

POUSSÉES STATIQUES DES GLACES

D. Carter¹, E. Stander¹, O. Caron², J.P. Tournier², C. Pek²

¹*Carter Consultants, 1281 Bishop, Ste-Foy Qc Canada G1W 3E4*

²*Hydro-Québec, 855, Ste-Catherine est, Montréal, Qc, H2L 4P5*

carter@mediom.qc.ca

Résumé : Nous avons mesuré, sous des conditions fort variables, les poussées statiques exercées par les glaces dans cinq réservoirs situés au centre et au nord du Québec (Figure 1). Ces poussées statiques résultent de variations de température, de fluctuations du plan d'eau ou du frottement des vents et des courants. Nous avons observé: (1) les champs de glace naturels présentent des réseaux de fissures sur leur pourtour et (2) les poussées statiques atteignent, dans certains cas, la limite de rupture de ces champs de glace déjà fissurés. Considérant qu'un champ de glace ne peut pas transmettre une force supérieure à sa propre résistance, nous établissons la limite supérieure des poussées statiques en déterminant la poussée suffisante pour produire l'instabilité d'un champ de glace déjà morcelé. Nous présentons aussi des formules pour calculer les poussées statiques maximales sur trois types usuels de structure: une structure longue, une vanne et un pilier. Ces formules s'avèrent en accord avec les mesures faites aux cinq sites et indiquent que les poussées statiques maximales dépendent tout simplement de l'épaisseur de la glace et de la géométrie de l'aire de contact.

Mots clés: glace, forces des glaces, poussées des glaces, réservoirs, barrage.

Abstract : We measured the magnitude of static ice forces in five reservoirs located in central and northern Quebec (Figure 1). These static forces may be generated by a temperature change or due to other mechanisms such as water level variations, wind and current friction force. Field observations have revealed two important facts: (1) ice covers have circumferential cracks caused either by water level variations, thermal contraction or coplanar forces, and (2) the static ice forces are, in some instances, sufficient to trigger an instability of the broken ice covers by a mechanism similar to buckling. Noting that an ice cover cannot transmit a force to a structure larger than its own resistance, we derive an upper bound for static forces by determining the in-plane compression force at which a fragmented ice cover collapses. Empirical formulae are presented for three typical structure shapes: long walls, sluice gates, and piers. These formulae correlate well with the field data collected from the five dam sites, and suggest that the maximum ice thrust may simply be defined as a function of ice thickness and contact geometry.

Keywords: ice; ice forces; ice thrust; reservoir; dam.

1. Introduction

Les sollicitations exercées par la glace sur les ouvrages hydrauliques se classent en deux grandes catégories: les forces dynamiques et les poussées statiques. Les forces dynamiques résultent de l'impact de glaçons qui, sous l'action des vents ou des courants, viennent percuter contre une structure. Ce sont, par exemple, les charges exercées par la glace, lors de la débâcle printanière, sur les piliers en rivière. À l'opposé, les poussées statiques prennent naissance lorsqu'un ouvrage, déjà en contact avec un champ de glace, s'oppose à son mouvement. Par le passé, les poussées statiques étaient surtout associées à l'expansion thermique des champs de glace confinés. Cependant, il est maintenant généralement reconnu que les poussées statiques des glaces peuvent aussi résulter de la friction du vent ou du courant ainsi que des fluctuations du niveau des eaux.

Dans la littérature spécialisée, les forces dynamiques font l'objet de plusieurs études et des méthodes éprouvées de calcul permettent de les évaluer sous les conditions usuelles rencontrées dans la pratique du génie. Malheureusement, les poussées statiques n'ont pas reçu la même attention. Ainsi, le code canadien, CAN/CSA-S6-88 (1988), stipule, sans autre indication, que: *"On doit porter une attention particulière à la pression (statique) de la glace sur les piles emprisonnées par celle-ci..."*.

Pour combler cette lacune, Hydro-Québec nous a confié, à l'automne 1995, un projet de recherche qui s'est échelonné sur quatre hivers. L'étude comportait essentiellement deux volets: une approche analytique et une validation expérimentale. La présente publication se veut une synthèse de l'ensemble de notre étude. Pour atteindre cet objectif, nous procéderons en trois étapes. D'abord, nous brosserons un aperçu global de notre programme expérimental. Ensuite, nous aborderons l'aspect analytique du problème. Finalement, nous comparerons nos déductions théoriques aux mesures expérimentales et aux formules empiriques parfois utilisées par les concepteurs d'ouvrages hydroélectriques.

2. Programme de mesures en nature

2.1 Localisation

Au cours des deux premiers hivers, nous avons systématiquement mesuré les poussées statiques sur les ouvrages de La Gabelle (46°28'N, 72°45'W), Shawinigan (46°31'N, 72°48'W), et Grand-Mère (46°37'N, 72°37'W). À ces trois sites, en cascade sur le Saint-Maurice, l'indice moyen de gel est d'environ 1000°C-jours et les épaisseurs de glace se situent autour de 0,65 m. Toutefois, la configuration particulière de chaque site implique une exposition différente aux vents et aux courants. De plus, le mode d'opération de ces centrales se traduit par des fluctuations journalières différentes du plan d'eau de leur retenue: 0,1 m à Grand-Mère, 0,3 m à Shawinigan, et 0,6 m à La Gabelle.

Lors de la troisième campagne de mesures, nous avons enregistré les pressions statiques à LG-1 (53°44'N, 78°40'W), situé à 37 km de l'embouchure de La Grande Rivière. Ce réservoir, au fil de l'eau, a une variation journalière du plan d'eau de l'ordre de 0,6 m comme La Gabelle. De plus, à cause du panache d'eau "chaude" lâchée à LG-2, à 75 km à l'amont, l'épaisseur de glace est semblable à celle observée sur le Saint-Maurice. Les températures y sont toutefois beaucoup plus froides voisinant parfois -40°C avec un indice de gel moyen de 2650°C-jours. Les mesures faites

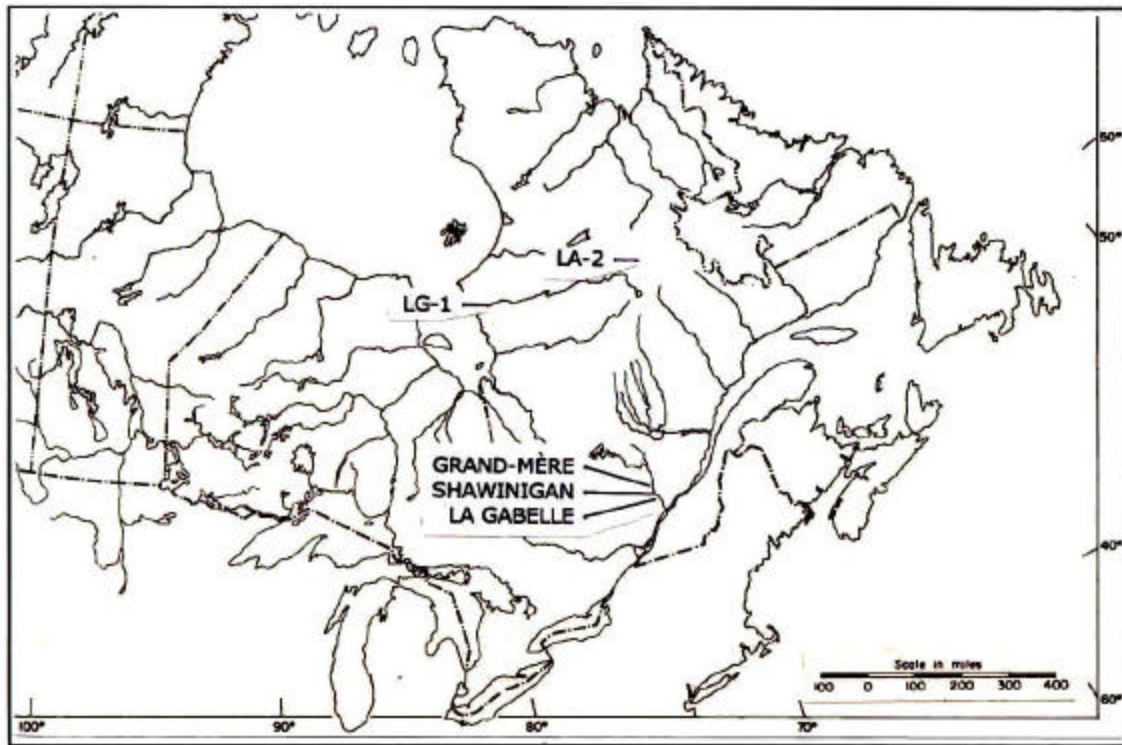


Figure 1.: Localisation des sites étudiés.

dans cet environnement plus rigoureux devaient permettre d'isoler l'influence relative des basses températures et d'une formation plus importante de glace dans les fissures de contraction et de flexion.

Finalement, la quatrième campagne de mesures s'est effectuée à LA-2 ($54^{\circ}32'N$, $71^{\circ}11'W$), là où l'indice de gel moyen de $2750^{\circ}C$ -jours est légèrement supérieur à celui de LG-1. Les épaisseurs de glace y sont généralement de l'ordre de 1,0 m. Toutefois, l'hiver 1999-2000 s'avéra particulièrement clément et les épaisseurs de glace furent de 0,91 m. L'objectif des mesures était alors de mettre en évidence l'influence de l'épaisseur de glace sur les pressions statiques.

2.2 Instrumentation

Lors de nos quatre (4) campagnes de mesures, nous avons enregistré, à des intervalles réguliers de 15 minutes, les pressions statiques sur les ouvrages, les températures et les niveaux d'eau. Les données s'inscrivaient sur un système d'acquisition CR-10 de Campbell Scientific placé à proximité des structures étudiées. Une fois par semaine, les données étaient transmises par Modem à nos bureaux pour une vérification de la bonne marche des appareils et une analyse préliminaire des données.

Nous avons systématiquement mesuré les pressions statiques à l'interface "glace-structure" et à l'intérieur du champ de glace à 50 m au droit des ouvrages étudiés. Aux l'interfaces "glace-structure", nous découpons d'abord une étroite fente où nous insérons ensuite quatre (4) plaques d'acier inoxydable de $1000 \times 400 \times 13$ mm sur lesquelles étaient montés quatre (4) jauges

plates, modèle 4850 de Geokon. Ces jauges de 100×200×13 mm, communément appelées "flatjacks", mesuraient effectivement les pressions exercées directement sur l'ouvrage par les couches situées entre les niveaux 0-100 mm, 200-300 mm, 400-500 mm, et 600-700 mm, sous la face supérieure de la glace. Ces flatjacks peuvent mesurer des contraintes jusqu'à 600 kPa avec une précision de ± 1 kPa. À l'intérieur de chacun des capteurs, un détecteur de température permet aussi de connaître simultanément la température de la glace au niveau des mesures de contraintes. Les contraintes à l'intérieur même du champ de glace furent mesurées à l'aide de jauges biaxiales, modèle 4350 de Geokon, identiques à celles utilisées antérieurement par Cox and Johnson (1983), Frederking et al. (1986a, 1986b) ainsi que Stander et al. (1992).

Pour mesurer les variations du niveau d'eau, nous avons utilisé des piézomètres modèle 4500ALV-5VW fabriqué par GEOKON. Les variations de la pression atmosphérique sont compensées par un second capteur à l'air libre et des variations du niveau d'eau de l'ordre de 0,5 mm peuvent théoriquement être mesurées par un tel appareil.

Toutes ces jauges de pression sont basées sur le principe des fils vibrants afin d'éviter les problèmes associés à la variation de résistance du câblage avec la distance, l'humidité, et la température. En effet, même si le signal s'atténue sur de longues distances, la fréquence demeure néanmoins inchangée. À chaque automne, avant le début des campagnes de mesures, les capteurs étaient vérifiés et remis en bon état par Geokon.

2.3. Détermination des Poussées

Les poussées statiques transmises par la glace furent obtenues par la méthode usuelle d'intégration numérique des contraintes observées à différents niveaux dans la plaque de glace. Les profils verticaux de contraintes enregistrés au cours des quatre (4) hivers de notre programme de mesures nous ont permis de reconstituer 16 histogrammes des poussées totales exercées directement sur les ouvrages et 10 histogrammes des poussées transmises à l'intérieur des champs de glace. Ces histogrammes sont présentés dans Carter et al. (1996), (1997), (1998b), (2000) et, à titre d'exemple, nous en reproduisons trois (3) à la Figure 2. En général, les poussées maximales dans les champs de glace correspondent à 50 – 60% de celles mesurées directement à l'interface "glace-structure". Nous attribuons cet écart au fait que, à cause des aspérités, la répartition des forces n'est pas uniforme et la rupture ne survient pas simultanément sur l'ensemble de l'aire de contact entre la glace et les structures. Cette observation est conforme au coefficient de contact se situant entre 0,4 et 0,7 recommandé par Korzhavin (1971) et largement utilisé par les ingénieurs praticiens.

2.4. Observations qualitatives

L'évidence expérimentale (Photos 1, 2, 3) montre qu'aux cinq (5) sites étudiés, malgré leur géométrie et leur confinement différents, les poussées statiques apparaissent, en certaines occasions, suffisantes pour provoquer l'instabilité latérale des champs de glace. Comme il est montré, par exemple, à la Figure 3, lors des fluctuations journalières du niveau, une augmentation des poussées, accompagne le début de la remontée du plan d'eau. Après un rehaussement entre 0,15 et 0,20 m, la poussée atteint son maximum et, par la suite, elle diminue durant tout le rehaussement subséquent. Sanderson (1988) décrit un phénomène similaire observée lors d'une tempête dans la mer de Beaufort. Les poussées statiques sur l'îlot artificiel NETSERK NORTH augmentèrent d'abord avec la vitesse du vent. Après avoir atteint un pic, elles diminuèrent ensuite

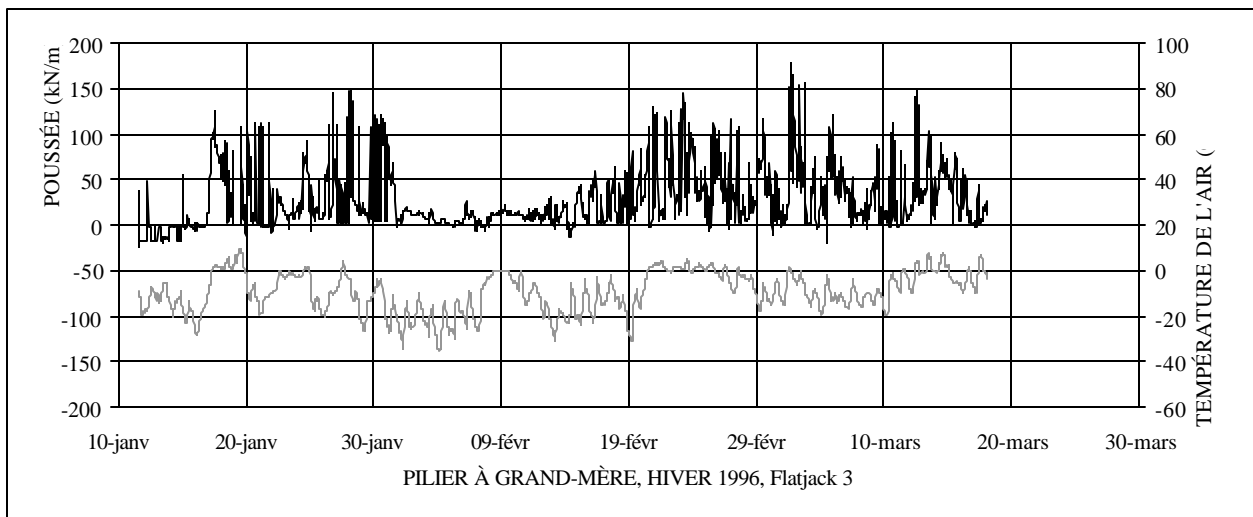
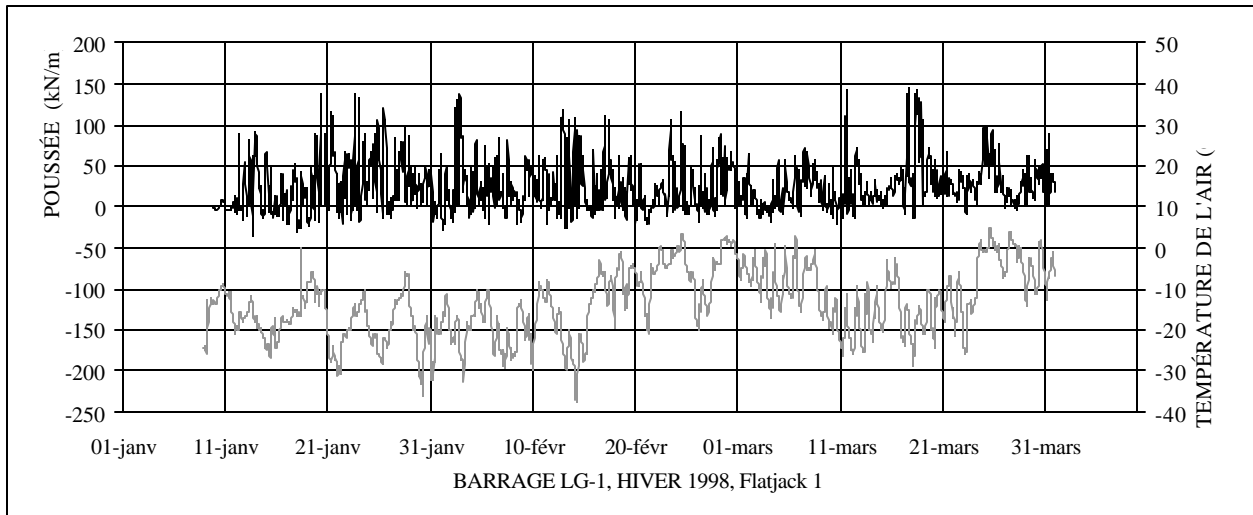
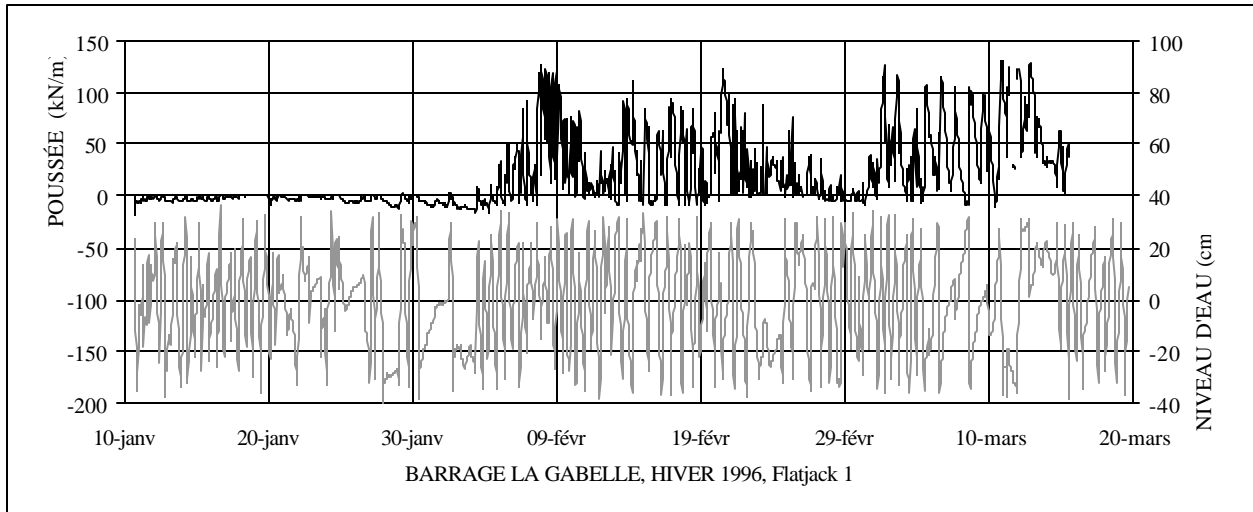


Figure 2.: Histogrammes de poussées statiques des glaces sur des ouvrages hydrauliques.

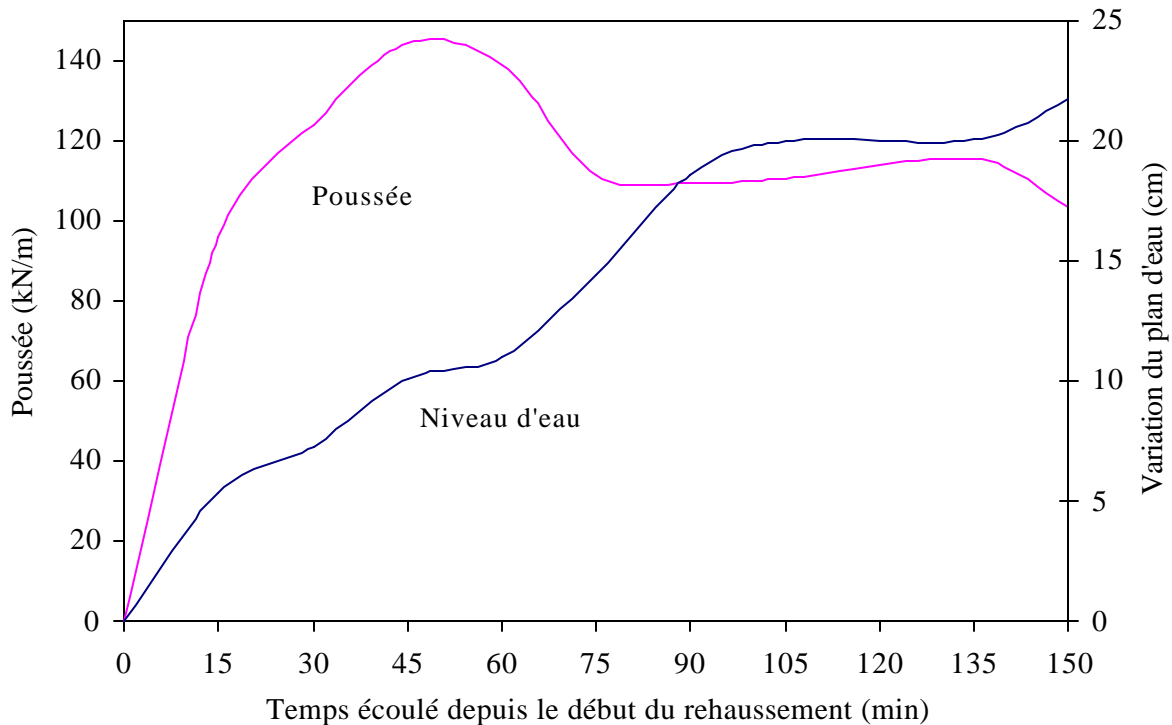


Figure 3.: Variation de la poussée statique lors d'un rehaussement du plan d'eau.

rapidement même si la vitesse du vent continuait à augmenter. Les poussées semblent augmenter jusqu'au déclenchement de l'instabilité latérale du champ de glace morcelé et la déformation latérale subséquente requiert une force coplanaire de moins en moins grande. La limite supérieure des poussées statiques semble donc correspondre au critère de rupture du champ de glace morcelé sous les forces environnementales appliquées.

3. Considérations analytiques

Nous réalisons fort bien que, selon les conditions météorologiques et hydrodynamiques, les poussées statiques oscilleront, au cours de l'hiver, entre zéro et leur limite supérieure. Dans le reste de l'étude, nous nous attacherons exclusivement à la valeur maximale que peuvent atteindre les pressions statiques. C'est d'ailleurs cette valeur limite qui présente un intérêt réel pour les concepteurs d'ouvrages soumis à l'action des glaces.

3.1. Fissuration des Champs de Glace

Comme il a été observé antérieurement par Metge (1976), Billfalk (1981), et Fransson (1991) sur d'autres lacs et réservoirs nordiques, nous avons noté, sur le pourtour des cinq réservoirs étudiés, la présence d'au moins trois fissures parallèles aux berges et aux structures. En général, la première fissure délimite une étroite bande de 1 à 2 m soudée aux structures ou aux berges. Les deuxième et troisième fissures ceinturent le réservoir à des intervalles plus ou moins réguliers. Ces fissures peuvent se former par deux mécanismes totalement différents selon que le champ de glace est soumis à des forces verticales ou seulement à des forces coplanaires (Voir Figure 4).

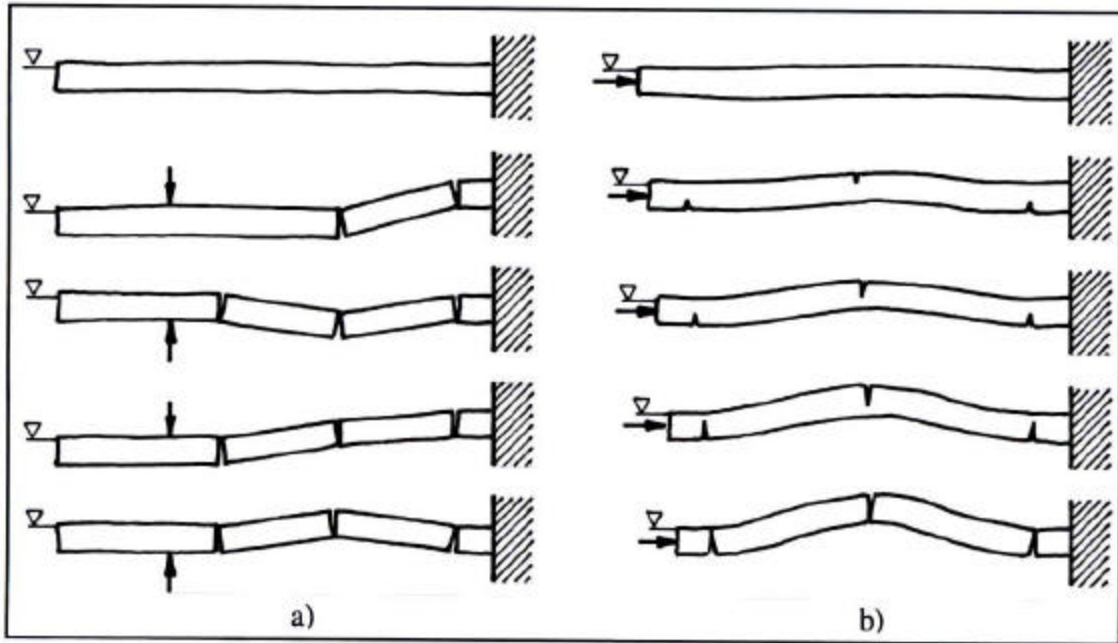


Figure 4.: Mécanismes de fissuration des champs de glace
a) sous des forces verticales; b) sous des forces coplanaires.

3.1.1 Fissures de flexion

Le poids de la neige en surface ainsi que le propre poids de la glace lors de variations du niveau des eaux induisent dans la plaque flottante des contraintes de flexion (Billfalk (1981), Fransson (1991)). La position théorique où se produit la contrainte maximale s'obtient à l'aide de la solution classique de Hétényi (1946) pour une poutre sur fondation élastique si ce n'est que la rigidité de la poutre doit être remplacée par la rigidité d'une plaque (Parmerter (1975)). La distance, L_1 , entre les fissures de flexion s'écrit alors en fonction de l'épaisseur de glace, h , sous la forme suivante (Carter et al. (1998a)):

$$L_1 = 8,8 h^{3/4} \quad (1)$$

3.1.2. Fissures de flambage

Lorsqu'une charge coplanaire, P , due par exemple à l'expansion thermique, est appliquée lentement, la glace peut subir, comme le note Sanderson (1988), un flambage par fluage (creep buckling). La solution théorique de l'équation qui gouverne le flambage par fluage a été obtenue par Calladine (1982) et est reproduite par Sanderson (1988). La distance, L_2 , entre deux fissures consécutives qui se forment lors du flambage par fluage s'écrit alors:

$$L_2 = \pi \sqrt{\sigma h / 2\rho g} \quad (2)$$

où σ est la contrainte moyenne qui peut, par exemple, être engendrée par l'expansion thermique; h est l'épaisseur de la glace; et ρg est le poids unitaire de l'eau.

Fransson (1991) et Carter (1996) ont montré que, durant l'expansion thermique d'un champ de glace, le taux de déformation représentatif se situait près de 10^{-8} s^{-1} . À Adams Island, Frederking (1986) a mesuré des taux de déformation moyens de l'ordre de 10^{-9} s^{-1} avec de rares pointes de l'ordre de $5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$. Pour de tels taux de déformation, la glace a un comportement totalement ductile. La relation entre la contrainte et le taux de déformation de la glace obéit alors à la loi classique d'Arrhenius pour l'énergie d'activation (Glen (1955)).

$$\sigma = \left[\frac{1}{A} \exp(Q/RT) \dot{\epsilon} \right]^{1/3} \quad (3)$$

où $\dot{\epsilon}$: taux de déformation de la glace, s^{-1} ;
 σ : contrainte appliquée sur la glace (kPa); T : température en degrés Kelvin;
 R : constante universelle des gaz égale à $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$;

En introduisant dans l'équation précédente, les valeurs de la constante, A , et de l'énergie d'activation, Q , données par Michel (1978) pour la glace colonnaire à axe optique horizontal formée normalement sur les lacs et les réservoirs, nous obtenons pour les températures voisines du point de fusion de la glace, la relation entre la contrainte appliquée et le taux de déformation:

$$\sigma = 55 \dot{\epsilon}^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (4)$$

En introduisant (4) dans (2), nous obtenons la distance entre les fissures de flambage:

$$L_2 = 7,7 \sqrt{h} \quad (5)$$

Il faut noter qu'à cause de son exposant 1/6, le taux de déformation assumé n'influence que très faiblement la position des fissures.

3.1.3. Espacement critique des fissures

Il sera démontré ultérieurement que les poussées statiques maximales seront associées à l'espacement maximal entre les fissures. En comparant l'espacement entre les fissures produites par flexion (1) et flambage (5), nous constatons que:

$$L_1 \geq L_2 \quad \text{quand} \quad h \geq 0,6 \text{ m} \quad (6)$$

Comme les conditions de "design" correspondent à des situations où $h \geq 0,6 \text{ m}$ et que tous les lacs et réservoirs sont susceptibles de subir des fluctuations de leur niveau d'eau, nous sommes du côté sécuritaire en retenant comme espacement maximale, L , la plus grande entre les fissures de flexion et de flambage:

$$L = L_1 = 8,8 h^{3/4} \quad (7)$$

Il convient de signaler que les contraintes maximales de flexion dans un plaque de glace varient très lentement en fonction de la distance, x , à partir du bord de la plaque. En effet, bien que les

contraintes atteignent leur maximum théorique à $x = 8,8 h^{3/4}$, elles sont supérieures à 90% de cette valeur à partir de $x = 5,6 h^{3/4}$. La moindre petite imperfection dans la glace peut donc provoquer un espacement inférieur à la valeur théorique. Il ne faut donc pas se surprendre d'observer en nature un espacement entre les fissures de flexion plus petit que la valeur théorique donnée par (1).

3.2. Instabilité des Champs de Glace fissurés

Plusieurs auteurs (Kovacs and Sodhi (1980), Billfalk and Sodhi (1982), Sodhi and Carter (1998), Carter et al. (1998a)) ont étudié, sous des hypothèses fort différentes, la stabilité d'un champ de glace fissuré (Figure 5). Tous les résultats concordent: même en considérant la présence de rotules plastiques aux fissures, la force par unité de largeur, F , suffisante pour provoquer l'instabilité latérale des glaçons correspond à:

$$F = \frac{1}{3} \rho g L^2 \quad (8)$$

En introduisant $\rho g = 9.8 \text{ kN m}^{-3}$ et la valeur de L donnée par (7), nous obtenons:

$$F = 253 h^{1,5} (\text{kN m}^{-1}) \quad (9)$$

ou bien:

$$p = 253 h^{0,5} (\text{kN m}^{-2})$$

où F est la force par unité de largeur suffisante pour provoquer l'instabilité et p est la pression statique moyenne transmise par le champ de glace au moment du flambage.

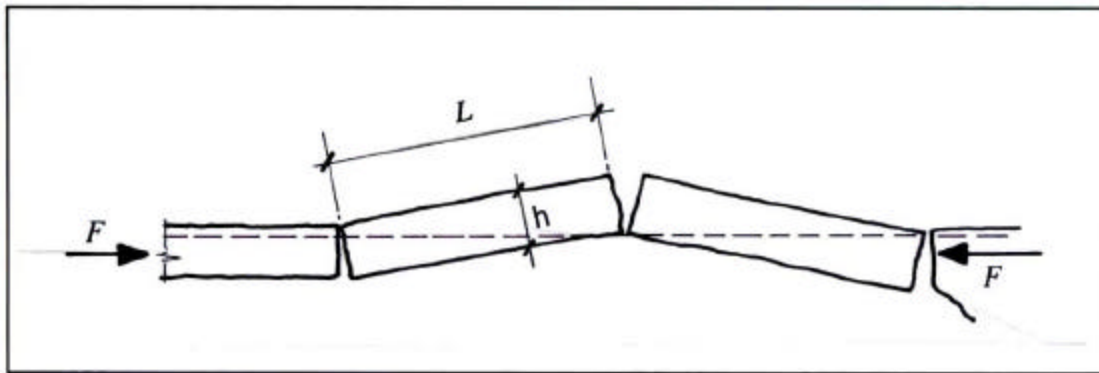


Figure 5.: Schématisation de l'instabilité latérale d'un champ de glace fissuré.

3.3. Résultats théoriques versus Mesures expérimentales

Au Tableau 1 et à la Figure 6, nous comparons les valeurs mesurées par différents chercheurs avec les prédictions obtenues à l'aide de (9). Comme nous pouvons le constater la concordance est très bonne.

TABLEAU 1
 Comparaison entre Poussées statiques mesurées et calculées

Chercheurs	Épaisseur de glace h (m)	Poussées mesurées (kN/m)	Poussées calculées (kN/m)	Ratio H_{mes}/H_{calc} (%)
Carter et al. (1996)	0,65	130	133	97,7
Carter et al. (1997)	0,65	131	133	98,0
Carter et al. (1998b)	0,70	145	148	97,9
Carter et al. (2000)	0,91	210	220	95,5
Frederking et al. (1986a)	1,55	474*	488	97,1
Frederking et al. (1986b)	1,55	480*	488	98,4
Johnson et al. (1985)	1,70	510	560	91,1

*Ces poussées sont obtenues en considérant que les poussées mesurées par Frederking et al. uniquement sur le mètre supérieur du champ de glace ne représentent, selon leurs propres résultats, que 85% des poussées totales (Sayed and Frederking (1992)).

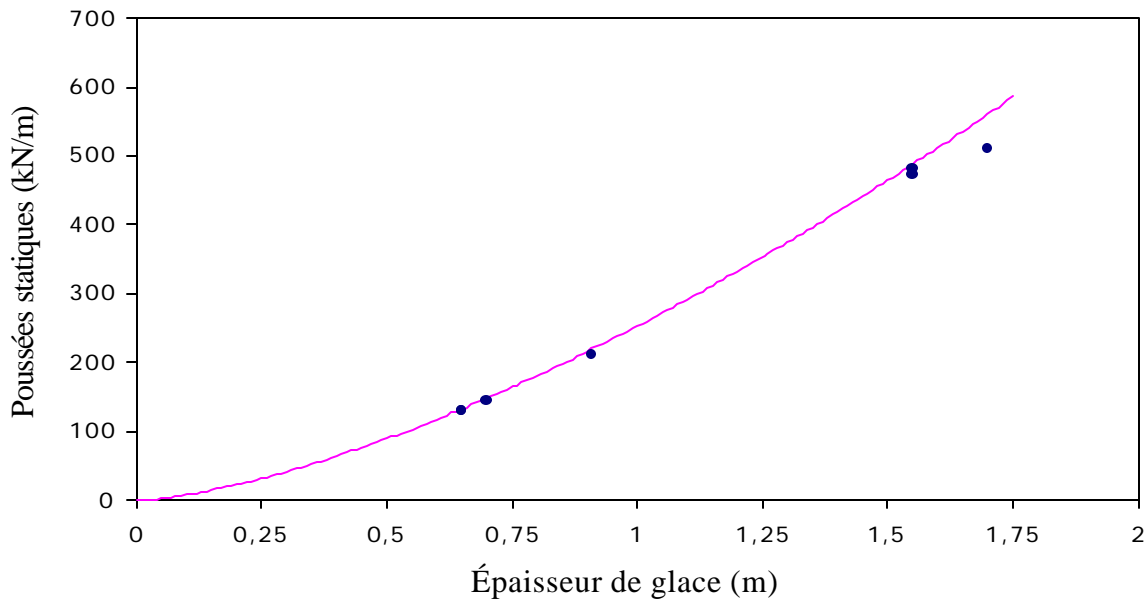


Figure 6.: Comparaison de l'équation (9) avec des poussées statiques mesurées.

3.4. Comparaison avec Formules Empiriques

Il est peut-être intéressant de comparer l'équation analytique proposée, (9), à certaines formules empiriques éprouvées que l'on retrouve dans la littérature spécialisée

3.4.1. Canada et USA

Les ingénieurs nord-américains utilisent, pour le calcul des forces statiques horizontales, la valeur empirique de 5 kips par pied carré (239 kN m²) applicable pour des champs de glace de 2 à 3 pieds (0,6 à 0,9 m) d'épaisseur. C'est cette valeur empirique qui a donné naissance à la charge usuelle de conception de 10 à 15 kips par pied (146 et 219 kN m¹) pour les poussées statiques (Acres (1971)). En unités SI, ce critère de conception s'écrit:

$$F = 239 h \text{ (kN m}^{-1}\text{)} \quad (10)$$

Force est de constater que les ouvrages construits depuis le début du siècle, selon le précédent critère, résistent sans dommage ni déformation apparente aux poussées statiques des glaces. En fait, comme le signale Ashton (1986), la fissuration du déversoir du barrage Minidoka est le seul cas de dommages causés par l'expansion thermique mentionné dans la littérature.

3.4.2. Ex-URSS

Selon Starosolszky (1970), dans l'ex-URSS, les valeurs recommandées comme première approximation des poussées statiques dépendent des régions géographiques.

- a) En Sibérie où les températures sont extrêmement rigoureuses et les épaisseurs de glace peuvent, selon Korzhavin (1971), se situer de l'ordre de $1,0 \leq h \leq 1,7$ m, on recommande:

$$H = 300h \text{ (kN m}^{-1}\text{)} \quad (11)$$

- b) Dans la région de Leningrad où les fleuves et les rivières coulent vers le nord et les épaisseurs de glace se situent plutôt de l'ordre de $0,6 \leq h \leq 1,0$ m, on recommande:

$$H = 200h \text{ (kN m}^{-1}\text{)} \quad (12)$$

- c) Dans la région méridional du Caucase où les fleuves et les rivières se déversent au Sud dans les mers Noire et Caspienne et les épaisseurs de glace sont généralement de l'ordre de $0,5 \leq h \leq 0,6$ m, on recommande:

$$H = 150h \text{ (kN m}^{-1}\text{)} \quad (13)$$

3.4.3 Suède

Selon RIDAS, Guidelines, Proposals (1999-0505), dans la partie méridionale de la Suède, à faible altitude, on doit concevoir les barrages avec une poussée statique des glaces, $H=50$ (kN m⁻¹). Plus au nord, jusqu'à une ligne reliant Stockholm et Karlstad, on doit utiliser:

$$h = 0,6 \text{ (m)} \quad \text{et} \quad H = 100 \text{ (kN m}^{-1}\text{)}$$

Pour les autres parties de la Suède, les paramètres de conception sont:

$$h = 1,0 \text{ (m)} \quad \text{et} \quad H = 200 \text{ (kN m}^{-1}\text{)}$$

Nous pouvons écrire ces deux critères de conception sous la forme suivante:

$$H = 200 h^{1,35} \text{ (kN m}^{-1}\text{)} \quad (14)$$

Il est aussi mentionné que les barrages doivent pouvoir résister aux poussées statiques des glaces majorées d'un facteur 1,5.

3.4.4. Comparaison

À la Figure 7, nous avons tracé, en comparaison de l'équation analytique proposée (9), les formules empiriques précédentes pour leur domaine d'application respectif. Nous y constatons une très bonne concordance. En effet, ces formules basées sur l'expérience expriment, tout comme l'équation théorique, une augmentation de la contrainte effective avec l'épaisseur du champ de glace.

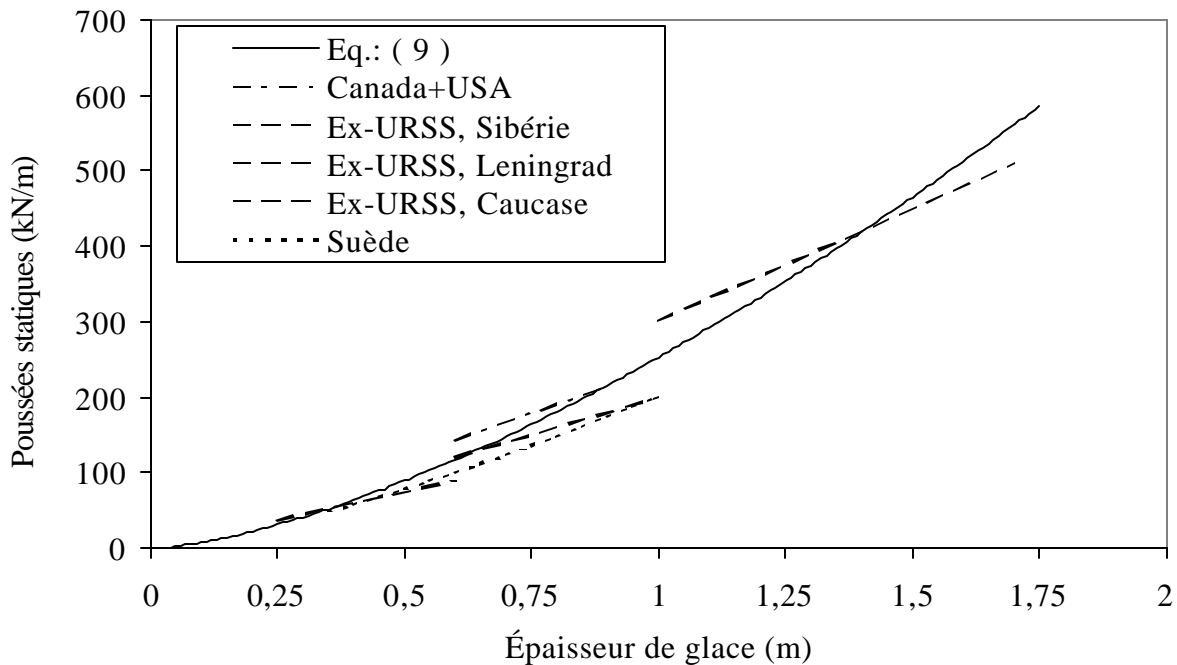


Figure 7.: Comparaison de l'équation (9) avec certaines formules empiriques.

4. Applications pratiques

Il est bien connu que la force statique exercée localement par la glace sur un ouvrage hydraulique dépend fortement de la géométrie de l'aire de contact (Korzavin (1971), Croasdale (1980), Sanderson (1984)). Nous avons donc, comme applications pratiques, considéré trois (3) formes usuelles de structures soumises à l'action des glaces. Nous voulons présenter des formules qui permettront d'évaluer les poussées statiques sous des conditions typiques rencontrées dans la pratique du génie. Les équations proposées sont en accord avec toutes les données expérimentales recueillies durant notre programme de mesures.

4.1. Structure longue

Pour une structure longue, comme un barrage, la poussée statique maximale, H_1 , exercée par les glaces correspond exactement à la situation considérée dans l'analyse théorique de la stabilité d'un champ de glace fissuré et peut donc s'écrire sous la forme suivante:

$$H_1 = 253 h^{1.5} \text{ (kN m}^{-1}\text{)} \quad (15)$$

4.2. Structure étroite

Pour les structures étroites telles que les piliers et les pieux, les poussées statiques, H_2 , exercées par les glaces s'écrivent habituellement sous la forme suivante:

$$H_2 = C_2 F \quad (\text{kN m}^{-1}) \quad (16)$$

où C_2 est un coefficient qui tient compte de la concentration des contraintes sur les ouvrages en saillie. Il tend vers 1.0 pour les ouvrages longs et vers 2.57 pour les structures très étroites. Pour les valeurs intermédiaires du rapport b/h , (largeur de la structure/épaisseur de la glace), différents facteurs d'amplification sont proposés dans la littérature spécialisée. Nous utiliserons celui recommandé dans le code canadien (1988) qui avait été obtenu par Afanasev et al. (1971) dans des essais d'indentation sur modèle réduit:

$$C_2 = \sqrt{\frac{5h}{b} + 1} \quad (17)$$

où h est l'épaisseur de glace et b la largeur du pilier.

4.3. Vanne en retrait

Nous exprimerons la poussée statique, H_3 , exercée par les glaces sur une vanne en retrait sous la forme suivante :

$$H_3 = C_3 F \quad (\text{kN m}^{-1}) \quad (18)$$

où C_3 est un coefficient de réduction qui tient compte qu'une partie importante de la poussée statique des glaces est réduite par l'effet de cisaillement sur les piliers latéraux.

Nos observations nous ont permis d'identifier deux (2) situations fort différentes. En hiver, une fissure se forme légèrement en amont des piliers et la glace en face des vannes forme une plaque continue bien soudée aux piliers. En périodes de temps doux, cette plaque se détache et se brise pour former en face des vannes un champ de glace morcelé avec plus ou moins de cohésion. Une analyse théorique des deux situations, sous des hypothèses très conservatrices, confirme l'impression intuitive qu'un champ de glace continu bien soudé aux piliers latéraux est moins critique pour les vannes qu'un champ de glace morcelé sans cohésion.

Selon les mesures prises lors des débâcles printanières et les études citées par Beltaos (1995), nous pouvons assumer, faute de formulation plus réaliste, qu'un champ de glace morcelé se comporte de la même façon qu'une masse granulaire entre deux murs parallèles. La formation d'arches à l'intérieur de la masse granulaire permet de transférer aux murs latéraux une partie des charges appliquées. La solution théorique obtenue par Janssen (1895) et les mesures faites par Berdennikov (1964) sur une rivière d'une largeur de 10 m comparable à celle des vannes d'évacuateur nous permettent d'écrire le coefficient de réduction sous la forme suivante:

$$C_3 = e^{-x/a} \quad (19)$$

où a est la longueur de la vanne et x est la distance à partir de la vanne jusqu'au nez du pilier.

5. Conclusions

Notre étude a permis de mettre en évidence que les poussées statiques maximales exercées par la glace correspondent non pas aux valeurs extrêmes que pourraient théoriquement atteindre les forces environnementales mais bien à la condition ultime de stabilité d'un champ de glace morcelé sous des forces coplanaires.

6. Remerciements

Nous tenons à remercier sincèrement Hydro-Québec de nous avoir confié cette étude très stimulante et de nous avoir permis d'en publier les résultats.

7. Références

- Acres H.G. Ltd. 1971. Review of Current Ice Technology and Evaluation of Research Priorities. Report Series No. 17. Inland Waters Branch. Department of the Environment, Ottawa, Canada.
- Afanas'yev, V.P., Dolgoplov, I.V., and Shvayshten, Z.I. 1971. Ice pressure on separate supporting structures in the sea (In Russian). *Arkticheskii i Antarkticheskii Nauchno-Issledovatel'skii. Trudy, Institut*, vol. 300, pp 61-80. US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, Draft Translation 346 (1972).
- Ashton, G.D., 1986, River and Lake Ice Engineering. Water Resources Publications, P.O. Box 2841, Littleton, Colorado, 80161, USA.
- Beltaos, S., 1995. River Ice Jams - Theory. In River Ice Jams, Beltaos S. (Editor), Water Resources Publications, LLC, P.O. Box 260026, Highlands Ranch, Colorado 80163-0026, USA, ISBN Number 0-918334-87-X.
- Berdennikov, V.P. 1964. Dynamic conditions of formation of ice jams on rivers. *Soviet Hydrology, Transactions of the State Hydrologic Institute (Trudy GGI)*, No 110, 1964, pp 3-11. Selected Papers, Washington, American Geographical Union, 101-108, translated by E.F. Tourkoff.
- Billfalk, L., 1981, Formation of Shore Cracks in Ice Covers Due to Changes in Water Level, *Proceedings of the 6th International Association Of Hydraulic Research (IAHR), Ice Symposium*, Quebec City, Canada, Vol. 2, pp. 650-660.
- Billfalk, L., and Sodhi, D.S. 1982. Instability of a Broken Ice Cover caused by Combined Frictional Drag and Wave Action. The Hydraulics Laboratory, Swedish State Power Board, S-810-71, Alvkarleby, Sweden.
- Calladine, C. R. 1982 (unpubl.), Creep buckling of floating ice sheet. Personal communication to The British Petroleum Company, 5 August 1982 (in Sanderson, (1988)).
- Canadian Standards Association, CAN/CSA-S6-88, 1988, Design of Highway Bridges, A National Standard of Canada, Rexdale, Ont.
- Carter, D., 1996. Poussée statique exercée par les glaces sur les barrages. Considérations théoriques. Contrat 14500-95-ERE-047-00. Rapport préparé pour Hydro-Québec, Service Hydraulique,
- Carter, D., et E. Stander, 1996. Poussée statique exercée par les glaces sur les barrages et les vannes. Campagne de mesures 1995-1996. Rapport d'études préparé pour Hydro-Québec, Hydraulique et Géotechnique, Montréal, Québec, Canada.

Carter, D., et E. Stander, 1997. Poussées statiques des glaces sur les ouvrages hydrauliques. Campagne de mesures 1996-1997. Rapport préparé pour Hydro-Québec, Service Hydraulique, Direction Ouvrages civils. Montréal, Québec, Canada.

Carter, D., D. Sodhi, E. Stander, O. Caron, Tung Quach, 1998a, Ice Thrust in Reservoirs, *Journal of Cold Regions Engineering*, ASCE, Vol. 12, No. 4, December 1998, pp. 19-183.

Carter, D., et E. Stander, 1998b. Poussée statique exercée par les glaces sur les barrages et les vannes. Campagne de mesures 1997-1998. Rapport d'études préparé pour Hydro-Québec, Hydraulique et Géotechnique, Montréal, Québec, Canada

Carter, D., et E. Stander, 2000. Poussées statiques exercées par les glaces sur les ouvrages hydrauliques. Campagne de mesures 1999-2000, Rapport préparé pour Hydro-Québec, Hydraulique et Géotechnique, Montréal, Québec, Canada

Cox, G.F.N. and J.B. Johnson, 1983. Stress measurements in ice. U.S. Army Corps Eng. Cold Reg. Res. Eng. Lab. Rep. 83-23, 31 pp.

Croasdale, K.R. 1980. Ice Forces on Fixed, Rigid Structures. In: T. Carstens (Editor), Working Group on Ice Forces on Structures. A State-of-the-Art Report. Prepared by International Association for Hydraulic Research, Section on Ice Problems. Published by United States Army, Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 80-26, Hanover, New Hampshire, U.S.A., pp.34-106.

Fransson, L. Å. 1991. Do Cracks Reduce Thermal Ice Stresses? In Ice-Structure Interaction S. Jones, R. F. McKenna, J. Tillotson, I. Jordaan (Editors), IUTAM-IAHR Symposium St.John's, Newfoundland, Canada, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 423-435.

Frederking, R.M.W., Sayed, M., Wessels, E., Child, A.J., and Bradford, D. 1984, Ice interaction with Adams Island, winter 1982-83. In IAHR 84, Vol. 3, pp. 187-201.

Frederking, R.M.W., Wessels, E., Maxwell, J.B., Prinsenberg, S., Sayed., M., 1986a, Ice pressure and behaviour at Adams Island, winter 1983/84. *Canadian Journal of Civil Engineering* 13, 140-149.

Frederking, R.M.W., Wessels, E., Maxwell, J.B., Prinsenberg, S., Sayed., M., 1986b, Ice interaction with Adams Island, winter 1984-85. In IAHR 86, Vol. 3, pp. 127-143.

Glen, J. W., 1955, The creep of polycrystalline ice. *Proceedings of the Royal Society (London)*, Ser. A 228, No.1175, pp. 519-538.

Hetenyi, M. 1946, Beams on Elastic Foundation, Ann Arbor, Univ. of Michigan Press.

Janssen, 1895, Versuche Über Getreiderdruck in Silozellen. *Zeitschr. Der Vereins Deutsche Jng.* No. 35.

Johnson, J. B., G. F. N. Cox, and W. B. Tucker, 1985. Kadluk ice stress measurement programme. In POAC 85, Vol. 1, pp. 88-100.

Korzhasin, K. N., 1971. Action of Ice on Engineering Structures. Draft Translation 260. Translated from Russian by Corps of Engineers, U.S. Army, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, USA.

Kovacs, A., and Sodhi, D. S. 1980. Shore pile-up and ride-up, field observations, models, theoretical analyses. *Cold Regions Science and Technology*,2: 209-288, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

Metge, M., 1976. Thermal cracks in lake ice. PhD thesis, Queen's Univ., Kingston, Ont., Canada.

Michel, B., 1978, Ice Mechanics, Les Presses de l'Université Laval, Québec, 499 p.

Parmeter, R., 1975, On the fracture of ice sheets with part-through cracks, Bulletin No. 30, Arctic Ice Dynamics Joint Experiment AIDJEX, November 1975, Univ. of Washington, Seattle, Washington 98105.

RIDAS – Tillämpningsanvisningar, (Guidelines, Proposals) 1999-0505, (1999), AB Jacobson & Widmark Vattenbyggnad, Solna, 1999.

Sanderson, T.J.O., 1988, Ice Mechanics – Risks to Offshore Structures, BP Petroleum Development Ltd, London. Graham & Trotman, London/Dordrecht/Boston.

Sayed, M. and R.M.W. Frederking, 1992. Landfast Ice Pressure Measurements in the Beaufort Sea. Proc. Second Intern. Offshore and Polar Eng. Conference. San Francisco, USA.

Sodhi, D.S., and Carter, D. 1998. A Model for Ice Thrust on Dam Walls, Proceedings of the 14th International Symposium on Ice, International Association for Hydraulic Research, July 27-31, Clarkson Univ., Potsdam, NY, USA.

Stander, E., B. Michel, M. Hodgson, T.M. Phat, R. Lariviere, 1992. Ice Thrust in Reservoirs: A Field Investigation. Report GCT-92-08, Dept. Génie civil, Univ. Laval, Québec, Canada.

Starosolszky, O., 1970. Ice in hydraulic engineering. Report 70-1, Division of hydraulic Engineering, the Norwegian Institute of Technology, the University of Trondheim.



Photo 1.: Hiver 1997, Instabilité latérale du champ de glace, Barrage de Shawinigan.



Photo 2.: Hiver 1997, Instabilité latérale du champ de glace, Barrage de La Gabelle.



Photo 3.: Hiver 2000, Instabilité latérale du champ de glace, Barrage de LA-2.