression  $F_P$  et Blocage de l'onde de surface  $F_S$ ), comme le montre la Figure 1 où  $c$  est la célérité de l'onde, peut s'avérer dangereux dans la mesure où il accroît le risque de précipiter la rupture de cet ouvrage.

### Exemple du canal 1D

L'exemple repris ici est celui d'un canal 1D où des essais ont été effectués pour déterminer l'influence d'une onde de rupture en présence d'un couvert de glace (Marche et Fuamba 2000). L'influence de deux types de couvert de glace a aussi été étudiée. Dans le premier cas, le couvert est considéré comme ayant un comportement rigide. Alors que dans le deuxième cas, c'est le comportement d'un couvert flexible qui est analysé. Schématisé à la Figure 2, ce canal est situé en aval d'un barrage limité à l'aval par un ouvrage haut de 15 m. Le couvert s'étend sur 190 m depuis l'ouvrage d'aval.



**Figure 2: Définition du barrage et position des points d'analyse**

Lors des essais, la pression instantanée a été mesurée aux points d'analyse C et D situés respectivement à 4,25 m et 11 m du fond du canal. C est donc toujours sous l'eau et dans la zone touchée par l'onde de pression lorsqu'il y a couvert, alors que D est initialement hors de l'eau. L'évolution de la pression en ces deux points permet, en faisant l'hypothèse que la pression varie hydrostatiquement dans les deux zones (sous et sur le couvert), de déduire à tout instant les forces et moments engendrés sur l'ouvrage.

La Figure 3 montre une comparaison des accroissements de la force de glissement appliquée à l'ouvrage,  $F_g$ , pour un couvert au comportement flexible. On peut y observer que, lors de l'arrivée de l'onde de rupture, la force sur l'ouvrage d'aval est rapidement multiplié par 2,5 environ en eau libre mais par 3,30 en présence de ce genre de couvert.

La même observation peut être faite avec le moment de renversement  $M$  tel que montré à la Figure 4. À l'arrivée de l'onde de rupture, le moment en question est respectivement amplifié par 4,0 et 4,5. On peut donc constater que l'effet relatif du couvert de glace est moins important sur le moment de renversement que sur la force de poussée horizontale; ceci s'expliquant peut-être par

le fait que la plus grande partie de l'accroissement de force se fait sous le couvert, c'est-à-dire à bas niveau sur l'ouvrage.

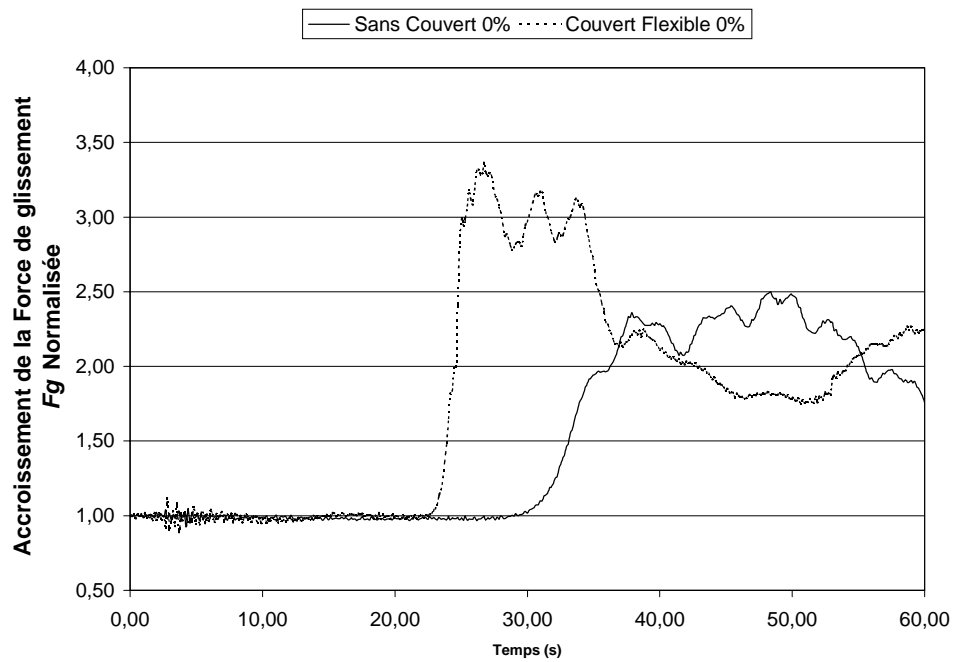


Figure 3: Amplification de la Force de glissement  $F_g$  sous un couvert flexible

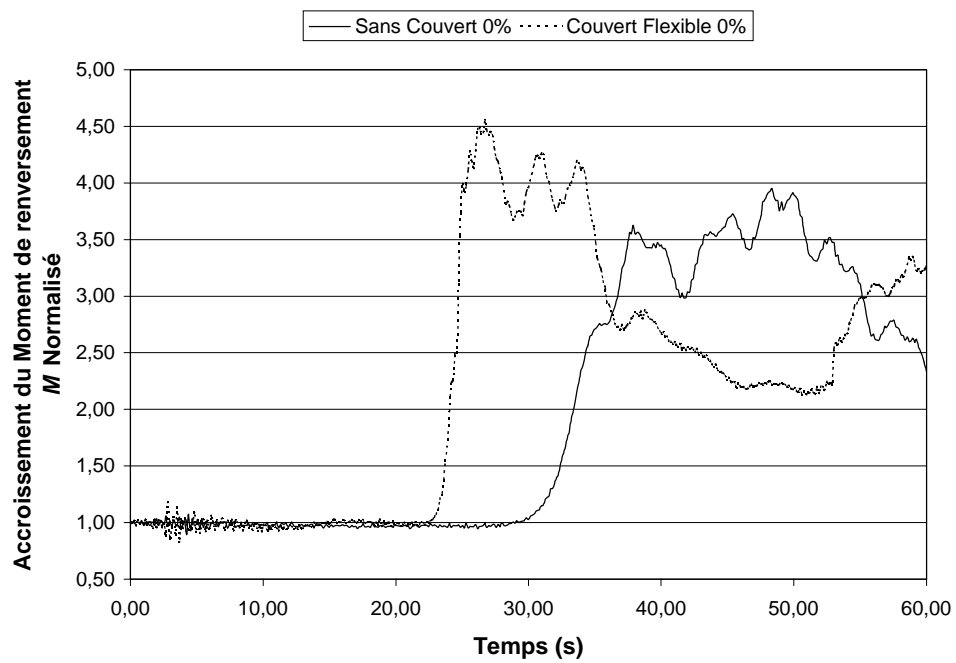


Figure 4: Amplification du Moment de renversement  $M$  sous un couvert flexible

Jusqu'à présent, seul l'effet du comportement du couvert selon sa rigidité/flexibilité avait été analysé lors de la propagation de l'onde de rupture. Or la prévision n'est valable que si le couvert reste non altéré. Comment réagit le couvert de glace suite à la sollicitation de l'onde? Pour le savoir, il est important d'introduire les caractéristiques physico-mécaniques de la glace dans la modélisation de la sécurité hivernale des barrages en cascade. Et c'est l'objet de la prochaine section.

### 3. Comportement physico-mécanique du couvert de glace

Dans la région proche du barrage, l'écoulement est faible et souvent de type laminaire. La température hivernale favorise la formation d'un couvert de glace sur la surface de l'écoulement. Michel, Prowse, Petryk et plusieurs autres auteurs ont étudié le phénomène à la base de la formation de la couche de glace favorisé par les processus statique et dynamique (Beltaos 1995).

#### Processus de formation du couvert de glace

Le processus statique débute lorsque les premières particules de glace se forment sur le rivage. Une fois que la température des matériaux sur la côte tombe en dessous de la température de nucléation hétérogène de l'eau, les cristaux de glace apparaissent dans l'eau adjacente au rivage. Du fait qu'il n'y a pas de mouvement d'échange de couches d'eau (supérieure et inférieure) dans un écoulement laminaire, Michel (1971) affirme que les différences de température sont importantes dans les directions verticale et horizontale lorsqu'on s'éloigne du rivage. La couche supérieure adjacente au rivage surefroidit considérablement alors que la température moyenne de l'eau au milieu de l'écoulement est encore loin du point de congélation. La nucléation de la glace se propage ensuite en surface vers le milieu de l'écoulement, formant ainsi un couvert de glace clair et solide. Selon Prowse (Beltaos 1995), ce processus continue tant que le flux net de chaleur de surface de l'eau à l'air  $Q^*$  le permet, c'est-à-dire, si la température de l'eau reste assez proche du point de congélation.:

$$Q^* = C_0 (T_w - T_a) \quad (1)$$

où  $T_w$  et  $T_a$  sont les températures (°C) respectivement de l'eau et de l'air.

Le point de départ de la nucléation de la glace peut aussi être les obstacles à l'écoulement du genre dépôts, piles de pont ou encore la bordure du barrage.

Le processus statique seul ne justifie pas la progression rapide du couvert de glace sur la surface d'eau dans le réservoir. Il faut y associer notamment le processus dynamique qui commence avec la formation du frasil sur le plan d'eau. Les cristaux de frasil apparaissent lorsque la température de l'eau descend légèrement en-dessous de 0°C. Plusieurs rivières sont le siège des écoulements turbulents où on observe un brassage vertical des couches parallèles; les molécules d'eau s'interchangent: la couche chaude profonde prenant la place de la couche froide de surface. Ce qui supprime la stratification en couches de différentes densités en rapport avec le processus de refroidissement. Ce brassage est régi par le nombre de Froude densimétrique  $Fr_d$  qui lie les forces d'inertie aux effets de la gravité de la manière suivante (Beltaos 1995):

$$Fr_d = \frac{V}{\sqrt{g H \Delta\rho_w / \rho_w}} \quad (2)$$

où  $V$  est la vitesse de l'écoulement,  $g$  l'accélération due à la gravité,  $H$  le niveau d'eau,  $\Delta\rho_w$  la densité de la couche du fond et  $\rho_w$  la différence de densité entre les couches supérieure et inférieure.

Ce processus de cristallisation va continuer vers les couches profondes d'eau et les cristaux de frasil vont s'agglomérer vers des flocons poreux dont le volume est fonction de la vitesse d'écoulement. Si les conditions sont toujours favorables, ces flocons vont se coller pour former des grandes feuilles de glace qui deviendront à leur tour des larges blocs de glace.

Le couvert de glace va interagir avec l'onde de rupture en fonction de ses caractéristiques physico-mécaniques qui dépendent, elles, largement de l'âge de la glace ainsi que de sa structure. La structure de la glace est une notion encore difficile à déterminer avec précision. Néanmoins, les recherches antérieures confirment que la glace qui résulte des deux processus de formation combinés se présente généralement en trois couches de base: primaire, secondaire et superposée. De texture uniforme, la couche primaire est la première couche de glace à se former à la surface de l'eau. Elle progresse soit horizontalement dans des réservoirs calmes, soit verticalement dans des rivières turbulentes. La couche secondaire se forme parallèlement au flux de chaleur, donc perpendiculairement à la couche primaire. Sa structure est différente de celle de la couche primaire. La couche superposée est celle qui se forme à la suite d'une crue au-dessus du couvert de glace ou encore après une chute de neige sur la même surface (Michel et Ramseier 1971).

### Caractéristiques physico-mécaniques de la glace

La forme solide du couvert de glace est plus rigide et consolidée au milieu de l'hiver, soit vers le mois de février. Cependant avec le début du redoux observé à partir de mars-avril, certaines propriétés physiques de la glace varient considérablement, reflétant un relâchement au niveau de certaines caractéristiques dont la rigidité. C'est notamment le cas du module d'élasticité  $E_i$  et de la contrainte de cisaillement résultant du frottement de l'écoulement sur la glace  $\tau_i$ . Les caractéristiques suivantes suffisent à décrire suffisamment la glace et sont celles qui ont été considérées dans la suite de cette étude.

#### **a) Résistance à la compression $\sigma_c$**

Connaissant la température  $T$  (°C) de la glace ainsi que la dimension de ses grains  $d$  (m), Michel propose l'expression (l'Équation 3) permettant de déterminer la charge de compression uniaxiale  $\sigma_c$  (MPa) qui provoque les fissures dans le matériau de glace considéré Michel (1978a):

$$\sigma_c = 0,094 \left( \frac{1}{\sqrt{d}} + 3|T|^{0.78} \right) \quad (3)$$

Une charge de compression uniaxiale supérieure à 1 MPa exercée sur la glace peut provoquer des fissures internes (Gold 1977).

**b) Résistance à la traction  $\Phi_t$**

Variant entre 1 et 2 MPa et fonction de la porosité  $e$  de la glace, la température  $T$  (°C) et du diamètre des grains de la glace  $d$  (m), la résistance à la traction  $\sigma_t$  (MPa) peut être déterminée par l'Équation 4 (Michel 1978b):

$$\sigma_t = 0,0794 \sqrt{(1 - e / 0.285)(1 - 0.0009 T) / d} \quad (4)$$

où la porosité  $e$  est donnée par  $e = 1 - \Delta_i' / \Delta_i$ ,  
 $\Delta_i'$  est la masse volumique de la glace (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\Delta_i$  est la masse volumique de la glace pure (917 kg/m<sup>3</sup>)  
 $d$  est situé entre 1.4 et 9 mm

**c) Résistance au cisaillement  $\tau_i$**

Elle est donnée, en MPa, par l'expression suivante (Roggensack 1975):

$$\tau_i = 0,7 + 0,47 \sigma_n \quad (5)$$

où  $\Phi_n$  est la contrainte normale maximale dont les valeurs sont comprises entre 0,5 et 1,4 MPa.

**d) Résistance à la flexion  $\tau_i$**

D'après les divers essais effectués par Gow, Frankenstein, Drouin et Michel (Ashton 1986), les valeurs trouvées de  $\tau_i$  se situent entre 0,35 et 2 MPa. La valeur typique pour la glace d'eau fraîche est 0,6 MPa (Billfalk 1982).

**e) Masse volumique  $\Delta_i$**

La masse volumique de la glace  $\Delta_i$  est comprise entre 915 et 917 kg/m<sup>3</sup> selon la pureté de la glace (Ashton 1986).

**f) Module d'élasticité  $E_i$**

Le module d'élasticité  $E_i$  dépend de plusieurs facteurs dont la température, la densité, la structure, le type et la pureté de la glace, le temps, la fréquence et la direction de la sollicitation. Néanmoins, les valeurs utilisées dans le présent travail sont comprises entre 1.4 et 7.0 GPa selon le degré de consistance et la rigidité de la glace (Beltaos 1990).

**g) Coefficient de Poisson  $\Lambda_i$**

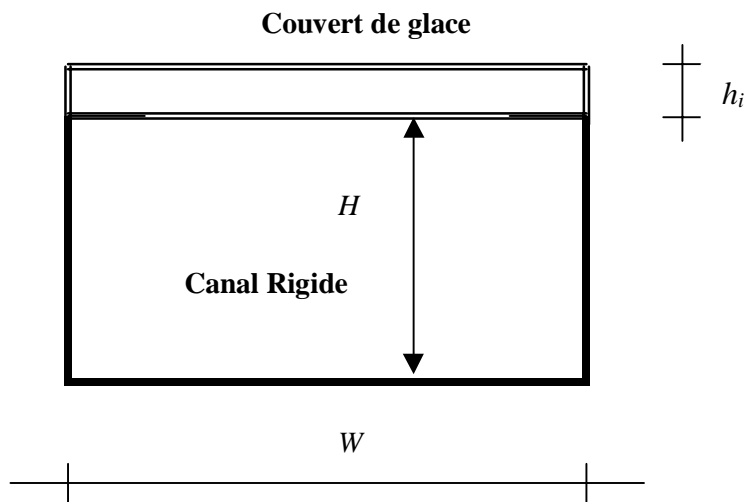
Pour la glace d'eau fraîche, le coefficient de Poisson  $\Lambda_i$  est compris entre 0.314 et 0.345 (Ashton 1986).

## Interaction Onde de rupture - Couvert de glace

La propagation de l'onde de pression sous le couvert est largement tributaire du degré de rigidité du couvert, des caractéristiques physico-mécaniques de la glace ainsi que de l'ancrage du couvert au niveau des berges du réservoir. Il a déjà été vu que si le couvert a un comportement rigide et immobile, l'onde sera similaire à un coup de bélier se déplaçant à des vitesses évaluées à plusieurs centaines de mètres par seconde. Si le comportement du couvert est par contre flexible, l'onde avancera moins vite mais ses effets en terme de pression seront finalement plus élevés. L'onde agit donc sur le couvert et la réaction du couvert influence alors l'onde dans sa course vers la condition-limite aval. Cette interaction aura finalement un impact sur l'effet dynamique de l'onde, une fois cette dernière arrivée à l'ouvrage d'aval. On comprend dès lors l'importance à accorder à la célérité de l'onde qui apparaît comme un facteur de premier plan dans la modélisation d'une rupture hivernale.

### *Célérité de l'onde*

La célérité de l'onde peut être déterminée par l'une des trois méthodes suivantes: onde modifiée par la flexibilité de la glace, onde modifiée par le périmètre mouillé ou encore selon la théorie de Daly (Daly 1993). Pour la première méthode, considérons un canal rectangulaire rempli par un écoulement contrôlé à l'aval par une vanne et couvert par un couvert de glace aux deux extrémités



latérales. Ses parois latérales ainsi que le fond sont rigides comme le montre la Figure 5.

**Figure 5: Vue transversale du canal couvert de glace**

Supposons que la longueur d'onde  $L$  est inférieure à 20 fois la longueur caractéristique de la glace pour que cette dernière ait une influence sur la propagation de l'onde (Daly 1994). La formulation générale de la vitesse de propagation de l'onde peut être trouvée en utilisant l'équilibre des quantités de mouvement entre deux sections du canal traversé par un coup de bélier créé lors de la fermeture brusque de la vanne. On peut montrer que la célérité de l'onde  $c$  aura la forme



$$c = \sqrt{\frac{K g}{\gamma(1 + K \frac{P_i \Psi_i}{P_t E_i})}} \quad (6)$$

avec  $\Psi_i = 2H(1-\nu_i^2)/h_i$

et où  $\nu_i$  est le coefficient de Poisson relatif au couvert de glace;

$h_i$  l'épaisseur du couvert de glace;

$H$  la hauteur du canal;

$K$  la compressibilité volumique de l'eau;

$g$  l'accélération de la gravité;

$\gamma$  le poids spécifique de l'eau;

$P$  le périmètre mouillé du canal et

$E$  le module d'élasticité de la glace.

La deuxième méthode utilisée pour déterminer la célérité  $c$  de l'onde est celle décrite par Fread (Fread 1984). Dans cette méthode, on suppose une extension verticale de la section transversale dans sa partie supérieure. La largeur  $b^*$  de cette extension joue un rôle déterminant parce qu'elle est employée dans l'expression de la célérité de l'onde de gravité, au-dessus de l'élévation du couvert

$$c = \sqrt{g A / B} \quad (7)$$

où  $A$  est la section transversale du canal fermé et  $B$  est la largeur du plan d'eau.  $B = b^*$  pour les écoulements où le niveau d'eau est supérieur à la profondeur maximale sous le couvert.

L'examen de l'Équation 7 montre que la vitesse  $c$  prend des valeurs très importantes lorsque  $B$  devient très petit. La valeur de  $b^*$  peut être obtenue selon l'Équation 7 si la valeur de la célérité  $c$  est connue dans l'écoulement sous pression lors des précédentes investigations. Sinon,  $b^*$  est calculée en fonction des propriétés de l'écoulement et de celles liées au canal.

Basée sur la théorie de Daly, la troisième méthode permet de déterminer la célérité connaissant la longueur de l'onde étudiée. En effet l'évaluation du nombre sans dimension  $N=2\pi L_0/L$  (avec  $L$  comme longueur d'onde et  $L_0=h_0/S_0$  où  $h_0$  est la hauteur d'eau dans le canal et  $S_0$  la pente de ce canal) permet de se situer dans l'une des cinq bandes pour établir ainsi la valeur de  $c$ . La bande associée à la glace est donc la région où la glace a une influence sur la propagation de l'onde; cette zone se situant selon Daly, à 20 fois la longueur caractéristique de la glace  $l$  définie comme  $l=[h_i^3 E_i / \{12\Delta_i g(1-\Delta_i^2)\}]^{1/4}$  où  $h_i$  est l'épaisseur du couvert de glace. Autrement dit, si la longueur d'onde  $L$  est inférieure à 20  $l$ , la région à l'étude est une région où la glace a une influence. Dans le cas contraire, ce sont les conditions de l'écoulement à surface libre qui prévaudront. Daly propose des courbes adimensionnelles, fonction du nombre d'onde  $N$ , qui permettent d'évaluer la célérité de l'onde  $c$ .

### Contraintes dans le couvert de glace

Le passage de l'onde sous un couvert de glace intégral et attaché aux extrémités du réservoir va accroître le gradient de pression sous le couvert où l'écoulement est comparable à un écoulement sous pression en conduite fermée. Ces pressions (forces de soulèvement) vont se mettre à solliciter l'intérieur du couvert jusqu'à atteindre la valeur limite de sa contrainte de flexion. Des fissures longitudinales vont apparaître une fois que cette valeur est dépassée (Beltaos 1990).

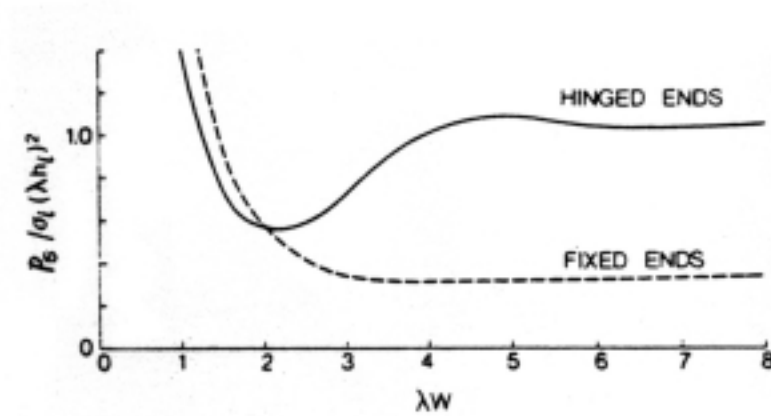


Figure 6: Valeurs limites de la pression de soulèvement (Beltaos 1990)

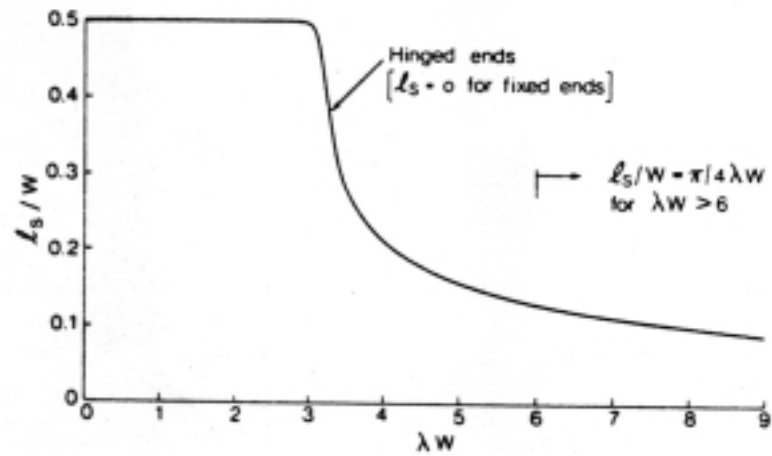
La Figure 6 indique la variation des valeurs limites de la pression de soulèvement selon les études effectuées par Beltaos. La variable  $W$  exprime la largeur du canal,  $\sigma_i$  la résistance à la flexion et la grandeur  $\delta$  est définie comme

$$\lambda = \sqrt[4]{\gamma / 4E_i I} \quad (8)$$

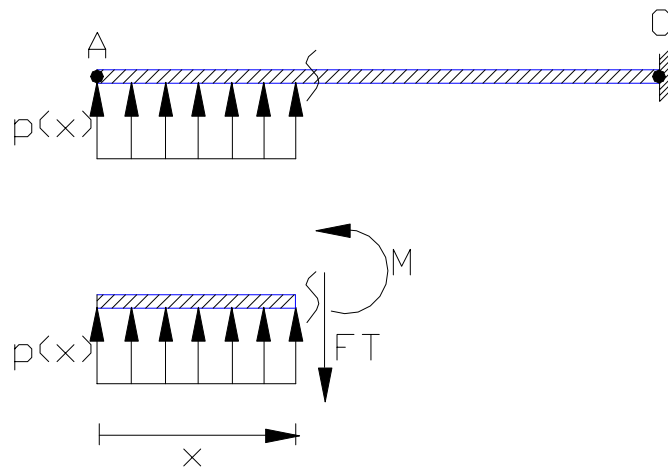
où  $I$  est le moment d'inertie du couvert de glace par unité de largeur =  $h_i^3/12$ .

Selon ces mêmes études, un couvert de glace fixé à ses extrémités se fissure le long de cette liaison si la pression de soulèvement  $p_s$  se développant dans le canal fermé dépasse la valeur limite de la Figure 6. Un couvert flottant par contre se fissure à une distance  $l_s$  proportionnelle aux propriétés mécaniques de la glace. La Figure 7 localise les fissures en fonction de la grandeur  $\delta$ .

La propagation de l'onde sous le couvert de glace va soumettre les sections transversales à des moments et efforts qui peuvent être dangereux pour la survie de la glace au point de provoquer des fissures transversales. Pour évaluer la probabilité cette fissuration, on a adopté une modélisation qui représente le couvert de glace en une poutre isostatique de hauteur  $h_i$ , libre à son extrémité gauche A (amont) et encastree à son extrémité droite C (barrage). La poutre est sollicitée par l'onde de pression comme le montre la Figure 8.



**Figure 7: Position des fissures longitudinales (Beltaos 1990)**



**Figure 8: Interaction Onde de pression - Couvert de glace**

Si on coupe la poutre à une distance  $x$  de A pour déterminer le moment résultant  $M$  et l'effort tranchant résultant  $F_T$  (voir toujours la Figure 8), on s'aperçoit que ces grandeurs peuvent être représentées respectivement par les équations suivantes:

$$M = p x^2 / 2$$

$$F_T = p x$$

(9)

La contrainte normale  $\sigma_i$  à la flexion et la contrainte de cisaillement maximale  $\tau_i$  sont calculées au moyen des Équations 10

$$\sigma = \frac{M y_i / 2}{I}$$
$$\tau = \frac{F_T}{2 I} \left( \frac{h_i^2}{4} \right) \quad (10)$$

où  $I = h_i^3 / 12$  représente le moment d'inertie autour de l'axe neutre de la poutre.

Après avoir calculé les valeurs de  $\sigma$  et  $\tau$ , il suffit alors de les comparer aux valeurs maximales admissibles de  $\sigma_i$  et  $\tau_i$ . Les fissures transversales apparaîtront si les valeurs admissibles sont dépassées.

#### **4. Application à une propagation réaliste de l'onde de rupture**

##### Méthode d'étude élaborée

La méthode d'étude mise au point pour modéliser une rupture hivernale de barrages en cascade est basée sur la démarche suivante:

- Choix du lit et conditions d'écoulement
- Choix d'une condition de glace
- Détermination de  $c_{éq}$
- Prédiction des caractéristiques hydrauliques de la propagation au moyen d'un schéma numérique approprié
- Évaluation de l'état de sollicitation du couvert et du barrage aval
- Interaction onde de rupture - couvert de glace

Il est essentiel de définir les caractéristiques du bief entre les deux barrages consécutifs, c'est-à-dire la forme géométrique de son lit, les coordonnées bathymétriques de ses sections transversales et sa rugosité. Les conditions initiales d'écoulement doivent être connues ainsi que celles qui provoquent la création et la propagation de l'onde de rupture.

La connaissance de l'état de la glace (ses propriétés physico-mécaniques) formant le couvert ainsi que les conditions d'ancrage sur les berges du réservoir permettent de définir la condition de glace.

La condition de glace étant choisie, il est maintenant possible d'évaluer la célérité de l'onde de pression  $c_{éq}$ . Cette dernière a une influence directe sur la sollicitation dynamique du couvert de glace ainsi que sur celle du barrage d'aval.

La prédiction des caractéristiques hydrauliques sollicitant le couvert de glace est effectuée au moyen de l'outil numérique approprié. Deux schémas numériques sont utilisés dans cette étude :

*Maconde* et *Fldwav*. *Maconde* est un modèle numérique qui calcule l'écoulement à surface libre à l'aide du schéma numérique de MacCormack et l'écoulement sous le couvert comme étant une propagation du coup de bélier. *Fldwav* est un logiciel qui calcule la propagation d'une onde de crue (Fread 1998). Ce dernier a été adapté dans la présente étude pour permettre de déterminer les caractéristiques de l'écoulement autant en amont du couvert de glace que sur et sous le même couvert. En fonction des grandeurs hydrauliques calculées, un état de sollicitation du couvert et du barrage d'aval est établi en termes de compression, traction, moment fléchissant, effort tranchant, ...

À l'action de l'onde de rupture va correspondre une réaction du couvert de glace. La présente méthode d'étude se termine donc par l'évaluation du comportement du couvert. En d'autres mots, si la sollicitation dépasse la résistance mécanique du couvert, ce dernier pourrait se fissurer. La théorie décrite par Beltaos est utilisée pour déterminer les lieux géométriques de ces fissures, dans l'éventualité où elles se produisaient.

### Exemple d'application

Le lit du réservoir choisi présente les caractéristiques suivantes: canal rectangulaire de 19 m de large et de 319 m de long; le couvert est long de 174 m et commence à 145 m de la section amont; la pente du canal est de 0%; le coefficient de Manning est de 0,020 en général et 0,050 sur fond sec; le diamètre de la vanne d'aval est de 2,0 m; la distance entre sections est de 29 m; le nombre de sections est fixé à 12.

L'écoulement initial est un écoulement permanent débitant à 30 m<sup>3</sup>/s, soit un niveau d'eau situé à 8,50 m du fond du canal. L'onde de rupture est créée par un débit de 566 m<sup>3</sup>/s chutant jusqu'à 113 m<sup>3</sup>/s après 2,33 minutes. La condition limite aval est donnée par une vanne de 2 m de diamètre ouverte complètement et ayant un coefficient de débit  $C_Q$  égal à 0,69.

Les propriétés de la glace sont celles décrites plus haut. Toutefois, la valeur de 1,40 GPa a été utilisée pour la grandeur  $E_i$  pour tenir compte d'un éventuel effet de fluage de la glace (Beltaos 1990). Le couvert a une épaisseur  $h_i = 0,50$  m et la glace est supposée être homogène. Il est question maintenant d'évaluer la célérité de l'onde de rupture  $c_{éq}$ . Appliquant l'Équation 8 et pour  $K=2,19$  GPa;  $g=9,81$  m/s<sup>2</sup>;  $\gamma=9,81$  kPa;  $v_i=0,35$ ;  $E_i=1,4$  GPa;  $H=8,50$  m;  $h_i=0,50$  m et  $W=19$ m, on trouve que  $c_{éq}=516$  m/s.

Comme mentionné plus haut, la prédiction instantanée des grandeurs hydrauliques sollicitant le couvert de glace a été faite dans chacune des sections transversales du canal grâce à l'utilisation du schéma numérique *Maconde* et du logiciel *Fldwav*. Ce dernier considère l'écoulement sous le couvert comme un écoulement à surface libre où la largeur du canal  $b^*$  ( $b^* = gA/c_{éq}^2$  avec  $A$  comme section transversale du canal) est réduite à une fente de 6 mm au-dessus de la position du couvert.

La Figure 9 montre les résultats obtenus avec *Maconde* et *Fldwav* dans la section du barrage d'aval sous le couvert de glace considérée. Comparée aux valeurs mesurées, les courbes obtenues avec *Maconde* et *Fldwav* donnent une bonne évaluation de la propagation de l'onde de rupture. Cette dernière arrive au barrage après 16 s de parcours et sa pression augmente jusqu'à 14,60 m selon les mesures enregistrées. *Fldwav* fait arriver l'onde plus tôt (12 s) et abruptement,

certainement à cause du schéma numérique utilisé qui est dynamique et implicite.. *Maconde* fait arriver quant à lui cette onde après 15,5 s.

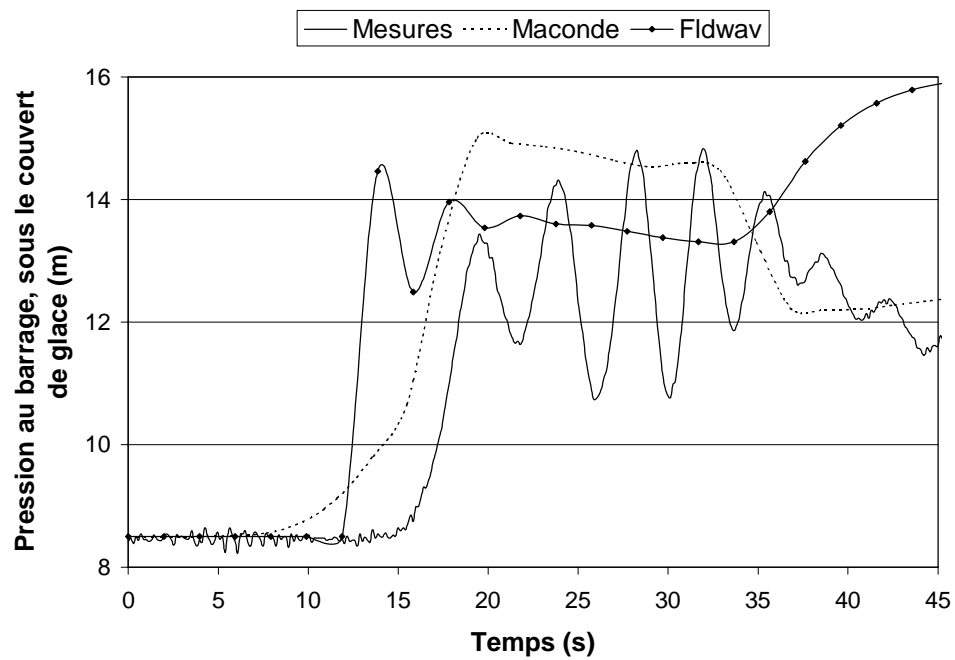


Figure 9: Variation de la pression en dessous du couvert de glace

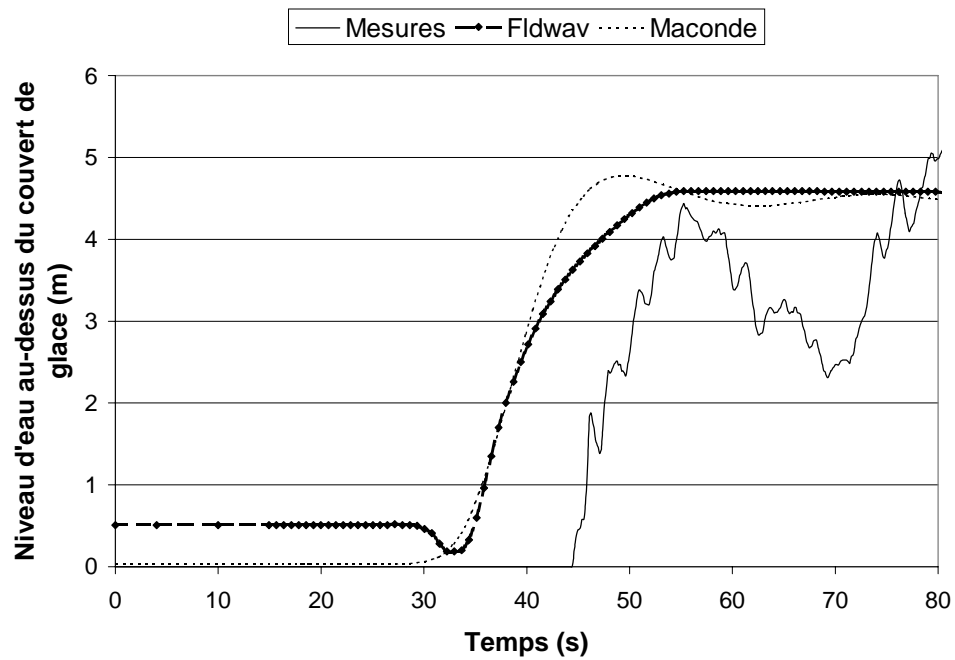
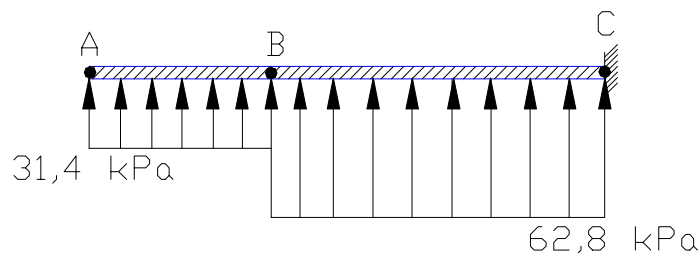


Figure 10: Variation de la pression au-dessus du couvert de glace

L'écoulement sur le couvert se fait normalement sur fond sec. Étant donné que les schémas de calcul ne sont pas capables de simuler cette situation, un filet d'eau de 5 mm d'eau a été initialement considéré au-dessus du couvert pour ce faire et  $n=0,050$ . L'examen de la Figure 10 montre une nette concordance entre les mesures et les résultats obtenus avec *Fldwav* et *Maconde*, même si l'onde prédite arrive 10 s plus tôt (erreur de 20%). Le niveau d'eau maximal se situe autour de 4,5 m, valeur donnée par *Fldwav* alors que *Maconde* est à 4,8 m. Il est à noter que l'onde de surface arrive à 45 s au niveau du barrage d'aval, soit 30 s après l'onde de pression.

Si  $h_i=0,50$  m;  $W=19$  m;  $E_i=1,4$  GPa et  $\sigma_i=600$  kPa, alors  $\lambda=0,114$ ,  $\lambda W=2,16$  et l'utilisation de la Figure 6 donne une pression de soulèvement limite  $p_s=1$  kPa, dans l'hypothèse d'un couvert fixé aux extrémités. Évaluons alors la sollicitation due à l'onde de pression. Les mesures et calculs effectués donnent une charge de pression de  $(14,90-8,50) \times 9,81 \times 1000 = 62,8$  kPa qui se maintient pendant 35 s avant de décroître jusqu'à 30 kPa. La Figure 11 montre la sollicitation du couvert de glace à un stade intermédiaire après 16 s, B étant une position de mesure située à 122 m du barrage d'aval.



**Figure 11: Sollicitation du couvert de glace après 16 secondes**

Comme la sollicitation  $p$  du couvert de glace (31,4 kPa) est largement supérieure à la charge limite acceptable de la glace (1 kPa), une fissuration longitudinale de la glace le long de ses extrémités va se produire. Si le couvert n'est pas fixé aux extrémités, la fissure apparaîtra à la distance  $l_s=0,5 \times 19$  m = 9,5 m, soit en milieu du couvert selon la Figure 7 (Beltaos 1990).

Lorsque l'onde de pression se propage sous le couvert, le moment résultant est évalué à  $M=px^2/2=31,4x^2/2=15,7x^2$  et l'effort tranchant  $F_T=px=31,4x$ . La contrainte normale est alors évaluée à  $\sigma =15,7x^2 \times (0,50/2)/(1 \times 0,50^3/12)=376,8x^2$  kPa, et la contrainte de cisaillement  $\tau=31,4x \times 0,25 \times (0,50^2)/(2 \times (0,50^3/12))=94,2x$  kPa. Si on considère que la valeur admissible des contraintes  $\sigma_c=\sigma_t=\sigma_i=1$  MPa, les premières fissures transversales apparaissent dès que l'onde dépasse la distance  $x=1,63$  m sous le couvert. En ce qui concerne l'effort tranchant, les fissures se produisent quand la résistance au cisaillement ( $\tau_i=1,17$  MPa, voir Équation 5) est dépassée, c'est-à-dire au-delà de la distance  $x=12,4$  m.

Il résulte de ce qui précède que l'interaction onde de pression - couvert de glace se traduit en une formation des fissures longitudinales et transversales dans le couvert de glace. Les sollicitations

sont grandes si bien que la destruction du couvert de glace est rapide et formera des embâcles qui vont perturber l'écoulement naturel et présenter certains dangers d'inondation pour les zones environnantes; sans compter que la sollicitation dynamique de l'onde sur le barrage d'aval risque aussi de mettre en mal la sécurité de cet ouvrage doublement sollicité.

## **5. Conclusion**

Une analyse des paramètres de la glace qui recouvre partiellement le réservoir entre deux ouvrages successifs en situation hivernale a été faite dans cette étude, et intégrée dans la modélisation de l'onde de rupture. La méthode de calcul ainsi décrite montre comment la connaissance des propriétés physico-mécaniques des glaces permet de mieux décrire l'interaction entre l'onde de rupture et le couvert. Un exemple d'application 1D reprend les résultats obtenus qui confirment l'utilité d'intégrer les paramètres de la glace dans la compréhension du phénomène de la rupture des barrages. Bien que les résultats soient encourageants, il reste que les analyses 2D et 3D sont nécessaires pour évaluer l'influence de la largeur et de la profondeur du canal sur l'ensemble des résultats à obtenir. D'autre part, les études futures sur la mécanique de la glace devront aider à une meilleure connaissance de ce matériau très changeant et difficile à caractériser simplement.

## **Remerciements**

Les auteurs remercient l'Unité Hydraulique et Environnement d'Hydro-Québec pour le soutien financier apporté au projet sur la sécurité des barrages dans les régions à hiver rude, projet étudié au Laboratoire d'Hydrodynamique de l'École Polytechnique de Montréal.

## **Références**

- Ashton, G., 1986. River and Lake Ice Engineering. Water Resources Publications, USA.
- Beltaos, S., 1990. Fracture and Breakup of River Ice Cover. Canadian Journal of Civil Engineering. Vol. 17, 173-183.
- Beltaos, S., 1995. River Ice Jams. Water Resources Publications, LLC, USA.
- Billfalk, L., 1982. Breakup of Solid Ice Covers due to Rapid Water Level Variations. CRREL Report 82-3, pp.17.
- Daly, S., 1994. Wave Propagation in Ice-Covered Channels. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 119, no 8, 895-910.
- Daly, S., 1995. Fracture of Ice Covers by River Waves. Journal of Cold Regions Engineering. Vol. 9, no 1, 41-52.
- Fread, D.L., 1998. NWS FLDWAV Model, Hydrologic Research Laboratory, Office of Hydrology, National Weather Service (NWS), USA.



Fuamba, M., Marche, C. et Quach, T., 2000. Les glaces et leur incidence sur la sécurité hivernale des barrages en cascade. Proceedings of the 2000 Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. London, Ontario Canada, 7-10 June, 2000, pp.250-256.

GIGB-ICOLD, 1998. Dam-Break Flood Analysis, Review and Recommendations (Étude d'onde de rupture de barrage, Synthèse et recommandations). Bulletin 111, Paris, France.

Gold, L.W., 1977. Engineering Properties of Fresh-Water Ice. Journal of Glaciology, vol. 19, no. 81, pp. 197-212.

Marche, C. et Fuamba, M., 2000. Ruptures en cascade dans une rivière couverte de glace. Rapport interne no.4, École Polytechnique de Montréal, laboratoire d'Hydrodynamique, Montréal, Canada.

Michel, B., 1971. Winter Regime of Rivers and Lakes. Cold Regions Science and Engineering. Monograph III-B1a, U.S. Army, Corps of Engineers.

Michel, B., 1978a. Ice Mechanics. Les presses de l'Université Laval, Québec.

Michel, B., 1978b. Mechanical Model of Creep of Polycrystalline Ice. Canadian Geotechnical Journal, vol. 15, no. 2, pp. 155-170.

Michel, B. et Ramseier, R., 1971. Classification of River and Lake Ice. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 8, No. 1, pp. 38-45.

Roggensack, W.D., 1975. Large Scale Laboratory Direct Shear Tests on Ice. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 12, no. 2, pp. 169-178.