

DAMS AND RELATED STRUCTURES IN COLD CLIMATE

Design guidelines and case studies

BARRAGES ET OUVRAGES ANNEXES DANS DES CLIMATS FROIDS

Recommandations pour la conception - Exemples

Bulletin 105



1996

Original text in English
French translation finalized by Y. Le May.
Texte original en anglais
Traduction en français mise au point par Y. Le May.

DAMS AND RELATED STRUCTURES IN COLD CLIMATE

Design guidelines and case studies

BARRAGES ET OUVRAGES ANNEXES DANS DES CLIMATS FROIDS

Recommandations pour la conception - Exemples

Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris
Tél. : (33-1) 53 75 16 22 - Téléc : 641320 ICOLD F - Fax : (33-1) 40 42 60 71

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

Les informations, analyses et conclusions auxquelles cet ouvrage renvoie sont sous la seule responsabilité de leur(s) auteur(s) respectif(s) cité(s).

Les informations, analyses et conclusions contenues dans cet ouvrage n'ont pas force de Loi et ne doivent pas être considérées comme un substitut aux réglementations officielles imposées par la Loi. Elles sont uniquement destinées à un public de Professionnels Avertis, seuls aptes à en apprécier et à en déterminer la valeur et la portée et à en appliquer avec précision les recommandations à chaque cas particulier.

Malgré tout le soin apporté à la rédaction de cet ouvrage, compte tenu de l'évolution des techniques et de la science, nous ne pouvons en garantir l'exhaustivité.

Nous déclinons expressément toute responsabilité quant à l'interprétation et l'application éventuelles (y compris les dommages éventuels en résultant ou liés) du contenu de cet ouvrage.

En poursuivant la lecture de cet ouvrage, vous acceptez de façon expresse cette condition.

NOTICE – DISCLAIMER :

The information, analyses and conclusions referred to herein are the sole responsibility of the author(s) thereof.

The information, analyses and conclusions in this document have no legal force and must not be considered as substituting for legally-enforceable official regulations. They are intended for the use of experienced professionals who are alone equipped to judge their pertinence and applicability and to apply accurately the recommendations to any particular case.

This document has been drafted with the greatest care but, in view of the pace of change in science and technology, we cannot guarantee that it covers all aspects of the topics discussed.

We decline all responsibility whatsoever for how the information herein is interpreted and used and will accept no liability for any loss or damage arising therefrom.

Do not read on unless you accept this disclaimer without reservation.

COMMITTEE ON HYDRAULICS FOR DAMS
COMITÉ DE L'HYDRAULIQUE DES BARRAGES
(1987-1995)

<i>Chairman/Président</i> USA/États-Unis	J.J. CASSIDY
<i>Sub-Committee 1/Sous-Comité 1</i> Spain/Espagne	J.A. HERRERAS (coordinator/coordonateur)
Brazil/Brésil	A. RICOY DE OLIVEIRA
China/Chine	SHEN CHONGGANG
France/France	S. ALAM
Norway/Norvège	D.K. LYSNE
Portugal/Portugal	F. OLIVEIRA LEMOS (1)
	A. QUINTELA (2)
Russia/Russie	V.M. SEMENKOV
<i>Sub-Committee 2/Sous-Comité 2</i> USA/États-Unis	J.J. CASSIDY (coordinator/coordonateur)
Netherlands/Pays-Bas	P.A. KOLKMAN (3)
Japan/Japon	B. PETRY (4)
	M. HINO
Co-opted members/Membres cooptés	H. MAKARECHIAN (USA/États-Unis)
	K. OGIHARA (Japan/Japon)
<i>Sub-Committee 3/Sous-Comité 3</i> Finland/Finlande	M. AUTTI (coordinator/coordonateur)
Canada/Canada	M. DROUIN (3)
	O. CARON (4)
Czechoslovakia/Tchécoslovaquie	V. MATOUSEK (5)
Denmark/Danemark	H. MAI
Sweden/Suède	L. BILLFALK
<i>Sub-Committee 4/Sous-Comité 4</i> Germany/Allemagne	J. GIESECKE (coordinator/coordonateur)
Belgium/Belgique	F. ZWAENPOEL (6)
Czechoslovakia/Tchécoslovaquie	K. HAINDL (6)
Switzerland/Suisse	D. VISCHER
<i>Sub-Committee 5/Sous-Comité 5</i> Finland/Finlande	P. REITER (coordinator/coordonateur)
Australia/Australie	J. WINTON
Great Britain/Grande-Bretagne	P.A. BACK (7)
	P.J. MASON (8)
Italy/Italie	P. MOLINARO (9)
Spain/Espagne	L. BERGA
South Africa/Afrique du Sud	A. ROOSEBOOM

(1) Until 1992/jusqu'en 1992

(2) Since 1992/depuis 1992

(3) Until 1994/jusqu'en 1994

(4) Since 1994/depuis 1994

(5) Until 1992/jusqu'en 1992

(6) Until 1991/jusqu'en 1991

(7) Until 1993/jusqu'en 1993

(8) Since 1993/depuis 1993

(9) Since 1992/depuis 1992

SOMMAIRE

- AVANT-PROPOS
1. INTRODUCTION
 2. GLACE SUR LES RIVIÈRES ET SUR LES RETENUES - CONCEPTION DES OUVRAGES D'ÉCOULEMENT D'EAU
 3. ACTIONS DE LA GLACE SUR LES OUVRAGES ET RECOMMANDATIONS POUR LEUR CONCEPTION
 4. RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION ET L'EXPLOITATION DES VANNES
 5. GLACE DANS LE SOL ET PERGÉLISOL
 6. EXPÉRIENCE D'EXPLOITATION ET EXEMPLES

CONTENTS

- FOREWORD
1. INTRODUCTION
 2. ICE ON RIVERS AND RESERVOIRS - DESIGN OF WATERWAYS
 3. ICE FORCES ON STRUCTURES AND DESIGN GUIDELINES
 4. OPERATION AND DESIGN GUIDELINES FOR GATES
 5. ICE IN SOIL AND PERMAFROST
 6. OPERATIONAL EXPERIENCE AND CASE STUDIES

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	15
1. INTRODUCTION	16
1.1. But du Bulletin	16
1.2. Structure du Bulletin	18
2. GLACE SUR LES RIVIÈRES ET LES RETENUES – CONCEPTION DES OUVRAGES D'ÉCOULEMENT D'EAU	20
2.1. Prise des lacs et des retenues par les glaces	20
2.1.1. Régime thermique des lacs et retenues	20
2.1.2. Formation des glaces	20
2.2. Prise des rivières par les glaces	22
2.3. Débâcle des glaces	30
2.3.1. Lacs et retenues	30
2.3.2. Rivières	30
2.4. Conception des ouvrages d'écoulement d'eau, prises d'eau et évacuateurs de crue	32
2.5. Références	36
3. ACTIONS DES GLACES SUR LES OUVRAGES ET RECOMMANDATIONS POUR LEUR CONCEPTION	38
3.1. Mécanique des glaces	38
3.1.1. Propriétés mécaniques de la glace	38
3.1.2. Résistance de la glace d'eau douce	40
3.1.3. Rigidité des plaques de glace	42
3.2. Forces dues à l'expansion thermique des couvertures de glace	44
3.2.1. Description du phénomène	44
3.2.2. Poussées d'origine thermique sur des ouvrages longs et rigides	46
3.2.3. Poussées d'origine thermique sur des ouvrages semi-rigides	50
3.2.4. Poussées d'origine thermique sur des ouvrages étroits	52
3.3. Forces dues aux variations du plan d'eau	54
3.3.1. Forces verticales sur les ouvrages	54
3.3.2. Forces horizontales sur les ouvrages	56
3.4. Forces dynamiques dues à la dérive des glaces	60
3.4.1. Considérations pratiques	60
3.4.2. Norme canadienne	60

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	15
1. INTRODUCTION	17
1.1. Purpose of the Bulletin.....	17
1.2. Structure of the Bulletin.....	19
2. ICE ON RIVERS AND RESERVOIRS - DESIGN OF WATERWAYS	21
2.1. Freeze-up of lakes and reservoirs.....	21
2.1.1. Thermal regime of lakes and reservoirs.....	21
2.1.2. Ice formation	21
2.2. Freeze-up of rivers	23
2.3. Break-up.....	31
2.3.1. Lakes and reservoirs	31
2.3.2. Rivers	31
2.4. Design of waterways, water intakes and spillways.....	33
2.5. References	36
3. ICE FORCES ON STRUCTURES AND DESIGN GUIDELINES.....	39
3.1. Ice mechanics	39
3.1.1. Mechanical properties of ice.....	39
3.1.2. Strength of freshwater ice.....	41
3.1.3. Ice plate rigidity	43
3.2. Forces induced by thermal expansion of ice covers	45
3.2.1. Description of phenomenon.....	45
3.2.2. Ice forces on long, rigid structures	47
3.2.3. Ice forces on semi-rigid structures.....	51
3.2.4. Ice forces on narrow structures.....	53
3.3. Forces induced by fluctuating water level.....	55
3.3.1. Vertical forces on structures	55
3.3.2. Horizontal thrust on structures	57
3.4. Forces induced by drifting ice.....	61
3.4.1. Practical considerations	61
3.4.2. Canadian standard	61

3.4.3. Norme soviétique.....	62
3.4.4. Approche analytique.....	66
3.4.5. Comparaison des forces sur une pile semi-circulaire calculées par diverses formules.....	84
3.5. Action des glaces sur le talus d'un barrage	84
3.5.1. Influence du type de riprap.....	86
3.5.2. Action du gel et du dégel.....	86
3.5.3. Action des glaces lors de la baisse du niveau d'eau	88
3.5.4. Action des glaces lors de la montée du niveau d'eau	88
3.5.5. Poussées horizontales des glaces	90
3.5.6. Comportement du riprap dans les climats nordiques	92
3.6. Application aux ouvrages hydrauliques.....	94
3.6.1. Forces dues à l'expansion thermique.....	94
3.6.2. Forces verticales dues aux variations du niveau d'eau	98
3.6.3. Forces dynamiques dues aux glaces	98
3.6.4. Riprap.....	102
3.7. Références.....	102
4. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LA CONCEPTION ET L'EXPLOITATION DES VANNES	108
4.1. Forces exercées par les glaces	108
4.2. Dispositifs de chauffage	110
4.3. Mesures de prévention de la glace.....	116
4.3.1. Mesures contre le gel des pièces mobiles sur des pièces fixes	116
4.3.2. Mesures contre l'adhérence ou la formation de glace sur les vannes ..	116
4.4. Références.....	120
5. GLACE DANS LE SOL ET PERGÉLISOL	122
5.1. Définitions.....	122
5.2. Répartition et propriétés du pergélisol.....	126
5.3. Températures du sol	132
5.4. Pénétration du gel et flux thermique	132
5.5. Formation de la glace	134
5.6. Gel et dégel	136
5.7. Problèmes relatifs aux ouvrages hydrauliques.....	136
5.7.1. Barrages.....	138
5.7.2. Évacuateurs de crue et ouvrages de restitution	142
5.7.3. Conduites et galeries	144
5.7.4. Prises d'eau et ouvrages de restitution immergés	148
5.8. Références.....	152

3.4.3. Soviet standard	63
3.4.4. Analytical approach.....	67
3.4.5. Comparison of forces on a semi-circular pier computed by different formulas.....	85
3.5. Ice action on dam slope.....	85
3.5.1. Effect of riprap type	87
3.5.2. Freeze-thaw action.....	87
3.5.3. Ice action when water levels drop	89
3.5.4. Ice action when water levels rise.....	89
3.5.5. Horizontal ice thrust	91
3.5.6. Riprap performance in northern climates.....	93
3.6. Typical application to hydraulic structures.....	95
3.6.1. Forces induced by thermal expansion.....	95
3.6.2. Vertical forces due to change in water level.....	99
3.6.3. Dynamic ice forces	99
3.6.4. Riprap.....	103
3.7. References	102
4. OPERATION AND DESIGN GUIDELINES FOR GATES.....	109
4.1. Ices forces	109
4.2. Heating devices	111
4.3. Ice prevention measures	117
4.3.1 Measures against freezing of movable parts on fixed ones.....	117
4.3.2 Measures against adhesion of ice to gates or icing over of gates	117
4.4. References	120
5. ICE IN SOIL AND PERMAFROST.....	123
5.1. Definitions.....	123
5.2. Distribution and properties of permafrost.....	127
5.3. Ground temperatures	133
5.4. Frost penetration and heat flow	133
5.5. Ice formation	135
5.6. Freezing and thawing	137
5.7. Problems related to hydraulic structures.....	137
5.7.1. Dams	139
5.7.2. Spillways and outlet systems.....	143
5.7.3. Pipelines and tunnels.....	145
5.7.4. Submerged inlets and outlets.....	149
5.8. References	152

6. EXPERIENCE D'EXPLOITATION ET EXEMPLES.....	156
6.1. Dégâts aux vannes d'évacuateur.....	156
6.1.1. Barrage Imnäs - Suède.....	156
6.1.2. Barrage de la Rivière des Prairies - Canada	158
6.2. Expérience dans l'exploitation des prises d'eau en Finlande	162
6.2.1. Description générale des problèmes	162
6.2.2. Centrale Permantokoski.....	164
6.2.3. Cours principal de la rivière Kemijoki	164
6.3. Érosion du talus d'un barrage.....	164
6.4. Références.....	170

6. OPERATIONAL EXPERIENCE AND CASE STUDIES	157
6.1. Damage to spillway gates.....	157
6.1.1. Imnäs dam - Sweden	157
6.1.2. Rivière des Prairies Dam - Canada.....	159
6.2. Operational experience with intakes in Finland	163
6.2.1. General description of the problems.....	163
6.2.2. Permankoski Power Station.....	165
6.2.3. The Kemijoki River Main Course.....	165
6.3. Erosion of dam slope.....	165
6.4. References	170

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

- Fig. 1 — Formes de couverture de glace sur les rivières (d'après Ashton 1986)
- Fig. 2 — Longueur caractéristique ou rayon d'action d'une plaque de glace en fonction de son épaisseur.
- Fig. 3 — Schéma montrant l'action de la glace sur un ouvrage hydraulique lors de variations du plan d'eau.
- Fig. 4 — Résultats théoriques de Nevel (1972) et équation empirique proposée par Carter (1985)
- Fig. 5 — Profil de la couverture de glace face au barrage
- Fig. 6 — Pile rectangulaire
- Fig. 7 — Pile semi-circulaire
- Fig. 8 — Pile avec avant-bec « en pointe » ($\alpha = 60^\circ$)
- Fig. 9 — Pile avec avant-bec « en pointe » ($\alpha = 90^\circ$)
- Fig. 10 — Pile avec avant-bec « en pointe » ($\alpha = 120^\circ$)
- Fig. 11 — Pile conique
- Fig. 12 — Pile «en ogive»
- Fig. 13 — Pile elliptique
- Fig. 14 — Calcul des forces sur une pile semi-circulaire
- Fig. 15 — Conception type d'une vanne d'évacuateur de crue et du dispositif de chauffage pour le Complexe La Grande
- Fig. 16 — Étendue du pergélisol (permafrost) et des régions froides dans l'Hémisphère Nord
- Fig. 17 — Profil schématique du pergélisol en Alaska [Péwé]
- Fig. 18 — Régime thermique caractéristique dans le pergélisol
- Fig. 19 — Représentation schématique de la répartition du pergélisol dans une zone de pergélisol continu
- Fig. 20 — Régime thermique des barrages sur du pergélisol
- Fig. 21 — Exemples d'ouvrages d'évacuation dans les zones de pergélisol, en Russie [Bogoslovkiy, 1963]
- Fig. 22 — Prise d'eau proposée pour un aménagement hydroélectrique à Greeland [Mai, 1987]
- Fig. 23 — Galeries de fuite dans un fjord situé dans une région de pergélisol
- Fig. 24 — Interaction de la glace et des blocs d'encrochement dans un riprap
- Fig. 25 — Bandes de glace cassées sur les digues lors de la baisse du niveau d'eau
- Fig. 26 — Des blocs d'encrochement en saillie sont souvent arrachés du riprap quand le niveau d'eau baisse pendant l'hiver
- Tableau 1 — Résistance ultime de la glace (kPa)
- Tableau 2 — Poussées maximales d'origine thermique pour une variation de température entre la valeur initiale à la surface de la glace et la valeur 0°C (kN/m)
- Tableau 3 — Poussées dues à l'expansion thermique de la glace.
- Tableau 4 — K_1 : Coefficient tenant compte de l'inclinaison de l'ouvrage par rapport à la verticale
-

LIST OF FIGURES AND TABLES

- Fig. 1 — Forms of river ice covers (from Ashton, 1986)
- Fig. 2 — Characteristic length of an ice plate as a function of ice thickness
- Fig. 3 — Force exerted on a hydraulic structure by ice due to change in water level
- Fig. 4 — Nevel's (1972) theoretical results and empirical equation suggested by Carter (1985)
- Fig. 5 — Profile of ice cover in front of dam
- Fig. 6 — Rectangular pier
- Fig. 7 — Semicircular pier
- Fig. 8 — Angular pointed pier ($\alpha = 60^\circ$)
- Fig. 9 — Angular pointed pier ($\alpha = 90^\circ$)
- Fig. 10 — Angular pointed pier ($\alpha = 120^\circ$)
- Fig. 11 — Conical pier
- Fig. 12 — Pointed arch pier
- Fig. 13 — Elliptical pier
- Fig. 14 — Computation of forces on a semicircular pier
- Fig. 15 — Typical design of a spillway gate and heating devices of Complex La Grande
- Fig. 16 — The extent of permafrost and cold regions in the Northern Hemisphere
- Fig. 17 — Idealized profile of permafrost in Alaska [Péwé]
- Fig. 18 — Typical ground regime temperature in permafrost
- Fig. 19 — Schematic representation of permafrost distribution in a continuous-permafrost region
- Fig. 20 — Thermal regime of dams on permafrost
- Fig. 21 — Examples of water escape structures in permafrost regions in Russia [Bogoslovkiy 1963]
- Fig. 22 — Proposed intake for hydroelectric power scheme in Greeland [Mai, 1987]
- Fig. 23 — Tunnel outlets in a fjord in permafrost region
- Fig. 24 — Ice and stones interaction in a riprap structure
- Fig. 25 — Typical bands of ice on the embankment formed during decrease in water level
- Fig. 26 — Protruding stones are often pulled out of riprap structure when water level decreases in winter
- Table 1 — Yield strength of ice (kPa)
- Table 2 — Maximum thermal thrust from initial ice surface temperature to 0°C (kN/m)
- Table 3 — Thermal thrust exerted by expanding ice
- Table 4 — K_1 : Factor taking into account the inclination of structure from vertical
-

- Tableau 5 — K_2 : Coefficient tenant compte du rapport B/h
- Tableau 6 — σ : Résistance ultime à la compression recommandée
- Tableau 7 — K_1 : Coefficient tenant compte du rapport B/h
- Tableau 8 — K_2 : Coefficient tenant compte de la forme de l'ouvrage dans le plan horizontal
- Tableau 9 — K_3 : Coefficient tenant compte de la forme et du rapport B/h
- Tableau 10 — K_4 : Coefficient tenant compte de l'inclinaison
- Tableaux 11 à 34 — K_1, K_2, K_3 : coefficients pour le calcul des forces horizontales (H), verticales (\bar{V}) et transversales (T)
- Tableau 35 — Comparaison des forces calculées par diverses formules

- Table 5 — K_2 : Factor taking into account the ratio B/h
Table 6 — σ : Recommended ice yield compressive strength
Table 7 — K_1 : Factor taking into account ratio B/h
Table 8 — K_2 : Factor taking into account structure shape on the horizontal plane
- Table 9 — K_3 : Factor taking into account shape and ratio B/h
Table 10 — K_4 : Factor taking into account slope
Tables 11 to 34 — K_1, K_2, K_3 : Factors for computing horizontal (H), vertical (V) and transversal (T) forces
Table 35 — Comparison of forces computed by different formulas

...



AVANT-PROPOS

Dans les climats froids, la formation de glace et de pergélisol (permafrost) peut causer des détériorations ou des difficultés de fonctionnement aux barrages, à leurs ouvrages annexes et au matériel d'équipement. Il importe donc de tenir compte de ces problèmes au cours de la conception, du projet, de la construction et de l'exploitation des aménagements hydrauliques situés dans des régions froides. Le présent Bulletin a pour but de passer en revue ces divers problèmes et de présenter des mesures préventives ou correctives destinées à y faire face.

Ce Bulletin a été préparé par les membres du Sous-Comité n° 3 du Comité de l'Hydraulique des Barrages créé en 1987 (voir composition du Comité, page 2).

Il s'adresse aux projeteurs, constructeurs et maîtres d'ouvrage qui pourront tirer le plus grand profit de la synthèse complète présentée.

Que les auteurs de cet excellent rapport en soient vivement remerciés.

J.J. Cassidy
Président du Comité
de l'Hydraulique des Barrages

FOREWORD

In areas with cold climate, formation of ice and permafrost may cause damage or operational problems to dams, related structures or equipment. These problems must be considered during planning, design, construction and operation of hydraulic projects in cold climate. The purpose of this Bulletin is to review these problems and to present preventive or remedial measures against ice and permafrost action.

This Bulletin was prepared by the members of Subcommittee No. 3 of the Committee on Hydraulics for Dams which was formed in 1987 (see membership, page 2).

It addresses designers, contractors, manufacturers and owners who will greatly benefit from the comprehensive review presented.

Authors of this excellent report deserve our best appreciation.

J.J. Cassidy
Chairman, Committee on
Hydraulics for Dams

1. INTRODUCTION

1.1. BUT DU BULLETIN

Sous les climats froids, il faut tenir compte des problèmes liés aux glaces et au pergélisol (permafrost) lors des étapes de conception, de projet, de construction, ainsi que durant l'exploitation des barrages et ouvrages hydrauliques. Les glaces prennent diverses formes : couverture de glace ou glaces flottantes sur les rivières et les retenues ; glace visqueuse et frasil dans les eaux en surfusion ; glace dans le sol, surtout dans les régions où l'on trouve du pergélisol ; glace adhérente aux vannes et aux grilles, glace accumulée dans les galeries et tuyaux ; etc.

Ces glaces de formes diverses peuvent causer divers types de problèmes. Les barrages et autres ouvrages hydrauliques doivent être conçus de façon à résister à l'augmentation de pression due aux glaces. Les vannes, évacuateurs, grilles, etc., doivent être conçus de manière à éviter les problèmes d'exploitation résultant de la formation non contrôlée des glaces. La formation de glace dans les galeries et les conduites doit être évitée dans tous les cas. Des mesures spéciales doivent être prises aux stades de la conception et de la construction des barrages et autres ouvrages dans les zones de pergélisol, afin d'éviter les tassements et les infiltrations dans les fondations.

Lors de la manœuvre des vannes et de l'exploitation des centrales, des consignes particulières basées sur l'expérience seront suivies, afin d'éviter tout dommage aux ouvrages et toute perte de capacité de production. Le manque d'expérience, une mauvaise conception ou une gestion inappropriée sont autant de facteurs qui ont souvent entraîné de graves problèmes, et dans les cas les plus défavorables, la rupture de barrages. Quand les glaces posent des problèmes, conduisant par exemple au mauvais fonctionnement des vannes, c'est en général que le temps est très rigoureux, les réparations ou autres interventions visant à prévenir les pannes étant alors difficiles à effectuer. L'absence d'énergie électrique, ainsi que l'inaccessibilité aux lieux à cause de tempêtes de neige ou d'avalanches, sont des problèmes additionnels dans le cas surtout de centrales isolées, sans personnel, comme il en existe en particulier sous les climats froids.

Le but de ce Bulletin est de donner des recommandations pour la conception, le projet et l'exploitation des barrages et des centrales situés dans des climats froids. Il ne s'agit pas de proposer ici des solutions à tous les problèmes, mais bien de procurer une meilleure compréhension des problèmes liés aux glaces, pour ceux qui n'ont pas l'habitude de travailler dans les zones froides du globe.

1. INTRODUCTION

1.1. PURPOSE OF THE BULLETIN

In areas with cold climate, problems with ice and permafrost must be considered during planning, design, construction, as well as during the operation of dams and hydraulic structures. Ice may occur in different forms: as ice cover or floating ice on rivers and reservoirs; as slush and frazil ice in supercooled water; as ice in soil especially in areas with permafrost; as fast ice on gates and trash racks, ice accumulated in tunnels and pipes; etc.

Formation of ice in different forms may cause different problems. Dams and other hydraulic structures must be designed to withstand increased pressure from the ice. Gates, spillways, trash racks, etc. must be designed to avoid operational problems from unintentional ice formation. Ice formation in tunnels and pipelines must in all cases be avoided. Special measures must be taken when designing and constructing dams and other structures in areas with permafrost to avoid settlements and seepage through the foundation.

During the operation of gates and exploitation of power stations special rules based on operational experience must be followed to avoid damage to structures and loss of production capacity. Lack of experience, incorrect design, and inadequate management has often caused severe failures, and in the worst cases dam failures may be the result. When ice problems occur, which for example may obstruct proper operation of gates, the weather situation is most often very critical, and repair or other measures to prevent the failure will be very difficult to carry out. Lack of power, no access due to snow storms or avalanches are additional problems especially for unmanned and remote power stations, which is most common in areas with cold climate.

The purpose of this Bulletin is to give some guidelines for the planning, designing, and operating of dams and power stations in cold areas. It has not been the intention to give a solution for all the problems, but rather to provide a better understanding of the ice problems for people who are not used to operating in the Arctic.

1.2. STRUCTURE DU BULLETIN

Le Bulletin comprend quatre chapitres principaux. Le chapitre 2 donne une description générale de la formation et de la débâcle des glaces sur les lacs et rivières, selon les conditions climatiques. Le chapitre 3 décrit l'action des glaces sur les ouvrages hydrauliques, plus précisément les forces dues à l'expansion thermique et aux glaces dérivantes. Le chapitre 4 traite de l'action des glaces sur les vannes, ainsi que des mesures visant à prévenir leur formation. Le chapitre 5 comprend une description générale de la formation de glace dans le sol et pergélisol, et donne, pour les barrages, galeries, conduites, prises d'eau et ouvrages de restitution, une liste de problèmes qui se posent dans les régions de pergélisol.

Le chapitre 6 présente un certain nombre d'exemples et résume les leçons tirées de l'expérience.

Il n'est pas possible de donner ici une liste exhaustive de recommandations destinées à surmonter les problèmes liés aux glaces. A la fin de chaque chapitre, on trouvera des références permettant d'obtenir des renseignements supplémentaires.

1.2. STRUCTURE OF THE BULLETIN

The Bulletin is divided into four main chapters. Chapter 2 comprises a general description of ice cover formation and ice break-up on lakes and rivers related to the climatic conditions. Chapter 3 gives a description of ice forces on hydraulic structures induced by thermal expansion and drifting ice. Chapter 4 gives special attention to ice forces on gates and ice prevention measures. Chapter 5 comprises a general description of frost in soil and permafrost, and it includes a list of problems for dams, tunnels, pipelines, intakes and outlets related to areas with permafrost.

In Chapter 6, a number of selected case studies and operational experiences are given.

The limitation of the Bulletin has not made it possible to give a complete list of guidelines about ice problems. A list of references is given after each chapter from which further information can be obtained.

2. GLACE SUR LES RIVIÈRES ET LES RETENUES – CONCEPTION DES OUVRAGES D'ÉCOULEMENT D'EAU

Ce chapitre vise à décrire brièvement les régimes thermiques et les processus qui régissent la formation et la débâcle des glaces sur les lacs, les retenues et les rivières. Il donne aussi quelques recommandations pour la conception et l'exploitation des circuits d'eau, afin de réduire les problèmes de glace sur les barrages et les ouvrages annexes.

Ashton (1986) fournit des renseignements plus complets sur les connaissances techniques actuelles en matière de glaces sur les lacs et rivières. Les comptes rendus des Symposia des Glaces, organisés par l'Association Internationale de Recherches Hydrauliques (AIRH), sont aussi une bonne source de renseignements sur les problèmes de glace.

2.1. PRISE DES LACS ET DES RETENUES PAR LES GLACES

2.1.1. Régime thermique des lacs et retenues

La densité de l'eau atteint son maximum à 4°C. Par conséquent, en climat tempéré les lacs et les retenues connaissent deux périodes de circulation, l'une au printemps, l'autre à l'automne. En automne, les eaux à la surface d'un lac se refroidissent à cause de la déperdition de chaleur de l'eau vers l'air et leur densité augmente. Il en résulte que les eaux de surface descendent vers le fond du lac. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que toute la masse d'eau atteigne 4°C. Compte tenu de cette propriété physique de l'eau, le refroidissement au-dessous de 4°C réduit la densité de l'eau de surface. Cette eau reste alors en surface, créant une stratification thermique stable durant l'hiver. Un refroidissement supplémentaire abaisse la température en surface jusqu'au point de congélation, alors que les eaux au fond du lac ou du réservoir peuvent tendre vers 4°C tout l'hiver.

Au printemps, la température de l'eau à la surface augmente grâce au rayonnement solaire. De façon analogue à ce qui s'est passé pour la circulation automnale, il se produit au printemps un mouvement qu'on pourrait appeler d'inversion, jusqu'à ce que l'eau de tout le lac ou de tout le réservoir atteigne 4°C. Par la suite, le réchauffement entraîne une stratification estivale stable, avec des températures plus élevées pour l'eau en surface.

2.1.2. Formation des glaces

En général, les vents produisent plus d'effets sur les grands lacs que sur les petits. Non seulement les vents forts accroissent les transferts de chaleur entre

2. ICE ON RIVERS AND RESERVOIRS – DESIGN OF WATERWAYS

The purpose of this chapter is to briefly describe the thermal regimes and the processes governing ice formation and break up on lakes, reservoirs and rivers. Simple guidelines regarding the design and operation of waterways in order to reduce ice problems at dams and related structures are also presented.

For a comprehensive state-of-the art report on different engineering aspects regarding ice on rivers and lakes, reference is made to Ashton (1986). The proceedings from Ice Symposia arranged by the International Association for Hydraulic Research (IAHR) are also a good source for information on various ice problems.

2.1 FREEZE-UP OF LAKES AND RESERVOIRS

2.1.1. Thermal regime of lakes and reservoirs

The density of water is at its maximum at 4° C. This implies that lakes and reservoirs in temperate climate have two circulation periods, one in the spring and one in the autumn. Due to heat loss from the water to the atmosphere the surface water of a lake will cool in the autumn and becomes more dense. Consequently the surface water sinks towards the bottom of the lake. This process goes on until the temperature of the entire water body has reached 4° C. Due to this physical property of water, cooling of the surface water below 4° C will decrease its density whereby a stable density stratification is created. Further cooling causes the surface temperature to reach the freezing point while the bottom water of the lake or reservoir may have temperatures up to 4° C for the whole winter-period.

In spring the temperature of the surface water will rise due to the solar radiation. Similar to the fall circulation, lakes and reservoirs will have a so called turnover in the spring when the temperature is 4° C over the full depth. Further heating will then cause a stable summer stratification with a warmer surface layer.

2.1.2. Ice formation

Large lakes are generally more susceptible to wind action than small lakes. Strong winds not only increase the heat flux between the water and the atmosphere

l'eau et l'air, mais ils favorisent aussi le brassage des masses d'eau. Il en résulte que la formation des glaces est souvent plus tardive sur les grands lacs que sur les petits, en dépit de conditions climatiques comparables. Dans certains cas, sur les Grands Lacs de l'Amérique du Nord par exemple, il peut ne pas se former de couverture entière de glace : les vents provoquent des courants de surface qui charrient et transforment les glaces, lesquelles peuvent alors s'empiler en masses considérables le long des rives.

Habituellement, c'est le long des berges et dans les anses calmes que la couverture de glace commence à se former sur les lacs et les retenues. Les premiers cristaux amènent la formation d'une mince pellicule en surface, qu'on appelle couche de glace primaire. Le processus de congélation se poursuit sous cette couche, si la température de l'air à sa surface est assez basse pour permettre à la chaleur que dégage la cristallisation de traverser la couche de glace pour s'échapper vers le haut.

La formule de Stefane, dite de la méthode degré-jour, permet d'évaluer la vitesse d'accroissement de l'épaisseur de la couverture de glace :

$$h = \alpha S^{1/2} \quad (2.1)$$

où h : épaisseur de la couverture de glace (m) ;
 α : coefficient (m/degrés-jours^{1/2}) ;
 S : nombre de degrés-jours de gel.

Ainsi, pour une journée où la température moyenne de l'air est de -10°C, la valeur de S est égale à 10 degrés-jours. La valeur du coefficient α dépend des conditions climatiques. Bengtsson (1987) l'évalue à environ 0,03 m/(degrés-jours de gel)^{1/2}. Cela suppose qu'après quatre jours pendant lesquels la température moyenne de l'air est de -9°C, l'épaisseur de la couverture de glace serait de 0,18 m, pourvu qu'il n'y ait pas de neige sur la glace. S'il y a de la neige, il faut effectuer un calcul plus complexe (voir par exemple Ashton, 1986).

Tel que mentionné plus haut, le moment de la prise des lacs par les glaces varie non seulement en fonction de leur situation géographique, mais en fonction aussi de leur grandeur et de leur profondeur. Dans certains pays, on a, depuis plusieurs années, pris note des dates où s'effectue la prise par les glaces.

La flottabilité de la glace s'avère plutôt faible, sa densité étant de 920 kg/m³ environ. Puisque les couvertures de glace sont habituellement fissurées, un peu de neige suffit à immerger une couverture de glace. L'eau se mélange alors à la neige, et il se forme ce qu'on appelle de la glace de neige. Au cours de l'hiver, il peut se former plusieurs couches de glace de neige, d'où une couverture de glace très anisotrope.

2.2. PRISE DES RIVIÈRES PAR LES GLACES

Dans les sections d'une rivière où la vitesse d'écoulement est lente, et surtout le long des berges ou dans les anses calmes, une couverture complète de glace peut commencer à se former de la même façon que sur un lac, dès que la température

re but also cause mixing of the water masses. This means that large lakes often will have a delayed ice formation compared with smaller lakes having similar climatic conditions. On some large lakes, such as for example the Great Lakes of North America, complete ice covers may not form at all. On such lakes the wind creates surface currents which transport and transform the ice. In this way ice packs and ice pile-ups along the shores can reach considerable dimensions.

The formation of ice covers on lakes and reservoirs usually starts along the shores and in calm bays. The first ice crystals will start the formation of a thin surface film, which is called the primary ice layer. Further freezing of water to the underside of the ice sheet will take place if the surface air temperature is low enough to allow the heat of crystallization to be conducted upward through the ice sheet.

The growth rate of the ice cover thickness may be estimated by the following equation which is the so called degree day method:

$$h = \alpha S^{1/2} \quad (2.1)$$

where h : Ice cover thickness (m)
 α : Coefficient (m/degree-days^{1/2})
 S : Number of degree-days of freezing

For example, one day of -10°C average air temperatures corresponds to $S = 10$ degree-days. The value of the coefficient α depends on the local climatic conditions and typical value have been found to be about 0.03 m/(degree-days of freezing)^{1/2} according to Bengtsson (1987). This implies that four days with -9°C average air temperature would result in an ice cover growth of 0.18 m, provided there is no snow on the ice. When snow covers the ice a more elaborate calculation must be done; see for example Ashton (1986).

As indicated above the date of freeze-up for lakes varies not only with their geographical location but also with their size and depth. In some countries freeze-up dates for certain lakes have been observed for many years.

The buoyancy of ice is relatively low (the density is about 920 kg/m³). Since ice covers usually contain cracks, a relatively thin snow cover will submerge the ice cover. Water will thus mix with the snow and form what is called snow ice. Snow ice layers may form several times during a winter creating a highly anisotropic ice cover.

2.2 FREEZE-UP OF RIVERS

In slow flowing parts of a river, particularly along the banks or on calm bays, a solid ice cover may start to form in the same manner as on a lake when the bulk temperature of the river is 1 or 2 degrees above the freezing point. The growth of

de la masse d'eau de la rivière atteint 1 ou 2 degrés au-dessus du point de congélation. La glace qui a commencé à se former le long des rives cesse de s'étendre vers le milieu de la rivière, lorsque le transfert de chaleur, de l'eau vers la bordure de glace, est égal à la perte de chaleur de la glace vers l'air.

La turbulence d'un écoulement d'eau peut empêcher la formation d'une couverture solide de glace. La formation de frasil est alors le facteur principal qui entraîne la création de glace visqueuse et d'assiettes de glace qui finissent par former des couvertures de glace fragmentaires.

Là où une rivière coule à découvert et à grande vitesse, la température de l'eau peut tomber en dessous du point de fusion quand un refroidissement intense a lieu. On dit que l'eau est à l'état de surfusion. Dans une telle eau, des cristaux qui ont la forme de petits disques qu'on nomme frasil apparaissent. Ces cristaux grossissent et le dégagement de la chaleur latente de fusion est compensé par les pertes de chaleur de l'eau vers l'air. Pour une description plus détaillée de la nucléation et de la formation du frasil, voir par exemple Ashton (1986).

La formule suivante permet d'évaluer la production de glace de frasil, un phénomène lié à la perte de chaleur de l'eau en surface :

$$Q_{\text{glace}} = \frac{\phi b l}{\rho f} \quad (2.2)$$

où Q_{glace} : taux de production de glace (m^3/s) ;
 ϕ : perte de chaleur de l'eau en surface (W/m^2) ;
 b : largeur de rivière exempte de glace (m) ;
 l : longueur de rivière à surface libre (m) ;
 ρ : densité de la glace ($920 \text{ kg}/\text{m}^3$) ;
 f : chaleur latente de fusion ($3,33 \cdot 10^5 \text{ J}/\text{kg}$).

La porosité de la glace visqueuse provenant du frasil peut atteindre 80 %. Cela signifie que pour une perte de chaleur modérée, de $200 \text{ W}/\text{m}^2$, il peut se former environ $1\,400 \text{ m}^3$ de glace visqueuse par jour, sur un tronçon de rivière large de 50 m et long de 100 m.

Une fois formés, les cristaux de frasil vont s'agglomérer en flocons. A mesure que ces flocons grossissent, ils font surface et flottent ; une couche de glace peut se former sur ces flocons, créant ce qu'on appelle des assiettes de frasil. Ces assiettes prennent souvent des formes arrondies, à cause des collisions entre assiettes voisines. C'est souvent à cause de la production considérable de frasil, qui vient d'être décrite, que des couches de glace en fragments peuvent se former très vite sur certains tronçons de rivière.

Les flocons de frasil peuvent aussi s'accrocher à la glace des berges et contribuer à son extension.

Le frasil peut boucher complètement les prises d'eau munies de grilles de protection.

Certaines centrales hydro-électriques connaissent de tels problèmes, une ou plusieurs fois l'an. Le chauffage des grilles, suivant divers procédés, permet de réduire le risque d'obstruction des prises d'eau par le frasil.

the shore ice towards the center of the river halts when the heat transferred from the water to the ice edge balances the heat loss to the atmosphere.

The turbulence of flowing water may prevent the formation of a solid ice cover. Along such river stretches the formation of frazil is the important mechanism responsible for the creation of frazil slush and ice pans which subsequently form fragmented ice covers.

Along open stretches of a fast flowing river the temperature of the water may drop below the freezing point during strong cooling, i.e. the water has become super-cooled. In super-cooled water small disk-shaped ice crystals called frazil appear. The crystals grow and the release of the latent heat of fusion is balanced by the heat loss from the water to the atmosphere. For a more detailed description of ice nucleation and frazil formation, see for example Ashton (1986).

The production of frazil ice, which is related to the heat loss from the water surface, can be estimated by the following formula:

$$Q_{\text{glace}} = \frac{\phi b l}{\rho f} \quad (2.2)$$

where Q_{ice} : Production rate of solid ice (m^3/s)
 ϕ : Heat loss from the water surface (W/m^2)
 b : Width of the open water reach (m)
 l : Length of the open water reach (m)
 ρ : Density of ice ($920 \text{ kg}/\text{m}^3$)
 f : Latent heat of fusion ($3.33 \cdot 10^5 \text{ J}/\text{kg}$)

Slush produced from frazil could have a porosity as high as 80%. For a moderate heat loss of $200 \text{ W}/\text{m}^2$ this means that about $1\,400 \text{ m}^3$ slush can be produced per day along a river reach 50 m wide and 100 m long.

After their formation, frazil crystals start to agglomerate into flocs. As these flocs grow larger they float to the surface where an ice sheet may form on top of such flocs whereby so called frazil pans are formed. These pans often become circular in shape due to the grinding effect against neighboring pans. Such circular pans are often called pancake ice. The very substantial frazil production that can take place, as shown above, is often the reason why thick fragmented ice covers may form very quickly on certain river reaches.

Frazil flocs may also attach to the shore ice and contribute to its growth.

Water intakes equipped with trash-racks may be completely clogged by frazil.

Certain hydro power stations suffer from such problems at one or more occasions every year. Heating the trash-rack in different ways may be one way to reduce the risk for blockage of water intakes by frazil.

Quand des assiettes ou des glaçons flottants heurtent un obstacle (estacade à glaces, ouvrage de prise d'eau, etc.) ou une couverture de glace existante, ils peuvent être stoppés ou s'enfoncer sous la glace. Si le courant est suffisamment faible, ces glaces vont s'accumuler le long de la couverture de glace qui s'étendra alors vers l'amont par simple juxtaposition des glaçons.

Pour prévoir cette progression par juxtaposition, on peut établir un rapport entre la force hydrodynamique, qui tend à immerger les glaçons, et leur flottabilité. Ce faisant, on trouve que la vitesse critique du courant sous les glaçons suit la relation suivante (Pariset et Hausser, 1959) :

$$V_c = k \left(2g \frac{\rho - \rho'}{\rho} h \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

où V_c : vitesse du courant sous le glaçon (m/s) ;
 g : accélération de la gravité (m/s²) ;
 ρ : densité de l'eau (kg/m³) ;
 ρ' : densité de la glace (kg/m³) ;
 h : épaisseur du glaçon (m) ;
 k : facteur lié à la forme du glaçon (qui va de 0,66 pour les blocs cubiques à 1,3 pour les plaques minces, d'après Pariset et Hausser, 1959).

De façon analogue à ce qu'exprime l'équation 2.3, la possibilité de formation d'une seule couche de glace peut s'exprimer par un nombre de Froude basé sur la profondeur de l'écoulement :

$$F = \frac{V}{(gd)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.4)$$

où F : nombre de Froude ;
 V : la vitesse du courant (m/s) ;
 d : la profondeur moyenne de l'écoulement en amont de la couverture de glace (m).

A partir d'études menées sur le terrain, Kivisild (1959) a constaté que les valeurs du nombre de Froude critique variaient de 0,06 à 0,08. Si le nombre de Froude est plus élevé, les glaçons seront entraînés dans l'écoulement pour former une couverture de glace plus épaisse.

Dans un courant turbulent, l'eau en surfusion peut atteindre le lit de la rivière, où la glace peut se former et s'agglomérer sur des pierres ou d'autres objets, produisant ainsi de la glace de fond. La glace de fond est essentiellement du frasil actif qui colle ou croît sur le lit de la rivière. La présence de frasil actif dans la masse d'eau active la croissance de la glace de fond. De grandes formations de glace de fond sont susceptibles de gêner le courant au point de provoquer des inondations et l'érosion des berges.

When pans and ice floes drift against a barrier (ice boom, intake structure etc) or an existing ice cover, they may be stopped or swept down below the ice. If the flow velocity is low enough ice will accumulate against the leading edge and the ice cover will progress upstream by simple juxtaposition of the ice floes.

A criterion for progression by juxtaposition can be derived by balancing the hydrodynamic force, tending to submerge the floe, against the buoyancy force. By doing so the critical flow velocity beneath the floe is found to be (Pariset and Hausser, 1959):

$$V_c = k \left(2g \frac{\rho - \rho'}{\rho} h \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

where V_c : Flow velocity beneath the ice floe (m/s)
 g : Acceleration due to gravity (m/s²)
 ρ : Density of water (kg/m³)
 ρ' : Density of ice (kg/m³)
 h : Thickness of ice floe (m)
 k : Factor depending on the shape of the floe (can vary between 0.66 for cubic blocks to 1.3 for thin floes according to Pariset and Hausser, 1959).

Similar to eq. 2.3 the ability to form a single layer of ice may be expressed in terms of a Froude number based on flow depth :

$$F = \frac{V}{(gd)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.4)$$

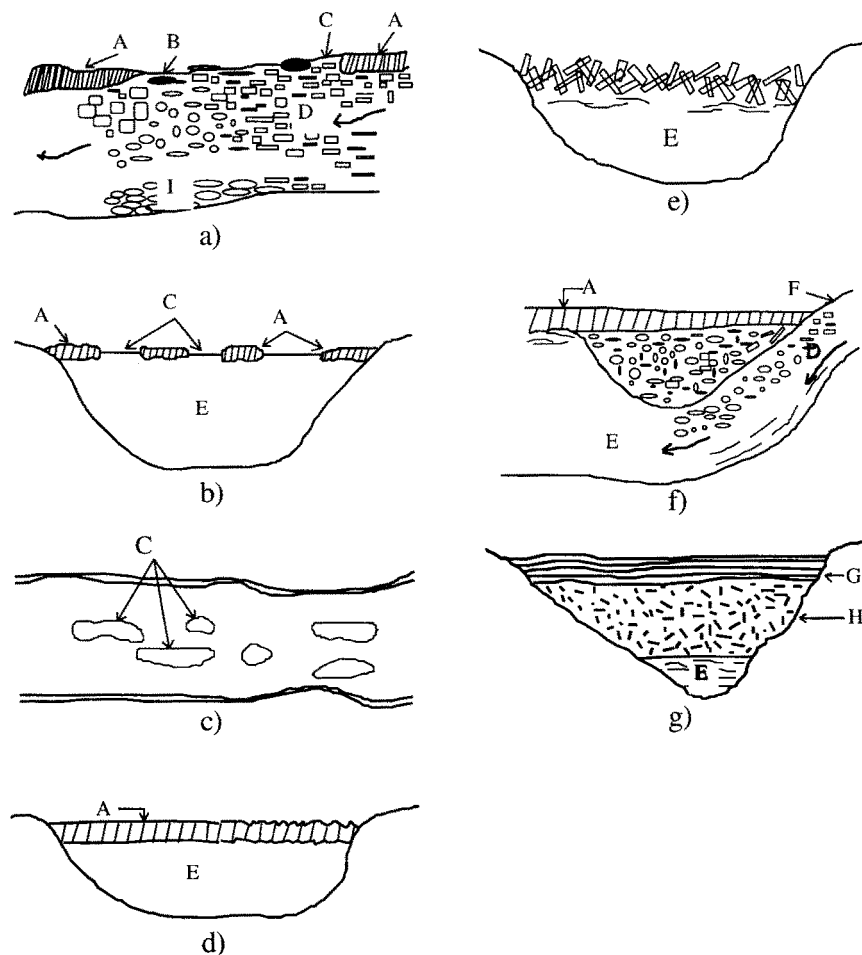
where F : Froude number
 V : Flow velocity (m/s)
 d : Flow depth (m)

Based on field studies Kivisild (1959) found that values on the critical Froude number varied between 0.06 and 0.08. For higher Froude numbers, approaching ice floes will be submerged and form a thicker ice cover.

In a turbulent river flow supercooled water may be brought to the river bottom where ice can nucleate or attach to stones or other objects to produce anchor ice. Anchor ice can also be formed from frazil which is very "sticky" in supercooled water. Large anchor ice formation may constrict the flow and cause inundations and erosion of the banks.

La formation d'une couverture de glace sur une rivière augmente la résistance au courant. Cette résistance accrue résulte de l'augmentation du périmètre mouillé, ainsi que de la réduction du rayon hydraulique. Les couvertures de glace épaisses peuvent aussi réduire considérablement la surface mouillée d'une coupe transversale d'une rivière. Ashton (1986) donne des méthodes de calcul des courbes de remous des rivières ayant une couverture de glace.

La Fig. 1 montre diverses formes de glace qui se créent sur les rivières. On trouve cette classification chez Ashton (1986). Parmi les divers termes indiqués sur cette Figure, la définition de l'aufeis peut être nécessaire. D'après Ashton, l'aufeis est une masse de glace de surface formée par les gels successifs des nappes d'eau entraînées sous ou sur la couverture de glace à partir des rives. Ceci se forme principalement dans les cours d'eau larges et peu profonds.



The formation of an ice cover on a river increases the resistance to flow. The increased resistance is due to the increased wetted perimeter and the reduced hydraulic radius. Thick ice covers can also substantially reduce the cross-sectional area of flow. Methods to calculate backwater curves for ice covered conditions are given by Ashton (1986).

Different forms of ice appearing in rivers are shown on Fig. 1. This classification can be found in Ashton (1986). Among the various terms indicated on this Figure, aufeis may need a clarification. According to Ashton, aufeis is massive surface ice formed by successive freezing of sheets of water seeping onto the ice cover from the banks, from under the ice cover or from surface runoff. It forms mainly in wide and shallow streams.

Fig. 1

Forms of river ice covers (from Ashton, 1986)

Formes de couverture de glace sur les rivières (d'après Ashton 1986)

a) Frazil and anchor ice (Longitudinal section)	a	<i>Frasil et glace de fond (coupe longitudinale)</i>
b) Partial ice cover (shorefast ice) (Cross section)	b	<i>Couverture de glace partielle (glace de rive) (coupe transversale)</i>
c) Partial ice cover (broken cover) (Plan)	c	<i>Couverture de glace partielle (couverture fracturée) (vue en plan)</i>
d) Continuous ice cover (Cross section)	d	<i>Couverture de glace continue (coupe transversale)</i>
e) Continuous ice cover (fragmented with rough undersurface) (Cross section)	e	<i>Couverture de glace continue (fragmentée avec surface inférieure rugueuse) (coupe transversale)</i>
f) Continuous ice cover (hanging dam) (Longitudinal section)	f	<i>Couverture de glace continue (barrage suspendu) (coupe longitudinale)</i>
g) Aufeis (Cross section)	g	<i>Aufeis (coupe transversale)</i>
A Ice	A	<i>Glace</i>
B Frazil slush	B	<i>Glace visqueuse</i>
C Open water	C	<i>Eau à surface libre</i>
D Frazil	D	<i>Frasil</i>
E Water	E	<i>Eau</i>
F Frazil slush and pans	F	<i>Assiette de glace visqueuse</i>
G Aufeis	G	<i>Aufeis</i>
H River ice	H	<i>Glace de rivière</i>
I Anchor ice	I	<i>Glace de fond</i>

Il faut tenir compte, dans la conception de nombreux aménagements hydro-électriques, des pertes de charge locales dues aux embâcles de glace ou à la résistance accrue que provoque la couverture de glace. Ce peut être le cas quand on décide de la hauteur d'un batardeau. Si on ne prend pas en compte les pertes de charge locales qui peuvent résulter des embâcles de glaces, de la glace de fond ou tout simplement de la formation d'une couverture de glace, le batardeau risque d'être submergé.

Pour une description plus détaillée de la formation des couvertures de glace sur les rivières et des études à ce sujet, voir Ashton (1986).

2.3. DEBÂCLE DES GLACES

2.3.1. Lacs et retenues

Sur les lacs et sur les retenues de petites ou de moyennes dimensions, la couverture de glace a tendance à fondre sur place.

Sur de plus grands lacs, l'action du vent et des vagues peut empêcher la formation d'une couverture de glace complète. Au printemps, des vents forts peuvent provoquer la débâcle et l'accumulation des glaces le long des rives. La vitesse terminale d'une plaque de glace poussée par le vent est d'environ 1/30^e de la vitesse du vent (Ashton, 1986). Une grande plaque peut développer une quantité de mouvement considérable. Pour des ouvrages sur un grand lac ou une retenue, il faut donc tenir compte des risques liés à l'impact des glaces en mouvement. Voir plus loin, le chapitre 3.4.

L'exutoire d'un grand lac ou d'une retenue peut se trouver obstrué lors de débâcles, entraînant une réduction du débit d'eau vers une centrale située en aval. Ce problème se pose souvent, par exemple, pour l'écoulement des eaux provenant du lac Érié et de la rivière Niagara Supérieur. On a donc entrepris des études approfondies visant à trouver des solutions satisfaisantes à ce problème d'obstruction par les glaces (Crissman R. *et al.*, 1994).

2.3.2. Rivières

Sur les rivières à l'état naturel, la débâcle est souvent un événement spectaculaire. Sous l'action combinée de l'augmentation du débit, de la hausse du niveau de l'eau et de la détérioration thermique de la couverture de glace, cette dernière se décroche des berges. Elle se met soudain en mouvement et se disloque en morceaux ; commence alors ce qu'on appelle la descente des glaces.

En divers points et pour toutes sortes de raisons, les glaces à la dérive peuvent se trouver stoppées. Une couverture de glace intacte sur un tronçon de la rivière, une section plus étroite ou encore un coude, sont autant de situations susceptibles de bloquer la dérive des glaces et de provoquer un embâcle.

Les embâcles de glace peuvent dans certains cas faire monter le niveau des eaux beaucoup plus haut que ne le font les crues à surface libre. Conséquence évidente, les communautés riveraines subissent alors de fortes inondations. Souvent

Local head losses due to ice jams or the increased resistance of an ice cover need to be considered in many design situations. One example could be the determination of the necessary height of a cofferdam. The extra head losses caused by ice jams, anchor ice or simply a surface ice cover may, if not considered, jeopardize the security of the coffer dam.

For a more complete description of various mechanisms and studies regarding the formation of ice covers on rivers, the reader is referred to Ashton (1986).

2.3. BREAK-UP

2.3.1. Lakes and reservoirs

In small and medium sized lakes and reservoirs the ice cover tends to melt in place.

On large lakes, wind and wave action may prohibit the formation of a complete ice cover. At spring time strong winds can also initiate break-up and cause ice piling along the shores. The terminal velocity of a wind-blown ice sheet is about 1/30 of the wind velocity (Ashton, 1986). A large ice sheet can therefore develop tremendous momentum. For structures located at large lakes or reservoirs the risk for impact of drifting ice needs to be considered. See section 3.4 for further details.

The outflow from a large lake or reservoir may also be clogged with ice by break-up events, causing reduced flow to power stations located downstream of the outlet. For example the outflow from lake Erie and the Upper Niagara River frequently experiences such problems. Very elaborate investigations have therefore been undertaken in order to find reasonable solutions to this problem with ice jamming (Crissman R. *et. al.*, 1994).

2.3.2. Rivers

In undeveloped rivers break-up often is a spectacular event. Increased flow and rising water levels combined with the thermal deterioration of the ice cover detach the ice from the banks. As the ice suddenly begins to move, it breaks into floes and the so called "ice run" is initiated.

The drifting ice may be halted at different locations for a variety of reasons. An intact ice cover on a certain river reach, a narrow section or a bend of the river are examples on locations where drifting ice may be halted and starts forming an ice jam.

Ice jams can in some regions cause water levels far higher than open water flood levels. The obvious consequence of such events is flooding of riverside communities. Damages from the ice masses pushed up along the river banks also occur

aussi, les glaces qui s'amoncellent contre les berges causent des dégâts. Et comme de tels embâcles font obstruction, il en résulte un accroissement de la vitesse d'écoulement des eaux capable d'entraîner une érosion imprévue des berges ou du lit d'une rivière. Les fondations des piles des ponts risquent ainsi de se trouver endommagées, compromettant la stabilité de l'ouvrage.

Beltaos (1983) donne un compte rendu complet de la théorie en matière d'embâcles des glaces, ainsi que les conclusions tirées d'observations in situ.

Sur une rivière entièrement aménagée pour la production d'hydro-électricité, la débâcle n'est d'habitude pas aussi dramatique. La création de retenues le long d'une rivière fait en sorte que la glace aura tendance à fondre sur place, ou du moins qu'elle se trouvera nettement amincie avant que ne commence la descente des glaces. Sur les rivières aménagées en partie, à des fins hydro-électriques, la débâcle qui se produit sur les sections encore à l'état naturel peut causer des difficultés, si de grandes quantités de glace font embâcle en amont d'une centrale. Voir Majewski (1984).

2.4. CONCEPTION DES OUVRAGES D'ÉCOULEMENT D'EAU, PRISES D'EAU ET ÉVACUATEURS DE CRUE

La construction d'un barrage entraînera des changements plus ou moins marqués des régimes hydraulique et thermique d'un cours d'eau. Ainsi la création d'un grand réservoir aura des conséquences beaucoup plus marquées que la construction d'une centrale au fil de l'eau.

Dans leur état naturel, les rivières des régions froides connaissent d'importantes variations de leur débit. En automne, le débit diminue jusqu'à la formation de glaces. Pendant toute la saison froide, les précipitations se font sous forme de neige, et l'écoulement reste faible jusqu'à la crue de printemps.

La construction d'une centrale hydro-électrique modifie le régime hydraulique et thermique de la rivière. Les barrages et les réservoirs accroissent la capacité de stockage de l'eau. Le débit variera donc fort peu d'une saison à l'autre dans une rivière entièrement aménagée à des fins hydro-électriques. L'existence de réservoirs tend aussi à retarder la formation des glaces, et l'évacuation d'eau moins froide stockée au fond des réservoirs peut empêcher la formation de glaces en aval. Voir par exemple Michel (1990) et Billfalk (1992).

Lors de la conception et du projet des ouvrages d'écoulement d'eau, barrages et installations hydro-électriques situés dans des climats froids, il faut porter une attention particulière aux risques et aux problèmes liés à la formation des glaces et à la débâcle.

Les chapitres 2.1, 2.2 et 2.3 évoquent brièvement les processus de formation des glaces et de débâcle sur les lacs et sur les rivières. Les renseignements de base que procurent ces chapitres permettent de présenter des recommandations pour la conception des ouvrages d'écoulement d'eau. Ainsi, pour un nombre de Froude critique de 0,07, l'équation 2.3 donne une vitesse critique du courant à la surface d'environ 0,6 m/s. Cette valeur permet souvent de déterminer si une canalisation d'eau pourra avoir une couverture de glace formée d'une seule couche de glaçons.

frequently. Since an ice jam effectively blocks the flow passage, resulting high flow velocities may cause unexpected erosion of the banks or the river bed. The foundation of bridge piers may in this way be damaged with serious consequences for the stability of the bridge.

A comprehensive state-of-the-art report on the theory of ice jams as well as results from field observations are given by Beltaos (1983).

In a river fully utilized for power production, the break-up usually is not a dramatic event. The creation of reservoirs along the river means that the ice tends to melt in place or will at least be strongly weakened before the ice run is initiated. In rivers partially developed with hydro power stations the break-up along the non-developed parts may cause problems if large quantities of ice cause jamming in the reservoir upstream of the hydro power installation. See Majewski (1984).

2.4. DESIGN OF WATERWAYS, WATER INTAKES AND SPILLWAYS

The hydraulic and thermal regime of a river system will normally be altered when a dam is constructed in the system. For example, the formation of a large reservoir has a much higher impact than the construction of a run-of-the river power station.

In their natural state, rivers in cold regions are characterized by large flow variations over the year. In the fall, flow rates are reduced until freeze-up occurs. During the ice covered season, all precipitation falls as snow, and the discharge remains low until the spring flood develops.

The construction of hydro power stations in a river will change the hydraulic and thermal regime of this river. The creation of dams and reservoirs increases the capacity for storage of water. In fully developed rivers the flow therefore often shows only marginal seasonal variation. Reservoirs also tend to delay ice formation and withdrawal of warm water stored in deep reservoirs may prevent ice formation downstream of the reservoir. See for example Michel (1990) and Billfalk (1992).

When designing waterways and hydraulic structures for dams and hydro power installations located in cold climates, special attention needs to be addressed to the potential problems and risks associated with ice formation and ice break-up.

In sections 2.1, 2.2 and 2.3 freeze-up and break-up processes for lakes and rivers are briefly described. Using the very basic information given in these sections, simple guidelines for the design of waterways may be established. For example, eq. 2.3 and a value of 0.07 for the critical Froude number, indicates critical surface flow velocities around 0.6 m/s. This value is also frequently used as a rule of thumb for determining whether a waterway may have an ice cover formed by a single layer of ice floes. For higher surface velocities, approaching ice

Un courant rapide en surface immergera les glaces flottantes, occasionnant des pertes de charge locales plus élevées.

Tel qu'indiqué au chapitre 2.2, le frasil peut obstruer les grilles des prises d'eau des centrales hydro-électriques. Il risque de s'ensuivre une diminution considérable de la production d'électricité et la nécessité d'ouvrir l'évacuateur de crue. En hiver, l'exploitation des évacuateurs de crue contrôlés par des vannes requiert un soin particulier et fait peser plus de risques sur la sécurité du barrage. Aussi, une conception adéquate de la prise d'eau et de son chenal d'amenée revêt-elle une grande importance pour les mêmes raisons de sécurité. Ashton a rassemblé les connaissances actuelles dans le domaine de la conception des prises d'eau (1988).

Roën et Tesaker (1988) font les recommandations suivantes quant à la conception des prises d'eau des centrales hydro-électriques. Dans la mesure du possible :

- choisir l'emplacement des prises d'eau de façon que les vents ne risquent pas de pousser les eaux de surface froides vers les grilles de protection ;
- prévoir un niveau de submersion suffisant au droit des grilles ;
- prévoir l'espacement maximal, mais physiquement acceptable, entre les barreaux des grilles
- chauffer les barreaux ;
- choisir avec soin la forme et le matériau des barreaux.

Il faut aussi permettre le passage, en toute sécurité, de grandes quantités de glace au moment des débâcles sur certaines rivières, surtout s'il y a peu de centrales sur un tronçon de la rivière. Majewski (1986) note qu'une conception spéciale peut être alors nécessaire pour l'évacuateur de crue ou pour les vannes, et que des essais sur modèles hydrauliques peuvent se révéler très efficaces dans l'étude de tels ouvrages.

Il faut faire très attention lorsqu'on utilise des ponts au-dessus de l'évacuateur de crue pour soutenir des câbles destinés au contrôle ou à l'alimentation électrique des vannes. Si pour une raison quelconque les niveaux d'eau montaient pendant le fonctionnement de l'évacuateur de crue, la glace qui dérive pourrait endommager de telles installations.

Dans la conception des aménagements hydrauliques, il importe d'examiner soigneusement les aspects de l'exploitation. Ainsi, un débit faible et régulier en hiver pourrait être idéal, dans bien des cas, pour éviter les problèmes liés aux glaces. Toutefois, les besoins énergétiques sont élevés en hiver, ce qui requiert de forts débits. A ce propos, un problème particulier se présente du fait que la production d'énergie en périodes de pointe suppose des variations marquées du débit. Quand de tels problèmes surviennent, on pourra les atténuer par des mesures, telles que la réduction du débit au début de la formation de glace ou la mise en place d'estacade, mais il vaut mieux les prévoir dès la conception (Billfalk, 1984).

Enfin, il faut souligner que la conception des grands ouvrages hydrauliques dans les climats froids exige souvent des études poussées, y compris des mesures et des observations in situ, une modélisation mathématique et/ou des études sur modèles physiques. Voir par exemple Crissman, R. *et al.*, (1994).

will be submerged and a thicker ice cover, causing higher head losses, will be formed.

As discussed in section 2.2, water intakes to hydro power stations may be completely clogged by frazil ice deposited on the trash racks. If this happens, substantial losses in power production may be the result and the spillway may need to be operated. Winter operation of gated spillways needs special consideration and adds a risk factor to the safety of the dam. Also, proper design of the intake and the intake channel may be important for the same reason. Ashton has compiled state of the art experience for intake design (1988).

Roen and Tesaker (1988) suggest that the following should be attempted when designing hydro power intakes:

- Locate the intake so that cold surface water cannot be wind-blown towards the trash racks
- Arrange for a high water level at the racks
- Keep a maximum, but physically acceptable distance between bars in the racks
- Heating the bars
- Consider carefully the shape and material of the bars.

The safe passage of large quantities of ice at breakup events is also a factor that needs to be considered for certain rivers, particularly if there are only a few power stations along the actual reach. Majewski (1986) indicates that a special design of the spillway or the gates may be required in such cases and that hydraulic model tests can be very effective in helping to design such structures.

A special warning may be directed to the use of bridges across the spillway as support for signal and electricity supply cables to the gates. If, for some reason, elevated water levels occur when operating the spillway, drifting ice may damage such installations.

Operational aspects must also be properly considered when designing waterways. For example, low and steady winter flow would in many cases be ideal in order to avoid ice problems. However, the need for power during the winter often calls for high winter flows. A particular problem in this respect may be the highly variable flows associated with extreme peak power operation. Flow reduction at the early freeze-up and other technical measures such as ice booms may to some extent, alleviate such problems when they occur, but should preferably be considered at the design stage (Billfalk, 1984). In other words, the flow may need to be carefully controlled during freeze up in order to establish an ice cover.

Finally, it must be stressed that the design of major hydraulic structures in cold climate often require elaborate studies, including field measurements and observations, mathematical modelling and/or physical model studies. See for example Crissman, R. *et. al.* (1994).

2.5. REFERENCES

- ASHTON, G.D., 1986. "River and Lake Ice Engineering". *Water Resources Publications*, Highlands Ranch, Colorado, USA.
- ASHTON, G.D., 1988. "Intake design for ice conditions". Ch. 2. *Developments in Hydraulic Engineering -5*. Elsevier Applied Science Publishers Ltd.
- BELTAOS, S., 1983. "River ice jams: Theory, case studies and applications". *JHE*, ASCE, 109 (10).
- BENGTSSON, L., 1987. "River ice forecasting". *Proc. Nordic expert meeting on river ice*. Espoo, Finland.
- BILLFALK, L., 1979. "Ice against gates and dams" (in Swedish). *Report BKL-LB/KJ-3558*. Vattenfall, Älvkarleby Laboratory.
- BILLFALK, L., 1984. "Strategic hydro power operation at freeze-up reduces ice jamming". *Proc. IAHR, Ice Symposium*, Hamburg, Germany.
- BILLFALK, L., 1992. "Ice effects and control for hydro power production". *Proc. IAHR, Ice Symposium*, Banff, Alberta, Canada.
- CRISSMAN, R. *et.al.*, 1994. "Studies of ice jamming in Upper Niagara River: Introduction and background". *Proc. IAHR Ice Symposium*, Trondheim, Norway.
- KIVISILD, H.R., 1959. "Hanging ice dams". *Proc. IAHR VIII Congress*, Seminar no 1, Ice problems in hydraulic structures.
- MAJEWSKI, W., 1984. "Backwater profiles on hydroelectric reservoir with ice cover". *Proc. IAHR, Ice Symposium*, Hamburg, Germany.
- MAJEWSKI, W., 1986. "Ice problems at hydro power installations and hydraulic structures". *Proc. IAHR, Symposium on ice*, Iowa City, USA.
- MICHEL, B., 1990. "Impact of dams on the ice regime of rivers". *Proc. IAHR, Ice Symposium*, Espoo, Finland.
- PARISSET, E. and HAUSSEER, R., 1959. "Formation of ice on rivers". *Proc. IAHR, VIII Congress*, Seminar no 1, Ice problems in hydraulic structures.

3. ACTIONS DES GLACES SUR LES OUVRAGES ET RECOMMANDATIONS POUR LEUR CONCEPTION

3.1. MÉCANIQUE DES GLACES

3.1.1. Propriétés mécaniques de la glace

La glace formée sur les lacs et les rivières est constituée d'une multitude de cristaux individuels et l'on dit qu'elle est «polycristalline». Selon les conditions météorologiques et hydrodynamiques qui prévalent au moment de sa formation, la glace polycristalline peut présenter une variété de textures qui va de granulaire, à colonnaire et à tabulaire.

En plus de leur texture différente, les couvertures de glace, dans la nature, présentent aussi un large éventail de :

- gradients de température à travers leur épaisseur ;
- imperfections, telles que fissures et bulles d'air ;
- concentrations de particules occluses.

Il importe maintenant de faire état d'une propriété intrinsèque de la glace. Lorsque la vitesse de déformation est faible, la glace peut, grâce au phénomène de recristallisation, fluer indéfiniment sans se rompre. Par exemple, un glacier «coule» lentement sous son propre poids. Par contre, si la glace se déforme trop rapidement, elle devient aussi cassante que le verre et se fracture en miettes.

La transition du comportement ductile au comportement fragile survient à des taux de déformation voisins de 10^{-3} s^{-1} en compression et 10^{-5} s^{-1} en traction.

Dans le domaine ductile, comme pour tout corps susceptible de fluer, la résistance de la glace croît avec le taux de déformation. Elle peut pratiquement varier de zéro jusqu'à la contrainte ultime de rupture selon la vitesse de déformation. Il est donc manifeste qu'aucune valeur ne peut être suggérée comme représentative du comportement ductile de la glace. Les problèmes où intervient le fluage de la glace, comme l'expansion thermique et la capacité portante sous une charge statique, devront donc être traités en tenant compte des vitesses de déformation induites dans la glace.

Dans le domaine fragile, la glace se comporte comme un matériau élastique et sa résistance ultime est indépendante du taux de déformation. L'expérience montre que la glace a un comportement totalement élastique lorsque :

- une contrainte inférieure à 1 000 kPa est appliquée pendant moins de 100 s, ou bien,
- la charge de rupture est appliquée pendant moins de 2 s.

3. ICE FORCES ON STRUCTURES AND DESIGN GUIDELINES

3.1. ICE MECHANICS

3.1.1. Mechanical properties of ice

The ice that forms on lakes and rivers is composed of a multitude of individual crystals and is thus called polycrystalline. Depending on hydrodynamic and weather conditions at the time of formation, the texture of polycrystalline ice ranges from granular to columnar to tabular.

In addition to variability of texture, natural ice covers are subject to large natural variations such as:

- Temperature gradient through the thickness of the cover
- Imperfections such as cracks and air bubbles
- Concentrations of foreign particles

One intrinsic property of ice merits attention at this point. When strain rate is low, ice can creep indefinitely without breaking because of recrystallization. A glacier, for example, “flows” along slowly under its own weight. Ice subjected to too rapid deformation, on the other hand, becomes as breakable as glass and splits into small pieces.

The transition from ductile to brittle behaviour occurs at a strain rate of about 10^{-3} s^{-1} for compression and 10^{-5} s^{-1} for tension.

In the ductile region, the strength of ice (like any body susceptible to creep) increases with strain rate; ice strength can range from zero to yield strength depending on strain rate. In other words, no one value can be suggested as representative of the ductile behaviour of ice. This means strain rate induced in ice must be considered when dealing with problems where ice creep is a factor such as thermal expansion and bearing capacity under static load.

In the brittle region, ice behaviour is elastic and yield strength does not depend on strain rate. Experimental evidence shows ice behaviour is fully elastic under the following conditions:

- Stress $< 1\ 000 \text{ kPa}$ is applied for less than 100 s
- Failure load is applied for less than 2 s

Des observations récentes confirment que la glace, sous une charge mobile se déplaçant même à une vitesse aussi faible que 1 km/h ou lors d'impact sur un ouvrage, peut, à juste titre, être considérée comme un matériau élastique.

Pour résoudre les problèmes de capacité portante sous des charges mobiles ou d'impact de glaçons sur des ouvrages, les ingénieurs ont besoin de données représentatives de :

- l'épaisseur de la couverture de glace ;
- la résistance ultime de la glace ;
- la déformation des plaques de glace soumises à des charges.

Nous examinerons brièvement ces trois paramètres fondamentaux qui interviennent dans la pratique courante du génie civil en régions froides. La variabilité naturelle des propriétés de la glace impose une approche essentiellement empirique et seules des moyennes prises sur de nombreux échantillons ont un sens.

3.1.2. Résistance de la glace d'eau douce

Les données expérimentales indiquent que le mode de rupture d'une couverture de glace dépend de la direction d'application de la charge. Une force verticale génère une rupture par flexion. Une poussée horizontale provoque généralement un écrasement ou parfois un flambage lorsque la couverture de glace est relativement mince. Sous des forces obliques, la rupture se produit par l'effet combiné des mécanismes précédents.

La texture variable des plaques naturelles de glace, le gradient thermique, les imperfections, les impuretés, mais surtout l'état biaxial des contraintes, ne permettent pas d'utiliser directement les résultats obtenus en laboratoire sur de petits échantillons de glace uniforme chargés uniaxialement. De plus, à cause de l'inertie thermique de la glace et de l'effet isolant de la couche de neige, les variations de température se répercutent, avec un certain décalage, dans la couverture de glace. La température à l'intérieur de la glace reflète en quelque sorte une moyenne des températures des jours précédents. Comme les propriétés mécaniques de la glace sont fortement influencées par la température, en particulier au voisinage de son point de fusion, on doit tenir compte des températures probables au cours de la période où la glace appliquera des charges.

Pour tenir compte de l'ensemble des facteurs mentionnés précédemment, les résistances à l'écrasement et à la flexion de la glace devraient normalement être l'objet d'essais «*in situ*». Ce n'est que dans l'impossibilité d'obtenir des données expérimentales qu'on utilisera les valeurs moyennes recommandées dans le code soviétique (1983) et reproduites au Tableau 1.

Tableau 1. Résistance ultime de la glace (kPa)

Résistance ultime de la glace	Température moyenne des 6 jours précédant le chargement de la couverture de glace				
	0°C	-5°C	-10°C	-15°C	-30°C
Écrasement (σ)	450	900	1 100	1 200	1 500
Flexion (σ')	335	680	835	900	1 125

Recent observations confirm that under a moving load at speeds as low as 1 km/h or upon collision with a structure, ice can rightly be considered elastic.

To determine ice bearing capacity under moving load or the force exerted by an ice floe colliding with a structure, the engineer requires representative data on the following:

- Ice thickness
- Yield strength of ice
- Ice plate deformation under load

These three parameters are basic to current civil engineering practice in cold regions. They are briefly reviewed in the following pages. The natural variability of ice properties dictates an essentially empirical approach; only averages of many samples of an ice property are statistically useful.

3.1.2. Strength of freshwater ice

Experimental data indicate that the mode of failure of an ice cover depends on the direction of application of the load. A vertical load generates a bending mode of failure. A horizontal thrust generally provokes a crushing mode of failure, and sometimes buckling when the ice cover is relatively thin. Oblique loads will cause failure by a combination of these modes.

Given the variable texture, thermal gradients, imperfections, impurities and, above all, the biaxial state of stress of natural ice plates, laboratory results obtained from small samples of uniaxially loaded uniform ice cannot be used directly. In addition, because of the thermal inertia of the ice and the insulating effect of snow covers, temperature changes are reflected in the ice cover, with a time lag. In other words, internal ice-cover temperature partly reflects the mean temperatures of the preceding days. Since the mechanical properties of ice are highly affected by temperatures, particularly near its melting point, probable temperatures during the period of ice loading must be considered.

To account for all the factors mentioned above, crushing and bending strength of ice should normally be tested in situ. Only when experimental data cannot be obtained should the mean values recommended in the U.S.S.R. Design Standards (1983) and given in Table 1 below be used.

Table 1. Yield strength of ice (kPa)

Yield strength of ice	Mean temperature of the six days preceding ice cover loading				
	0°C	-5°C	-10°C	-15°C	-30°C
Crushing (σ)	450	900	1 100	1 200	1 500
Bending (σ')	335	680	835	900	1 125

3.1.3. Rigidité des plaques de glace

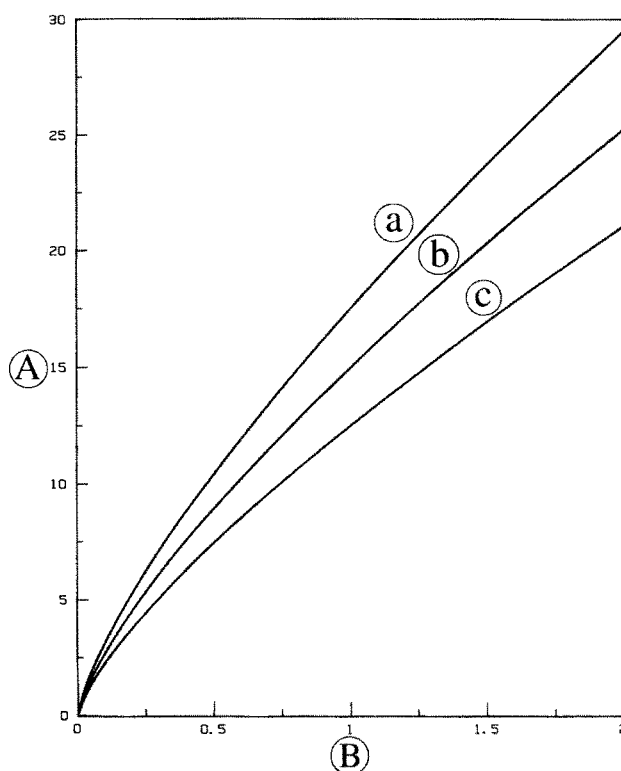
Sous une charge verticale, la couverture de glace s'incurve très légèrement à la façon d'une plaque sur une fondation élastique. La grandeur de cette zone déprimée est définie par une certaine longueur caractéristique, parfois appelée rayon d'action, qui reflète la rigidité de la plaque de glace à la flexion.

Toutes les propriétés qui régissent la réponse d'une plaque élastique à la flexion sont regroupées dans cette longueur caractéristique définie par :

$$l = \left[\frac{E h^3}{12 \rho g (1 - \mu^2)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.1)$$

- où l : longueur caractéristique (m) ;
 E : module de Young (min. : 2,7 GPa, moy. : 5,4 GPa, max. : 9,9 GPa) ;
 h : épaisseur de la glace (m) ;
 ρ : densité de l'eau (kg/m^3) ;
 μ : coefficient de Poisson (0,32) ;
 g : gravité (m/s^2).

Cette équation montre que la longueur caractéristique est sensible surtout aux variations d'épaisseur de la plaque. La Fig. 2 présente les valeurs limites de la longueur caractéristique des plaques de glace d'eau douce en fonction de leur épaisseur.



3.1.3. Ice plate rigidity

Under a vertical load, the ice cover deflects like a plate on an elastic foundation. The size of the depressed area is determined by a characteristic length that reflects the rigidity of the ice plate under bending force.

This characteristic length incorporates all properties governing response of an elastic plate to bending and is expressed as follows:

$$l = \left[\frac{E h^3}{12 \rho g (1 - \mu^2)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.1)$$

where l : Characteristic length (m)
 E : Young's modulus (min.: 2.7 GPa, mean.: 5.4 GPa, max: 9.9 GPa)
 h : Ice thickness (m)
 ρ : Density of water (kg/m^3)
 μ : Poisson's ratio (0.32)
 g : Gravity constant (m/s^2)

This equation shows that the characteristic length is particularly sensitive to variations in plate thickness. Fig. 2 shows limit values for characteristic lengths of freshwater ice plates as a function of thickness.

Fig.2

Characteristic length of an ice plate as a function of ice thickness

Longueur caractéristique ou rayon d'action d'une plaque de glace en fonction de son épaisseur.

- | | |
|------------------------------|-------------------------------------------|
| Ⓐ Characteristic length (m) | Ⓐ Longueur caractéristique (m) |
| Ⓑ Thickness of ice cover (m) | Ⓑ Épaisseur de la couverture de glace (m) |
| ⓐ Maximum value | ⓐ Valeur maximale |
| ⓑ Mean value | ⓑ Valeur moyenne |
| ⓒ Minimum value | ⓒ Valeur minimale |

3.2. FORCES DUES A L'EXPANSION THERMIQUE DES COUVERTURES DE GLACE

3.2.1. Description du phénomène

La glace, comme tous les autres solides, se dilate ou se contracte avec les variations de température. Pour donner un ordre de grandeur, disons qu'un «échantillon» de glace d'une longueur de 1 kilomètre tendrait à s'allonger d'environ 1 mètre pour un réchauffement de 20°C.

Des poussées d'origine thermique s'exercent sur tout ouvrage qui empêche la dilatation résultant normalement du réchauffement d'une couverture de glace. Pour annuler l'expansion thermique, les ouvrages doivent induire dans la glace un taux de déformation égal au taux d'expansion thermique ; *i.e.*, par définition :

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta L}{L \Delta t} = \frac{e L \Delta \theta}{L \Delta t} = \frac{e \Delta \theta}{\Delta t} \quad (3.2)$$

où $\dot{\epsilon}$: taux de déformation de glace (s⁻¹) ;
L : longueur de la couverture de glace (m) ;
t : temps (s) ;
 θ : température (°C) ;
e : coefficient d'expansion thermique de la glace (°C⁻¹) ;
 ΔL : variation de la longueur de la couverture de glace (m)
 Δt : intervalle de temps (s)
 $\Delta \theta$: variation de température (°C)

Selon Drouin (1970), qui a analysé la littérature spécialisée, le coefficient de dilatation thermique de la glace varie en fonction de la température, suivant la relation empirique suivante :

$$e = (54 + 0,18\theta) \times 10^{-6} \quad (3.3)$$

Comme les variations de température sont généralement de l'ordre de 1°C par heure, le taux d'expansion thermique (Eq. : 3.3) est donc inférieur à 10⁻⁷ s⁻¹ ; *i.e.*, bien à l'intérieur du domaine ductile de la glace.

La relation entre la contrainte appliquée (σ^*) et le taux de déformation de la glace ($\dot{\epsilon}$) s'exprime par l'équation de Glen (1958) :

$$\sigma^* = \left[\frac{\dot{\epsilon}}{A} \right]^{\frac{1}{n}} \exp \left[\frac{Q}{n R \theta^*} \right] \quad (3.4)$$

où σ^* : contrainte thermique (kPa)
Q : énergie d'activation (J/mole-°K) ;
R : constante universelle des gaz (8,28 J/mole) ;
 θ^* : température exprimée en °K ;
A et n : constantes dépendant du type de glace.

3.2. FORCES INDUCED BY THERMAL EXPANSION OF ICE COVERS

3.2.1. Description of phenomenon

Like any other solid, ice expands and contracts with fluctuations in temperature. To get an order of magnitude, consider a freshwater ice "sample" 1 km long. It will tend to expand about 1 m with a 20°C increase in temperature.

Any structure preventing the expansion that normally accompanies warming of an ice cover will be subject to thrust due to thermal expansion of the ice. To counter thermal expansion, a structure must be able to induce a strain rate in the ice equal to the rate of thermal expansion. By definition then :

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta L}{L \Delta t} = \frac{e L \Delta \theta}{L \Delta t} = \frac{e \Delta \theta}{\Delta t} \quad (3.2)$$

where $\dot{\epsilon}$: Ice strain rate (s⁻¹)
 L : Length of ice cover (m)
 t : Time (s)
 θ : Temperature (°C)
 e : Ice coefficient of linear thermal expansion (°C⁻¹)
 ΔL : Variation of ice cover length (m)
 Δt : Time interval (s)
 $\Delta \theta$: Variation of temperature (°C)

According to Drouin (1970), who reviewed literature on the subject, the coefficient of linear thermal expansion varies as a function of temperature according to the following empirical formula:

$$e = (54 + 0.18\theta) \times 10^{-6} \quad (3.3)$$

Since rate of temperature change is generally on the order of one degree per hour, rate of thermal expansion (Equation 3.3) is less than 10⁻⁷ s⁻¹, that is, well within the ductile range of ice.

The relation between applied stress (σ^*) and ice strain rate ($\dot{\epsilon}$) is expressed by Glen's (1958) classic equation:

$$\sigma^* = \left[\frac{\dot{\epsilon}}{A} \right]^{\frac{1}{n}} \exp \left[\frac{Q}{n R \theta^*} \right] \quad (3.4)$$

where σ^* : Thermal stress (kPa)
 Q : Activation energy (J/mole-°K)
 R : Universal gas constant (8.28 J/mole)
 θ^* : Temperature (°K)
 A and n : Constants depending on ice type

Les études de Drouin (1970) ont mis en évidence que c'est la glace granulaire qui offre la plus grande résistance au fluage. Selon les résultats de plusieurs chercheurs rassemblés par Michel (1978), les constantes dans l'équation de Glen prennent alors les valeurs suivantes :

$$A = 1,22 \times 10^{-15}$$

$$n = 3,713$$

et $Q = 72\,980 \text{ J/mole} - ^\circ\text{K}$

La propagation d'une variation de température à l'intérieur d'un solide est régie par l'équation de Fourier relative aux transferts thermiques, tel que présenté par Carter (1990). La validité de cette équation théorique est confirmée par plusieurs mesures effectuées sur des couvertures de glace de différentes épaisseurs. Ces équations permettent de mettre en évidence, comme l'a déjà remarqué Drouin (1970), que c'est un réchauffement sinusoïdal de la température qui provoque dans les couvertures de glace les taux de déformation les plus élevés, d'où les poussées d'origine thermique les plus importantes.

3.2.2. Poussées d'origine thermique sur des ouvrages longs et rigides

L'analyse des poussées maximales d'origine thermique sera faite avec les hypothèses très prudentes suivantes :

- la couverture de glace n'est pas fissurée ;
- la couverture de glace est parfaitement confinée ;
- les ouvrages et les rives sont parfaitement rigides.

Ces hypothèses correspondent à une situation idéale où toute dilatation thermique serait entièrement contenue.

En tenant compte de l'épaisseur de la glace, de la température initiale à la surface et de la durée de la hausse de température, on a utilisé les équations présentées par Carter (1990) pour calculer les paramètres suivants dans le cas d'une hausse sinusoïdale de la température :

- température interne en fonction de la profondeur et du temps écoulé ;
- taux de déformation en fonction de la profondeur et du temps écoulé ;
- contrainte thermique en fonction de la profondeur et du temps écoulé ;
- poussée totale en fonction du temps écoulé.

Les résultats confirment ce qu'avaient observé plusieurs chercheurs, dont Drouin (1970), à savoir que plus la glace est épaisse, plus bas est le taux critique de hausse de température susceptible de produire une poussée maximale. En d'autres termes, les changements de température rapides ne jouent que sur une mince couche de la couverture de glace, alors qu'une hausse lente de la température pénètre beaucoup plus en profondeur.

L'analyse permet de dégager la relation empirique suivante entre la durée critique de réchauffement et l'épaisseur de la couverture de glace :

The work of Drouin (1970) demonstrated that granular ice offers the most resistance to creep. On the basis of results obtained by a number of researchers and compiled by Michel (1978), values for the constants in Glen's equation are as follows:

$$\begin{aligned} A &: 1.22 \times 10^{-15} \\ n &: 3.713 \\ Q &: 72\,980 \text{ J/mole} - ^\circ\text{K} \end{aligned}$$

Propagation of temperature change within a solid is governed by Fourier's thermal transfer equation as presented by Carter (1990). The validity of this theoretical equation has been confirmed by measurements of ice covers of different thickness. As Drouin (1970) noted, the equation shows that sinusoidal temperature rises provoke the highest strain rates in ice covers, and hence the greatest thermal thrust.

3.2.2. Ice forces on long, rigid structures

The following highly conservative assumptions are used for the analysis of maximum thermal stress:

- The ice cover is not cracked.
- The ice cover is completely confined.
- Structures and shoreline are completely rigid.

These assumptions are ideal conditions under which thermal expansion is entirely constrained.

Given the ice thickness, initial surface temperature and duration of temperature rise, the equations presented by Carter (1990) were used to calculate the following parameters for a sinusoidal temperature rise:

- Internal temperatures versus depth and time elapsed
- Strain rate versus depth and time elapsed
- Thermal stress versus depth and time elapsed
- Total thrust versus time elapsed

The results confirm the observation of a number of researchers, among them Drouin (1970), that the thicker the ice the lower the critical rate of temperature rise that yields maximum thrust. In other words, a rapid change in temperature affects only a thin surface layer of the ice cover, whereas a slow increase penetrates to much greater depths.

Analysis shows the following empirical relation between critical duration of temperature rise and thickness of the ice cover:

$$T_{\text{crit}} = 42 h^2 \quad (3.5)$$

où T_{crit} : durée critique de réchauffement (heures) ;
 h : épaisseur de la couverture de glace (m).

Les poussées thermiques par unité de longueur pour la durée critique de réchauffement sont présentées au Tableau 2.

Tableau 2. Poussées maximales d'origine thermique pour une variation de température entre la valeur initiale à la surface de la glace et la valeur 0°C (kN/m)

Épaisseur de glace (m)	Température initiale à la surface de la glace (°C)					
	-5°C	-10°C	-15°C	-20°C	-25°C	-30°C
0,25	100,0	126,8	149,6	172,1	194,9	220,3
0,50	139,9	178,1	210,2	240,6	271,1	305,9
0,75	169,0	215,0	253,4	289,9	328,1	368,6
1,00	193,1	245,5	289,4	331,4	375,2	420,9
1,25	214,1	272,1	320,9	367,3	415,8	466,7
1,50	232,9	296,0	349,0	399,6	452,4	507,7
1,75	250,1	317,8	374,7	429,1	485,8	545,1
2,00	265,9	338,1	398,6	456,4	516,6	579,8

Ces poussées par unité de longueur peuvent, sans aucune perte de précision, être estimées à partir de l'équation :

$$p = 160 [1 - 0,053 \theta] h^{1/2} \quad (3.6)$$

où p : poussée thermique maximale par unité de longueur (kN/m) ;
 θ : température initiale en surface de la glace (°C).

Les mesures expérimentales de Xu Bomeng (1986) mettent en évidence que les poussées d'origine thermique sont surtout importantes au début et à la fin de l'hiver. Les conditions météorologiques les plus néfastes, susceptibles de se produire en ces périodes de l'année, relèvent de l'analyse statistique des paramètres locaux recueillis aux stations de mesures.

A titre indicatif, il semble plausible, quoique peu probable, qu'en début d'hiver une couverture de glace d'environ 0,3 m d'épaisseur soit totalement exempte de neige et que, sous l'effet combiné du réchauffement de l'air, du vent et du rayonnement solaire, la température en surface passe de -30 à 0°C sur une période critique de 3,78 heures. D'après la formule précédente, la poussée maximale d'origine thermique pourrait alors atteindre 227 kN/m (23,2 tonnes/m).

Au début du printemps, les couvertures de glace sont plus épaisses mais recouvertes d'une couche isolante de neige. Les variations journalières des températures sont amorties par la couche de neige et seul se propage dans la couverture de glace le réchauffement graduel de l'air réparti sur quelques jours. Croasdale (1980) note que, même dans l'Arctique, il est peu probable, à cause de

$$T_{\text{crit}} = 42 h^2 \quad (3.5)$$

where T_{crit} : Critical duration of temperature rise (hours)
 h : Ice cover thickness (m)

Table 2 shows thermal thrust per unit length for critical duration of temperature rise.

Table 2. Maximum thermal thrust from initial ice surface temperature to 0°C (kN/m)

Ice Cover Thickness (m)	Initial ice surface temperature (°C)					
	-5°C	-10°C	-15°C	-20°C	-25°C	-30°C
0.25	100.0	126.8	149.6	172.1	194.9	220.3
0.50	139.9	178.1	210.2	240.6	271.1	305.9
0.75	169.0	215.0	253.4	289.9	328.1	368.6
1.00	193.1	245.5	289.4	331.4	375.2	420.9
1.25	214.1	272.1	320.9	367.3	415.8	466.7
1.50	232.9	296.0	349.0	399.6	452.4	507.7
1.75	250.1	317.8	374.7	429.1	485.8	545.1
2.00	265.9	338.1	398.6	456.4	516.6	579.8

The maximal thermal thrusts per unit length can be approximated as follows without any loss of precision:

$$p = 160 [1 - 0.053 \theta] h^{1/2} \quad (3.6)$$

where p : Maximal thermal thrust per unit length (kN/m)
 θ : Initial temperature at the surface (°C)

Experimental measurements by Xu Bomeng (1986) show thermal pressures are greatest at the beginning and the end of winter. Worst case weather conditions for these periods of the year are established from statistical analysis of meteorological data collected at local measuring stations.

For example, it seems plausible, though not very probable, that an ice cover about 0.3 m thick might be completely free of snow in early winter and that under the combined effects of a rise in air temperature, wind and solar radiation, surface temperature might rise from -30°C to 0°C during a critical period of 3.78 hours. According to the formula above, thermal ice pressure would reach a maximum 227 kN/m (23.2 t/m).

In early spring, the ice cover is thicker, but it is usually covered with an insulating layer of snow. Daily fluctuations in temperature are damped in the snow layer, and only a gradual rise in air temperature over several days will propagate into the ice cover. Croasdale (1980) noted that even in the arctic ice-surface temperatures below -10°C are unlikely because of the insulating effect of the snow

l'effet isolant de la couche de neige, que la température à la surface de la glace soit inférieure à -10°C . Il semble donc raisonnable de considérer que la température à l'interface neige-glace puisse augmenter, au printemps, de -10 à 0°C sur une période critique de quelques jours. Les équations précédentes deviennent alors :

$$p = 245 h^{1/2} \quad (3.7)$$

Comme, dans les régions froides, l'épaisseur maximale dépasse habituellement 1 mètre, les poussées d'origine thermique sont donc susceptibles d'être légèrement plus élevées à la fin qu'au début de l'hiver. Xu Bomeng (1986) indique que, dans le nord de la Chine, les poussées thermiques sont effectivement plus importantes à l'arrivée du printemps.

Le Tableau 3 compare les valeurs habituellement utilisées par les ingénieurs de projet dans différents pays avec la relation obtenue par l'approche analytique du phénomène décrite ici.

Tableau 3. Poussées dues à l'expansion thermique de la glace.

Canada et USA	Selon Acres (1970) Selon Drouin (1970) Selon Michel (1970) Selon Carter (1990) sur une structure longue et rigide	250 h (kN/m) 150 à 300 h (kN/m) 150 à 220 h (kN/m) $250 \sqrt{h}$ (kN/m)
URSS	Selon Starosolsky (1970) Sibérie région de Léninegrad Caucase	300 h (kN/m) 200 h (kN/m) 150 h (kN/m)
Norvège	Selon Starosolsky (1970)	90 h (kN/m)
Suède	Selon Starosolsky (1970)	200 h (kN/m)
Japon	Selon Yamoaka et al. (1988)	250 h (kN/m)
Chine	Selon Xu Bomeng (1988)	300 h (kN/m)

où h est l'épaisseur maximale de la couverture de glace (en m)

3.2.3. Poussées d'origine thermique sur des ouvrages semi-rigides

Si l'on admet que la présence de fissures dans la glace, l'élasticité des ouvrages et la souplesse des berges permettent une certaine expansion thermique, il faut bien réaliser que la partie inférieure de la couverture de glace s'opposera à cette dilatation. Ceci est dû au fait que la partie inférieure de la couverture de glace subit une faible variation de température.

Comme la couverture de glace ne s'incurve pas à la manière d'un bilame, force est de conclure qu'une section verticale demeurera verticale ; *i.e.*, que le taux de déformation doit être uniforme sur toute l'épaisseur de la glace.

cover. It seems reasonable then to consider that temperature at the snow-ice interface can increase in spring from -10°C to 0°C over a critical period of several days. The preceding equations then become :

$$p = 245 h^{1/2} \quad (3.7)$$

Since maximum thickness is generally greater than 1 m in cold regions, thermal pressures are likely to be slightly higher at the end than at the beginning of the winter. Xu Bomeng (1986) mentions that thermal thrusts are indeed greater in early spring in northern China.

Table 3 compares values usually used by design engineers in different countries and the relation obtained using the analytical approach described here.

Table 3. Thermal thrust exerted by expanding ice

Canada and USA	According to Acres (1970) According to Drouin (1970) According to Michel (1970) According to Carter (1990) on a long, rigid structure	250 h (kN/m) 150 to 300 h (kN/m) 150 to 220 h (kN/m) $250 \sqrt{h}$ (kN/m)
URSS	According to Starosolsky (1970) Siberia region Leningrad region Caucasus region	300 h (kN/m) 200 h (kN/m) 150 h (kN/m)
Norway	According to Starosolsky (1970)	90 h (kN/m)
Sweden	According to Starosolsky (1970)	200 h (kN/m)
Japan	According to Yamoaka et al. (1988)	250 h (kN/m)
China	According to Xu Bomeng (1988)	300 h (kN/m)

where h : maximum thickness of the ice cover (m)

3.2.3. Ice forces on semi-rigid structures

If one accepts cracks in the ice, structure elasticity, or shoreline flexibility allows some thermal expansion, it must be understood that the lower part of the ice cover will oppose the expansion. This is because the lower part of the ice cover has a smaller temperature variation.

Since an ice cover does not bend like a two material layer, then it follows that a vertical section will remain vertical. In other words, strain rate should remain uniform throughout the thickness of the ice.

En réalité, pour une couverture de glace non confinée, le taux de déformation est réduit dans la partie supérieure et augmente dans la partie inférieure. L'équilibre des forces sur une section verticale montre que le taux de déformation résultant est au plus 40 % du taux de dilatation maximal qui se produirait si chaque lamelle horizontale pouvait agir indépendamment.

La pratique actuelle est de considérer que la poussée d'origine thermique sur un ouvrage semi-rigide, qui peut supporter momentanément une certaine déformation sans dommage permanent, est égale à :

$$p = 245 c h^{1/2} \quad (3.8)$$

Dans cette équation, c est un coefficient supposé égal à 0,5, quand la couverture de glace n'est pas parfaitement confinée de sorte que les forces retardatrices dans la partie inférieure s'opposent à la dilatation de la partie supérieure.

3.2.4. Poussées d'origine thermique sur des ouvrages étroits

La poussée d'origine thermique sur un ouvrage étroit peut s'assimiler au problème de la pénétration lente d'un appareil d'indentation dans le bord d'une plaque semi-infinie de glace. Ce problème fut étudié par Croasdale, Morgenstern et Nuttall (1977) à l'aide de la théorie plastique des matériaux. Pour tenir compte de la formation de zones plastiques au voisinage d'un ouvrage étroit, la poussée due à l'expansion thermique doit alors être multipliée par un coefficient d'indentation, τ :

$$p = 245 c \tau h^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

$$\tau = 1 + \frac{h}{3B} \quad (3.10)$$

où p : poussée thermique par unité de longueur (kN/m) ;
 c : coefficient égal à 0,5 ;
 τ : coefficient d'indentation $\leq 2,57$;
 B : largeur de l'ouvrage (m) ;
 h : épaisseur de la couverture de glace (m).

Quand B est beaucoup plus petit que h ($B \leq 0,2 h$), le problème se réduit au cas classique étudié par Prandtl (1920) dont la solution exacte est : $\tau = 2,57$. Lorsque B est beaucoup plus grand que h , *i.e.* dans le cas d'un ouvrage long, le facteur d'indentation tend vers l'unité : $\tau = 1,0$.

L'importance de la poussée thermique peut être jugée par le fait qu'une valeur de 245 kN/mètre linéaire a le même impact sur la stabilité contre le renversement d'un barrage en béton de 12,5 m de hauteur que la pression de l'eau du réservoir. Il faut prévoir 30 % de béton supplémentaire afin de garantir la stabilité contre les glaces.

In fact for an unconstrained ice cover, the strain rate is reduced in the upper part of the ice cover and increases in the lower part. The equilibrium of forces on a vertical section shows the resultant strain rate is at most 40% of maximum expansion rate assuming horizontal plates act independently.

Current practice is to consider thermal thrust on a partly rigid structure that can momentarily withstand some deformation without permanent damage to be equal to :

$$p = 245 c h^{1/2} \quad (3.8)$$

In this equation, c is a coefficient assumed equal to 0.5, when the ice cover is not perfectly constrained so that retarding forces in the deeper part of the cover offset the expansion in the upper part.

3.2.4. Ice forces on narrow structures

Ice force on a narrow structure can be compared to slow penetration of an indenter into the edge of a semi-infinite ice plate. This phenomenon was studied by Croasdale, Morgenstern and Nutall (1977) using the classical theory of plasticity. To account for formation of plastic zones near a narrow structure, thrust induced by thermal expansion must be multiplied by an indentation factor τ . The formulations for this case are:

$$p = 245 c \tau h^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

$$\tau = 1 + \frac{h}{3B} \quad (3.10)$$

where p : Thermal thrust per unit length (kN/m)
 c : Coefficient equal to 0.5
 τ : Indentation factor ≤ 2.57
 B : Structure width (m)
 h : Ice thickness (m)

When B is much smaller than h ($B \leq 0.2 h$), one gets the classic case studied by Prandtl (1920), for which the exact solution is $\tau = 2.57$. When B is much greater than h , that is, the structure is long, the indentation factor tends to unity ($\tau = 1.0$).

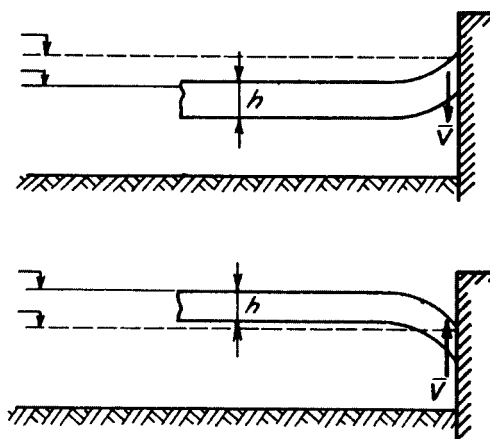
As an example of the importance of thermal load, thermal thrust of 245 kN/linear metre has about the same impact on stability against overturning of a 12.5 m high concrete dam due to water pressure. About 30% more concrete volume may be required to ensure stability.

3.3. FORCES DUES AUX VARIATIONS DU PLAN D'EAU

Dans ce chapitre, nous étudierons les forces verticales exercées par les glaces, lors de variations du plan d'eau. Nous porterons notre attention sur la limite supérieure correspondant aux conditions de rupture de la glace.

3.3.1. Forces verticales sur les ouvrages

Lors des variations du plan d'eau, la glace adhérant aux ouvrages peut engendrer des forces verticales, selon le mécanisme illustré à la Fig. 3. Cet exemple concerne une pile verticale. Cette formulation a été d'abord développée pour une pile verticale, elle a été transformée par la suite pour un ouvrage vertical d'une longueur unitaire.



Après la formation de fissures radiales autour d'une pile, la rupture correspond à l'effondrement de secteurs tronqués comme il est montré schématiquement sur la Fig. 4. Carter (1985) a démontré que la solution théorique de Nevel (1972) pouvait être représentée, sans perte de précision, par la formule empirique suivante :

$$\bar{V} = 0,38 \left[\tan \frac{\alpha}{2} + \frac{P}{l} \right] \sigma' h^2 \quad (3.11)$$

- où \bar{V} : force verticale exercée par la glace (kN) ;
 P : longueur de la surface de contact entre la glace et la pile (m) ;
 σ' : contrainte ultime en flexion (Tableau 1) (kPa) ;
 h : épaisseur de la glace (m) ;
 l : longueur caractéristique de la couverture de glace (m) ;
 α : angle au sommet du secteur de glace (Fig. 4).

3.3. FORCES INDUCED BY FLUCTUATING WATER LEVEL

This section discusses vertical forces exerted by ice when the water level fluctuates. The discussion focuses on extreme forces causing ice failure conditions.

3.3.1. Vertical forces on structures

Changes in water level can cause ice to exert vertical forces on structures to which it is frozen as shown in Fig. 3. The formulation is first developed for a vertical pier and then it is transformed for a wall of unit length.

Fig. 3

Force exerted on a hydraulic structure by ice due to change in water level

Schéma montrant l'action de la glace sur un ouvrage hydraulique lors de variations du plan d'eau.

For radial cracks around a pier, the truncated wedge-shaped pieces collapse as shown in Fig. 4. Carter (1985) has demonstrated that Nevel's theoretical solution (1972) can be represented by the following empirical equation without loss of precision:

$$\bar{V} = 0.38 \left[\tan \frac{\alpha}{2} + \frac{P}{l} \right] \sigma' h^2 \quad (3.11)$$

where \bar{V} : Vertical force exerted by ice (kN)
P : Length of the contact surface of the pier and the ice (m)
 σ' : Yield bending stress (Table 1) (kPa)
h : Ice thickness (m)
l : Characteristic length of the ice cover (m)
 α : Point angle of wedge (Fig. 4)

Dans le cas où la glace exerce son action sur une pile circulaire isolée, on doit considérer qu'en premier lieu la glace se brise généralement en 6 sections d'environ 60° ou bien en 8 sections de 45°. L'équation précédente devient :

$$\bar{V} = [1,3 + 0,38 \frac{P}{l}] \sigma' h^2 \quad (3.12)$$

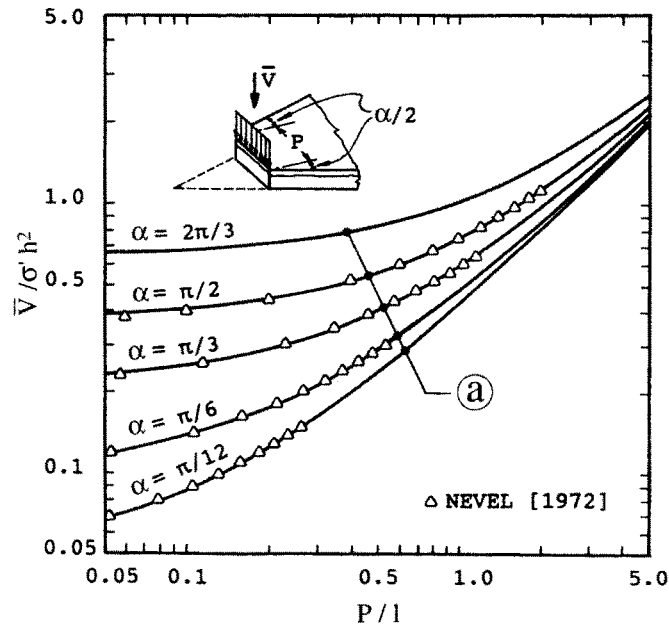
Dans le cas où la glace agit sur un long mur ($\alpha = 0,0$), l'équation générale devient :

$$\bar{V} = [0,38 \frac{P}{l}] \sigma' h^2 \quad (3.13)$$

ou bien, par unité de longueur du mur :

$$\bar{V} = [0,38 \frac{\sigma' h^2}{l}] \quad (3.14)$$

Cette dernière équation concorde très exactement avec les résultats théoriques de Billfalk (1981) et Christensen (1987).



3.3.2. Forces horizontales sur les ouvrages

Les variations du plan d'eau dans un réservoir provoquent généralement dans la couverture de glace la formation de fissures actives sensiblement parallèles au

In the case of ice forces exerted on an isolated circular pier, it is assumed that the ice first generally breaks into six roughly 60° wedges or eight 45° wedges. The preceding equation then becomes :

$$\bar{V} = [1.3 + 0.38 \frac{P}{l}] \sigma' h^2 \quad (3.12)$$

When ice forces act on a long wall ($\alpha = 0.0$), the general equation becomes :

$$\bar{V} = [0.38 \frac{P}{l}] \sigma' h^2 \quad (3.13)$$

or, per unit length of the wall :

$$\bar{V} = [0.38 \frac{\sigma' h^2}{l}] \quad (3.14)$$

This latter equation agrees closely with the theoretical results of Billfalk (1981) and Christensen (1987).

Fig. 4

Nevel's (1972) theoretical results and empirical equation suggested by Carter (1985)
Résultats théoriques de Nevel (1972) et équation empirique proposée par Carter (1985)

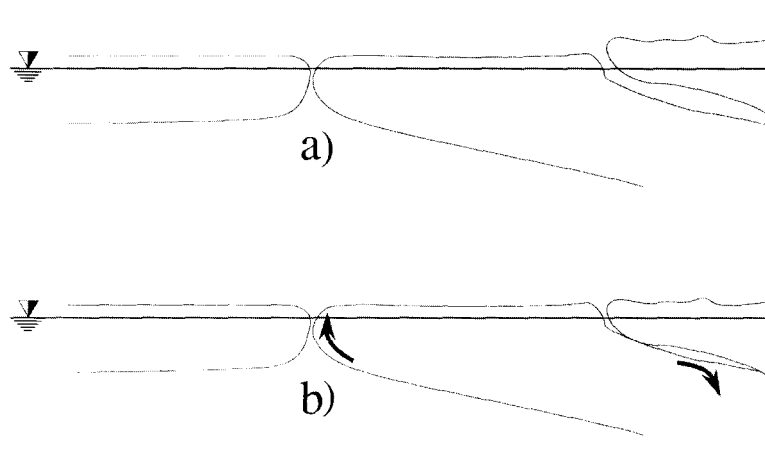
Ⓐ Carter, 1985

Ⓐ Carter, 1985

3.3.2. Horizontal thrust on structures

In general, when water level fluctuates in a reservoir it provokes formation of active cracks in the ice cover approximately parallel to the upstream face of the

parement amont du barrage. Les fissures divisent la couverture de glace en trois parties bien distinctes, comme on peut le voir sur la Fig. 5.



Alors qu'une partie de la glace est bien soudée à la paroi, les deux autres flottent et se déplacent librement lors des variations du niveau d'eau. A niveau bas, les deux parties flottantes ne sont pas en contact avec celle ancrée au barrage comme l'illustre bien la Fig. 5.

La montée du niveau d'eau provoque l'apparition de forces de rotation sur le bloc de glace médian. Ce bloc en se soulevant exerce une poussée horizontale sur le barrage.

L'analyse de ces poussées a permis de mettre en évidence les faits suivants (Verrette *et al.*, 1993) :

- les poussées dues aux variations du niveau d'eau se superposent aux poussées dues à l'expansion thermique ;
- plus la température de l'air est basse, plus les contraintes engendrées par les variations du niveau d'eau sont élevées ;
- pour les conditions de température moyenne, la relation entre l'élévation du niveau d'eau et l'augmentation des contraintes est presque linéaire ;
- les poussées horizontales sont en phase avec la montée du plan d'eau.

A la lumière de ces constatations, il devient évident que les contraintes résultant des variations du niveau d'eau peuvent prendre une importance cruciale dans le calcul de la stabilité des barrages dont le niveau de la retenue subit de rapides variations. Cependant, il n'existe pas de cas bien documentés permettant d'évaluer ces poussées. Un cas expérimental est présenté dans le paragraphe 6.1.1.

dam. The cracks divide the ice cover into three separate parts, as shown in Fig. 5.



Fig. 5

Profile of ice cover in front of dam

Profil de la couverture de glace face au barrage

a) Low water level
b) High water level

a) *Niveau d'eau bas*
b) *Niveau d'eau élevé*

One part of the ice cover is frozen solid to the dam face, but the two other parts float freely in response to change in water level. When the water level is low, the two floating blocks are not in contact with the block frozen to the dam, as shown in Fig. 5.

When water level rises, rotational forces appear on the middle block. In rising, this block exerts a horizontal thrust on the dam.

A documented case of these forces highlighted the following facts (Verrette *et al.*, 1993):

- Forces due to change in water level are superposed on thrust due to thermal expansion.
- The lower the air temperature, the greater the stresses generated by change in water level.
- For average temperature conditions, the relation between rise in water level and increase in stress is almost linear.
- Horizontal thrusts are in phase with the increase in water level.

In light of these findings, it is clear that stresses resulting from change in water level can be crucial in calculating the stability of dams whose reservoirs are subject to rapid fluctuations in water level. However there is a lack of well documented cases for the evaluation of these forces. A case study is presented in section 6.1.1.

3.4. FORCES DYNAMIQUES DUES AUX GLACES

3.4.1. Considérations pratiques

Dans ce chapitre, nous examinerons les forces d'impact causées par la dérive des glaçons. Nous rappellerons d'abord les normes canadiennes et soviétiques et nous présenterons une méthode analytique de calcul. Ensuite, nous comparerons les résultats obtenus à l'aide des formules le plus souvent citées dans la littérature spécialisée.

Il est bien évident que nous nous intéressons surtout à la limite supérieure que peut atteindre la force d'impact exercée par la glace. Cette force dynamique maximale correspond à la force nécessaire pour briser la glace. Le mode de rupture de la glace, soit par flexion, écrasement, cisaillement ou flambage, dépend à la fois de la géométrie de la surface de contact, des propriétés de la glace et du coefficient de frottement à l'interface glace-ouvrage. Tous ces paramètres doivent donc normalement être pris en considération dans le calcul des forces dynamiques.

La pratique courante est d'admettre que le point d'application des forces dynamiques est au tiers supérieur de l'épaisseur de la glace.

En l'absence de données plus précises, on doit prendre, pour le calcul des forces dynamiques, une épaisseur de glace au moins égale à 80 % de celle ayant une période de retour de 100 ans.

Il convient, peut-être, d'indiquer que, par souci d'homogénéité et de simplicité, les symboles et les unités utilisés dans le rappel de certaines formules de calcul peuvent parfois différer de ceux employés dans les textes originaux.

Dans le présent texte, H, V et T désigneront respectivement les composantes horizontale, verticale et transversale des forces d'impact (voir Fig. 6 à 14). Les composantes H et V maximales correspondent à un contact sur la pleine largeur de l'ouvrage. Par contre, la force transversale T maximale survient lorsque, à un instant donné, la glace agit uniquement sur une demi-largeur de la pile. Par conséquent, dans les calculs de stabilité, T ne devrait être couplée qu'à H/2 et V/2. Si la glace agit sur la pleine largeur de la pile, les composantes T s'annulent généralement par symétrie.

3.4.2. Norme canadienne

La norme canadienne CAN3-S6-M88 (1988) recommande de calculer la force horizontale due à l'impact de glaçons sur les ouvrages hydrauliques en considérant la force la plus faible pour briser la glace soit par flexion, soit par écrasement.

$$H_{\text{flexion}} = K_1 \sigma h^2 \quad (3.15)$$

$$H_{\text{écrasement}} = K_2 \sigma B h \quad (3.16)$$

avec

$$K_1 = 0,5 \cot(\beta - 15^\circ) \text{ et } K_2 = \sqrt{(5h/B) + 1}$$

3.4. FORCES INDUCED BY DRIFTING ICE

3.4.1. Practical considerations

This section discusses forces on structures resulting from impact of ice floes. Canadian and Soviet standards are reviewed first and then an analytical calculation method is presented. The section closes with a comparison of results obtained with the formulas most often cited in relevant literature.

Of course, it is the maximum force an ice floe can exert on a structure upon collision that is of particular interest. This maximum force corresponds to the force required to break the ice. The mode of ice failure, be it bending, crushing, shear or buckling, depends on geometry of the area of contact, ice properties and coefficient of friction between ice and structure. All these parameters should normally be considered when calculating dynamic forces.

The usual practice is to assume point of application of dynamic forces is in the top third of ice thickness.

In the absence of more exact data, an ice thickness of at least 80% that of an ice cover with a 100-year return period should be assumed when calculating dynamic ice forces.

For the purpose of uniformity and simplicity, symbols and units used when reviewing calculation formulas may sometimes differ from those that appear in the original texts.

Herein, H, V and T designate horizontal, vertical and transversal impact forces respectively (See Fig. 6 to 14). Maximum H and V components correspond to contact over the full width of the structure. Maximum transversal force T, on the other hand, occurs when ice acts only on the half-width of a pier; hence in stability calculations T should be coupled only with H/2 and V/2. When ice acts over the full width of the pier, the T components generally cancel one another out by symmetry.

3.4.2. Canadian standard

The National standard of Canada CAN3-S6-M88 (1988) recommends that horizontal thrust due to impact of ice floes with hydraulic structures be taken as the lesser of force required to break ice by bending or crushing:

$$H_{\text{bending}} = K_1 \sigma h^2 \quad (3.15)$$

$$H_{\text{crushing}} = K_2 \sigma B h \quad (3.16)$$

with :

$$K_1 = 0.5 \cot(\beta - 15^\circ) \text{ and } K_2 = \sqrt{(5h/B) + 1}$$

- où H : poussée horizontale (kN) ;
 K_1 : coefficient tenant compte de l'inclinaison de l'avant-bec de l'ouvrage par rapport à la verticale (Tableau 4) ;
 K_2 : coefficient tenant compte du rapport B/h (Tableau 5) ;
 σ : résistance de la glace à la compression (kPa) (Tableau 6) ;
B : largeur ou diamètre de l'ouvrage (m) ;
h : épaisseur de la glace (m) ;
 β : inclinaison de l'ouvrage, par rapport à la verticale (°C).

Tableau 4. K_1 : Coefficient tenant compte de l'inclinaison de l'ouvrage par rapport à la verticale

Inclinaison β	Coefficient K_1	Inclinaison β	Coefficient K_1
20°	5,72	45°	0,87
25°	2,84	50°	0,71
30°	1,87	55°	0,60
35°	1,37	60°	0,50
40°	1,07		

Tableau 5. K_2 : Coefficient tenant compte du rapport B/h

Rapport B/h	Coefficient K_2	Rapport B/h	Coefficient K_2
0,5	3,3	2,0	1,9
1,0	2,4	3,0	1,6
1,5	2,1	4,0 ou plus	1,5

Tableau 6. σ : Résistance ultime à la compression recommandée

Température de la glace	Dimensions des glaçons	Structure interne	Résistance σ (kPa)
point de fusion	petits	détériorée	400
point de fusion	moyens	saine	700
point de fusion	grands	saine	1 100
froide	très grands	saine	1 500

3.4.3. Norme soviétique

Selon la norme soviétique, SNiP2.06.04.82 (1983), la force d'impact d'un glaçon sur un ouvrage vertical se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$H = K_1 K_2 \sigma B h \quad (3.16)$$

Par contre, sur les ouvrages inclinés :

where H : Horizontal thrust (kN)
 K_1 : Factor taking into account the nose inclination of structure from vertical (Table 4)
 K_2 : Factor taking into account the ratio B/h (Table 5)
 σ : Ice compressive strength (kPa) (Table 6)
B : Structure width or diameter (m)
h : Ice thickness (m)
 β : Structure inclination from vertical ($^\circ$)

Table 4. K_1 : Factor taking into account the inclination of structure from vertical

Angle β	Coefficient K_1	Angle β	Coefficient K_1
20 $^\circ$	5.72	45 $^\circ$	0.87
25 $^\circ$	2.84	50 $^\circ$	0.71
30 $^\circ$	1.87	55 $^\circ$	0.60
35 $^\circ$	1.37	60 $^\circ$	0.50
40 $^\circ$	1.07		

Table 5. K_2 : Factor taking into account the ratio B/h

Ratio B/h	Coefficient K_2	Ratio B/h	Coefficient K_2
0.5	3.3	2.0	1.9
1.0	2.4	3.0	1.6
1.5	2.1	4.0 or more	1.5

Table 6. σ : Recommended ice yield compressive strength

Ice temperature	Size of ice floe	Internal structure	Strength σ (kPa)
Melting point	Small	Deteriorated	400
Melting point	Medium	Sound	700
Melting point	Large	Sound	1 100
Cold	Very large	Sound	1 500

3.4.3. Soviet standard

According to Soviet standard SNIp2.06.04.82 (1983), the force due to impact of an ice floe with a vertical structure is computed with the following formula:

$$H = K_1 K_2 \sigma B h \quad (3.16)$$

However, the force on an inclined structure is computed as follows:

$$V = 0,75 K_3 (h/B) \sigma B h \quad (3.17)$$

$$H = K_4 V \quad (3.18)$$

- où H : poussée horizontale (kN) sur les ouvrages inclinés (équation 3.18) n'excédant pas la valeur de H pour un ouvrage vertical (équation 3.16) ;
 V : force verticale (kN) ;
 K₁, K₂, K₃, K₄ : coefficients tenant compte de la géométrie de l'ouvrage, donnés aux Tableaux 7 à 10 ;
 σ : résistance de la glace à la compression (kPa) (Tableau 6) ;
 B : largeur ou diamètre de l'ouvrage (m) ;
 h : épaisseur de la glace (m).

Tableau 7. K₁ : Coefficient tenant compte du rapport B/h

Rapport B/h	1	3	10	20	30	≥50
Coefficient K ₁	2,5	2,0	1,5	1,2	1,0	0,5

Tableau 8. K₂ : Coefficient tenant compte de la forme de l'ouvrage dans le plan horizontal

Forme dans plan horiz.	Polyèdre ou demi-cercle	Rectangle	Triangle avec angle au sommet					
			45°	60°	75°	90°	120°	150°
K ₂	0,90	1,0	0,54	0,59	0,64	0,69	0,77	1,00

Tableau 9. K₃ : Coefficient tenant compte de la forme et du rapport B/h

Forme de l'ouvrage	Pile rectangulaire		Pile conique	Ouvrage long
	B/h ≤ 5	B/h > 5		
K ₃	1	0,2B/h	1+0,05B/h	0,1B

Tableau 10. K₄ : Coefficient tenant compte de l'inclinaison

Inclinaison par rapport à la verticale	5°	10°	15°	30°	45°	60°	75°
Coefficient K ₄	18	5,6	3,7	1,7	1,0	0,6	0,3

$$V = 0.75 K_3 (h/B) \sigma B h \quad (3.17)$$

$$H = K_4 V \quad (3.18)$$

where **H** : Horizontal thrust (kN) if the equation 3.18 does not exceed the H value for a vertical structure (Equation 3.16)

- V** : Vertical force (kN)
K₁ K₂ K₃ K₄ : Factors taking into account the geometry of structure. Values are given in Tables 7 to 10.
σ : Ice compressive strength (kPa) (Table 6)
B : Structure width or diameter (m)
h : Ice thickness

Table 7. *K₁ : Factor taking into account ratio B/h*

Ratio B/h	1	3	10	20	30	≥50
Factor K ₁	2.5	2.0	1.5	1.2	1.0	0.5

Table 8. *K₂ : Factor taking into account structure shape on the horizontal plane*

Shape, hor. plane	Poly-hedron or half-circle	Rectangle	Triangle, point angle as below					
			45°	60°	75°	90°	120°	150°
K ₂	0.90	1.0	0.54	0.59	0.64	0.69	0.77	1.00

Table 9. *K₃ : Factor taking into account shape and ratio B/h*

Structure shape	Rectangular pile		Conical pile	Long structure
	B/h≤5	B/h>5		
K ₃	1	0.2B/h	1+0.05B/h	0.1B

Table 10. *K₄ : Factor taking into account slope*

Slope to vertical	5°	10°	15°	30°	45°	60°	75°
Factor K ₄	18	5.6	3.7	1.7	1.0	0.6	0.3

3.4.4. Approche analytique

La théorie ainsi que les observations expérimentales indiquent que la rupture de la glace se produit en deux étapes. D'abord, des fissures rayonnent à partir de la zone de charge et, ensuite, les secteurs délimités par ces fissures se brisent provoquant la rupture définitive. La glace ne peut donc pas exercer sur un ouvrage une force supérieure à celle nécessaire pour briser une section de glace dans le mode de rupture le plus facile, soit par flexion, par flambage, par compression ou bien par cisaillement.

L'analyse des différents critères de rupture déborde largement le cadre du présent Bulletin et les lecteurs intéressés sont priés de se référer à d'autres publications (Carter, 1975, 1986, 1987 et 1990a).

L'algorithme proposé par Carter consiste essentiellement à évaluer pour chaque zone élémentaire de l'interface glace-ouvrage la force de rupture en fonction des propriétés de la glace, de la géométrie de l'ouvrage et du frottement. Les résultantes longitudinale, transversale et verticale s'obtiennent en intégrant, par la méthode de Simpson, les composantes élémentaires agissant sur le pourtour de l'ouvrage. Les résultats peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$H = K_1 \sigma B h \quad (3.19)$$

$$V = K_2 \sigma B h \quad (3.20)$$

$$T = K_3 \sigma B h \quad (3.21)$$

où H : force horizontale (kN) ;
V : force verticale (kN) ;
T : force transversale (kN) ;
 σ : résistance de la glace à la compression (kPa) (Tableau 6) ;
B : largeur ou diamètre de l'ouvrage (m) ;
h : épaisseur de la glace (m) ;
 K_1, K_2, K_3 : coefficients tenant compte de la géométrie de l'ouvrage (voir Tableaux ci-après).

Carter (1990) et d'autres publications donnent les valeurs des coefficients correspondant aux piles de formes usuelles.

3.4.4. Analytical approach

Theory as well as experimental observations indicate that ice failure is a two-stage process. First, cracks radiate from the pressure region and then the areas affected by the cracks break, causing final failure. This means ice cannot exert more force on a structure than the force that will break one area of the ice in the easiest mode of failure by bending, buckling, compression or shear.

The derivation of different failure criteria is far beyond the scope of this Bulletin. Interested readers are referred to other publications (Carter, 1975, 1986, 1987 and 1990a).

The algorithm developed by Carter consists essentially of estimating breaking force for each elementary area of the ice-structure interface as a function of ice properties, structure geometry and friction. Longitudinal, transversal and vertical resultant forces are obtained by using the Simpson method to integrate elementary components acting on the circumference of the structure. Formulation are expressed as follows:

$$H = K_1 \sigma B h \quad (3.19)$$

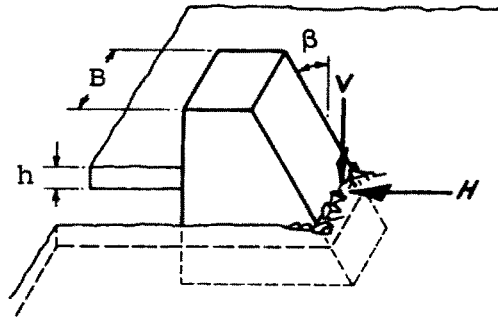
$$V = K_2 \sigma B h \quad (3.20)$$

$$T = K_3 \sigma B h \quad (3.21)$$

where H : Horizontal force (kN)
V : Vertical force (kN)
T : Transversal force (kN)
 σ : Compressive strength (kPa) (Table 6)
B : Structure width or diameter (m)
h : Thickness of ice (m)
 $K_1 K_2 K_3$: Factors taking into account the geometry of structure. Their values are given in following Tables.

Carter (1990) and other publications give factors for piers of standard shapes.

Pile rectangulaire (Coefficient de frottement = 0,15 et $\alpha = 180^\circ$)



$H = K_1 \sigma B h$
 $V = K_2 \sigma B h$
 $T = K_3 \sigma B h$
 σ : Valeurs données au Tableau 6 ;
 K_1, K_2, K_3 : Valeurs données aux Tableaux 11 à 13.

Tableau 11. K_1 : Coefficient pour le calcul de H

β ($^\circ$)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	2,41	1,96	1,73	1,61	1,55
15	2,41	1,96	1,73	1,61	0,77
30	2,41	1,72	0,89	0,47	0,22
45	1,80	0,92	0,47	0,25	0,12

Tableau 12. K_2 : Coefficient pour le calcul de V

β ($^\circ$)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,27	0,22	0,20	0,18	0,09
30	0,95	0,68	0,35	0,19	0,09
45	1,33	0,68	0,35	0,19	0,09

Tableau 13. K_3 : Coefficient pour le calcul de T

β ($^\circ$)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Rectangular pier (Coefficient of friction = 0.15 and $\alpha = 180^\circ$)

Fig. 6

Rectangular pier
Pile rectangulaire

$H = K_1 \sigma B h$
 $V = K_2 \sigma B h$
 $T = K_3 \sigma B h$
 σ : Values are given in Table 6
 $K_1 K_2 K_3$: Values are given in Tables 11 to 13.

Table 11. K_1 : Factor for computing H

β ($^\circ$)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	2.41	1.96	1.73	1.61	1.55
15	2.41	1.96	1.73	1.61	0.77
30	2.41	1.72	0.89	0.47	0.22
45	1.80	0.92	0.47	0.25	0.12

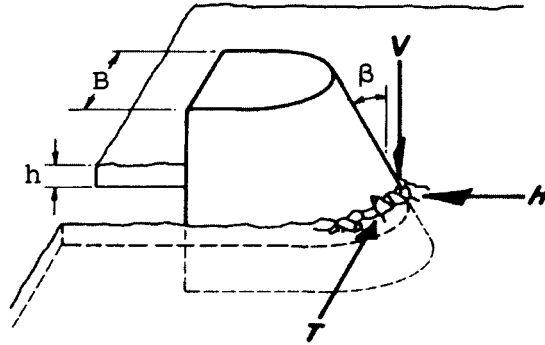
Table 12. K_2 : Factor for computing V

β ($^\circ$)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.27	0.22	0.20	0.18	0.09
30	0.95	0.68	0.35	0.19	0.09
45	1.33	0.68	0.35	0.19	0.09

Table 13. K_3 : Factor for computing T

β ($^\circ$)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Pile semi-circulaire (Coefficient de frottement = 0,15 et $\alpha = 180^\circ$)



$$\begin{aligned}
 H &= K_1 \sigma B h \\
 V &= K_2 \sigma B h \\
 T &= K_3 \sigma B h \\
 \sigma &: \text{ Valeurs données au Tableau 6 ;} \\
 K_1, K_2, K_3 &: \text{ Valeurs données aux Tableaux 14 à 16.}
 \end{aligned}$$

Tableau 14. K_1 : Coefficient pour le calcul de H

β ($^\circ$)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	2,30	1,87	1,65	1,54	1,48
15	2,30	1,87	1,65	1,12	0,57
30	2,30	1,87	1,25	0,68	0,34
45	2,30	1,87	1,00	0,54	0,26

Tableau 15. K_2 : Coefficient pour le calcul de V

β ($^\circ$)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,26	0,21	0,19	0,13	0,07
30	0,42	0,34	0,23	0,13	0,07
45	0,52	0,42	0,23	0,13	0,07

Tableau 16. K_3 : Coefficient pour le calcul de T

β ($^\circ$)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,37	0,30	0,27	0,25	0,24
15	0,37	0,30	0,27	0,25	0,24
30	0,37	0,30	0,27	0,25	0,24
45	0,37	0,30	0,27	0,25	0,24

Semicircular pier (Coefficient of friction = 0.15 and $\alpha = 180^\circ$)

Fig. 7
Semicircular pier
Pile semi-circulaire

$$\begin{aligned}
 H &= K_1 \sigma B h \\
 V &= K_2 \sigma B h \\
 T &= K_3 \sigma B h \\
 \sigma &: \text{Values are given in Table 6} \\
 K_1 \ K_2 \ K_3 &: \text{Values are given in Tables 14 to 16.}
 \end{aligned}$$

Table 14. K_1 : Factor for computing H

B (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	2.30	1.87	1.65	1.54	1.48
15	2.30	1.87	1.65	1.12	0.57
30	2.30	1.87	1.25	0.68	0.34
45	2.30	1.87	1.00	0.54	0.26

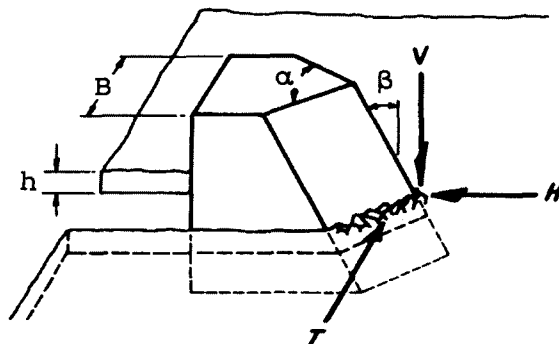
Table 15. K_2 : Factor for computing V

B (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.26	0.21	0.19	0.13	0.07
30	0.42	0.34	0.23	0.13	0.07
45	0.52	0.42	0.23	0.13	0.07

Table 16. K_3 : Factor for computing T

B (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.37	0.30	0.27	0.25	0.24
15	0.37	0.30	0.27	0.25	0.24
30	0.37	0.30	0.27	0.25	0.24
45	0.37	0.30	0.27	0.25	0.24

Pile avec avant-bec « en pointe » (Coefficient de frottement = 0,15 et $\alpha = 60^\circ$)



$$\begin{aligned}
 H &= K_1 \sigma B h \\
 V &= K_2 \sigma B h \\
 T &= K_3 \sigma B h \\
 \sigma &: \text{ Valeurs données au Tableau 6 ;} \\
 K_1, K_2, K_3 &: \text{ Valeurs données aux Tableaux 17 à 19.}
 \end{aligned}$$

Tableau 17. K_1 coefficient pour le calcul de H

β ($^\circ$)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	1,01	0,82	0,73	0,68	0,65
15	1,01	0,82	0,73	0,68	0,58
30	1,01	0,82	0,73	0,49	0,29
45	1,01	0,82	0,50	0,30	0,18

Tableau 18. K_2 : Coefficient pour le calcul de V

β ($^\circ$)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,39	0,31	0,26	0,22	0,16
30	0,82	0,65	0,54	0,33	0,16
45	1,40	4,09	0,61	0,33	0,16

Tableau 19. K_3 : Coefficient pour le calcul de T

β ($^\circ$)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,64	0,52	0,46	0,43	0,41
15	0,64	0,52	0,46	0,43	0,34
30	0,64	0,52	0,46	0,28	0,16
45	0,64	0,52	0,28	0,16	0,09

Angular pointed pier (Coefficient of friction = 0.15 and $\alpha = 60^\circ$)

⋮

Fig. 8

Angular pointed pier ($\alpha = 60^\circ$)

Pile avec avant-bec «en pointe» ($\alpha = 60^\circ$)

- $H = K_1 \sigma B h$
 $V = K_2 \sigma B h$
 $T = K_3 \sigma B h$
 σ : Values are given in Table 6
 $K_1 K_2 K_3$: Values are given in Tables 17 to 19.

Table 17. K_1 : Factor for computing H

B (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	1.01	0.82	0.73	0.68	0.65
15	1.01	0.82	0.73	0.68	0.58
30	1.01	0.82	0.73	0.49	0.29
45	1.01	0.82	0.50	0.30	0.18

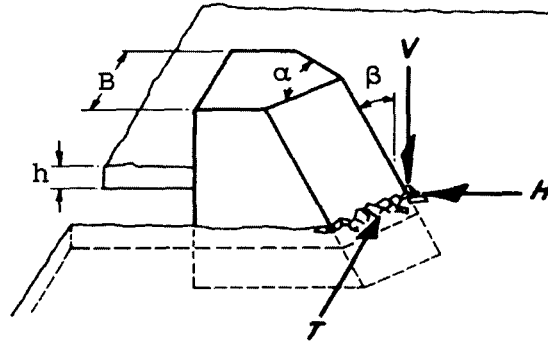
Table 18. K_2 : Factor for computing V

B (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.39	0.31	0.26	0.22	0.16
30	0.82	0.65	0.54	0.33	0.16
45	1.40	4.09	0.61	0.33	0.16

Table 19. K_3 : Factor for computing T

B (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.64	0.52	0.46	0.43	0.41
15	0.64	0.52	0.46	0.43	0.34
30	0.64	0.52	0.46	0.28	0.16
45	0.64	0.52	0.28	0.16	0.09

Pile avec avant-bec « en pointe » (Coefficient de frottement = 0,15 et $\alpha = 90^\circ$)



$$\begin{aligned}
 H &= K_1 \sigma B h \\
 V &= K_2 \sigma B h \\
 T &= K_3 \sigma B h \\
 \sigma &: \text{Valeurs données au Tableau 6;} \\
 K_1, K_2, K_3 &: \text{Valeurs données aux Tableaux 20 à 22.}
 \end{aligned}$$

Tableau 20. K_1 : Coefficient pour le calcul de H

β (°)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	1,85	1,50	1,32	1,24	1,18
15	1,85	1,50	1,32	0,92	0,51
30	1,85	1,40	0,77	0,45	0,26
45	1,57	0,83	0,46	0,28	0,17

Tableau 21. K_2 : Coefficient pour le calcul de V

β (°)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,58	0,46	0,39	0,26	0,13
30	1,23	0,91	0,47	0,26	0,13
45	1,78	0,91	0,47	0,26	0,13

Tableau 22. K_3 : Coefficient pour le calcul de T

β (°)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,58	0,46	0,39	0,26	0,13
30	1,23	0,91	0,47	0,26	0,13
45	1,78	0,91	0,47	0,26	0,13

Angular pointed pier (Coefficient of friction = 0.15 and $\alpha = 90^\circ$)

Fig. 9

Angular pointed pier ($\alpha = 90^\circ$)

Pile avec avant-bec «en pointe» ($\alpha = 90^\circ$)

$$\begin{aligned}
 H &= K_1 \sigma B h \\
 V &= K_2 \sigma B h \\
 T &= K_3 \sigma B h \\
 \sigma &: \text{Values are given in Table 6} \\
 K_1 K_2 K_3 &: \text{Values are given in Tables 20 to 22.}
 \end{aligned}$$

Table 20. K_1 : Factor for computing H

β ($^\circ$)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	1.85	1.50	1.32	1.24	1.18
15	1.85	1.50	1.32	0.92	0.51
30	1.85	1.40	0.77	0.45	0.26
45	1.57	0.83	0.46	0.28	0.17

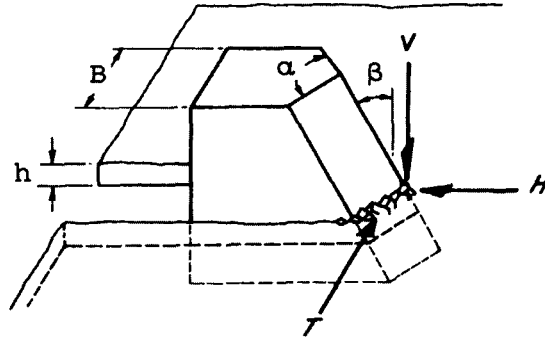
Table 21. K_2 : Factor for computing V

β ($^\circ$)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.58	0.46	0.39	0.26	0.13
30	1.23	0.91	0.47	0.26	0.13
45	1.78	0.91	0.47	0.26	0.13

Table 22. K_3 : Factor for computing T

β ($^\circ$)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.58	0.46	0.39	0.26	0.13
30	1.23	0.91	0.47	0.26	0.13
45	1.78	0.91	0.47	0.26	0.13

Pile avec avant-bec « en pointe » (Coefficient de frottement = 0,15 et $\alpha = 120^\circ$)



$$\begin{aligned}
 H &= K_1 \sigma B h \\
 V &= K_2 \sigma B h \\
 T &= K_3 \sigma B h \\
 \sigma &: \text{Valeurs données au Tableau 6 ;} \\
 K_1, K_2, K_3 &: \text{Valeurs données aux Tableaux 23 à 25.}
 \end{aligned}$$

Tableau 23. K_1 : Coefficient pour le calcul de H

β (°)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	2,62	2,13	1,88	1,75	1,68
15	2,62	2,13	1,71	0,97	0,53
30	2,62	1,45	0,79	0,46	0,26
45	1,59	0,84	0,47	0,28	0,15

Tableau 24. K_2 : Coefficient pour le calcul de V

β (°)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,65	0,52	0,41	0,22	0,11
30	1,44	0,78	0,41	0,22	0,11
45	1,52	0,78	0,41	0,22	0,11

Tableau 25. K_3 : Coefficient pour le calcul de T

β (°)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,52	0,42	0,37	0,34	0,33
15	0,52	0,42	0,34	0,19	0,10
30	0,52	0,29	0,16	0,09	0,05
45	0,33	0,17	0,09	0,05	0,03

Angular pointed pier (Coefficient of friction = 0.15 and $\alpha = 120^\circ$)

Fig. 10

Angular pointed pier ($\alpha = 120^\circ$)

Pile avec avant-bec « en pointe » ($\alpha = 120^\circ$)

$$\begin{aligned}
 H &= K_1 \sigma B h \\
 V &= K_2 \sigma B h \\
 T &= K_3 \sigma B h \\
 \sigma &: \text{Values are given in Table 6} \\
 K_1 K_2 K_3 &: \text{Values are given in Tables 23 to 25.}
 \end{aligned}$$

Table 23. K_1 : Factor for computing H

β ($^\circ$)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	2.62	2.13	1.88	1.75	1.68
15	2.62	2.13	1.71	0.97	0.53
30	2.62	1.45	0.79	0.46	0.26
45	1.59	0.84	0.47	0.28	0.15

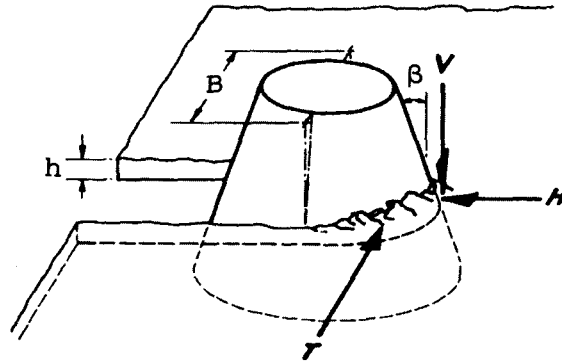
Table 24. K_2 : Factor for computing V

β ($^\circ$)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.65	0.52	0.41	0.22	0.11
30	1.44	0.78	0.41	0.22	0.11
45	1.52	0.78	0.41	0.22	0.11

Table 25. K_3 : Factor for computing T

β ($^\circ$)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.52	0.42	0.37	0.34	0.33
15	0.52	0.42	0.34	0.19	0.10
30	0.52	0.29	0.16	0.09	0.05
45	0.33	0.17	0.09	0.05	0.03

Pile conique (Coefficient de frottement = 0,15 et $\alpha = 180^\circ$)



$$\begin{aligned}
 H &= K_1 \sigma B h \\
 V &= K_2 \sigma B h \\
 T &= K_3 \sigma B h \\
 \sigma &: \text{Valeurs données au Tableau 6 ;} \\
 K_1, K_2, K_3 &: \text{Valeurs données aux Tableaux 26 à 28.}
 \end{aligned}$$

Tableau 26. K_1 : Coefficient pour le calcul de H

β (°)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	2,30	1,87	1,65	1,54	1,48
15	2,30	1,87	1,65	0,99	0,52
30	2,30	1,36	0,72	0,40	0,21
45	1,51	0,78	0,41	0,23	0,12

Tableau 27. K_2 : Coefficient pour le calcul de V

β (°)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,60	0,48	0,43	0,26	0,13
30	1,46	0,86	0,46	0,26	0,13
45	1,67	0,86	0,46	0,26	0,13

Tableau 28. K_3 coefficient pour le calcul de T

β (°)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,37	0,30	0,27	0,25	0,24
15	0,37	0,30	0,27	0,25	0,16
30	0,37	0,30	0,25	0,14	0,07
45	0,37	0,27	0,15	0,08	0,04

Conical pier (Coefficient of friction = 0.15 and $\alpha = 180^\circ$)

Fig. 11
Conical pier
Pile conique

H = $K_1 \sigma B h$
V = $K_2 \sigma B h$
T = $K_3 \sigma B h$
 σ : Values are given in Table 6
 $K_1 K_2 K_3$: Values are given in Tables 26 to 28.

Table 26. K_1 : Factor for computing H

β (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	2.30	1.87	1.65	1.54	1.48
15	2.30	1.87	1.65	0.99	0.52
30	2.30	1.36	0.72	0.40	0.21
45	1.51	0.78	0.41	0.23	0.12

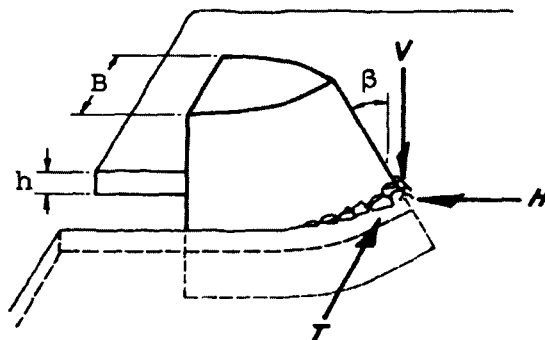
Table 27. K_2 : Factor for computing V

β (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.60	0.48	0.43	0.26	0.13
30	1.46	0.86	0.46	0.26	0.13
45	1.67	0.86	0.46	0.26	0.13

Table 28. K_3 : Factor for computing T

β (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.37	0.30	0.27	0.25	0.24
15	0.37	0.30	0.27	0.25	0.16
30	0.37	0.30	0.25	0.14	0.07
45	0.37	0.27	0.15	0.08	0.04

Pile « en ogive » (Coefficient de frottement = 0,15 et $\alpha = 90^\circ$)



$$\begin{aligned}
 H &= K_1 \sigma B h \\
 V &= K_2 \sigma B h \\
 T &= K_3 \sigma B h \\
 \sigma &: \text{ Valeurs données au Tableau 6 ;} \\
 K_1, K_2, K_3 &: \text{ Valeurs données aux Tableaux 29 à 31.}
 \end{aligned}$$

Tableau 29. K_1 : Coefficient pour le calcul de H

β ($^\circ$)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	1,38	1,12	0,99	0,92	0,88
15	1,38	1,12	0,99	0,80	0,50
30	1,38	1,12	0,90	0,54	0,33
45	1,38	1,12	0,75	0,45	0,27

Tableau 30. K_2 : Coefficient pour le calcul de V

β ($^\circ$)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,32	0,25	0,21	0,16	0,09
30	0,46	0,36	0,28	0,16	0,09
45	0,54	0,43	0,28	0,16	0,09

Tableau 31. K_3 : Coefficient pour le calcul de T

β ($^\circ$)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,62	0,51	0,45	0,42	0,40
15	0,62	0,51	0,45	0,42	0,40
30	0,62	0,51	0,45	0,42	0,40
45	0,62	0,51	0,45	0,42	0,40

“Pointed arch” pier (Coefficient of friction = 0.15 and $\alpha = 90^\circ$)

Fig. 12
Pointed arch pier
Pile «en ogive»

H = $K_1 \sigma B h$
V = $K_2 \sigma B h$
T = $K_3 \sigma B h$
 σ : Values are given in Table 6
 $K_1 K_2 K_3$: Values are given in Tables 29 to 31.

Table 29. K_1 : Factor for computing H

β (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	1.38	1.12	0.99	0.92	0.88
15	1.38	1.12	0.99	0.80	0.50
30	1.38	1.12	0.90	0.54	0.33
45	1.38	1.12	0.75	0.45	0.27

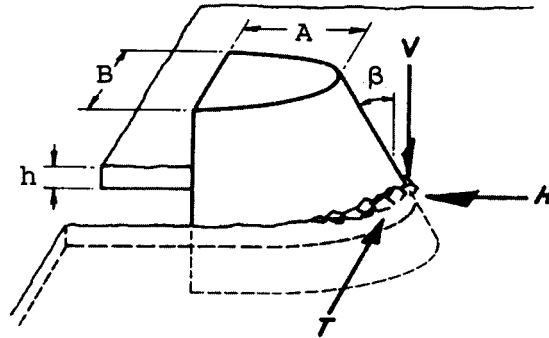
Table 30. K_2 : Factor for computing V

β (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.32	0.25	0.21	0.16	0.09
30	0.46	0.36	0.28	0.16	0.09
45	0.54	0.43	0.28	0.16	0.09

Table 31. K_3 : Factor for computing T

β (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.62	0.51	0.45	0.42	0.40
15	0.62	0.51	0.45	0.42	0.40
30	0.62	0.51	0.45	0.42	0.40
45	0.62	0.51	0.45	0.42	0.40

Pile elliptique (Coefficient de frottement = 0,15 et A/B = 0.86)



$H = K_1 \sigma B h$
 $V = K_2 \sigma B h$
 $T = K_3 \sigma B h$
 σ : Valeurs données au Tableau 6 ;
 K_1, K_2, K_3 : Valeurs données aux Tableaux 32 à 34.

Tableau 32. K_1 : Coefficient pour le calcul de H

β (°)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	1,83	1,48	1,31	1,22	1,17
15	1,83	1,48	1,31	1,12	0,62
30	1,83	1,48	1,08	0,63	0,35
45	1,83	1,48	0,81	0,47	0,26

Tableau 33. K_2 : Coefficient pour le calcul de V

β (°)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,23	0,19	0,17	0,14	0,08
30	0,42	0,34	0,25	0,14	0,08
45	0,57	0,46	0,25	0,14	0,08

Tableau 34. K_3 : Coefficient pour le calcul de T

β (°)	Rapport B/h				
	0,5	1,0	2,0	4,0	10,0
0	0,44	0,35	0,31	0,29	0,28
15	0,44	0,35	0,31	0,29	0,28
30	0,44	0,35	0,31	0,29	0,28
45	0,44	0,35	0,31	0,29	0,28

Elliptical pier (Coefficient of friction = 0.15 and A/B = 0.86)



Fig. 13
Elliptical pier
Pile elliptique

$$\begin{aligned}
 H &= K_1 \sigma B h \\
 V &= K_2 \sigma B h \\
 T &= K_3 \sigma B h \\
 \sigma &: \text{Values are given in Table 6} \\
 K_1 K_2 K_3 &: \text{Values are given in Tables 32 to 34.}
 \end{aligned}$$

Table 32. K_1 : Factor for computing H

β (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	1.83	1.48	1.31	1.22	1.17
15	1.83	1.48	1.31	1.12	0.62
30	1.83	1.48	1.08	0.63	0.35
45	1.83	1.48	0.81	0.47	0.26

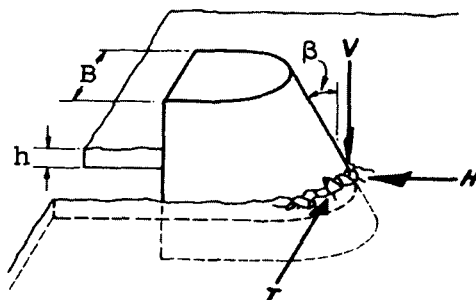
Table 33. K_2 : Factor for computing V

β (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.23	0.19	0.17	0.14	0.08
30	0.42	0.34	0.25	0.14	0.08
45	0.57	0.46	0.25	0.14	0.08

Table 34. K_3 : Factor for computing T

β (°)	Ratio B/h				
	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
0	0.44	0.35	0.31	0.29	0.28
15	0.44	0.35	0.31	0.29	0.28
30	0.44	0.35	0.31	0.29	0.28
45	0.44	0.35	0.31	0.29	0.28

3.4.5. Comparaison des forces sur une pile semi-circulaire calculées par diverses formules



Données :

Largeur de la pile au niveau du plan d'eau (m)	4,30
Épaisseur de la glace (m)	1,00
Résistance de la glace à la compression (kPa)	1 100,00
Coefficient de frottement (approximatif)	0,15
Angle entre l'ouvrage et la verticale (°)	30,00
Hauteur de la revanche (m)	1,54

Tableau 35. Comparaison des forces calculées par diverses formules

Références	H (kN)	V (kN)	T (kN)
Carter, 1990	3 027	576	1 177
Norme canadienne CAN3-S6-M88, 1988	2 053	807	593
Norme soviétique SNiP2.06.04.82, 1983	1 403	825	111
Korzhavin, 1962	1 512	794	260
Danys, 1975	742	1 285	146
Ralston, 1977 (force maximale)	3 124	1 534	614
Croasdale 2-D modifié, 1980	2 452	897	482
Moyenne	2 045	960	483

3.5. ACTION DES GLACES SUR LE TALUS D'UN BARRAGE

La méthode de dimensionnement du riprap pour contrecarrer l'action des vagues et des courants est bien connue. Il n'en est pas de même pour le dimensionnement du riprap pouvant résister à l'action des glaces dans un réservoir. Dans

3.4.5. Comparison of forces on a semi-circular pier computed by different formulas

Fig. 14

Computation of forces on a semicircular pier

Calcul des forces sur une pile semi-circulaire

Given:

Pier width at water level (m)	4.30
Ice thickness (m)	1.00
Compressive strength of ice (kPa)	1 100.00
Coefficient of friction (approximate)	0.15
Angle of structure with vertical (°)	30.00
Freeboard (m)	1.54

Table 35. Comparison of forces computed by different formulas

References	H (kN)	V (kN)	T (kN)
Carter, 1990	3 027	576	1 177
Canadian standard CAN3-S6-M88, 1988	2 053	807	593
Soviet standard SNiP2.06.04.82, 1983	1 403	825	111
Korzhavin, 1962	1 512	794	260
Danys, 1975	742	1 285	146
Ralston, 1977 (Yields max. force)	3 124	1 534	614
Croasdale modified 2-D, 1980	2 452	897	482
Average	2 045	960	483

3.5. ICE ACTION ON DAM SLOPE

The sizing of riprap to counter wave action and currents is well known. However, the sizing of riprap to resist ice action in a reservoir is less understood. In practice, riprap designed to resist wave energy is often capable of absorbing ice

la pratique, on considère que le riprap conçu pour résister à l'énergie des vagues est généralement suffisant pour résister aux forces des glaces (US Army Corps of Engineers, 1984 ; Acres H.G. Ltd., 1971 ; Northumberland Consultants Ltd., 1966). La littérature sur l'interaction glace-riprap est très rare et souvent limitée à de simples constatations. Il n'existe aucune approche fondamentale sur ce sujet.

3.5.1. Influence du type de riprap

L'inspection par l'US Army Corps of Engineers (1949) de l'état du riprap d'environ 100 barrages aux États-Unis, soumis à une grande variété de conditions climatiques et de vagues, a conduit à l'établissement d'un dossier de résultats montrant que :

- le riprap constitué d'enrochement déversé était endommagé dans 5 % des cas. Ces dégâts étaient dus aux dimensions inappropriées de l'enrochement ;
- le riprap constitué d'enrochement placé manuellement était détérioré dans 30 % des cas. Ces dégâts résultaient du type de construction à une seule couche de pierre ;
- les dalles de béton étaient détériorées dans 36 % des cas et les détériorations étaient imputables à l'inefficacité de ce type de construction.

Le riprap placé manuellement n'est pas approprié pour résister aux conditions sévères de glace (USBR, 1987). Ce type de riprap est plus mince, n'est pas aussi souple que le riprap déversé et ne s'adapte pas aux tassements importants.

La supériorité du riprap en enrochement déversé pour la protection des talus et son faible coût d'entretien par rapport aux autres types de protection ont été clairement démontrés par l'étude du Corps of Engineers (USBR, 1987).

Depuis plusieurs décennies, la pierre a été utilisée avec succès pour la protection des talus dans les régions arctiques sujettes aux sévères attaques des glaces. La pierre déversée est souple et peut s'adapter facilement au tassement différentiel ou à l'érosion. Le déplacement de plusieurs blocs de pierre ne mène pas nécessairement à la rupture du talus (McDonald, 1988).

3.5.2. Action du gel et du dégel

Le gel et le dégel affectent la pérennité des roches fissurées et de certains types de roche. Ce phénomène est classique et n'est pas traité ici.

Un autre phénomène est le soulèvement des blocs causé par l'action du gel et du dégel, observé au barrage Sveg en Suède (Berndtsson, 1986). C'est un barrage avec un noyau en moraine confiné par un remblai constitué de gravier et de matériau d'excavation tout-venant. Le talus est protégé par un riprap de 1,4 m d'épaisseur, ayant une pente variant de 1V :2H à 1V :4H. Le diamètre maximal de l'enrochement est de 0,7 m. Le réservoir est utilisé pour une régularisation saisonnière, c'est-à-dire qu'il est soumis à une baisse graduelle des niveaux d'eau en hiver. La couverture de glace peut atteindre 0,9 m d'épaisseur et la couche de neige est insignifiante sur le barrage.

forces as well (US Army Corps of Engineers, 1984; Acres H.G. Ltd., 1971; Northumberland Consultants Ltd., 1966). Literature on ice interaction with riprap is scarce and often restricted to simple observations. There is no fundamental approach to designing riprap to resist ice action.

3.5.1. Effect of riprap type

The US Army Corps of Engineers inspected the condition of riprap on about 100 dams in the United States subject to a wide variety of climatic and wave conditions and compiled the findings (US Army Corps of Engineers, 1949). The study showed the following:

- Five percent of riprap structures composed of dumped rockfill were damaged. The damage was caused by incorrect sizing of the rock.
- Thirty percent of riprap structures composed of hand-placed riprap were damaged. The riprap consisted of a single layer of stone, and this was the source of the problem.
- Thirty-six percent of riprap structures composed of concrete slabs were damaged. This type of construction is often ineffective.

Hand-placed riprap is not suitable for a structure that must withstand severe ice conditions (USBR, 1987). It is thinner and not as flexible as dumped rockfill, and it does not adjust to large settlements.

The study by the US Army Corps of Engineers clearly demonstrated that dumped rockfill is superior to other types of slope protection as well as inexpensive to maintain (USBR, 1987).

For decades, stone has been successfully used as slope protection in arctic regions subject to severe ice attack. Dumped stone is flexible and easily adjusts to differential settlement and erosion. Stone displacement does not necessarily lead to slope failure (McDonald, 1988).

3.5.2. Freeze-thaw action

Freezing and thawing affect the durability of certain types of rock particularly cracked rock. This is a well-known phenomenon and is not dealt with here.

Another effect of freeze-thaw action is vertical uplift which was observed at the Sveg dam in Sweden (Berndtsson, 1986). This dam has a till core supported by fill composed of gravel and pit-run material. Slopes are protected by a riprap layer 1.4 m thick installed with slopes ranging from 1V:2H to 1V:4H. Maximum rock diameter is 0.7 m. The reservoir is used for seasonal regulation; in other words, the water level gradually drops over the winter. The ice cover has a maximum thickness of 0.9 m, and snow cover on the dam is insignificant.

La profondeur de gel pénètre en général jusqu'à 2 m sur toute la surface du riprap exposée à l'air. Quand le niveau du réservoir baisse, l'eau contenue dans le remblai saturé s'écoule et gèle au contact avec les blocs du riprap gelé. Des lentilles de glacé se développent et provoquent le soulèvement des blocs du riprap. Les blocs soulevés ne reviennent pas en général à leur position initiale à cause de la migration de petits cailloux au-dessous de ceux-ci.

Le même phénomène a été observé sur le riprap de barrages en terre argileuse dans la partie septentrionale de la Chine. Le riprap peut être soulevé jusqu'à 30 cm (Sui Xian-Zhi, 1988a).

3.5.3. Action des glaces lors de la baisse du niveau d'eau

Au barrage Sveg en Suède, des dégâts ont été également causés au riprap par l'action de la couverture de glace qui descend au rythme de la baisse du niveau du réservoir. Lors de la descente, la couverture de glace se fissure, la bande collée au riprap demeure en porte-à-faux puis s'affaisse et repose sur le talus. Les pierres du riprap emprisonnées dans la bande de glace en porte-à-faux sont alors soumises à un moment important de renversement et de torsion et sont déchaussées pour occuper une nouvelle position. Au dégel, la pierre retombe mais revient rarement à sa position initiale. Ce phénomène se répète chaque année et conduit à la détérioration du riprap. Les actions combinées du gel et des forces induites par l'affaissement de la couverture de glace rendent le riprap instable. A moins qu'il y ait un entretien annuel, les vagues mineront le riprap en enlevant les particules plus fines et pourront mettre en danger l'intégrité du barrage (Berndtsson, 1986).

Un massif de glace en porte-à-faux se forme couramment sur les rives des réservoirs des centrales de transfert d'énergie par pompage et sur les berges des rivières. Celui-ci peut glisser le long du talus ou basculer en arrachant les matériaux des berges (Vonokov, 1981 ; Kondrat'ev, 1982 ; Rossinskij, 1977 ; Sokolov, 1970 ; Gatto, 1982).

Selon l'expérience acquise au Québec (MacKenzie, 1970), des déplacements importants du riprap se sont produits sur des pentes plus raides que 1V : 1.75H et quand les niveaux des réservoirs baissent en présence d'une couverture de glace épaisse. Avec des pentes 1V : 3H, seul un mouvement mineur a été observé.

Dans la partie nord de la Suède, la stabilité du talus des barrages en enrochement est influencée non seulement par l'action des vagues mais aussi par le poids de la glace. Au printemps, durant la période de baisse des niveaux d'eau, de grandes plaques de glace de plusieurs mètres d'épaisseur peuvent couvrir le talus des barrages. C'est durant cette période que le riprap subit des dégâts importants (Bernel, 1973).

En Norvège, des blocs de riprap peuvent être aussi déchaussés ou fissurés par la glace lors de la baisse du niveau du réservoir (Hoff, 1985).

3.5.4. Action des glaces lors de la montée du niveau d'eau

Lors de la montée du niveau d'eau, la couverture de glace engendre aussi des forces énormes qui peuvent soulever les pieux des quais. A la marina de Michigan, sur des pieux de 0,3 m de diamètre équipés d'appareils de mesure, on a enregistré

Frost generally penetrates to a depth of 2 m through the entire riprap surface exposed to air. When the reservoir level drops, water in the saturated fill flows out, freezing on contact with the stones of the frozen riprap. Ice lenses develop, provoking vertical uplift of the stones. The stones that are uplifted do not generally return subsequently to their original positions because of the migration of small pebbles beneath them.

This phenomenon was also observed in riprap on dams built of clayey earth in northern China. The riprap sometimes moved as much as 30 cm upward (Sui Xian-Zhi, 1988a).

3.5.3. Ice action when water levels drop

Riprap on the Sveg dam in Sweden was also damaged by action of the ice cover as it dropped in response to falling water level. The ice cover cracked as it dropped, and the band of ice frozen to the riprap first formed a cantilever and then collapsed onto the embankment. The stones frozen into the cantilevered band of ice were subjected to substantial overturning and torsional moment and were plucked into new positions. When the ice thawed, these stones fell, but rarely back to their original positions. This process was repeated every year, causing gradual deterioration of the riprap. The combined effect of freezing and of forces induced by collapse of the ice cover rendered the riprap instable. Without maintenance, waves will erode riprap by removing fine particles and this can jeopardize the integrity of the dam (Berndtsson, 1986).

Cantilevered ice masses commonly form on riverbanks as well as the shores of reservoirs of pumped-storage plants. These ice masses sometimes slide down the bank or tip over, plucking material from the banks as they do so (Vonokov, 1981; Kondrat'ev, 1982; Rossinskij, 1977; Sokolov, 1970; Gatto, 1982).

In Quebec (MacKenzie, 1970), riprap displacement has occurred on slopes steeper than 1V:1.75H when the ice cover is thick and reservoir level drops. Where slopes are 1V:3H, only minor movement has occurred.

In the northern part of Sweden, the stability of the slopes of rockfill dams is affected not only by wave action but also by the weight of the ice. When water levels drop in the spring, large ice sheets several metres thick sometimes cover the slopes of the dam. This is the time when the riprap suffers major damage (Bernel, 1973).

In Norway too, riprap stones are sometimes plucked or cracked by ice when the reservoir level drops (Hoff, 1985).

3.5.4. Ice action when water levels rise

The ice cover generates enormous forces that can push wharf piles upward. Instrumented piles 0.3 m in diameter at the Michigan marina recorded vertical forces of as much as 49.8 kN induced by a 7-cm rise in water level when the ice

des forces verticales allant jusqu'à 48 kN, qui étaient induites par une montée du niveau d'eau de 7 cm, avec une couverture de glace de 0,5 m d'épaisseur (Sui Xian-Zhi, 1988b).

Damron (1987) a présenté un cas de conception de riprap tenant compte de l'effet des glaces. L'article décrit la conception et la construction du riprap de protection d'une falaise bordant une usine de traitement des eaux usées d'Anchorage, Alaska, à Cook Inlet. La falaise subissait une érosion d'environ 2 m par an, causée essentiellement par les courants de marée, les glaces et les vagues. A cet endroit, la marée peut atteindre 12 m d'amplitude. Le pied de la falaise est constamment miné par les vagues et la glace. Pendant 7 mois par an, la glace colle au talus puis se déplace au gré des variations de niveau d'eau, causant ainsi une érosion rapide de la falaise. Lors de la conception de la protection, le souci principal concernait le soulèvement des blocs par la glace durant la marée montante et le charriage de ceux-ci par les courants. Pour prévenir les dommages causés par la glace, un revêtement en enrochement de pente 1V : 1.5H a été recommandé. Le poids moyen des blocs de pierre était de 2 700 kg, basé sur les expériences antérieures à Cook Inlet. D'autre part, le contrôle de la qualité de la roche avant la mise en place était très sévère.

McDonald (1988) mentionne que le volume de glace requis pour arracher une pierre doit être au moins égal à 15 fois le volume de cette dernière. De plus, le soulèvement n'est possible que si la force d'adhérence glace-pierre est supérieure à l'adhérence pierre-talus. La perte de blocs de pierre causée par ce phénomène est rare et généralement limitée à de petits blocs, comme observé au quai de Dillingham, Alaska.

3.5.5. Poussées horizontales des glaces

Les poussées horizontales des glaces sur les ouvrages peuvent être causées par la couverture de glace soumise à l'expansion thermique, aux vents et courants, et par l'impact des glaçons poussés par les courants et les vents.

Dans la partie septentrionale de la Chine, le revêtement des talus des barrages est constitué de blocs de pierre et d'autres types de matériau. La granulométrie des blocs varie entre 15 et 40 cm. Le riprap a une épaisseur de 20 à 60 cm reposant sur une couche de pierre concassée de 30 à 60 cm d'épaisseur. Ces revêtements de protection ont subi des dégâts importants et fréquents, causés par les poussées des glaces d'origine thermique (Sui Xian-Zhi, 1988a). Les poussées surviennent généralement au début et à la fin de l'hiver. La couverture de glace peut atteindre 0,35 m d'épaisseur vers la mi-novembre et 1,3 m vers la fin de l'hiver. Sous l'action des poussées, la glace peut remonter jusqu'à la crête du barrage, provoquant des dégâts importants. Les poussées maximales mesurées aux différents barrages peuvent varier entre 35,3 kN/m et 264,9 kN/m (Sui Xian-Zhi, 1988b).

Rose (1946) souligne que l'abaissement du plan d'eau provoque des fissures et une rupture de continuité dans la couverture de glace, ce qui peut réduire considérablement les poussées d'origine thermique exercées sur le riprap.

Le phénomène des poussées des glaces est souvent relaté dans les régions côtières et dans les grands lacs. Les blocs de glace peuvent remonter sur les rives et causer des dégâts considérables (Sokolov, 1970 ; Sodhi *et al.*, 1984 ; Goldthwait, 1957).

cover was 0.5 m thick (Sui Xian-Zhi, 1988b).

Damron (1987) describes a riprap design case that considers ice effect. He discusses the design and construction of riprap for a cliff bordering the Anchorage, Alaska, wastewater treatment plant at Cook Inlet. The cliff was eroding at a rate of about 2 m/year, mainly due to tidal currents, ice and waves. At this spot, the tidal range runs as high as 12 m, and the foot of the cliff is constantly undermined by waves and ice. For as much as seven months of the year, ice is frozen to the cliff and moves with fluctuations in water level, causing rapid erosion of the cliff. The main riprap design concern was that ice would rip stones from the slope protection during rising tide and currents would carry them away. To prevent ice damage, a riprap was installed with a slope of 1V:1.5H. Average weight of the stones was 2 700 kg, based on past experience at Cook Inlet. Quality control of the rock prior to placement was very strict.

McDonald (1988) mentions that the volume of ice required to pluck a stone must be at least 15 times the volume of the stone. For the rock to be lifted, bond strength between ice and rock must be greater than that between rock and soil. Loss of stones by plucking is rare, and generally limited to small rocks, such as those observed at the Dillingham quay in Alaska.

3.5.5. Horizontal ice thrust

An ice cover subjected to thermal expansion can exert horizontal pressure on structures, as can ice floes driven by winds or currents.

In northern China, dam slope protection is composed of stones and other material. Rock size ranges from 15 to 40 cm. The riprap is 20 to 60 cm thick and rests on a layer of crushed stone 30 to 60 cm thick. These protective revetments frequently suffer major damage from thermal ice thrust (Sui Xian-Zhi, 1988a), generally in early and late winter. The ice cover can be as much as 0.35 m thick in mid-November and 1.3 m in late winter. Horizontal thrust can cause the ice to ride right up to the top of the dam, causing major damage. Maximum pressures recorded at the different dams range from 35.3 kN/m to 264.9 kN/m (Sui Xian-Zhi, 1988b).

Rose (1946) states that a drop in water level can provoke cracking and break the continuity of the ice cover, considerably reducing thermal ice pressure on riprap.

Ice thrust is often reported in coastal regions and in large lakes. Ice blocks can ride up the shoreline and cause considerable damage (Sokolov, 1970; Sodhi *et al.*, 1984; Goldthwait, 1957).

Pour minimiser les dégâts causés par la montée des glaces sur les talus, la surface du riprap doit être régulière et les blocs d'enrochement bien entremêlés. De plus, les forces de cisaillement sur les blocs sont réduites si la pente du riprap ne dépasse pas 1V : 1.7H (McDonald, 1988).

3.5.6. Comportement du riprap dans les climats nordiques

L'enquête la plus récente sur le comportement du riprap dans les milieux nordiques a été entreprise par ACRES en 1988 pour l'Association Canadienne d'Électricité. 37 organismes ont répondu au questionnaire, dont 17 au Canada et 20 à l'étranger. Des données d'étude ont été fournies par 12 réponses provenant du Canada et 14 réponses provenant de l'étranger. De plus, le riprap de 22 barrages à travers le Canada a été inspecté.

L'analyse des informations obtenues montre que les causes les plus fréquentes des dégâts survenus au riprap sont la fracture des blocs par l'action du gel et du dégel, le sous-dimensionnement de l'enrochement contre l'action des vagues et la mauvaise mise en place de l'enrochement. Au Canada, la fracture des enrochements du riprap due au gel et dégel survient surtout en Alberta, au Manitoba et dans le sud de l'Ontario où les roches calcaires et le grès ont été utilisés. Les roches ignées du Bouclier Canadien qu'on utilise à la Baie James sont très peu affectées par l'action du gel et du dégel.

L'enquête révèle que le nombre de cas de dégâts constatés sur du riprap et causés par les glaces est très limité, compte tenu du nombre de barrages en service dans les milieux nordiques. Ces cas sont résumés ci-dessous :

Aménagement	Description des dégâts
Grand Rapids (Manitoba)	La montée du niveau du réservoir d'environ 2 m a produit des dégâts notables au riprap $D_{100} = 1$ m, $D_{50} = 0,6$ m, dus à la montée de la couverture de glace arrachant les blocs d'enrochement qui y étaient collés. La couverture de glace était de l'ordre de 0,7 m.
Cook Inlet (Alaska)	Des marées de 12 m d'amplitude ont arraché des blocs d'enrochement du riprap le long de la voie ferrée en Alaska ; la couverture de glace avait 0,6 – 0,9 m d'épaisseur. Un poids minimal de 2 700 kg pour les blocs d'enrochement est nécessaire pour prévenir la perte de riprap.
Barrage Rivers (Manitoba)	Des dégâts causés par les poussées des glaces furent notés par Prairie Farm Rehabilitation Administration. Les dimensions du riprap étaient $D_{100} = 0,45$ m, $D_{50} = 0,32$ m ; épaisseur moyenne = 0,50 m.
Barrage Dickson (Alberta)	Des dégâts causés par les poussées des glaces à la protection du talus constituée de blocs de béton furent notés sur la digue Sud de pente 1V : 4H

To minimize damage from ice ride-up, the surface of the riprap should be even and the stones interlocked. In addition, shear forces on the stones can be reduced by installing riprap with a slope of less than 1V:1.7H (McDonald, 1988).

3.5.6. Riprap performance in northern climates

The most recent investigation of riprap performance in northern environments was conducted by ACRES in 1988 for the Canadian Electrical Association. Thirty-seven organizations responded to ACRES' questionnaire, 17 Canadian and 20 foreign organizations. Study data was obtained from 12 of the Canadian respondents and 14 of the foreign respondents. In addition, riprap on 22 dams across Canada was inspected.

Compilation of the information obtained showed that the most frequent causes of riprap damage were breaking of stones due to freeze-thaw action, undersizing of rock subject to wave action and incorrect placement of stones. In Canada, breakage of stones due to freeze-thaw action occurs mainly in Alberta, Manitoba and southern Ontario, where limestone and sandstone rock is used. The igneous rock of the Canadian Shield, used in the James Bay territory, is not much affected by freeze-thaw action.

The investigation showed there are few documented cases of riprap damaged by ice, relative to the number of dams operating in northern environments. These few cases are summarized below.

Project	Damage
Grand Rapids, Manitoba	A rise in reservoir level of about 2 m resulted in significant damage to riprap with $D_{100} = 1$ m and $D_{50} = 0.6$ m; when the ice cover rose, stones frozen to it were plucked. The ice cover was about 0.7 m thick.
Cook Inlet, Alaska	Tides with a range of 12 m ripped stones from riprap along the Alaska railway; ice cover was 0.6 to 0.9 m thick. Minimum rock weight to prevent loss of riprap is 2 700 kg.
Rivers Dam, Manitoba	The Prairie Farm Rehabilitation Administration reports damage caused by ice thrust. Riprap was sized $D_{100} = 0.45$ m and $D_{50} = 0.32$ m. Average ice thickness was 0.5 m.
Dickson Dam, Alberta	Concrete-block slope protection (1V:4H) on the south dike was damaged by ice thrust and a pressure ridge formed in the reservoir at the same time.

	concurrentement avec la formation d'une crête de pression dans le réservoir. Aucun dommage n'a été causé au riprap adjacent avec $D_{100} = 0,7$ m, $D_{50} = 0,4$ m.
Barrage Gavins Point (Nebraska)	Le personnel de l'US Corps of Engineers a relaté des dégâts causés à un petit riprap ($D_{50} = 0,3$ m).
Retenue Little Bow (Alberta)	Dégâts causés au riprap par la poussée des glaces. Pas de détails.

La glace est considérée comme un des facteurs ayant contribué aux dégâts subis par le riprap à la centrale R.H. Saunders et à Little Long Rapids en Ontario.

Au Québec, l'inspection de barrages pendant plus de 20 ans (MacKenzie, 1970) a révélé des dégâts importants sur du riprap, comme mentionné au chapitre 3.5.3.

L'analyse des dégâts causés par l'action des glaces semble faire ressortir une certaine corrélation entre le D_{50} du riprap et l'épaisseur de la couverture de glace. Si le D_{50} est inférieur à l'épaisseur de la couverture, le riprap peut être endommagé par la glace.

ACRES (1988) a fait aussi une enquête sur la pratique de conception du riprap. Parmi les onze organismes qui ont répondu à l'enquête, dix considèrent uniquement l'action des vagues pour le dimensionnement de l'enrochement. Seul Hydro-Québec imposait un poids minimal W_{50} de 454 kg pour tenir compte de l'effet des glaces lors de la conception du riprap à Manic 3, Outardes 2 et LG 2.

3.6. APPLICATION AUX OUVRAGES HYDRAULIQUES

Ce chapitre est consacré aux poussées des glaces utilisées dans la conception des prises d'eau, évacuateurs de crue, ouvrages de réglage et barrages en béton du complexe La Grande situé dans la partie occidentale et subarctique du Québec (Canada). Le climat de cette région est de type continental froid, caractérisé par des saisons fortement contrastées. La température moyenne annuelle se maintient aux environs de -4°C , alors qu'en janvier la température moyenne est de -23°C . En hiver, le mercure peut descendre jusqu'à -50°C .

En plus des poussées des glaces, on abordera la question du diamètre minimal de l'enrochement utilisé pour le riprap de protection des ouvrages de retenue.

3.6.1. Forces dues à l'expansion thermique

En hiver, le gel des réservoirs du complexe La Grande a lieu en général au début de décembre et la couverture de glace disparaît presque complètement au début de juin. En moyenne l'épaisseur de glace dans les réservoirs atteint 0,8 m à la fin de janvier et 1,0 m vers la mi-avril, date à partir de laquelle la couche de glace commence à fondre.

Adjacent riprap sized $D_{100} = 0.7$ m and $D_{50} = 0.4$ m was not damaged.

Gavins Point Dam,
Nebraska

Staff of the US Army Corps of Engineers reported damage to small riprap ($D_{50} = 0.3$ m) by ice thrust.

Little Bow Reservoir,
Alberta

Riprap damaged by ice thrust but no details reported.

Ice is considered to be one of the factors responsible for damage of the riprap at the R.H. Saunders and the Little Long Rapids power plants in Ontario.

Inspections of dams in Quebec over more than twenty years (MacKenzie, 1970) showed significant riprap damage as mentioned in section 3.5.3.

The review of damage caused by ice action seems to suggest a correlation between D_{50} of the riprap and the thickness of the ice cover. If D_{50} is less than ice thickness, then the riprap may be damaged by the ice.

ACRES (1988) also investigated riprap design practices. Of the 11 organizations that responded to ACRES' survey, 10 consider only wave action when sizing the rock. Hydro-Québec adopted a minimum rock weight W_{50} of 454 kg to account for ice effect when designing riprap for the Manic 3, Outardes 2 and La Grande 2 developments.

3.6. TYPICAL APPLICATION TO HYDRAULIC STRUCTURES

This section describes ice forces used to design intakes, spillways, control structures and concrete dams of La Grande complex in western, subarctic Quebec, Canada. The climate in the region is cold and continental with enormous variation in temperature between seasons. Mean annual temperature is about -4°C . Mean temperature in January is -23°C , and winter temperatures sometimes drop as low as -50°C .

In addition to ice forces, minimum rock diameter for riprap on the retaining structures of La Grande complex is presented.

3.6.1. Forces induced by thermal expansion

The reservoirs of La Grande complex generally freeze over in early December. By early June the ice cover has almost completely disappeared. By late January, the ice is an average 0.8 m thick. By mid-April, when the ice begins to melt, the ice is an average 1.0 m thick.

La poussée maximale théorique exercée par l'expansion thermique de la glace a été calculée en se référant aux données météorologiques de la région. Les critères, retenus à la suite d'analyses historiques et spécifiques au site des conditions météorologiques et de la glace, sont les suivants :

- température initiale de l'air -37°C
- augmentation de la température de l'air -37°C à -17°C
- durée de l'augmentation de la température 7 heures
- épaisseur maximale de la glace (exempte de neige) 0,6 m

Dans ces conditions, la méthode de calcul décrite dans le paragraphe 3.2 donne une poussée théorique maximale de 223 kN/m pour une couverture de glace saine parfaitement confinée.

Un facteur de réduction a été considéré dans l'évaluation des poussées pour tenir compte des fissures et des défauts internes de la couverture de glace qui augmentent avec son étendue. De plus, ce facteur dépend aussi du degré de confinement de la couverture de glace imposé par les ouvrages (fonction de leur type : rigide, semi-rigide ou souple, et de leur pente) et par les berges du réservoir (nature des berges, pente et géométrie en plan du rivage par rapport aux ouvrages). Dans le cas du complexe La Grande, les poussées suivantes ont été retenues pour la conception de 2 types d'ouvrages :

i) *Prises d'eau et barrages en béton*

Pour ces grands ouvrages rectilignes et rigides, on a choisi une poussée de 150 kN/m exercée par une couverture de glace de 0,6 m d'épaisseur. Une telle poussée pourrait s'exercer sur les prises d'eau quand la centrale n'est pas en service pendant une longue période.

Pour les ouvrages souples comme les barrages en enrochement et digues, les poussées d'origine thermique ne sont pas prédominantes dans le calcul de la stabilité.

ii) *Piles des évacuateurs de crue et ouvrages de réglage*

a) Force frontale

La force frontale d'expansion thermique exercée sur une pile par une couverture de glace de 0,6 m d'épaisseur est donnée par la relation suivante :

$$U = 150 \tau B$$

- où U : force horizontale d'expansion thermique (kN/m) ;
τ : facteur d'indentation défini à l'équation 3.10 ;
B : largeur de la pile (m).

A cette force, il faut ajouter la poussée d'expansion thermique qui est transmise indirectement par deux demi-vannes à la pile centrale et pas une demi-vanne à la pile d'extrémité.

Meteorological data for the region were used to calculate theoretical maximum thrust from thermal expansion of the ice. On the basis of historical and site-specific analyses of weather and ice conditions, the following criteria were adopted:

- Initial air temperature -37°C
- Air temperature rise -37°C to -17°C
- Duration of temperature rise 7 hours
- Maximum ice thickness (free of snow) 0.6 m

With these conditions, the method of calculation described in section 3.2 yields a maximum theoretical thrust of 223 kN/m for a sound, completely constrained ice cover.

A reduction factor was considered in the thrust calculations to account for cracks and internal faults in the ice cover, which increase with the size of the ice cover. The reduction factor also depends on the degree to which the ice cover is restrained by the structures (as a function of slope and type of structure: rigid, semi-rigid or flexible) and by the banks of the reservoir (nature of bank material, slope and geometry of the shoreline relative to the structures). Design thrust for two types of structures at La Grande complex is described below.

i) *Intakes and concrete dams*

For these large, rigid, rectilinear structures, a design thrust of 150 kN/m exerted by an ice cover 0.6 m thick was selected. Such a force could be exerted on an intake if the power plant was not in operation for any length of time.

For flexible structures such as dikes and rockfill dams, thermal thrust is normally not a major factor in stability calculations.

ii) *Piers of spillways and control structures*

a) Horizontal force

The following formula gives horizontal thermal expansion thrust exerted directly on a pier by an ice cover 0.6 m thick:

$$U = 150 \tau B$$

where U : Horizontal thermal expansion thrust (kN/m)
 τ : Indentation factor defined in equation 3.10
 B : Width of pier (m)

To this must be added the thermal expansion thrust transferred indirectly by two gate half-widths to the central pier and by one gate half-width to the end pier.

b) Force latérale

Lorsqu'il peut y avoir absence temporaire d'une partie ou de toute la couverture de glace entre 2 piles, il est alors nécessaire de considérer, pour l'analyse de la stabilité latérale de la pile, une poussée d'expansion thermique latérale égale à 185 kN/m exercée par une couverture de glace de 0,6 m d'épaisseur.

Les forces données ci-dessus s'appliquent à une couverture de glace semi-confinée, c'est-à-dire quand celle-ci est confinée par les berges dans la direction transversale à l'ouvrage, mais s'allonge longitudinalement au réservoir. Si la couverture de glace est assez bien confinée, les poussées qui s'appliquent aux prises d'eau, barrages et piles sont portées à 250 kN/m pour la force frontale et 310 kN/m pour la force latérale. Ce cas peut survenir lorsque le canal d'aménée reliant l'ouvrage au réservoir comporte un goulot d'étranglement.

On a considéré que la poussée d'origine thermique s'appliquait à toute la hauteur de marnage du réservoir.

3.6.2. Forces verticales dues aux variations du niveau d'eau

Dans le cas du complexe La Grande, les niveaux des réservoirs baissent lentement et graduellement au cours de l'hiver. La glace adhérant aux ouvrages induit des forces verticales descendantes qui augmentent la stabilité des ouvrages. Ces forces sont faibles par rapport aux autres forces intervenant et ne sont pas considérées dans le calcul de la stabilité.

Dans d'autres cas, les forces verticales peuvent être déterminantes dans le dimensionnement de certains ouvrages. Trois exemples sont présentés ci-dessous :

En hiver, lors des variations du niveau d'eau, une couverture de glace adhérant aux pieux d'un quai peut générer des forces énormes qui risquent de les endommager. Par exemple, pour un pieu de quai de 0,5 m de diamètre, une couverture de glace de 1,0 m d'épaisseur et une contrainte ultime de flexion de la glace de 1 125 kPa (Tableau 1), l'application de l'équation 3.11 donne une force verticale maximale de 1 530 kN.

Dans le cas où la glace agit sur un mur, la couverture de glace de 1 m d'épaisseur ayant une contrainte ultime de flexion de 1 125 kPa induit, lors de la descente ou de la remontée du niveau d'eau, une force verticale maximale de 25 kN par mètre de longueur de mur.

La formation de glace sur les parois d'un ouvrage dans la zone de marnage du réservoir peut engendrer aussi une force verticale importante. Une couche de glace de 1 m d'épaisseur sur une hauteur de 10 m exerce une force verticale d'environ 90 kN par mètre de mur.

3.6.3. Forces dynamiques dues aux glaces

Les forces d'impact des glaces s'appliquent en général aux piles des évacuateurs de crue et des ouvrages de réglage. Dans certains cas, celles-ci peuvent agir sur les faces amont des prises d'eau et des vannes.

b) Lateral force

For pier lateral stability analysis, a lateral thermal expansion thrust of 185 kN/m was assumed to be exerted by an ice cover 0.6 m thick. This condition assumes that the other side of the pier has little or no ice cover.

The forces described above were applied to a semi-constrained ice cover, that is, an ice cover extending longitudinally to the reservoir but restrained by shoreline transversal to the structure. Where the ice cover was more fully constrained, the horizontal force exerted on intakes, dams and piers was increased to 250 kN/m and the lateral force to 310 kN/m. This can occur when the headrace canal connecting structure and reservoir includes a bottleneck.

Thermal thrust was considered to be exerted over the entire height of the reservoir drawdown zone.

3.6.2. Vertical forces due to change in water level

Water level in the reservoirs of La Grande complex drops slowly and gradually over the course of the winter. Ice frozen to the structures exerts vertical drawdown forces that stabilize the structures. These forces are weak compared to other forces at work and are not considered in stability calculations.

Vertical forces can sometimes, however, be determinant in sizing a structure. Three examples are described below.

When water level fluctuates in winter, an ice cover frozen to the pile of a dock can exert enormous force, enough to damage the pier. For example, an ice cover 1.0 m thick with yield bending stress of 1125 kPa (Table 3.1) exerts a maximum vertical force of 1530 kN on a dock pile 0.5 m in diameter (according to equation 3.11).

When acting on a wall, an ice cover 1 m thick with yield bending stress of 1125 kPa exerts a maximum vertical force of 25 kN/m over the length of the wall when water level rises and falls.

Icing over of the walls of a structure in the reservoir drawdown zone can also generate substantial vertical force. An one meter layer of ice 10 m high exerts a vertical force of 90 kN per metre of wall length.

3.6.3. Dynamic ice forces

The piers of spillways and control structures are generally subject to ice impact forces. Sometimes the impact force is exerted on the upstream face of the intake and the gates.

i) *Prises d'eau*

En général, le plan d'eau dans le canal d'amenée reliant la prise d'eau au réservoir n'est pas gelé à cause du soutirage de l'eau au-dessus du point de congélation et des vitesses d'écoulement suffisamment élevées pour permettre un bon mélange des eaux dans le canal. Au cours de l'hiver, des bordures de la couverture de glace du réservoir peuvent se détacher de temps à autre et venir heurter, sous l'action des courants, la paroi des prises d'eau. Ces blocs de glace sont souvent minces et de petites dimensions et se déplacent normalement à la même vitesse que l'eau, c'est-à-dire à une vitesse inférieure à 1 m/s à l'approche de la prise d'eau. Les forces d'impact de ces blocs sur la paroi des prises d'eau sont minimales.

Toutefois, il peut arriver qu'un immense bloc de glace se détache du réservoir et vienne heurter la prise d'eau sous l'action de vents violents. Ces forces d'impact peuvent être élevées. Une immense plaque de glace de 1 m d'épaisseur soufflée par le vent, qui heurte la paroi verticale de la prise d'eau sur une largeur effective de 3 m et dont la résistance ultime à la rupture à la compression est de 1 500 kPa, engendre une force maximale de 4 500 kN.

La force locale d'impact des glaces est utilisée pour vérifier l'intégrité structurale des prises d'eau. En pratique, celle-ci n'est pas prédominante dans le calcul des ouvrages de prise d'eau du complexe La Grande.

ii) *Piles des évacuateurs de crue et des ouvrages de réglage*

L'évaluation des forces maximales d'impact présuppose qu'une immense plaque de glace heurte les piles et continue à se déplacer à travers celles-ci.

Pour une pile verticale et de forme elliptique ayant pour dimensions $A = 3,65$ m et $B = 4,25$ m (voir paragraphe 3.4.4), une immense plaque de glace à la dérive de 1 m d'épaisseur, avec une résistance ultime à la compression de 1 500 kPa, engendre des forces maximales d'impact qui s'élèvent à :

- force frontale H : 7 800 kN
- force transversale T : 1 900 kN

La résistance de la glace à l'écrasement est évaluée en tenant compte de l'état de la glace lors de l'impact. Les normes canadiennes CAN/CSA-S6-88 recommandent d'utiliser les contraintes effectives suivantes :

- a) 400 kPa quand la débâcle se déclenche avec des températures au-dessus de 0°C et que la structure de la glace est affaiblie d'une manière substantielle ;
- b) 700 kPa quand la débâcle se déclenche avec des températures au-dessus de 0°C et que la structure de la glace n'est que légèrement affaiblie ;
- c) 1 100 kPa quand la débâcle ou de très grands déplacements de glace se produisent avec des températures au-dessus de 0°C, la glace se déplaçant en très grandes plaques qui sont encore solides ;
- d) 1 500 kPa quand la débâcle et de très grands déplacements de glace se produisent, la température moyenne, dans l'épaisseur totale de la glace, restant sensiblement au-dessous du point de congélation.

Note : Si l'on prévoit que la température de la glace sera inférieure à -2°C ou -3°C, des résistances plus élevées peuvent être appropriées.

i) *Intakes*

The water in the headrace canal connecting intake and reservoir does not generally freeze because the average reservoir water temperature is normally above 0°C, and the flow velocity is sufficiently high to fully mix the water in the canal. From time to time during the winter, pieces of ice may break off the edges of the reservoir ice cover and collide with the face of the intake under the action of the current. Such pieces of ice are often thin and small, and they generally move at the speed of the water, that is, less than 1 m/s near the intake. The force exerted on the intake face as a result of the impact of such pieces of ice is minimal.

Sometimes, however, an immense ice floe breaks off the reservoir ice cover and is driven against the intake by a violent wind, generating a substantial impact force. A large immense ice floe 1 m thick with a yield compressive strength of 1 500 kPa that is driven by the wind and collides with the vertical face of the intake over an effective width of 3 m generates a maximum force of 4 500 kN.

The local ice impact force is used to check the structural integrity of an intake. In practice, this was not a major factor in the design of La Grande complex intake structures.

ii) *Piers of spillways and control structures*

Maximum impact forces are estimated by assuming that an immense ice floe collides with the piers and continues to move through them.

An immense drifting ice floe 1 m thick with yield crushing strength of 1 500 kPa generates the following maximum impact forces when it collides with a typical vertical, elliptical pier at La Grande complex sized A = 3.65 m and B = 4.25 m (see section 3.4.4):

- Horizontal thrust H 7 800 kN
- Transversal force T 1 900 kN

The condition of the ice at the time of impact must be considered when estimating ice crushing strength. Canadian standards CAN/CSA-S6-88 recommend the following effective stresses as guidelines:

- a) About 400 kPa where breakup occurs at melting temperatures and the ice is substantially disintegrated in its structure
- b) About 700 kPa where breakup occurs at melting temperatures and the ice is somewhat disintegrated in its structure
- c) About 1 100 kPa where breakup or major ice movement occurs at melting temperatures but the ice moves in large pieces and is internally sound
- d) About 1 500 kPa where breakup or major ice movement may occur with the ice temperature averaged over the depth measurably below the melting point

Note: If ice temperature is expected to be lower than about -2 or -3°C, even higher strengths may be appropriate.

Ces valeurs semblent recouper celles données dans le code soviétique (1983) et reproduites au Tableau 1.

3.6.4. Riprap

Lors de la réalisation des ouvrages de retenue de la 1ère phase du complexe La Grande, l'action de la glace sur le riprap a été prise en considération. Une valeur minimale W_{50} égale à 454 kg (ou $D_{50} = 0,65$ m) a été spécifiée pour assurer la protection contre l'érosion qui pourrait être causée par la glace. Ce critère avait été établi en se basant sur l'expérience d'Hydro-Québec concernant la protection des berges. Cependant, pour ce site particulier, des blocs d'enrochement de grandes dimensions sont requis pour la protection normale contre les vagues.

3.7. REFERENCES

- ACRES H.G. LIMITED. 1971. "Review of Current Ice Technology and Evaluation of Research Priorities". *Inland Water Branch, Department of the Environment, Ottawa, Report Series No.17.*
- ACRES INTERNATIONAL LTD. 1988. "Performance of Riprap in Northern Climates". *Canadian Electrical Association. CEA No. 625 G571.*
- ACRES LIMITED. 1971. "Review of Current Ice Technology and Evaluation of Research Priorities". Report Series No. 17, prepared for *Inland Waters Branch, Department of Environment, Ottawa, Canada.*
- AFANS'YEV, V.P., YU, V. & SHVAYSHTEYN DOLGOPOLOV, Z.I. 1971. "Davleniye l'da na morskive otdel'no stoyaschchye opory." [Ice Pressure on Isolated Structures in the Sea.] *Trudy Arkticheskogo i Antark ticheskogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta, Vol 300, p. 61-80.* English Translation: US CRREL, draft translation 346, 1972.
- BERCHA, F.G. & DANYS, J.F. 1976. "Investigation of Ice Forces on a Conical Offshore Structure". *Ocean Engineering, Vol. 3, No. 5, p.299-310.*
- BERGDAHL, L. 1977. "Thermal Ice Pressure in Lake Ice Covers". *Department of Hydraulics, Chalmers University of Technology, Sweden.*
- BERNDTSSON, O. 1986. "Degradation of Embankment Dams in Cold Climates". *Seminar on Dams. State Power Board of Sweden, Stockholm.*
- BERNEL, L. 1973. "Construction of Slope Protection on Swedish Rockfill Dams". *Eleventh International Congress on Large Dams, Vol. III, Q.42, R.25, Madrid.*
- BILLFALK, L. 1981. "Formation of Shore Cracks in Ice Covers Due to Changes in Water Level". *IAHR Ice Symposium, Quebec City, Canada, Vol. 2, p. 650-660.*
- BROWN, E. & CLARKE, G. 1932. "Ice Thrust in Connection with Hydro-Electric Plant Design", *Engineering Journal, USA.*

These values agree closely with those of the U.S.S.R design standards (1983), shown in Table 3.1.

3.6.4. Riprap

Ice action on riprap was considered when the retaining structures of Phase I of La Grande complex were built. A minimum W_{50} of 454 kg (or $D_{50} = 0.65$ m) was specified for protection against ice erosion. This criterion was based on Hydro-Québec experience with shoreline protection. However, for this particular site, large stone were required due to "normal wave protection."

- CARTER, D. 1975. "Study of Ice Forces on Conical Lightpiers and Other Marine Structures". Report prepared for *Ministry of Transport, Marine Services*, Ottawa, Canada, 75 p.
- CARTER, D. 1986. "Ice Forces on Fixed Structures and Ship Hulls". Report TP7457E, prepared for *Transportation Development Centre, Ministry of Transport*, Montreal, Canada, 41 p.
- CARTER, D. 1987. "Mathematical Model for Predicting Icebreaker Performance". Report TP8531E, prepared for *Transportation Development Centre, Ministry of Transport*, Montreal, Canada, 101 p.
- CARTER, D. 1990a. "Parametric Study of Icebreaking Bow Forms". Report TP10193E, prepared for *Transportation Development Centre, Ministry of Transport*, Montreal, Canada, 87 p.
- CARTER, D. 1990. "Capacité portante et action des glaces sur les ouvrages hydrauliques", Rapport interne, *Société d'Énergie de la Baie James*, Montréal, Québec, Canada.
- CARTER, D. and B. MICHEL. 1971. "Lois et mécanismes de l'apparente fracture fragile de la glace de rivière et de lac". *Laval University, Faculty of Science, Civil Engineering Department, Ice Mechanics Section*, Report S-22.
- CHRISTENSEN, F.T. 1987. "Vertical Ice Forces on Long Straight Walls". *Cold Regions Science and Technology*, 13, 1987, p. 215-218.
- CROASDALE, K., MORGENSTERN, N. & NUTTALL, J. 1977. "Indentation Tests to Investigate Ice Pressures on Vertical Piers". *Journal of Glaciology*, Vol. 19, No. 81, Cambridge, UK.
- CROASDALE, K. 1980. "Ice Forces on Fixed, Rigid Structures". Special Report 80-26 prepared by *IAHR Section on Ice Problems*, published by US Army Corps of Engineers CRREL, Hanover, USA.
- DAMRON, F.J. 1987. "Design/Construction Considerations for Subarctic Wastewater Plant". *ASCE Journal of Cold Regions Engineering*, Vol. 1, No. 3, September.

- DANYS, J.V. 1971. "Effect of Cone-Shaped Structure on Impact Forces of Ice Floes". *First Conf. Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, Trondheim, Norway.
- DORSEY, N.E. 1940. "Properties of Ordinary Water Substances". *Reinhold Publ. Corp.* New York, USA.
- DROUIN, M. 1970. "Les poussées d'origine thermique exercées par les couverts de glace sur les structures hydrauliques". Doctoral dissertation, *Laval University*, Québec, Canada.
- FREDERKING, R. 1979. "Dynamic Ice Forces on an Inclined Structure in Physics and Mechanics of Ice". *IUTAM Symposium*, Copenhagen, p. 104-116.
- GATTO, L.W. 1982. "Reservoir Bank Erosion Caused and Influenced by Ice Cover". *US Army Corps of Engineers, CRREL*, Special Report 82-31.
- GLEN, J.W. 1958. "The Mechanical Properties of Ice, The Plastic Properties of Ice". *Advances in Physics*, Vol. VII, No. 25-28, London.
- GLEN, J.W. 1974. "The Physics of Ice". *Cold Regions Science and Engineering Monograph 11-C2a*, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H.
- GOLD, L.W. 1976. "Engineering Properties of Fresh-Water Ice". *Symp. on Applied Glaciology*, Cambridge, 13-17 Sept. Published in *Journal of Glaciology*, Vol. 19, No. 81, 1977, p. 197-211.
- GOLD, L.W. 1977. "Engineering Properties of Fresh-Water Ice". *Journal of Glaciology*, Vol. 19, No. 81, Cambridge, England, p. 197-211.
- GOLD, L.W. 1988. "On the Elasticity of Ice Plates". *Revue canadienne de Génie civil*. Vol. 15, No.6, Ottawa, Canada, p. 1080-1084.
- GOLDTHWAIT, L. 1957. "Ice Action on New England Lakes." *Journal of Glaciology*, Vol. 3, No.22.
- HETÉNYI, M. 1946. "Beams on Elastic Foundation". Ann Arbor, Michigan, *University of Michigan Press*.
- HOFF, T. 1985. "Erosion and Leakage Problems on Some Norwegian Dams". *Fifteenth International Congress on Large Dams*, Vol. IV, Q.59, R.36, Lausanne.
- KJELDGAARD, J. & CARSTENS, T. 1980. "Thermal Ice Forces". Special Report 80-26, prepared by *IAHR Section on Ice Problems*, published by US Army Corps of Engineers, CRREL, Hanover, USA.
- KONDRAT'EV V.M. *et al.* 1982. "Dynamics of the Formation of an Ice Prism on Reservoir Slopes of a Pumped-Storage Station". *Hydrotechnical Construction*.
- KORZHAVIN, K.N. 1962. "Voxdeystviye l'da na inshenernyye sooruzheniya". [Action of Ice on Engineering Structures.] *Novosibirsk, Isdatel'stvo Sibirskogo Otdel Akademiye Nauk SSSR*. English translation US CRREL, draft translation 260, 1971.

- LINDGREN, S. 1968. "Effects of Temperature Increase on Ice Pressure". *The Institute for Hydraulic Engineering*, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- LLIBOUTRY, L. 1964. "Traité de glaciologie", Vol. 1: *Glace, Neige, Hydrologie nivale*. Masson, Paris, France.
- LOFQUIST, B. 1954. "Studies of the Effects of Temperature Variations". Paper 2656, *ASCE Symposium on Ice Pressure against Dams*, ASCE, New York, NY, USA.
- MACKENZIE, I.D. 1970. "In-Service Inspection and Restoration of Dams and Flow Control Works". *Tenth International Congress on Large Dams*, Vol. III, Q.38, R.53, Montreal.
- MCDONALD, G.N. 1988. "Riprap and Armor Stone". *Technical Council on Cold Regions Engineering Monograph*.
- MEYERHOF, G.G. 1960. "Bearing Capacity of Floating Ice Sheets". Proc. of the American Society of Civil Engineers, *Journ. of the Mechanics Division*, New York, NY, Vol. 86, EM5, p. 113-145.
- MICHEL, B. 1970. "Ice Pressure on Engineering Structures". *Cold Regions Science and Engineering Monograph III-B1b*, US Army Corps of Engineers, CRREL, Hanover, USA.
- MICHEL, B. 1978. "Ice Mechanics". *Les Presses de l'Université Laval*, Québec.
- NATIONAL STANDARD OF CANADA: "Design of Highway Bridges". 1988. CAN3-S6-M88, *Canadian Standards Association*.
- NEVEL, D.E. 1961. "The Narrow Free Infinite Wedge on an Elastic Foundation". *US Army Corps of Engineers, CRREL Reserach Report 79*.
- NEVEL, D.E. 1972. "The Ultimate Failure of a Floating Ice Shear". *IAHR Symposium, Ice and Its Action on Hydraulic Structures*, Leningrad, USSR, 26-29 Sept. 1972.
- NEVEL, D.E. 1979. "Bending and Buckling of a Wedge on an Elastic Foundation". *IUTAM Symposium on the Physics and Mechanics of Ice*. Technical University of Denmark, Copenhagen, 6-10 Aug. 1979.
- NORTHUMBERLAND CONSULTANTS LTD. 1966. "Investigation of Marine Structures Along the Coast of Newfoundland and the Gaspé Coast".
- PRANDTL, L. 1920. *Nachr. Ges. Wiss. Gottingen*, 74.
- RALSTON, T.D. 1977. "Ice Force Design Considerations for Conical Offshore Structures". *Fourth POAC Conference*, St. John's, Newfoundland, p. 741-752.
- ROSE, E. 1946. "Thrust Exerted by Expanding Ice Sheet". *ASCE Transactions*.
- ROSE, E. 1947. "Thrust Exerted by Expanding Ice Sheet". *Journal of ASCE*, Vol. 112, p. 871.

- ROSSINSKIJ, K.I. 1977. "Particularité de la formation de glace dans les réservoirs à fort marnage". Translated by B.A. Saharov.
- SODHI, D.S. & KOVACS, A. 1984. "Forces Associated with Ice Pile-up and Ride-up". *IAHR Ice Symposium*, Hamburg, Germany.
- SOKOLOV, I.N. 1970. "Ice Conditions in Reservoirs of Pumped-Storage Power Plants". *Symposium on Ice and Its Action on Hydraulic Structures*. Reykjavik, Iceland.
- SUI XIAN-ZHI. 1988a. "Frost Destruction and Its Prevention: Reservoir Revetment in Plain Area". *IAHR Ice Symposium*, Sapporo, Japan.
- SUI XIAN-ZHI. 1988b. "Study of Ice Static Pressure on Ice Cover in Reservoir". *IAHR Ice Symposium*, Sapporo, Japan.
- STAROSOLSKY, O. 1970. "Ice in Hydraulic Engineering". Division of Hydraulic Engineering, *Norwegian Institute of Technology*, Report No. 70-71, Trondheim, Norway.
- STEFAN, J. 1889. "Über die Theoriem des Eisbildung insbesondere uber die Eisbildung in Polarmeere". *Wien Sitzunsber, Akad. Wiss., Ser. A., Vol. 42, pt 2, p. 965-983*.
- TRYDE, P. 1977. "Ice Forces". *Journal of Glaciology*, Vol. 19, No. 81, p. 257-264.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1984. "Shore Protection Manual". *Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, Vol. 2*.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1949. "Shore Protection for Earth Dams": Preliminary Report. *Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi*.
- USBR. 1987. "Design of Small Dams". US Department of the Interior, *Bureau of Reclamation, Denver, CO*.
- USSR DESIGN STANDARDS. 1983. "Load Exerted on Hydraulic Structures by Waves, Ice and Ships". SNIp2. 06.04.82, *Construction Standards and Rules*, Translated by National Research Council, Division of Building Research, Ottawa, Canada.
- USSR, CODE SNIp2-06-04-82. 1983. "Construction Standards and Rules: Loads Exerted on Hydraulic Structures by Waves"...
- VERRETTE, J.L., STANDER, E., HODGESON, M., BOURBEAU, P. 1993. "Étude de la poussée d'un couvert de glace sur les ouvrages de retenue", Rapport GCT-93-17. Prepared for Hydro-Québec by the Division Géologie et Structures, *Lab. Mécanique des glaces, Départ. Génie civil, Univ. Laval*.
- VONOKOV, V.K. 1981. "Hydrometeorological Conditions of Formation and Destruction of Multilayer Ice on Slopes of the Reservoir at the Kiev Pumped-Storage Station". *Hydrotechnical Construction*.
- WEEKS, W.F. & ASSUR, A. 1969. "Fracture of Lake and Sea Ice". Research Report 269, *US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H.*

- WUEBBEN, J.L. Chapter31: "Ice Effects on Riprap" Presented in book titled:
"River, Coastal and Shoreline Protection: Erosion Control Using Riprap and
Armorstone" (To be published by John Wiley and Sons Ltd. New York, NY.).
- XU BOMENG. 1986. "Design Value of Pressure Due to Expansion of Ice Sheet in
Reservoir". *IAHR Ice Symposium 1986*, Iowa Institute of Hydraulic Research,
University of Iowa, Iowa City, Iowa, USA.
- YAMAOKA, I., FUJITA, M. and HASEGAWA, K. 1988. "Measurement of Thermal Ice
Thrust Exerted by Expanding Ice Cover in Taisetsu Dam Reservoir in
Hokkaido", Japan. *IAHR Ice Symposium*, Sapporo, Japan.

4. RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION ET L'EXPLOITATION DES VANNES

4.1. FORCES EXERCÉES PAR LES GLACES

Une vanne exposée à l'air libre, comme une vanne d'évacuateur de crue, doit être conçue pour résister à 2 types de forces :

- forces dues à l'expansion thermique de la couverture de glace ;
- forces d'impact causées par les glaçons à la dérive.

En général, les poussées d'expansion thermique par unité de longueur sur une vanne sont estimées à 50 % de celles agissant sur une pile d'évacuateur de crue (Inland Waters Directorate, 1971). Ceci peut s'expliquer par la position des vannes qui est située en retrait et donc moins exposée qu'une pile d'évacuateur. Comfort et Abdelnour (1994) ont mesuré pendant deux hivers les poussées d'expansion thermique agissant sur une pile et une vanne du barrage Paugan d'Hydro-Québec. Les valeurs moyennes des poussées sur la pile représentaient 2 à 5 fois celles exercées sur la vanne.

Les forces d'impact devraient être aussi considérées dans la conception d'une vanne servant à régler les débits. Celles-ci peuvent être beaucoup plus élevées que les poussées d'expansion thermique. Elles doivent être évaluées minutieusement en fonction des conditions particulières de glace au site, car une surestimation des forces d'impact peut augmenter démesurément le coût d'une vanne.

Pour les aménagements du complexe La Grande, on a considéré une poussée d'expansion thermique de 150 kN/m agissant sur le tablier des vannes sur une bande de 0,6 m de largeur. Cette poussée a été appliquée aux vannes en position fermée, sur toute la hauteur de marnage et ce, quel que soit le degré de confinement de la couverture de glace. La même poussée a été adoptée pour l'étude de stabilité d'une pile d'évacuateur en milieu semi-confiné (chapitre 3.6).

Quant aux forces d'impact, elles n'ont pas été prises en compte, même pour les vannes de l'ouvrage de réglage qui fonctionne continuellement. Ceci s'explique par la difficulté d'évaluer ces forces d'une façon exacte. D'autre part, on ne prévoyait pas des forces très grandes et on acceptait des dégâts aux vannes si jamais les forces d'impact dépassaient 150 kN/m.

Mises en service depuis plus de dix ans, les vannes des évacuateurs de crue et des ouvrages de réglage du complexe La Grande n'ont subi aucun dommage. On peut déduire que les forces d'impact des glaces sur les vannes n'ont pas dépassé jusqu'à présent 150 kN/m. Selon les observateurs, la couverture de glace est très

4. OPERATION AND DESIGN GUIDELINES FOR GATES

4.1. ICE FORCES

A spillway gate must be designed to withstand two types of forces:

- Forces due to thermal expansion of the ice cover
- Forces resulting from impact of drifting ice.

Thermal expansion thrust per unit length on a gate is generally considered to be 50 percent of that exerted on a spillway pier (Inland Waters Directorate, 1971). This is attributable to the position of the gate, which is normally recessed and hence less exposed than a spillway pier. Comfort and Abdelnour (1994) measured thermal expansion thrust exerted on a pier and a gate at Hydro-Québec's Pagan dam over two winters. Mean thrust exerted on the pier was two to five times that exerted on the gate.

Impact forces must also be considered when designing a gate used to control flow. Impact forces can be much greater than thermal expansion thrust and they must be very carefully calculated based on site-specific ice conditions since overestimates can unduly increase the cost of a gate.

For the La Grande complex projects, a thermal expansion thrust of 150 kN/m exerted on a 0.6 m wide band of the upstream skin plate was assumed. This force was applied to the closed gate the entire height of the drawdown zone no matter what the degree of restraint of the ice cover. The same thrust was assumed for stability study of a spillway pier subjected to a semi-constrained ice cover (section 3.6).

Impact forces were not considered, even for the gates of the control structure that operates continuously. The impact forces were not expected to be very great and it was understood that the gates might be damaged should impact forces exceed 150 kN/m.

The gates of the spillways and control structures of La Grande complex have been in operation for more than ten years and have never been damaged. It can be assumed, therefore, that ice impact forces exerted on the gates have not exceeded 150 kN/m to date. According to observers, the ice cover is very solid in winter des-

solide en hiver malgré les vents violents et même les variations du niveau d'eau. La couverture commence à se fragmenter tard au printemps et dérive vers les ouvrages d'évacuation lorsque la couverture de glace est presque complètement désagrégée.

Dans certains projets, les forces d'impact, estimées à partir d'observations, sont bien supérieures aux forces d'expansion thermique et doivent être considérées dans la conception des vannes qui servent à régler les débits. Un tel cas est présenté dans le chapitre 6.2.

En plus des forces d'expansion thermique et d'impact, il existe un autre type de force qui gêne l'exploitation des vannes. Il s'agit de la force d'adhérence de la glace aux ouvrages. Cette question est traitée dans les 2 chapitres ci-dessous.

4.2. DISPOSITIFS DE CHAUFFAGE

En hiver, les pièces mobiles d'une vanne peuvent geler. La glace peut se former dans les rainures et adhérer solidement au tablier de la vanne. La glace, formée par les débits sortant de l'évacuateur et par les intempéries, peut alourdir démesurément une vanne. Tous ces problèmes de glace gênent l'exploitation des vannes si aucun dispositif n'a été prévu pour les combattre.

Dans les régions nordiques où l'hiver est long et rigoureux, le moyen le plus efficace consiste à chauffer les vannes qui doivent être maintenues opérationnelles en tout temps durant l'hiver.

Un appareil de chauffage et une pompe peuvent servir à envoyer, par des tuyaux, de la vapeur, de l'air chaud ou un liquide chaud, vers les pièces qu'il convient de chauffer, les tuyaux étant posés juste sous la surface. Ces dernières années, on a surtout utilisé des antigels identiques à ceux qui servent pour les automobiles. Un appareil de chauffage et une pompe ordinaires suffisent quand on emploie de tels liquides antigel, ce qui requiert moins de puissance de chauffage qu'un chauffage à résistance électrique. Il faut généralement de l'ordre de 0,6 à 0,7 kW par mètre de surface chauffée. Le fonctionnement de ce système s'est avéré satisfaisant. L'automatisation est simple : une baisse de la température du liquide met la pompe en marche. Pour des vannes plus petites, l'air chauffé donne les meilleurs résultats. Il suffit alors d'un appareil de chauffage ordinaire, l'air étant mis en circulation par un simple ventilateur.

Le chauffage électrique (par résistance ou par induction) reste le plus utilisé.

Pour le chauffage à résistance électrique, on utilise des éléments chauffants (spiraux sur céramique, câbles chauffants, ou autres) insérés dans des tubes et fonctionnant jusqu'à 380 V, ou bien des ceintures chauffantes dans lesquelles on fait passer un courant de 6 à 50 V. Les masques latéraux des vannes clapets, par exemple, sont chauffés par des ceintures d'acier inoxydable avec un courant d'environ 24 V. A l'intérieur du clapet, les éléments sont insérés dans des tubes. Pour le chauffage à résistance électrique, il faut environ 1 kW/mètre carré de surface chauffée.

En théorie, le chauffage par induction des structures d'acier comporte des avantages que n'a pas le chauffage par résistance.

pite violent winds and fluctuations in water level. Break-up begins late in the spring and drift towards the spillway structures. It starts when the cover is almost completely rotten.

For certain projects, observations suggested impact forces would be much greater than thermal expansion forces. Accordingly, impact forces had to be considered when designing gates used to control flow. One such case is discussed in section 6.2.

There is also another type of force in addition to impact and thermal expansion forces that interferes with gate operation: the force of adhesion of ice to structures. The following two sections discuss ways of combatting this problem.

4.2. HEATING DEVICES

The moving parts of a gate may freeze in winter. Ice can form in gate guides and freeze solidly to the upstream skin plate of the gate. Icing over caused by spillway discharges and bad weather can unduly weigh down a gate. All of this can interfere with gate operation if preventive measures are not taken.

In northern environments where winters are long and harsh, the most effective measure is to heat gates that must be operational at all times during the winter.

Heat carriers can be steam, warm air or warm liquid flowing through pipes to points to be heated, where the pipes are laid just below the surface. In recent years, car antifreeze liquids have been the main heat carrier. An ordinary heater and pump are sufficient for such liquids and less wattage is required than for electric resistance heating. Input is usually 0.6 to 0.7 kW per metre of heated surface. Operational experience has been very satisfactory. Automation is simple: pump operation is triggered by a drop in liquid temperature. On smaller gates, circulating air serves as the heat carrier. The air is heated by a standard heating device and set in motion by a simple fan.

Electric heating (resistance or inductive) is the most popular heating option.

For resistance heating, either heating elements (heating spirals on ceramic elements, heating cables and so forth) enclosed in tubes and operating at up to 380 V or heating belts through which a 6- to 50-V current is used. Lateral shields of flap gates, for example, are heated by stainless steel belts at a voltage of about 24 V. Inside the flap, the heating elements are placed in tubes. For resistance heating, about 1 kW is required per metre of heated surface.

Theoretically, induction heating of steel structures has certain advantages over resistance heating.

De toute évidence, le chauffage exige une étanchéité sans faille. Si les vannes ne sont pas parfaitement étanches, leur fonctionnement l'hiver risque de s'avérer très problématique, même si on les chauffe.

Le chauffage peut se faire de manière occasionnelle ou continue. On applique le chauffage occasionnel juste avant utilisation ; il faut alors un chauffage intense. Le chauffage continu empêche tout gel, ce qui rend le matériel opérationnel en tout temps, mais entraîne une forte consommation de chaleur.

La Fig. 15 présente un dispositif de chauffage pour une vanne plane verticale du type wagon, de 19,2 m de hauteur et 12,7 m de largeur. Ce système est constitué d'aérothermes installés de chaque côté de la partie supérieure de chacune des vannes. Les aérothermes ont une capacité de 70 kW chacun et sont utilisables en deux paliers égaux de 35 kW. Ils peuvent fonctionner dans une atmosphère humide complètement saturée.

Un système de gaines de ventilation, avec sorties ajustables, conduit l'air chaud vers les galets de roulement de la vanne et vers l'extrémité inférieure afin d'assurer le chauffage le long de la face qui est en contact avec la poutre de seuil. Le fonctionnement des aérothermes est contrôlé par un thermostat incorporé dont l'élément sensible est influencé par la température de l'air de retour. Un thermostat supplémentaire installé à l'intérieur de chaque vanne donne une alarme de basse température au cas où la température de l'air en circulation baisse en dessous d'un niveau déterminé à l'avance.

Pour éviter le gel des vannes dans les rainures, les éléments chauffants sont placés dans des gaines étanches prévues sur toute la longueur des pièces encastrees. Une gaine est placée derrière les lames d'étanchéité latérales et deux autres à la base des chemins de roulement. Des éléments tubulaires thermoélectriques, fonctionnant à 600 V et à deux niveaux d'intensité, sont installés dans les gaines. Le premier niveau d'intensité a une capacité de chauffage de 125 W et le deuxième niveau une capacité de 500 W par mètre linéaire sur toute la longueur des éléments chauffants.

Ainsi, les six éléments chauffants équipant chaque pertuis de l'évacuateur ont une capacité maximale de 9,5 kW chacun. La capacité totale des éléments chauffants est donc de 57 kW par pertuis. Les éléments chauffants sont en mesure de fonctionner à sec, partiellement immergés ou complètement immergés.

Pour rendre le système de chauffage efficace, la face aval de la vanne est isolée. Des bandes d'isolation thermique sont placées le long des chemins de roulement sur toute la longueur des deux côtés de la vanne, à l'aval. L'étanchéité latérale de la vanne est assurée par deux tiges en bronze, de section circulaire, suspendues sur les deux côtés amont de celle-ci, tout le long du tablier et à côté des montants latéraux.

Le système de chauffage, tel que décrit ci-dessus, est normalisé pour toutes les vannes des évacuateurs de crue du complexe La Grande. Il a été conçu pour fonctionner jusqu'à une température ambiante de -50°C.

An obvious requirement for heating is perfect sealing. If the gates are not perfectly sealed, winter operation may be very difficult even if the gates are heated.

Heating can be occasional or continuous. Occasional heating is applied just before handling and requires intense heating. Continuous heating prevents freezing at all times, ensuring permanent operability, but heat consumption is high.

Fig. 15 shows a heating system for a vertical fixed-wheel gate 19.2 m high and 12.7 m wide. The system comprises unit heaters installed on either side of the upper part of each gate. Capacity of each unit heater is 70 kW; each heater can operate at 35 or 70 kW. The heaters can operate in a completely water-saturated environment.

A ventilation duct system with adjustable outlets conducts the hot air to the gate wheels and the lower end of the gate to ensure that the entire face in contact with the sill beam is heated. An internal thermostat whose sensing element is affected by return-air temperature controls operation of the heaters. Additional thermostats inside each gate give low-temperature warnings when the temperature of the circulating air drops below a preset level.

To prevent gates from freezing to guide rails, heating elements are placed in impervious sheaths that run the full length of the embedded parts. One sheath is placed behind the lateral seal plates and two others are placed at the base of the rail tracks. Tubular thermoelectric elements operating at 600 V and two levels of intensity are installed inside the sheaths. The first level of intensity has a heating capacity of 125 W/linear metre the entire length of the heating elements and the second a capacity of 500 W/linear metre the length of the heating elements.

Each spillway sluice is equipped with six heating elements, each with a maximum capacity of 9.5 kW. Total capacity of the heating elements in each sluice is thus 57 kW. The heating elements are capable of functioning in the dry, partially submerged or completely submerged.

To ensure the heating system is effective, the downstream surface of the gate is insulated. Weather stripping is placed along the guide rails the entire length of both sides of the gate on the downstream side. For lateral sealing of the gate, two circular-section, bronze rod seals are hung beside the lateral posts on both sides of the gate on the upstream side and run the entire length of the skin plate.

Designed to operate at ambient temperatures as low as -50°C , the heating system described above is standard for all spillway gates of La Grande complex.

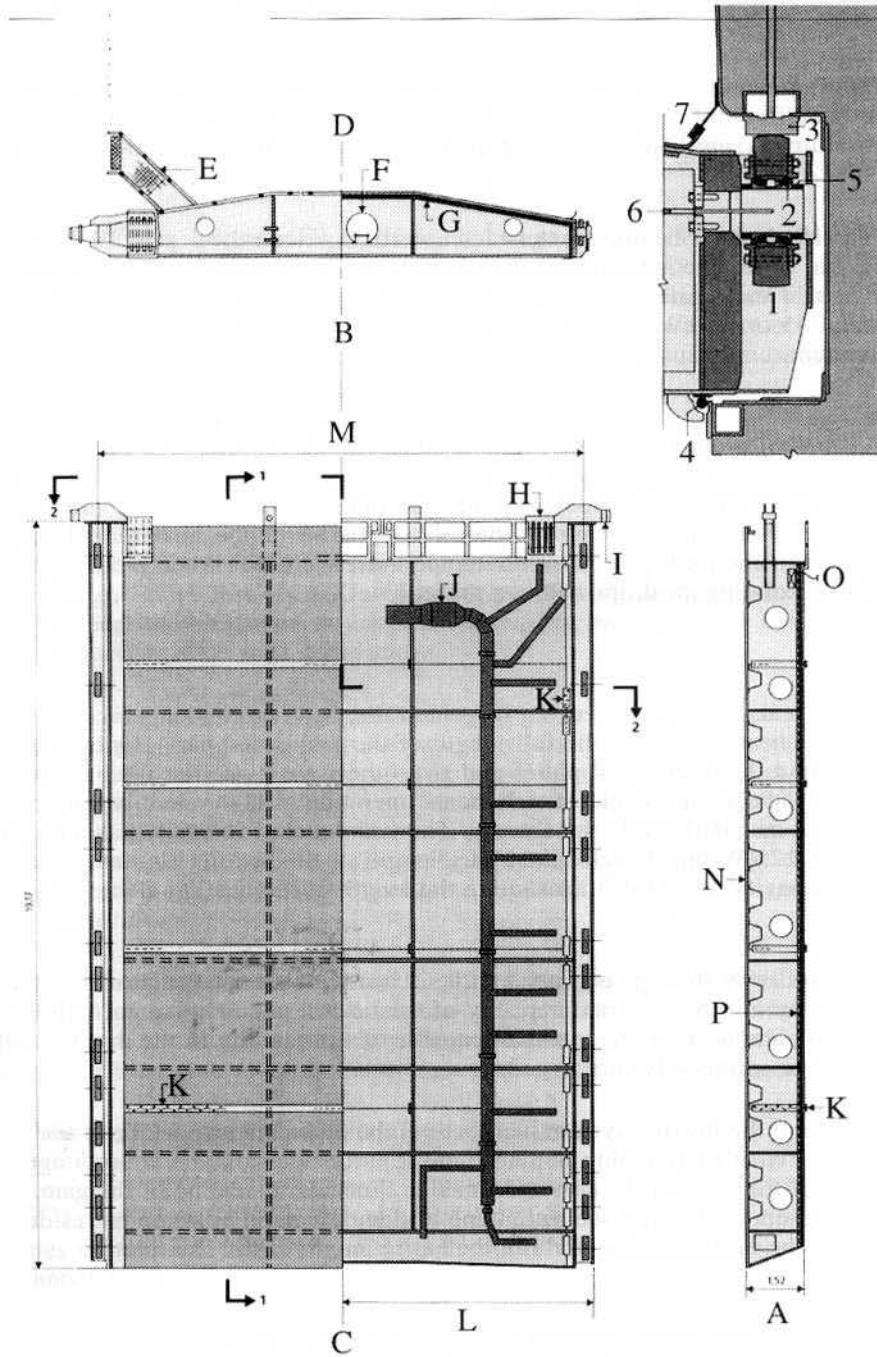


Fig.15

Typical design of a spillway gate and heating devices of Complex La Grande
*Conception type d'une vanne d'évacuateur de crue et des dispositifs de chauffage
pour le Complexe La Grande*

A	Section 1-1	A	<i>Coupe 1-1</i>
B	Section 2-2	B	<i>Coupe 2-2</i>
C	Upstream elevation	C	<i>Élévation amont</i>
D	Downstream	D	<i>Aval</i>
E	Access platform	E	<i>Plate-forme d'accès</i>
F	Manhole and ladder	F	<i>Trou d'homme et échelle</i>
G	Insulating material	G	<i>Matériau isolant</i>
H	Sheave block	H	<i>Gaîne</i>
I	Guide shoe	I	<i>Sabot de guidage</i>
J	Space heater	J	<i>Dispositif de chauffage</i>
K	Joint (Typ.)	K	<i>Joint</i>
L	Interior view	L	<i>Vue intérieure</i>
M	Spacing of the rollers	M	<i>Distance entre galets de roulement</i>
N	Upstream skin plate	N	<i>Tablier amont</i>
O	Electric power supply	O	<i>Fourniture d'énergie électrique</i>
P	Downstream plate and insulation (heated gate only)	P	<i>Tablier aval et isolation (pour une vanne chauffée seulement)</i>
1	Wheel	1	<i>Galet de roulement</i>
2	Roller bearing	2	<i>Axe-support du galet de roulement</i>
3	Roller path	3	<i>Chemin de roulement</i>
4	Sealing rod (bronze)	4	<i>Tige d'étanchéité (bronze)</i>
5	Seal	5	<i>Étanchéité</i>
6	Lubrication	6	<i>Lubrification</i>
7	Flexible weather strip	7	<i>Bande flexible d'isolation thermique</i>

4.3. MESURES DE PRÉVENTION DE LA GLACE

Si une vanne n'est pas munie d'un système de chauffage adéquat, il existe d'autres mesures pour faire face aux problèmes de glace. Les mesures présentées ci-dessous sont surtout valables dans des régions où le climat est doux.

4.3.1. Mesures contre le gel des pièces mobiles sur des pièces fixes

Au début de l'hiver, on évite le gel des joints d'étanchéité, des galets de roulement, des cylindres, des chaînes, etc, en manœuvrant de façon répétée les pièces mobiles pour contrer l'adhérence entre les pièces. Il faut procéder ainsi plusieurs fois par jour, selon le temps qu'il fait (surtout en cas de vent), ainsi que la nuit, pour empêcher les pièces de geler au point de ne plus pouvoir les actionner. Cette mesure est efficace jusqu'à -15°C si le temps est calme ou si les installations sont à l'abri du vent. On peut utiliser un revêtement ou prendre d'autres mesures qui protègent du froid afin de prolonger la période pendant laquelle la vanne restera opérationnelle, mais cette période ne peut se prolonger indéfiniment.

Pour que ce type de protection soit complètement sûr, une étanchéité parfaite est indispensable. Sinon les joints seront de moins en moins étanches, à mesure que la pression augmentera.

Si l'on n'a pas prévu de chauffage pour la vanne dès sa conception, il faudra de toute façon en ajouter un en cours d'exploitation : poêles au charbon, vapeur, air chaud, radiateurs électriques, eau chaude, par exemple. Jadis on utilisait couramment des poêles au charbon. Ils étaient installés dans des renforcements de la pile ou accrochés à celle-ci. On peut en améliorer le rendement en entourant de planches l'endroit à chauffer. Ces poêles se sont avérés efficaces quand il s'agit de dégager la glace des renforcements, des chemins de roulement, des chaînes et des joints d'étanchéité.

La vapeur ou l'air chaud peuvent aussi servir à enlever la glace. On a utilisé avec succès des générateurs de vapeur mobiles et des granulats chauffés à l'air chaud.

On peut soutirer du fond d'un réservoir de l'eau moins froide, par pompage ou en soufflant de l'air comprimé dans l'eau. On peut aussi utiliser des eaux usées tièdes ou l'eau du robinet ; il s'agit d'amener l'eau au moyen de tuyaux à l'endroit qu'on souhaite dégeler ou de la répandre sur un ouvrage recouvert de glace.

4.3.2. Mesures contre l'adhérence ou la formation de glace sur les vannes.

Le fonctionnement d'une vanne et sa stabilité seront compromis si durant l'hiver la couverture de glace y adhère ou si de la glace recouvre entièrement une vanne.

Quand la couverture de glace adhère à la vanne, elle exerce sur elle une pression statique qui en empêche le fonctionnement. De plus, la paroi de la vanne est soumise à de fortes pressions qui tendent à la déformer quand le niveau de l'eau varie. On peut protéger la vanne contre les effets de la pression statique de la glace

4.3. ICE PREVENTION MEASURES

Other measures can be taken to combat ice problems if the gate-heating system is not adequate. The measures described below are suitable mainly where the climate is mild.

4.3.1. Measures against freezing of movable parts to fixed ones

Freezing of seals, wheels, cylinders, chains and so forth can be prevented in early winter by repeated movement of the movable parts to release adhesion between parts. This must be done several times a day, depending on conditions (especially when it is windy) and at night to prevent the parts from freezing so solidly they can no longer be moved. This preventive measure is effective to -15°C under calm conditions or if the structure is sheltered from the wind. Using a casing or some other measure to protect the structure against cold will prolong the period during which the gate will remain operable but not extend it indefinitely.

For this type of protection to be completely safe, perfect sealing is essential. Otherwise, the sealing will become less and less tight as stress increases.

If heating is not built into the design of the gate, some form of heating will inevitably have to be devised during operation-coke-fed stoves, steam, hot air, electric radiators or hot water, for example. Coke-fed stoves were a common means in the past. Usually they are built into pier recesses or hung on the pier. Their performance can be improved by boarding up the area to be heated. Coke-fed stoves have proved satisfactory for freeing recesses, undercarriages, chains and seals of ice.

Steam or warm air can also be used to remove ice. Mobile steam generators and hot-air aggregates have been successfully applied.

Warm water can be obtained from the bottom of a deep reservoir by pumping or by introducing compressed air into the water. Warm wastewater or tap water can also be used; it can be piped to the point to be defrosted or poured over the ice-covered structure.

4.3.2 Measures against adhesion of ice to gates or icing over of gates

Gate operation as well as stability can be jeopardized in winter if the ice cover adheres to the gate or the entire surface of a movable gate ices over.

When the ice cover adheres to the gate, it exerts static pressure on the gate, placing an extra load on the gate that impedes its operation. The gate wall is also subject to considerable bending stress when water level fluctuates. Protection against static ice pressure can be obtained by assuming worst-case ice effects for

en tenant compte des pires scénarios au moment de la conception ou en dégageant la glace qui se forme sur les ouvrages. Il y a diverses manières de dégager la glace des ouvrages.

1. Une mesure tout à fait sûre consiste à *entailler la couverture de glace*, le long des ouvrages, pourvu qu'on le fasse convenablement tout l'hiver.

2. On peut protéger un ouvrage déversant contre l'adhérence de la glace au moyen d'un écoulement de quelque 10 cm d'épaisseur, ce qui entraîne toutefois deux inconvénients : perte d'eau et formation de glace sur les parois environnantes.

3. Une *circulation forcée d'eau grâce à des bulles d'air* est une façon très efficace de protéger les ouvrages contre la pression statique de la glace. Un compresseur pousse de l'air dans un tuyau, jusqu'à une certaine profondeur dans le réservoir, et l'air est relâché dans l'eau par jets. Les bulles d'air montent à la surface à une vitesse proportionnelle à leur dimension. Elles entraînent avec elles une eau plus chaude que celle qui se trouve en surface, ce qui fait fondre la couverture de glace, ou du moins en réduit l'épaisseur. Cette méthode est indiquée seulement si la température de l'eau au fond du réservoir est supérieure à 0°C.

4. On peut utiliser de l'eau sous pression pour briser la couverture de glace et relâcher la pression qu'elle exerce sur les ouvrages hydrauliques. Il s'agit de pomper de l'eau du réservoir et de la faire gicler sur la couverture de glace, sous l'action d'une pompe à haute pression, de manière à casser la couverture en morceaux de glaces flottantes et dérivantes. Une fois la surface requise fragmentée, le courant pousse les glaces vers les bords, et elles sont alors emportées sous la couverture.

Des essais ont démontré que cette mesure était très efficace pour de la glace dont l'épaisseur ne dépassait pas 2,5 cm. Le rendement décroît si la glace est plus épaisse. L'épaisseur maximale pour l'utilisation de cette méthode est de 5,5 cm.

5. *La pression d'air* peut être utilisée pour briser la glace. Il s'agit d'envoyer de grandes quantités d'air et d'eau contre la paroi inférieure de la couverture de glace. On y arrive en passant un tuyau sous l'eau ; l'air en sort par de grandes ouvertures.

La concentration d'air et d'eau en certains points sous la glace provoque la déformation de la couverture, qui peut, selon son épaisseur, résister un certain temps, mais finira par se rompre pour former des glaces flottantes. L'accumulation d'air en un point donné provoque de forts courants latéraux qui emportent les glaces.

6. On peut dégeler la couverture de glace en *l'aspergeant* d'eau chaude ou d'un liquide qui déclenche une réaction chimique. L'eau chaude (eau du robinet, eaux usées, ou autres) ou l'eau salée (ou une solution semblable) s'écoule d'un tuyau perforé, placé juste au-dessus de la surface de glace. Cette méthode est valable quand on est en mesure d'obtenir, à prix raisonnable, un liquide approprié.

7. Des embarcations peuvent casser la couverture de glace devant les ouvrages.

design purposes or by separating ice and structures. Ice and structure can be separated in a number of ways.

1. *Cutting slots* in the ice cover along the structure is a completely safe measure as long as it is performed properly throughout the entire winter.

2. An overflow structure can be protected from ice cover adhesion by a continuous nappe about 10 cm in thickness. The disadvantages of this measure are loss of water and icing on the surrounding structure.

3. A very effective way of protecting structures against static ice pressure is *forced circulation of water by air bubbles*. A compressor is used to force air through a distribution pipe at some depth in the reservoir. The air is introduced into the water through jets. Air bubbles released from the jets rise to the surface with a velocity proportional to their size. The rising bubbles cause water to flow from the bottom to the surface, transporting the relatively warmer water from the bottom to the surface where it melts or at least reduces the ice cover. This method can be used only where the water is warmer than 0°C at depth.

4. Flowing water under pressure can be used to break up the ice cover and relieve pressure on hydraulic structures. Water is pumped from the reservoir and sprayed onto the ice cover under pressure from a high-pressure pump, breaking the ice into floes and drift ice. Once the required area of the ice cover is broken up, the water current transports the ice floes to the edge of the ice where it is shifted below the ice.

Tests show that this measure is very effective with ice up to 2.5 cm thick. Performance deteriorates when the ice is any thicker. Maximum thickness for this method is 5.5 cm.

5. *Air pressure* can be used to break up ice. The ice breaks up under the dynamic action of large quantities of air and water on the underside of the ice. Introduced through a pipe under the water surface, the air is released through large openings.

The local concentration of air and water under the ice causes ice deformation. Depending on its thickness, the ice cover resists for some time but eventually breaks up into floes. The accumulation of air at a particular point causes strong lateral flows that carry away the ice floes.

6. The ice cover can be melted by *spraying* it with warm water or with a liquid that produces a chemical effect. Warm water (tap water, wastewater and so forth) or brine (or a similar solution) is released from a perforated pipeline just above the water surface. This method can be used when a suitable liquid is obtainable at a reasonable price.

7. The ice cover can be broken up in front of the structure by boats.

8. Des *radiateurs électriques* peuvent être utilisés pour maintenir devant les ouvrages une zone d'eau exempte de glace. Les appareils ne coûtent pas cher, et les coûts de fonctionnement sont faibles.

9. Là où le gel est moins intense, il suffit parfois de protéger avec des planches la face aval des vannes, pour éviter que de la glace ne s'y forme.

4.4. REFERENCES

COMFORT, G., and ABDELNOUR, R. 1994. "Field Measurements of Ice Loads: Thermal Loads on Hydro-Electric Structures". Prepared for the *Canadian Electrical Association*, Montréal, Canada

INLAND WATERS DIRECTORATE, ENVIRONMENT CANADA. 1971. "Review of Current Ice Technology and Evaluation of Research Priorities". Report Series No. 17. *Prepared by H.G. Acres Ltd. for the Ice and Snow Research Committee.*

8. *Electric radiators* can be used to maintain an ice-free zone on the water surface next to the structures. The equipment is very cheap and operational costs are low.

9. Where freezing is less severe, planks placed on the downstream face of the gates may be sufficient to prevent them from icing up.

5. GLACE DANS LE SOL ET PERGÉLISOL

Dans les régions froides, les basses températures et la présence du pergélisol (permafrost) ont une influence considérable sur la conception et l'exploitation des ouvrages hydrauliques. Après une description générale des phénomènes de gel et de glace dans le sol, les différents types de problèmes qu'ils entraînent pour les ouvrages hydrauliques seront examinés.

5.1. DÉFINITIONS

Les régions froides se définissent comme des régions où le sol gèle jusqu'à une profondeur de 0,3 m, ou plus, au moins une fois tous les dix ans. Dans l'Hémisphère Nord, ces régions englobent l'Arctique, la zone Subarctique et d'autres zones plus au sud selon le climat local. Voir Fig. 16 (Pergélisol [Johnston et Brown, 1966], limite du gel [Andersland et Anderson, 1978], isothermes et limite des arbres [Judge, 1973a]).

L'Arctique est défini par Wasburn comme l'ensemble des terres situées au nord de la ligne isotherme de 10°C en juillet et où la température moyenne pour le mois le plus froid ne dépasse pas 0°C [Wasburn 1951]. L'Armée Américaine a complété cette définition en ajoutant que la température moyenne annuelle ne devait pas dépasser 0°C [Ministères Américains de l'Armée et de l'Aviation, 1987]. En règle générale, il existe une bonne corrélation entre la limite des arbres et la ligne isotherme de 10°C en juillet, même si dans certaines zones l'écart entre les deux lignes peut atteindre jusqu'à 160 km [Sage, 1986].

La zone Subarctique est définie par l'US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Eng. Laboratory, CRREL, comme la région adjacente à l'Arctique où la température moyenne pour le mois le plus froid est inférieure à 0°C et où la température moyenne mensuelle ne dépasse pas 10°C pendant plus de quatre mois.

Le pergélisol a été défini pour la première fois par Muller comme «une épaisseur de sol ou d'autres dépôts superficiels, voire même du substratum rocheux, s'étendant sur une profondeur variable sous la surface de la terre et où la température reste continuellement au-dessous du point de congélation sur une période prolongée (de deux à des dizaines de milliers d'années)», quel que soit le degré d'humidité éventuel [Muller, 1947]. En URSS, le pergélisol se définit comme un sol gelé depuis des siècles ou des millénaires [Tsyrovich].

De nos jours, le pergélisol se définit le plus souvent comme «l'état thermique du sol ou de la roche dont la température reste constamment inférieure à 0°C pendant au moins deux hivers consécutifs et durant l'été qui les sépare» [Brown, 1974].

5. ICE IN SOIL AND PERMAFROST

In cold regions, the design and operation of hydraulic structures are very much influenced by low temperatures and the presence of permafrost. In the following, a general description is given of frost and ice in the ground, and the different kinds of problems related to hydraulic structures are explained.

5.1. DEFINITIONS

Cold Regions are defined as areas, where frost penetrates the ground to a depth of about 0.3 m or more at least once in 10 years. The cold regions on the Northern Hemisphere comprise the Arctic, the Sub-arctic, and areas further to the South depending on the local climate, see Fig. 16 (Permafrost [Johnston and Brown, 1966], frost limit [Andersland and Anderson, 1978], isotherm and treeline [Judge, 1973a])

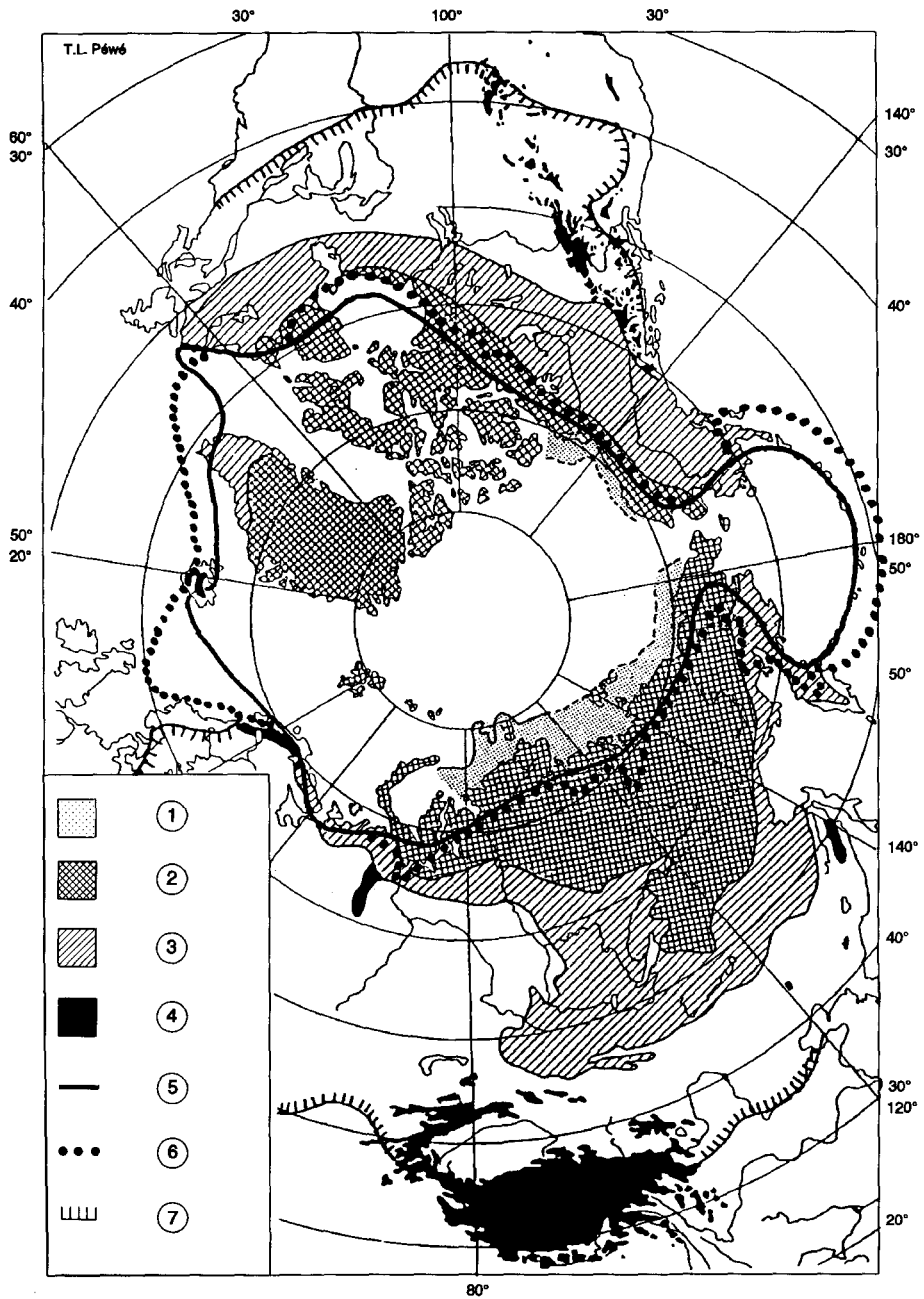
The *Arctic* is defined by Wasburn as those lands north of the 10°C July isotherm, provided that the mean temperature for the coldest month is not above 0°C [Wasburn, 1951]. The US Army has furthermore determined that the mean annual temperature shall be below 0°C [Departments of the US Army and Air Force 1987]. There is generally a good correlation between the treeline and the 10°C July isotherm, even though the two lines diverge up to about 160 km in some places [Sage, 1986].

The *Sub-arctic* zone is defined by US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Eng. Laboratory, CRREL, as the region adjacent to the Arctic in which the mean temperature for the coldest month is below 0°C and in which there are less than 4 months having a mean temperature above 10°C.

Permafrost has first been defined by Muller as «a thickness of soil or other superficial deposit, or even of bedrock, at a variable depth beneath the surface of the earth in which a temperature below freezing has existed continually for a long time (from two to tens of thousand of years)», regardless of the state of any moisture that might be present [Muller, 1947]. In the U.S.S.R., permafrost has been defined as frozen ground with an existence of centuries or millennia [Tsyrovich].

Today permafrost is most often defined as «the thermal condition in soil or rock of having temperatures below 0°C persist over at least two consecutive winters and the intervening summer» [Brown, 1974].

Le pergélisol (appelé aussi sol gelé en permanence) se définit uniquement par rapport à la température, qu'il y ait ou non présence d'humidité sous forme d'eau et de glace dans le sol.



Permafrost (also referred to as perennially frozen ground) is defined solely on the basis of temperature; moisture in the form of water and ground ice may or may not be present.

Fig. 16

The extent of permafrost and cold regions in the Northern Hemisphere

Étendue du pergélisol (permafrost) et des régions froides dans l'Hémisphère Nord

- | | | | |
|---|----------------------------------|---|-------------------------------------------|
| ① | Zone of sub-sea permafrost | ① | <i>Zone de pergélisol sous-marin</i> |
| ② | Zone of continuous permafrost | ② | <i>Zone de pergélisol continu</i> |
| ③ | Zone of discontinuous permafrost | ③ | <i>Zone de pergélisol discontinu</i> |
| ④ | Zone of alpine permafrost | ④ | <i>Zone de pergélisol alpin</i> |
| ⑤ | Limit of substantial frost | ⑤ | <i>Limite de gel important</i> |
| ⑥ | Treeline | ⑥ | <i>Limite des arbres</i> |
| ⑦ | 10°C July isotherm | ⑦ | <i>Ligne isotherme de 10°C en juillet</i> |

ERRATUM - p. 125

The text of Figure 16 should be read :

La légende de la Figure 16 est :

- | | |
|-------------------------------|------------------------------------------------|
| 5. 10° C July isotherm | 5. <i>Limite isotherme de 10° C en juillet</i> |
| 6. Treeline | 6. <i>Limite des arbres</i> |
| 7. Limit of substantial frost | 7. <i>Limite de gel important</i> |

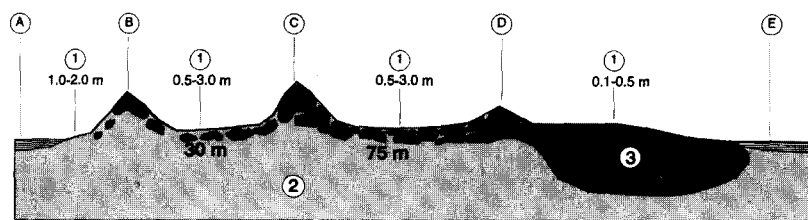
5.2. RÉPARTITION ET PROPRIÉTÉS DU PERGÉLISOL

Le pergélisol touche environ 20 % des terres émergées, dont 85 % de l'Alaska, 50 % du Canada, 48 % de l'URSS et 20 % de la Chine [Péwé 1982], voir Fig. 16. A l'exclusion des montagnes, le pergélisol continu recouvre environ $7,64 \times 10^{13}$ km² de l'hémisphère nord. Dans certaines zones, il s'étend aussi sous la mer le long des côtes de l'Arctique, et à des latitudes plus méridionales dans des zones montagneuses élevées. [Flaate, 1987].

En règle générale, la limite méridionale du pergélisol correspond à la ligne isotherme annuelle moyenne de -1°C . Entre les lignes isothermes annuelles moyennes de -1°C et -4°C , le pergélisol se retrouve surtout dans les parties les plus sèches des tourbières, sur certains versants orientés au nord et dans les zones d'ombre locales. Au nord de la ligne isotherme annuelle moyenne de -4°C , le pergélisol devient de plus en plus répandu et son épaisseur augmente. La limite entre le pergélisol continu et le pergélisol discontinu semble se situer près de l'isotherme -8°C [Johnston 1981]. Au Canada, on peut s'attendre à rencontrer du pergélisol continu au nord de la ligne isotherme -6°C .

Dans la zone de pergélisol continu, on le retrouve partout sous la surface du sol sauf dans les sédiments nouvellement déposés et pas encore consolidés, voir Fig. 17. Dans la zone de pergélisol discontinu, il coexiste avec des zones de sol non gelé et on peut rencontrer des couches dégelées (talik) à l'intérieur du pergélisol.

La répartition du *pergélisol alpin* dans les régions montagneuses varie selon l'altitude et la latitude et dépend aussi beaucoup de l'épaisseur de la couche de neige. En règle générale, le pergélisol sera plus répandu et plus épais sur les versants nord, mais les variations de la couche de neige et de la couverture végétale sur les différentes pentes compliquent la situation.



La Fig. 18 présente le régime thermique caractéristique du sol dans le pergélisol. La variation annuelle de température diminue progressivement de la surface du sol jusqu'à la profondeur H_0 . Au-delà de cette profondeur, la température augmente progressivement à cause de la chaleur provenant du centre de la Terre. Le flux thermique ascendant ou flux géothermique est exprimé par le gradient géothermique G .

5.2. DISTRIBUTION AND PROPERTIES OF PERMAFROST

About 20% of all land surface of the earth including 85% of Alaska, 50% of Canada, 48% of the USSR, and 20% of China, are underlaid by permafrost [Péwé, 1982], see Fig. 16. Excluding mountains, continuous permafrost covers about 7.64×10^{13} km² of the northern hemisphere. In some places, permafrost is found under the sea along arctic shores, and in high mountain areas at southern latitudes [Flaate, 1987].

It is found that the southern limits of permafrost generally coincide with the -1°C mean annual air isotherm. Between -1°C and -4°C mean annual air isotherms, permafrost is restricted mainly to the dryer portions of peatlands, some north-facing slopes, and local shaded areas. North of the -4°C mean annual air isotherm permafrost becomes increasingly widespread and thicker. The boundary between the discontinuous and the continuous zones appears to be near the -8°C isotherm [Johnston, 1981]. In Canada continuous permafrost can be expected north of the -6°C isotherm.

In the continuous zone permafrost exists everywhere beneath the land surface except in newly deposited un-consolidated sediments, see Fig. 17. In the discontinuous zone, permafrost exists together with areas of unfrozen ground, and unfrozen layers (talik) may occur within the permafrost.

The distribution of *alpine permafrost* in mountainous regions varies with the altitude as well as the latitude, and is very sensitive to the thickness of the snow cover. Usually, permafrost is more widespread and thicker on north-facing slopes but variations in snow cover and vegetation on different slopes complicate the situation.

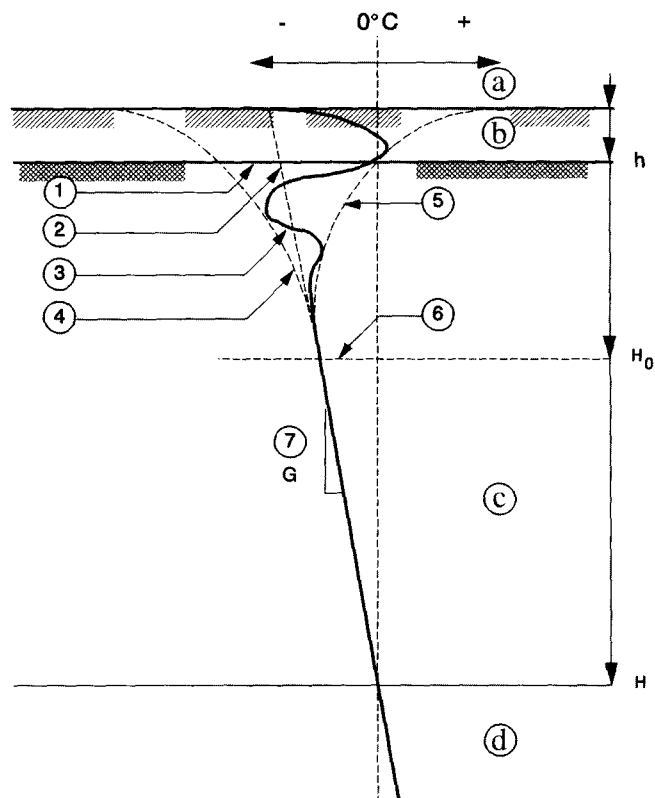
Fig. 17

Idealized profile of permafrost in Alaska [Péwé]

Profil schématique du pergélisol en Alaska [Péwé]

Ⓐ Pacific Ocean	Ⓐ Océan Pacifique
Ⓑ Chugach Mountain	Ⓑ Montagne Chugach
Ⓒ Alaska Range	Ⓒ Chaîne de l'Alaska
Ⓓ Brooks Range	Ⓓ Chaîne Brooks
Ⓔ Arctic Ocean	Ⓔ Océan Arctique
① Active layer	① Couche active
② Unfrozen ground	② Sol non gelé
③ Continuous permafrost	③ Pergélisol continu

In Fig. 18, the typical *ground temperature* regime in permafrost is shown. The annual variation of the temperature decreases steadily from the ground surface to the depth H_0 . Below this depth, the temperature increases steadily under the influence of heat generated deep in the earth. This upward heat flow or geothermal flux is expressed by the *geothermal gradient* G .



La couche de dégel saisonnier se définit comme la couche supérieure du sol à l'intérieur de laquelle la température varie au-dessus et au-dessous de 0°C durant l'année. Dans les zones de pergélisol, cette couche de dégel saisonnier s'appelle la *couche active*. Son épaisseur varie de 0,3 à 1 m dans la zone de pergélisol continu et s'étend généralement jusqu'à la *limite supérieure du pergélisol*, sauf à proximité des étendues d'eau. Dans la zone de pergélisol discontinu, l'épaisseur de cette couche varie de 0,6 à 3 m ou plus, selon les conditions climatiques et superficielles locales. A Fairbanks, en Alaska, la couche active atteint une épaisseur de 5 m [Andersland et Anderson, 1978].

Entre la surface du sol et la profondeur limite correspondant à une variation annuelle nulle des températures, la température varie tout au long de l'année entre les courbes enveloppes comme l'indique la *courbe en fouet* (présentée pour novembre). En règle générale, cette profondeur limite H_0 se situe entre 10 et 15 m. Au-delà de cette profondeur, la température du sol varie uniquement en fonction du flux géothermique et des changements climatiques au fil des siècles.

Au Canada, l'épaisseur du pergélisol H varie de 60 à 100 m, à la limite méridionale de la zone de pergélisol continu. Elle augmente ensuite pour dépasser 600 m dans les secteurs les plus septentrionaux de l'archipel arctique canadien [Judge, 1973a]. Dans la zone de pergélisol discontinu, son épaisseur varie entre

Fig. 18

Typical ground regime temperature in permafrost

Régime thermique caractéristique dans le pergélisol

Ⓐ	Ground surface	Ⓐ	<i>Surface du terrain naturel</i>
Ⓑ	Active layer	Ⓑ	<i>Couche active</i>
Ⓒ	Permafrost	Ⓒ	<i>Pergélisol</i>
Ⓓ	Unfrozen ground	Ⓓ	<i>Sol non gelé</i>
①	Permafrost table	①	<i>Limite supérieure du pergélisol</i>
②	Mean annual ground temperature	②	<i>Température moyenne annuelle du sol</i>
③	Whiplash curve	③	<i>Courbe en fouet</i>
④	Minimum monthly mean temperature	④	<i>Température moyenne mensuelle minimale</i>
⑤	Maximum monthly mean temperature	⑤	<i>Température moyenne mensuelle maximale</i>
⑥	Depth of zero annual amplitude	⑥	<i>Profondeur où les variations de température sont nulles</i>
⑦	Geothermal gradient	⑦	<i>Gradient géothermique</i>

The *seasonal frost layer* may be described as the top layer of the ground, in which the temperature fluctuates above and below 0°C during the year. In areas with permafrost the seasonal frost layer is called the *active layer*. The thickness varies from about 0.3 to 1 m in the continuous zone and generally extends to the *permafrost table* except near bodies of water. In the discontinuous zone the depth to the permafrost table ranges from 0.6 to 3 m or more, depending on local climatic and surface conditions. At Fairbanks, Alaska, the active layer is 5 m thick [Andersland and Anderson, 1978].

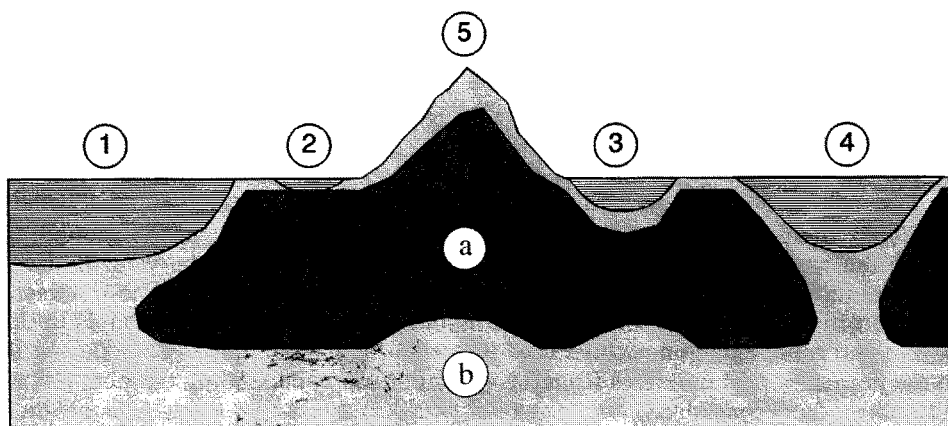
From the ground surface to the depth of *zero annual amplitude*, the temperature varies through the year between the envelope curves as indicated by the *whiplash curve* (shown for November). The depth of zero annual amplitude H_0 is generally between 10 and 15 m. Below this depth, the ground temperature changes only in response to geothermal flux and changes in climatic conditions extending over centuries.

The *thickness of permafrost* H varies in Canada from 60 to 100 m at the southern limit of the continuous zone. It increases to more than 600 m in the northern parts of the Canadian Arctic Archipelago [Judge, 1973a]. In the discontinuous zone it varies in thickness from a few centimetres at the southern limit of the zone,

quelques centimètres, à la limite méridionale de la zone, et 50 à 200 m à la limite du pergélisol continu. La plus grande épaisseur de pergélisol mesurée au Canada est d'environ 720 m, mais on estime qu'il peut atteindre jusqu'à 1000 m [Judge, 1973b]. On a mesuré une épaisseur de 1700 m en Sibérie [Phukan, 1985].

La *température du pergélisol*, à la profondeur du niveau isotherme où la température ne connaît pratiquement aucune fluctuation annuelle, varie entre quelques dixièmes de degré sous 0°C, à la limite méridionale, et environ -5°C, à la limite entre les zones de pergélisol discontinu et continu. A l'extrême nord, la température atteint -15°C [Johnston, 1981]. On a mesuré des gradients géothermiques variant de 1°C/22 m à 1°C/160 m selon le type de sol ou de roche et selon l'effet des périodes climatiques antérieures [Mackay, 1967]. En dehors des zones volcaniques, le gradient a une valeur moyenne de 3°C par 100 m.

La Fig. 19 [Andersland and Anderson, 1978] présente une illustration schématique de la surface du pergélisol lorsque la température moyenne du fond marin est supérieure à 0°C. Ce schéma repose sur des calculs concernant les conditions thermiques sous la surface, qui tiennent compte des perturbations causées par les caractéristiques d'une surface présentant des anomalies thermiques. Si la température moyenne du fond marin est inférieure à 0°C, on pourra trouver du pergélisol sous le fond marin [Mai *et al.*, 1987].



Il existe toujours un bassin de dégel sous les lacs et les rivières qui ne gèlent pas jusqu'au fond en hiver. Au Canada et aux États-Unis, la glace qui se forme sur un lac peut atteindre une épaisseur maximale d'environ 2,5 m et, si le lac est plus profond, on trouvera probablement un bulbe non gelé (talik) sous le lac. Dans les petits lacs, on a constaté que la profondeur de ce bulbe non gelé correspond environ à la largeur minimale du lac [Krezewinski, 1985].

Les différentes catégories de sol gelé sont souvent établies d'après la teneur en glace : riche en glace (teneur en glace supérieure à 50 %) ; pauvre en glace (teneur en glace inférieure à 25 %) ; glacé (teneur en glace entre 25 et 50 %)

to 50 to 200 meters at the boundary with the continuous zone. Thickest permafrost measured in Canada is about 720 m, but is estimated to reach a maximum of 1000 m [Judge, 1973b]. Thickness of 1700 m has been measured in Siberia [Phukan, 1985].

The *permafrost temperature* at the depth of zero annual amplitude, where there is virtually no annual fluctuation in temperature, generally ranges from a few tenths of a degree below 0°C at the southern limit, to about -5°C at the boundary between the discontinuous and the continuous zones. At the extreme North the temperature reaches -15°C [Johnston, 1981]. Geothermal gradients ranging from about 1°C/22 m to 1°C/160 m have been measured, depending on the type of soil or rock and the effect of past climatic periods [Mackay, 1967]. Apart from volcanic areas, the gradient is 3°C per 100 m in average.

A schematic illustration of the permafrost surface is presented in Fig. 19 [Andersland and Anderson, 1978] for a case in which the mean sea bottom temperature is greater than 0°C. This is based on calculations of the subsurface thermal conditions taking into account the disturbance caused by thermally anomalous surface features. If the mean sea bottom temperature is less than 0°C, permafrost may be found below the sea bottom [Mai et al, 1987].

Fig. 19

Schematic representation of permafrost distribution in a continuous-permafrost region

Représentation schématique de la répartition du pergélisol dans une zone de pergélisol continu

- | | |
|-------------------|----------------------------|
| Ⓐ Permafrost | Ⓐ <i>Pergélisol</i> |
| Ⓑ Unfrozen ground | Ⓑ <i>Sol non gelé</i> |
| ① Ocean | ① <i>Océan</i> |
| ② Shallow lake | ② <i>Lac peu profond</i> |
| ③ Small deep lake | ③ <i>Petit lac profond</i> |
| ④ Large deep lake | ④ <i>Grand lac profond</i> |
| ⑤ Hill | ⑤ <i>Colline</i> |

A thaw basin always exists beneath lakes and rivers that do not freeze to the bottom in winter. The maximum ice thickness on a lake in Canada or the US is about 2.5 m, and a lake deeper than this will probably contain an unfrozen bulb (talik) beneath it. The depth of this unfrozen bulb, for smaller lakes, has been found to be about equal to the minimum width of the lake [Krezewinski, 1985].

The frozen soil is often categorized by the content of ice: High-ice (ice content above 50%); low-ice (ice content below 25%); icy (ice contents from 25% to 50%) [Tsytoovich, 1975]. By the content of moisture, two types of permafrost

[Tsytovich, 1975]. Selon le degré d'humidité, on distingue deux types de pergélisol : le pergélisol sec renfermant peu de glace excédentaire et que l'on trouve généralement dans les zones de roche, de gravier ou de sable grossier ; et le pergélisol humide avec une teneur en glace élevée que l'on trouve dans les sols fins [Sage 1986]. Selon son état physique, le sol gelé se divise en plusieurs catégories : les sols gelés durs (basse température) auxquels la glace a donné une cohésion ferme qui les rend pratiquement incompressibles ; les sols gelés plastiques (température élevée) qui renferment une quantité importante d'eau non gelée et possèdent une compressibilité relativement faible à l'état gelé [Tsytovich, 1975].

5.3. TEMPÉRATURES DU SOL

La température du sol dépend de la température de l'air (le climat), des conditions en surface et des propriétés du sol (conductivité thermique). Aux latitudes nordiques, il existe une différence clairement établie de 1 à 6°C entre les températures annuelles moyennes du sol et de l'air. Les observations ont permis d'établir que cette différence était due aux effets de facteurs proches de la surface, tels que la couche de neige, la couverture végétale, les propriétés thermiques du sol qui varient avec le temps, le relief, la pente, l'orientation de la surface et le drainage sous la surface [Gold et Lachenbruch, 1973].

Les indices de gel et de dégel relatifs à l'air peuvent servir à comparer les climats en différents lieux et aussi à des fins techniques. Ils sont calculés en totalisant le nombre de degrés-jours au-dessus (indice de dégel) ou en-dessous (indice de gel) de 0°C chaque année. Pour établir la température de surface, on utilise souvent le *facteur n*, calculé de façon empirique et qui correspond au rapport de l'indice de gel en surface à l'indice de gel mesuré à une hauteur de 1,3 m au-dessus du sol [Department of the Army and the Air Force, États-Unis, 1987].

5.4. PÉNÉTRATION DU GEL ET FLUX THERMIQUE

La pénétration du gel dans le sol et le flux thermique dépendent des caractéristiques du sol, de sa conductivité thermique, de sa densité, de la chaleur massique spécifique, etc. En outre, la présence de glace et d'eau transitoire joue un rôle très important. En règle générale, pour un matériau homogène, le flux thermique par conduction est exprimé par l'équation suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5.1)$$

dans laquelle $\alpha = k/C$ représente la diffusivité thermique ; k la conductivité thermique, C la capacité thermique volumétrique, T la température et t le temps [Johnston, 1981]. A titre d'exemple, lorsqu'on veut calculer la température autour de tuyaux ou de galeries enfouis, l'équation 5.1 se traduit souvent en coordonnées polaires [Mai, 1995] :

can be defined: Dry permafrost containing little excess ice, as usually found in areas of rock, gravel or coarse sand; and wet permafrost that generally has a high ice content, and is found in fine-grained soils [Sage, 1986]. By physical state the frozen soil can be categorized as: Hard-frozen (low temperature) soils rendered firmly cohesive by ice and practically incompressible; and plastic-frozen (high temperature) soils with high unfrozen-water contents and relatively low compressibility in the frozen state [Tsytoich, 1975].

5.3. GROUND TEMPERATURES

The ground temperatures are dependent on both the air temperature (the climate), the surface conditions, and the properties of the ground (heat conductivity). It is well established that a difference of about 1-6°C exists in northern latitudes between the average annual air and ground surface temperatures. Observations have shown that this difference is due to the effects of such near-surface factors as snow cover, vegetation, time-varying ground thermal properties, relief, slope and orientation of the surface, and subsurface drainage [Gold and Lachenbruch, 1973].

Air freezing index and *thawing index* can be used to compare the climates of different locations and are also used for engineering purposes. They are computed by totalling the number of degree days above (thawing index) or below (freezing index) 0°C for each year. To determine the surface temperature the empirically determined *n-factor* is often used, which is the ratio of the freezing-index for the surface to the freezing-index measured 1.3 m above ground [Department of the Army and the Air Force, 1987].

5.4. FROST PENETRATION AND HEAT FLOW

The penetration of frost into the ground and the heat flow depends on the properties of the ground, thermal conductivity, density, mass specific heat, etc. Furthermore the presence of ice and transient water is most important. The heat flow by conduction for a homogeneous material is in general described by the equation:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5.1)$$

where $\alpha = k/C$ is the thermal diffusivity; k the thermal conductivity, C the volumetric heat capacity, T the temperature and t is the time [Johnston, 1981]. When calculating the temperature around for example buried pipes or tunnels, equation 5.1 is often expressed in polar coordinates [Mai, 1995]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) \quad (5.1)$$

Les principales caractéristiques du régime thermique dans le sol posent quatre problèmes de transfert thermique, relativement distincts [Gold et Lachenbruch 1973] :

- le flux thermique constant unidimensionnel, allant du centre de la Terre vers sa surface isotherme, et la profondeur de la limite inférieure du pergélisol ;
- la variation périodique saisonnière de la température en surface et la profondeur de la limite supérieure du pergélisol ;
- les variations à long terme de la température en surface, l'évolution du pergélisol et les effets des changements climatiques ;
- les variations latérales de la température en surface et les effets des masses d'eau, la couverture de surface variable, la topographie et les ouvrages construits en surface.

Tous ces problèmes ont une influence déterminante sur la conception et l'exploitation des ouvrages hydrauliques dans les régions de climat froid, comme on le verra au chapitre 5.7.

Les calculs du régime thermique dans le sol se font souvent par traitement informatique de modèles aux éléments finis à partir des équations mentionnées précédemment. On trouvera une description de ces modèles dans la littérature spécialisée, par exemple [Andersland et Anderson, 1978], [Gold et Lachenbruch, 1973], [Johnston, 1981], [Krzewinski et Tart, 1985], [Mai, 1995] et [Phukan, 1985].

5.5. FORMATION DE LA GLACE

Lorsqu'un sol humide gèle, l'humidité migre vers la surface de congélation. Des masses de glace commencent à se former sur le front de congélation, alimentées par le transfert de vapeur et la migration de liquide. Ainsi peuvent se former des couches de glace d'une épaisseur considérable (1 à 100 mm constituent des épaisseurs courantes). Ces couches déplacent le sol pour faire de la place à la glace, lorsqu'il y a de l'eau disponible dans une couche inférieure et à condition que le sol possède une granulométrie fine, une capillarité élevée et une perméabilité pas trop basse. On sait que dans de telles circonstances l'accumulation de glace peut doubler le volume du sol gelé. Le plus souvent, le soulèvement total dû au gel peut varier de 0 à environ 150 mm en une saison [Andersland et Anderson, 1978]. De tels sols (par exemple du limon ou du sable qui renferment une quantité élevée de grains fins) sont considérés comme des sols *sensibles au gel*, et donc à éviter pour les projets de construction.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) \quad (5.1)$$

The main features of the temperature regime in the ground can be understood in terms of four rather distinct heat transfer problems [Gold and Lachenbruch, 1973]:

- The steady one-dimensional flow of heat from the earth's interior to its isothermal surface, and the depth of the bottom of permafrost;
- The periodic seasonal variation of surface temperature and the depth to the top of the permafrost;
- Long-term variations of surface temperature, the evolution of permafrost, and the effects of climatic change;
- Lateral variations in the surface temperature and the effects of bodies of water, variable surface cover, topography, and engineering structures placed on the surface.

All these problems are of great importance when discussing design and operation of hydraulic structures in cold climate regions as described in section 5.7.

Calculation of the thermal regime in the ground is often done by means of computerized finite element models based on the above mentioned equations. A description of these models can be found in special literature, e.g., [Andersland and Anderson, 1978], [Gold and Lachenbruch, 1973], [Johnston, 1981], [Krzewinski and Tart, 1985], [Mai, 1995] and [Phukan, 1985].

5.5. ICE FORMATION

When damp ground freezes, there is a migration of moisture to the freezing surface. Masses of ice begin to form along the freezing front, supplied with vapour transfer and by liquid migration. Ice layers of considerable thickness (1 to 100 mm are common) may develop, displacing the soil to make room for the ice if water is available from a lower layer and if the soil is fine-grained with a combination of high capillarity and not too low permeability. The accumulation of ice under such circumstances has been known to double the volume of frozen soil. More commonly, the total amount of frost heave amounts to anything from 0 to about 150 mm in a season [Andersland and Anderson, 1978]. Such soils (e.g., silt or sand with high contents of fines) are called *frost-susceptible* and should be avoided for construction purposes.

5.6. GEL ET DÉGEL

Le gel et le dégel du sol entraînent toujours des problèmes pour les ouvrages hydrauliques, qu'ils soient hors-sol ou enterrés dans le sol. Le dégel peut causer de grands tassements de consolidation surtout lorsqu'il y a présence de formations de glace en profondeur (pergélisol) dans le sol. Il est beaucoup plus difficile de construire sur du pergélisol marginal ou *chaud* que sur du pergélisol *froid* (moins de -4°C) car toute perturbation physique en surface, aussi minime soit elle, aura un effet thermique beaucoup plus grand sur la profondeur de la couche active.

L'épaisseur de la couche active et par conséquent l'emplacement de la *limite supérieure du pergélisol* peuvent changer rapidement et de façon considérable à la suite de modifications des conditions environnementales, naturelles ou causées par l'homme. Des changements dans les conditions en surface peuvent aussi entraîner une grave dégradation du pergélisol et il faudra attendre des décennies avant que l'équilibre ne se rétablisse. En outre, le dégel du pergélisol peut accroître la perméabilité du sol, ce qui pourra avoir des impacts graves sur la fondation d'un barrage. L'épaisseur du pergélisol est influencée par des facteurs tels que le type de sol et de roche, les caractéristiques de la surface (couche de neige et couverture végétale) et la proximité de masses d'eau.

La présence d'eau, qu'elle soit transitoire ou stagnante, influence considérablement le régime thermique sous la surface. Voici les mécanismes qui peuvent entrer en jeu pour modifier le régime thermique, tel que les données climatiques publiées permettent de le prévoir [Krzewinski et Fart, 1985] :

- l'influence d'eau stagnante (douce ou salée) ;
- la présence d'ions salins dans l'eau qui abaissent la température du point de congélation et la température de chaleur de fusion latente ;
- un écoulement transitoire causé par un gradient hydraulique ;
- un écoulement transitoire causé par la présence d'un gradient de concentration saline ;
- un écoulement transitoire causé par des modifications de la marée et/ou une tempête soudaine ;
- les variations de la couche de neige dues à des vents côtiers violents ;
- les variations de la couverture végétale ;
- les variations des propriétés du sol.

5.7. PROBLÈMES RELATIFS AUX OUVRAGES HYDRAULIQUES

Avant de concevoir ou de construire des ouvrages hydrauliques dans des zones où le sol est susceptible de geler et surtout dans les zones de pergélisol, il faut examiner les problèmes suivants :

- le dégel de la glace ou du pergélisol situés sous la fondation, causant des tassements (dans un matériau déstabilisé par le dégel) ou provoquant une augmentation des infiltrations sous les ouvrages de retenue ;

5.6. FREEZING AND THAWING

Freezing and thawing of the ground will always create problems with hydraulic structures whether they are above ground or located below the surface. Thawing can create large consolidation settlements especially when deep ice formations (permafrost) are present in the ground. Marginal or *warm* permafrost is much more difficult to construct on than is *cold* permafrost (less than -4°C) because any small physical disturbance at the surface will have a much greater thermal effect on the depth of the active layer.

The thickness of the active layer, and hence the position of the *permafrost table*, can be rapidly and drastically altered as a result of naturally occurring or man made changes to the environmental conditions in the area. Changing the surface conditions may also cause severe degradation of the permafrost, and a new equilibrium may not be reached in decades. Furthermore thawing out of permafrost may cause a higher permeability in the ground, which may have severe effects on a dam foundation. The thickness of permafrost is influenced by such factors as soil and rock type, surface characteristics (such as snow and vegetation cover) and the proximity to bodies of water.

The presence of water, whether transient or ponded, has a profound influence on the subsurface thermal regime. The processes, which may be acting to alter the thermal regime from that which would be predicted based on published climatic data are as follows [Krzewinski and Tart, 1985]:

- The influence of ponded water (both fresh and salt water);
- The presence of salt ions in the water which lower the freezing point temperature and the temperature associated with latent heat of fusion;
- Transient flow caused by hydraulic gradient;
- Transient flow caused by the presence of a salt concentration gradient;

- Transient flow caused by changes in the tide and/or storm surge;

- Variable snow cover caused by high coastal winds;
- Variable vegetative cover;
- Variable soil properties.

5.7. PROBLEMS RELATED TO HYDRAULIC STRUCTURES

When designing and constructing hydraulic structures in areas where frost may occur in the ground and especially in areas with permafrost, the following problems must be considered:

- Thawing out of existing ice or permafrost below the foundation creating settlements (in thaw-unstable material), or causing increased seepage below water retaining structures.

- le gel de l'eau dans les galeries ou dans les conduites enterrées, posant des problèmes de glace ;
- le gel de l'eau qui s'infiltré dans le sol, créant ainsi des soulèvements dans un sol sensible au gel.

Les paragraphes suivants traitent de l'incidence de ces problèmes sur les barrages, les évacuateurs de crue et les ouvrages de restitution, les galeries et les conduites, ainsi que sur les prises d'eau et les ouvrages de restitution immergés.

5.7.1. Barrages

En Sibérie, on a construit un certain nombre de grands et de petits barrages dans la zone de pergélisol. Actuellement, cinq grands barrages en remblai, dont les hauteurs varient de 20 à 125 m, sont en service dans des zones de pergélisol [Biyarov, 1973], [Johnston, 1981], [Sayles, 1987], [Tsytoich *et al.*, 1978]. La majorité des barrages construits sur le pergélisol sont des barrages en terre étant donné l'avantage technique des ouvrages souples qui requièrent moins de résistance au niveau des fondations, et l'économie procurée par l'utilisation des matériaux locaux. Apparemment, il n'existe aucun barrage en béton dans les zones de pergélisol, et pour des ouvrages d'une hauteur supérieure à 20 m on a utilisé uniquement le substratum rocheux ou le till glaciaire dense comme fondation [Johnston, 1981].

Pour une construction sur le pergélisol, on a le choix entre deux types de barrages en terre : les barrages *imperméables* ou *semi-imperméables*, voir Fig. 20. On adoptera des barrages imperméables pour maintenir les fondations et les matériaux de remblai à l'état gelé (barrages gelés), ou encore pour tenir compte du dégel des fondations dans le pergélisol pendant la construction et la durée de vie de l'ouvrage (barrages dégelés).

La construction d'un barrage *gelé* imperméable utilise pratiquement n'importe quel type de sol, y compris des matériaux gelés ou dégelés. Le noyau du barrage et ses fondations seront gelés pendant ou immédiatement après la construction.

Un barrage imperméable *dégelé* doit être fondé sur un substratum rocheux adéquat ou sur un matériau incompressible et posséder un noyau ou une membrane étanche. Il faut aussi prévoir des dispositifs appropriés pour maîtriser les percolations à travers et sous le remblai. La conception d'un barrage *semi-imperméable* doit tenir compte du dégel des matériaux de fondation et des problèmes potentiels de tassement, de percolation et de stabilité.

Dans la zone de *pergélisol continu* où les températures du sol sont basses et les périodes de dégel courtes, on pourra construire des barrages imperméables, de faible hauteur (moins de 8 m), le remblai gelant naturellement au fur et à mesure que les matériaux sont mis en place par couches. Toutefois, dans la plupart des cas et surtout pour les grands barrages, il faut recourir à des méthodes de gel artificiel (par exemple, des systèmes de réfrigération mécaniques, ou la circulation d'air froid à travers des conduites verticales) pour créer et maintenir l'imperméabilité du noyau et des fondations. Pour les barrages de stériles, on peut également utiliser des endiguements comportant un noyau gelé. [Dufor et Holubec, 1988].

- Freezing of water in tunnels or buried pipelines creating ice problems.
- Freezing of water percolating into the ground thus creating frost heave in frost-susceptible soil.

In the following, the nature of these problems are described in relation to dams, spillways and outlet systems, tunnels and pipes, as well as submerged intakes and outlets.

5.7.1. Dams

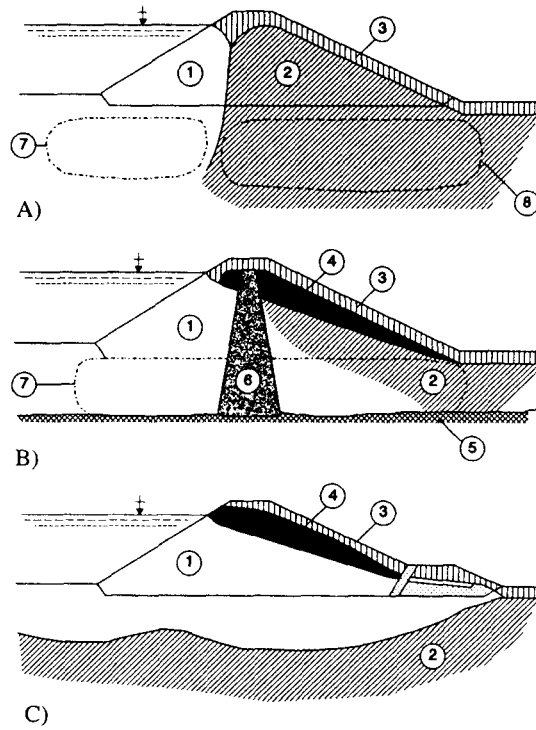
In Siberia a number of large and small dam structures have been constructed throughout the permafrost region. At least five large embankment dams with heights ranging from 20 to 125 m are now in operation in permafrost areas [Biyarov, 1973], [Johnston, 1981], [Sayles, 1987], [Tsyrovich et al, 1978]. The majority of dams on permafrost are earth fills because of the technical advantage of flexible structures requiring less strength in the foundations, and the economy in using local materials. Apparently no concrete dams have been founded on permafrost-affected soils, and only bedrock or dense till have been used for foundation of structures higher than 20 m [Johnston, 1981].

Two types of earthfill dams are suited to be constructed on permafrost: *impervious* or *semi-pervious*, see Fig. 20. Impervious dams may either be designed to maintain the foundation and embankment in a frozen condition (frozen dams), or take into account thawing of the permafrost foundation during construction and during the life of the structure (thawed dams).

A *frozen*, impervious dam may be constructed of practically any kind of soil including frozen or unfrozen material. The core of the dam and its foundation are frozen either during or immediately after construction.

A *thawed*, impervious dam must be founded on competent bedrock or incompressible material and have an impermeable core or membrane. Furthermore it must have appropriate provisions for handling seepage through and under the embankment. The design of *semi-pervious* dams must take into account the thawing of the foundation materials and the potential settlement, seepage, and stability problems that may arise.

In the *continuous permafrost* zone, where ground temperatures are low and the thawing seasons are short, low head (< 8 m), frozen, impervious dams may be built by natural freezing of the fill as the material is placed in layers. In most cases, however, and particularly for larger dams, artificial freezing methods (e.g., mechanical refrigeration systems or circulation of cold air through vertical ducts) must be used to create and maintain an impervious frozen core and foundation. Embankments with a frozen core are also found feasible for tailings' dams [Dufor and Holubec, 1988].



Dans la *zone de pergélisol discontinu* où le climat est plus chaud et la température du pergélisol plus élevée, il faut concevoir des barrages adaptés aux conditions de dégel. Le choix entre un barrage imperméable ou semi-imperméable dépendra des conditions locales du sol (sol riche en glace ou fondation rocheuse adéquate), des matériaux de remblai disponibles, de l'utilisation de l'ouvrage et du coût des différentes variantes de conception.

Pour permettre la construction de barrages en terre tout au long de l'année, il a fallu mettre au point des techniques particulières pour l'extraction, le stockage, la mise en place et le compactage des matériaux. Il faut excaver les taliks et le sol gelé, susceptibles de dégeler, et prendre des précautions particulières pour éviter des soulèvements dus au gel dans les fondations et le remblai lorsque le sol est gelé. En règle générale, dans les périodes où le dégel ouvre les fissures qui étaient remplies de glace, on effectue des injections dans ces fissures à partir de galeries incorporées à l'ouvrage. Ces injections pourront se poursuivre pendant 25 ou 50 ans après la construction du barrage.

Pour bien concevoir les endiguements de retenue d'eau dans les zones de pergélisol, il est essentiel de déterminer le régime thermique tout au long de la durée de vie de l'ouvrage. On a mis au point un certain nombre de méthodes pour évaluer les régimes thermiques de ces digues et de leurs fondations [Bogoslovskiy, 1950] et [Mukhetdinov, 1969] ; des méthodes pour calculer le transfert thermique causé par les percolations et la convection de l'eau [Brown et Johnston, 1970], la

Fig. 20

Thermal regime of dams on permafrost

Régime thermique des barrages sur du pergélisol

Ⓐ Impervious, frozen dam	Ⓐ <i>Barrage imperméable-gelé</i>
Ⓑ Impervious, thawed dam	Ⓑ <i>Barrage imperméable-dégelé</i>
Ⓒ Pervious, thawed dam	Ⓒ <i>Barrage perméable-dégelé</i>
① Permanently thawed soil	① <i>Sol dégelé en permanence</i>
② Perennially frozen soil (permafrost)	② <i>Sol gelé pendant plusieurs années (pergélisol)</i>
③ Seasonally frozen and thawed zone	③ <i>Zone périodiquement gelée et dégelée selon les saisons</i>
④ Perennially frozen or potential frost heave zone with water inflow	④ <i>Zone gelée pendant plusieurs années ou zone susceptible de présenter des soulèvements dus au gel avec apport d'eau</i>
⑤ Competent bearing strata	⑤ <i>Couches portantes adéquates</i>
⑥ Impermeable core	⑥ <i>Noyau imperméable</i>
⑦ Zone to be pre-thawed and compacted or excavated and backfilled	⑦ <i>Zone qu'il faut pré-dégeler et compacter, ou bien excaver et remblayer</i>
⑧ Zone in which natural taliks must be frozen	⑧ <i>Zone dans laquelle les taliks naturels doivent être gelés</i>

In the *discontinuous zone*, where the climate is warmer and permafrost temperatures are higher, dams must be designed for thawed conditions. The choice of constructing a semi-pervious or an impervious dam will depend on local ground conditions (ice-rich versus competent rock foundation materials), availability of fill materials, use of the structure, and cost of the various design alternatives.

Year-round construction work on earth dams has required development of special engineering methods for extraction, storage, placement and compaction of material. Taliks and frozen soil that may thaw out must be excavated and special care must be taken to prevent frost heave in foundation and embankment when the soil is frozen. Ice-filled fissures in rock foundations are usually grouted from galleries incorporated in the structure as long as thawing opens up the fissures. This grouting may be continued up to 25 or 50 years after the construction.

Essential to the design of water retaining embankments on permafrost is the determination of the thermal regime throughout the life of the structure. A number of methods have been developed for estimating the thermal regimes of these embankments and their foundations [Bogoslovskiy, 1950] and [Mukhetdinov, 1969], methods of calculation heat transfer due to seepage and convection of water [Brown and Johnston, 1970], convection of air within rockfill embankments

convection de l'air à l'intérieur des remblais en enrochement [Melnikov et Olivin, 1983] et [Mukhetdinov, 1969], et la modélisation de la pénétration du gel et du dégel dans le contexte des barrages [Knutson et al, 1990].

Une bibliographie complète sur les endiguements dans les zones de pergélisol est fournie par Sayles [1987].

5.7.2. Évacuateurs de crue et ouvrages de restitution

Un aménagement hydraulique incluant des barrages comprend normalement des ouvrages de prise d'eau et de restitution, de diverses conceptions et ayant divers objectifs. Pour les barrages construits dans la zone de pergélisol, on évite de placer les ouvrages de prise d'eau et de rejet dans le corps de l'ouvrage. Dans la plupart des cas, les évacuateurs de crue sont construits à la surface puisqu'ils servent à libérer non seulement l'eau mais aussi la glace du réservoir. Si l'eau du canal d'évacuation provoque une arrivée de chaleur dans le corps et les fondations de l'ouvrage, leur régime thermique pourra s'en trouver modifié au point d'entraîner une réduction de la capacité portante des fondations et des percolations qui affecteront l'intégrité globale de l'ouvrage. Par conséquent, tous les ouvrages d'un aménagement doivent normalement être construits pour fonctionner dans les mêmes conditions de température. Lors de la construction d'un barrage du type gelé, il faut construire les ouvrages de rejet de manière à ce que les fondations et les autres éléments restent à l'état gelé pendant tout le fonctionnement [Biyarov, 1975]. Il est préférable de placer les évacuateurs de crue à l'extérieur du barrage et d'utiliser des chenaux latéraux pour les écoulements rapides. Dans ce cas, la meilleure solution consiste à utiliser un canal sur des piliers. On réduit ainsi le dégel causé par la chaleur de l'eau sous le canal pendant les opérations d'évacuation, ainsi que par l'énergie radiante. Il faut prévoir des évacuateurs sans vannes car les ouvrages contrôlés accroîtront le réchauffement du coursier par l'eau du réservoir et par l'eau s'échappant à travers les vannes.

Au barrage de Irelyakh, dans le Yakutia, en URSS, les fondations ont dégelé jusqu'à une profondeur d'environ 50 m à cause du passage de l'eau dans le déversoir pendant une période de 7 ans [Johnston et Sayles, 1980].

Il est recommandé d'utiliser des conduites pour l'ouvrage d'évacuation uniquement lorsque l'eau est évacuée du réservoir sous des débits relativement faibles pendant une période prolongée. Chaque conduite doit posséder un siphon à l'entrée et une vanne à la sortie et doit être placée sur des piliers. Il faut éviter les bassins de tranquillisation, les dispositifs brise-charge et autres dépressions en aval de l'ouvrage car ils entravent le refroidissement de l'ouvrage d'évacuation en hiver et peuvent causer une diminution de la zone gelée, entraînant une réduction inévitable de la résistance du barrage. Des abris installés au-dessus des évacuateurs de crue contribuent au refroidissement. En été, ils protègent l'ouvrage des rayons du soleil, tandis qu'en hiver ils éliminent l'effet de réchauffement de la couche de neige (Fig. 21) [Bogoslovskiy *et al.*, 1963].

[Melnikov and Olivin, 1983] and [Mukhetdinov, 1969], and modelling of frost and thaw penetration in relation to dams [Knutson et al, 1990].

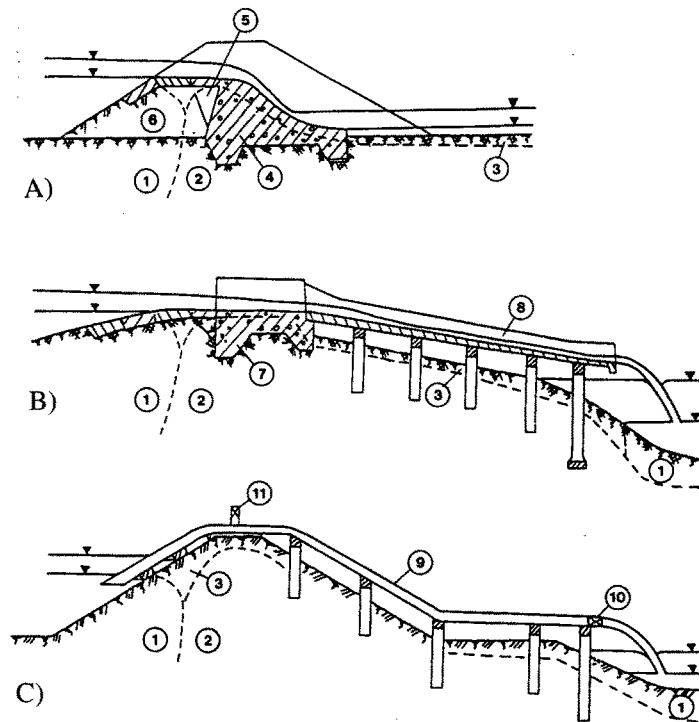
A comprehensive bibliography of embankments on permafrost is given by [Sayles 1987].

5.7.2. Spillways and outlet systems

A hydraulic engineering installation containing dams usually includes water-outlet and water-intake structures of various designs and for various purposes. When dams are built in the permafrost zone, one usually avoids locating the water-outlet and water-intake structures in the body of the dam. Spillways are most often built at the surface, since they are used to release not only water but also ice from the reservoir. Introduction of heat into the body and foundation of the structure from the water in the spillway channel may lead to a change in their temperature regime, and this could cause a loss of bearing capacity in the foundation, seepage, and loss of overall structural integrity. Therefore, all structures of an installation usually should be built to operate under the same temperature conditions. In building a dam of the frozen type the water-outlet structures should also be built in such a way that both the foundation and the other elements are maintained in the frozen state during operation [Biyanov, 1975]. It is preferable to place spillways outside the dam, and to use side channels for rapid flow. Rapid flow is best obtained by a flume on pillars. This decreases thawing under the flume from water heat during spillway operation and from radiant energy. Outlets should be planned without gates, as regulated outlets will increase warming of the spillway from storage reservoir water and from water leaking through the gates.

At the Irelyakh River dam in Yakutia, U.S.S.R., the foundation thawed to a depth of approximately 50 m caused by water flow through the spillway during a 7 year period [Johnston and Sayles, 1980].

It is advisable to use pipes for the spillway structure only when water is spilled from the reservoir by comparatively small discharges for a long time. The pipe should have a siphon at the inlet and a valve at the outlet, and the pipe should be placed on pillars. Stilling basins, pressure relief installations, and other depressions in the downstream side should be avoided, because they hinder a proper cooling of the spillway structure in winter and may cause diminishing of the frozen zone for an inevitable decrease in dam strength. Shelters above spillway dams help in cooling. In summer they protect the structure from the rays of the sun, whereas in winter they prevent the warming effect of the snow cover (Fig. 21) [Bogoslovskiy et al, 1963].



5.7.3. Conduites et galeries

Pour les aménagements hydrauliques comprenant des conduites et situés dans des climats froids, deux problèmes majeurs se présentent :

- *Les conduites chaudes* enterrées dans le pergélisol peuvent entraîner le dégel de la fondation et par conséquent le tassement de la conduite. C'est un problème fréquent dans les pipelines transportant du gaz ou du pétrole.
- *Les conduites froides* transportant de l'eau présentent des risques de gel et de formation de glace à l'intérieur.

Pour les conduites chaudes, la meilleure solution consiste souvent à installer des piliers-supports pour éviter l'effet de la conduite sur le sol gelé. Il sera parfois nécessaire d'utiliser des pieux thermiques qui maintiennent le sol dans un état gelé [Johnston, 1981]. Pour les conduites chaudes enterrées, il pourra s'avérer nécessaire de poser des tuyaux de refroidissement dans la tranchée.

Dans les *conduites* transportant de l'eau froide, l'épaisseur de glace sur la paroi interne variera suivant la longueur de la conduite et avec le temps. Dans des conditions d'exploitation constante, la formation de glace à l'intérieur a progressivement tendance à atteindre un état stable lorsqu'un équilibre s'établit entre l'effet de refroidissement et la chaleur de frottement produite par le passage de l'eau.

Fig. 21

Examples of water escape structures in permafrost regions in Russia [Bogoslovskiy, 1963]

Exemples d'ouvrages d'évacuation dans les zones de pergélisol, en Russie [Bogoslovskiy, 1963]

- | | | | |
|---|---------------------------------------------------------------|---|--------------------------------------------------------------------------|
| Ⓐ | Overflow dam | Ⓐ | <i>Barrage à crête déversante</i> |
| Ⓑ | Chute | Ⓑ | <i>Coursier</i> |
| Ⓒ | Siphon spillway | Ⓒ | <i>Évacuateur en siphon</i> |
| ① | Zone of permanently thawed ground | ① | <i>Sol dégelé en permanence</i> |
| ② | Zone of permanently frozen ground | ② | <i>Sol gelé en permanence</i> |
| ③ | Zone of alternating thawing and freezing | ③ | <i>Zone périodiquement dégelée et gelée</i> |
| ④ | Body of dam | ④ | <i>Corps du barrage</i> |
| ⑤ | Beam for strengthening surface of fill to prevent washing out | ⑤ | <i>Poutre pour renforcer la surface du remblai et empêcher l'érosion</i> |
| ⑥ | Fill, serving as heat insulation | ⑥ | <i>Remblai utilisé comme isolant</i> |
| ⑦ | Rim of chute | ⑦ | <i>Ancrage du coursier</i> |
| ⑧ | Trough of chute on piles | ⑧ | <i>Canal d'écoulement sur piliers</i> |
| ⑨ | Conduit of siphon spillway | ⑨ | <i>Conduit de l'évacuateur en siphon</i> |
| ⑩ | Downstream gate | ⑩ | <i>Vanne aval</i> |
| Ⓜ | Valve for shutting off siphon | Ⓜ | <i>Vanne de fermeture du siphon</i> |

5.7.3. Pipelines and tunnels

For hydraulic structures in cold climate, which include pipelines, two major problems occur:

- *Warm pipelines* that are buried in permafrost may cause thawing of the foundation and a consequently settlement of the pipeline. This is often the problem for pipelines carrying oil or gas.
- *Cold pipelines* carrying water will be subject to freezing and interior ice formation.

For warm pipelines, support piers are often the best solution to prevent influence from the pipeline on the frozen ground. It may be necessary to use thermal piles, which keep the ground in a frozen state [Johnston, 1981]. For warm, buried pipelines cooling pipes placed in the trench may be necessary.

In *pipelines* carrying cold water, the ice thickness at the inside surface of the walls will change as a function of the length of the pipeline and with the passage of time. With constant operating conditions, internal icing tends gradually to take on a steady-state form when an equilibrium between the cooling effect and the frictional heat produced by the running water is obtained. If the water is not run-

Si l'eau ne circule pas, une quantité critique de glace risque de se former et, par la suite, la couche de glace augmente jusqu'à ce qu'elle bouche complètement la conduite. Si la conduite est utilisée comme conduite forcée pour une centrale électrique, l'eau sous pression ne gèlera pas, mais on risque d'avoir de l'eau en surfusion. Lorsque la pression baisse en arrivant dans les turbines, l'eau se transformera en glace, interrompant ainsi le fonctionnement de la turbine ou bloquant l'aspirateur ou le canal de fuite.

La température de l'eau à son entrée dans la conduite est le facteur fondamental qui détermine l'équilibre de la formation de la glace. Si la température de l'eau d'arrivée est proche du point de congélation, la formation de glace sur les parois internes près de l'entrée sera très importante. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'entrée, la formation de glace diminue. La glace qui se forme à l'intérieur de la conduite diminue sa section d'écoulement et donc réduit sa capacité. En outre, la vitesse accrue entraînera une augmentation des contraintes de cisaillement du fait des pertes de charges accrues. Ce phénomène risque d'amener la couche de glace à se détacher de la paroi, provoquant un embâcle dans la conduite, qui aura un effet destructeur sur le matériel situé en aval. Une montée soudaine de la température de l'eau d'arrivée ou le dégel de la conduite pourront avoir les mêmes conséquences. Pour réduire ces problèmes, la conduite sera souvent isolée et protégée du rayonnement solaire. Les portions de conduite comprenant des vannes, etc. sont souvent recouvertes d'abris chauffés ou sont chauffées par des câbles électriques. Un certain nombre de conduites forcées sont en service dans les régions froides de l'URSS depuis un certain temps déjà.

On a percé des galeries dans des roches gelées en permanence, à des fins de reconnaissance et d'exploitation minière. Lorsqu'on perce une galerie dans le pergélisol, la glace présente dans les roches semble stabiliser la montagne [Sondbø et Orheim, 1987] et, du point de vue de la mécanique des roches, un pergélisol stable est préférable à des conditions de dégel. Toutefois, pendant la construction et l'exploitation des galeries, la chaleur de l'air peut faire dégeler la roche, causant ainsi de l'instabilité qui pourra entraîner l'effondrement du toit [Myrvang, 1988]. Lorsqu'on utilise des galeries pour acheminer de l'eau, il faudra en outre tenir compte du risque de formation de glace mentionné précédemment pour les conduites froides. Dans les régions arctiques, la température de l'eau à la prise risque d'être seulement de quelques dixièmes de degré Celsius au-dessus du point de congélation surtout si la prise d'eau est proche de la surface du réservoir. Si la galerie est utilisée comme galerie d'amenée à une centrale électrique, on risque de rencontrer les mêmes problèmes que pour les conduites forcées. Pour éviter ces problèmes de glace et d'eau surfondue, il pourra s'avérer nécessaire d'implanter la galerie à la plus grande profondeur possible afin de bénéficier du fait que la température augmente avec la profondeur. Aux endroits les plus cruciaux, juste après la prise d'eau et avant les turbines, il faudra peut-être acheminer l'eau dans des conduites isolées qui pourront être chauffées. La conception des galeries d'acheminement d'eau dans une roche gelée en permanence doit aussi tenir compte du fait que l'eau stagnante gèle très rapidement. Il faudra donc recourir à une conception particulière des prises d'eau, des vannes, des cheminées d'équilibre et des conduites de sortie pour éviter l'eau stagnante [Mai, 1987].

Bien que l'on n'ait encore jamais construit de galeries dans du pergélisol, on a mené des études approfondies et élaboré des logiciels pour calculer le régime

ning, critical icing may develop, and subsequently the layer of ice increases up to complete freezing of water throughout the cross-section. If the pipeline is used as a penstock for a power station, the water under pressure will not freeze, but super cooled water may occur. When the pressure drops passing the turbine, some of the water may be transformed into ice that may interrupt the turbine operation or block the outlet.

The basic factor that determines the character of steady-state icing is the temperature of the water entering the pipeline. If the inlet water has a temperature near the freezing point, very strong icing of the internal surface of the walls near the intake will be the result. Proportional to the distance from the intake the icing diminishes. Internal icing causes a reduction in the cross-section area and reduces the capacity of the pipeline. Furthermore, the higher velocity will result in an increased shear stress caused by hydraulic head loss. This may cause a separation of the ice layer from the wall causing an ice-jam in the pipeline, with a destructive effect on the mechanisms located downstream as a result. A sudden temperature rise of the inflow water or thawing of the pipe may have the same effect. To diminish these problems, the pipeline is often insulated and sheltered from sun radiation. Stretches of the pipe with valves, etc. are often covered with heated housings or heated by electrical cables. A number of hydropower pipelines in cold regions have been in operation in U.S.S.R. for a long period

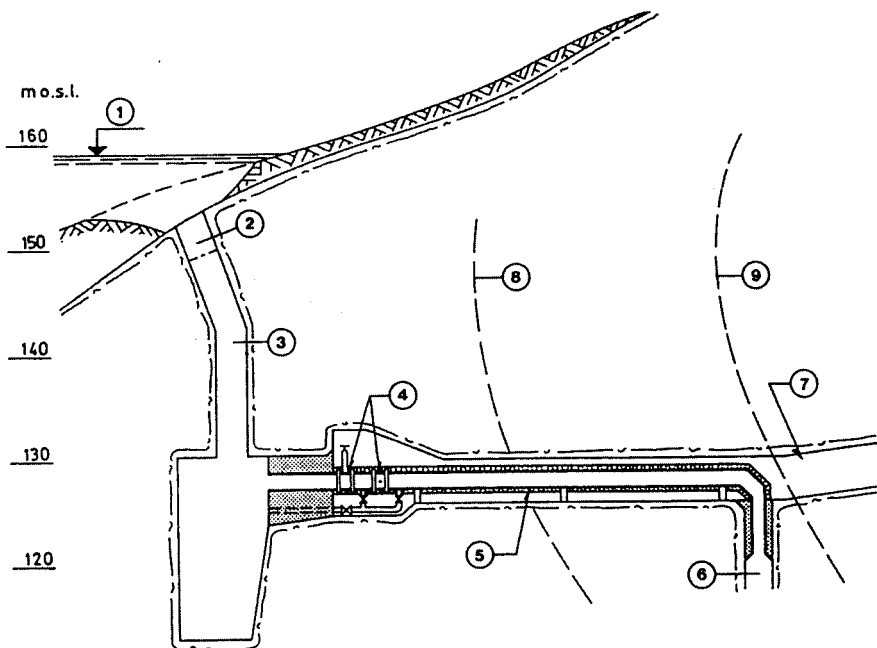
A number of *tunnels* have been made in perennial frozen rock for investigation and mining purposes. When tunnelling in permafrost, ice in the rock seems to stabilize the mountain [Sondbø and Orheim, 1987], and from a rock mechanics point of view, stable permafrost conditions are to be preferred to thawed conditions. During the construction and operation of the tunnels, however, heat from the air may thaw out the frozen rock and cause instability and collapse of the roof [Myrvang, 1988]. When using tunnels for supplying water, the risk of ice formation in the tunnels must furthermore be considered as described above for cold pipelines. In arctic areas the temperature of the intake water may be only a few tenths of a degree above freezing level especially if the intake is close to the surface of the reservoir. If the tunnel is used as a headrace for a power station, the same problems may occur as described for penstocks. To avoid problems with ice and super cooled water it may be necessary to locate the tunnel as low as possible to benefit from the fact that the temperature is increasing with the depth. At the most critical parts of the tunnel, just after the intake and in front of the turbines, it may be necessary to conduct the water in insulated pipes that can be heated. The design of water supply tunnels in perennial frozen rock must also take into account that stagnant water will freeze in a short time. Therefore, intakes, gates, surge arrangements, and outlets must be designed in a special way to avoid stagnant water [Mai, 1987].

Although no tunnels have been constructed in permafrost, comprehensive studies and development of computerized models to calculate the thermal regime

thermique autour des galeries et des centrales électriques dans le cadre de la planification de centrales électriques au Groenland. Les calculs ont démontré que la chaleur accumulée dans les parois de la galerie, suite à l'entrée d'eau chaude en été, aurait très peu d'influence au bout de trois mois avec une température d'eau de prise proche du point de congélation. A ce moment-là, la température de la paroi de la galerie est très proche de la température de l'eau et le gradient de température vers la galerie est négligeable. Cela signifie que la chaleur accumulée se diffuse dans la roche environnante et ne retourne pas dans l'eau [Mai, 1995].

5.7.4. Prises d'eau et ouvrages de restitution immergés

Dans les lacs arctiques, la température de l'eau augmente avec la profondeur pendant l'hiver. A moins que le lac ne soit très peu profond, la température au fond sera supérieure à 0°C [Iversen et Gottlieb, 1990]. Les prises d'eau immergées dans des lacs ou des retenues devront se situer à la plus grande profondeur possible afin de bénéficier du réchauffement de l'eau en profondeur (Fig. 22). Toutefois dans les réservoirs régulateurs, l'eau de surface risque de se rapprocher de la prise d'eau et il faudra prendre des mesures particulières pour éviter la formation de glace lorsque l'eau acheminée dans une galerie entre dans la zone de pergélisol.



around tunnels and power stations have taken place in connection with planning of power stations in Greenland. The calculations have shown that the heat accumulated in the tunnel walls from warm inlet water during the summer will have very little influence after three months with intake water temperatures close to the freezing point. At that time the temperature of the tunnel wall is very close to the water temperature, and the temperature gradient towards the tunnel is negligible. This means that the accumulated heat is conducted to the surrounding rock and not back into the water [Mai, 1995].

5.7.4. Submerged inlets and outlets

In arctic lakes the water temperature is increasing with the depth during the winter. Unless the lake is very shallow the temperature will be above 0°C at the bottom [Iversen and Gottlieb, 1990]. Submerged intakes in lakes or reservoirs should be located as deep as possible in order to benefit from the warm water (Fig. 22). In regulated reservoirs, however, the water surface may become close to the intake and special measures must be taken to avoid ice formation when the water enters the permafrost zone in a tunnel.

Fig. 22

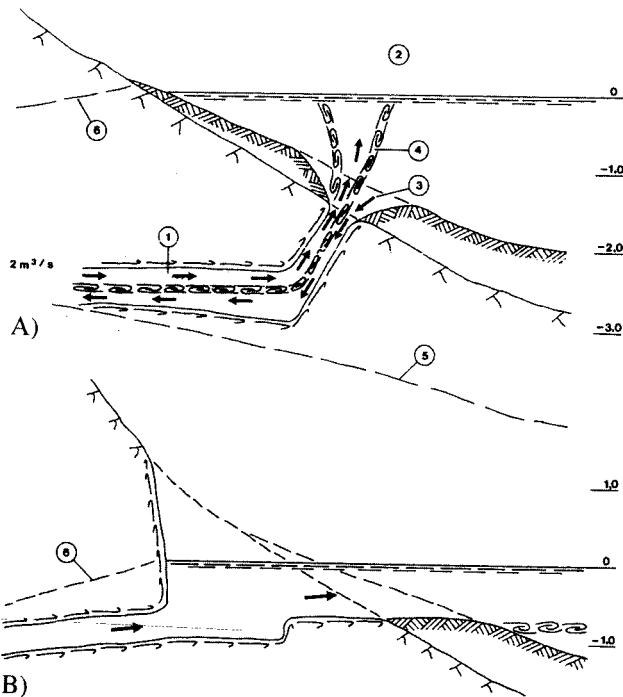
Proposed intake for hydroelectric power scheme in Greenland [Mai, 1987]

Prise d'eau proposée pour un aménagement hydroélectrique au Groenland [Mai, 1987]

- | | |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| ① Low supply level in reservoir | ① <i>Niveau minimal d'exploitation de la retenue</i> |
| ② Lake bottom piercing | ② <i>Prise d'eau (percement au fond du lac)</i> |
| ③ Intake shaft | ③ <i>Puits de prise d'eau</i> |
| ④ Valves | ④ <i>Vannes</i> |
| ⑤ 1.6 m dia. insulated, headrace steel pipe | ⑤ <i>Conduite d'amenée en acier, de 1,6 m de diamètre et isolée</i> |
| ⑥ Pressure shaft | ⑥ <i>Puits en charge</i> |
| ⑦ Access tunnel | ⑦ <i>Tunnel d'accès</i> |
| ⑧ Expected maximum extent of 0°C isotherm | ⑧ <i>Étendue maximale prévue de l'isotherme de 0° C</i> |
| ⑨ Present 0°C isotherm | ⑨ <i>Isotherme actuelle de 0° C</i> |

La restitution d'eau douce dans un milieu marin en hiver aura une influence considérable sur l'état de la glace. L'épaisseur de la couverture de glace naturelle dans un fjord dépend beaucoup de l'écoulement d'eau douce vers le fjord pendant l'hiver. S'il n'y a pas d'écoulement, la salinité de l'eau augmentera et par conséquent la couverture de glace sera beaucoup plus mince. L'évacuation d'eau douce provenant, par exemple, d'une centrale électrique modifiera la salinité de l'eau et provoquera une augmentation de l'épaisseur de glace. Dans la plupart des fjords, on pourra éviter ce phénomène en mélangeant l'eau douce avec de l'eau de mer chaude, créant ainsi un mélange qui ne gèlera pas étant donné sa température et sa salinité. On peut forcer ce mélange en localisant la sortie à une grande profondeur.

Toutefois, dans les régions de pergélisol, la température de l'eau de mer, même à un niveau bas, risque d'être au-dessous du point de congélation de l'eau douce à cause de la présence de pergélisol sous le fond marin. Lorsque de l'eau douce très froide est rejetée à la sortie d'une galerie en profondeur, il peut y avoir formation de frasil pendant le mélange des eaux. En outre, de l'eau salée froide risque d'entrer dans la galerie et entraîner la formation de frasil lorsqu'elle se mélange à l'eau douce froide. Dans de telles circonstances, la meilleure solution consiste à installer l'ouvrage d'évacuation à un niveau plus élevé, ce qui amènera la formation d'une couche d'eau douce entre la glace du fjord et l'eau du fjord qui a une salinité plus élevée (Fig. 23). Cependant, une telle solution entraînera une augmentation uniformément répartie de la couverture de glace dans le fjord comme dans un lac d'eau douce, mais cette situation demeure préférable à une formation de glace beaucoup plus épaisse, à proximité de l'ouvrage d'évacuation, en raison du frasil [Mai et al, 1987].



Discharge of freshwater into a marine, saltwater environment in wintertime will have a significant influence on the ice condition. The thickness of the natural ice cover on fiords is very much dependent on the run-off of fresh water to the fiord during winter. If no run-off takes place, the water will become more saline, and the ice cover will consequently be thin. The outlet of freshwater from (for example) a hydropower plant will change the salt content and cause an increase of the ice thickness. In most fiords this can be avoided if the freshwater is heavily mixed with warm sea water thus creating a mixture that will not freeze, given its temperature and salinity. The mixing can be forced by locating the outlet deep below the water surface.

In permafrost areas, however, the sea water temperature, even at a lower level, may be below the freezing point for freshwater because of permafrost condition below the sea bottom. When very cold freshwater is discharged from a deep tunnel outlet, frazil ice may be formed during the mixing. Furthermore, cool saltwater may enter the tunnel with the risk of developing frazil ice when it mixes with the cold freshwater. Under such circumstances the best solution will be an outlet at a higher level, which will result in a fresh water layer between the fiord ice and the more dense saline fiord water (Fig. 23). This will, however, result in an evenly distributed increase of the fiord ice thickness to the same level as on a freshwater lake, but this is to be preferred to a much thicker ice formation close to the outlet caused by frazil ice [Mai et al, 1987].

Fig. 23

Tunnel outlets in a fjord in permafrost region

Galeries de fuite dans un fjord situé dans une région de pergélisol

- | | |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------|
| A) Deep outlet | A) <i>Ouvrage de rejet profond</i> |
| B) Shallow outlet | B) <i>Ouvrage de rejet peu profond</i> |
| ① 12 m ² tailrace tunnel | ① <i>Galerie de fuite de 12 m²</i> |
| ② Fjord | ② <i>Fjord</i> |
| ③ Entrainment of saline water below 0°C | ③ <i>Entraînement de l'eau salée sous 0° C</i> |
| ④ Mixing of freshwater and saline water | ④ <i>Mélange de l'eau douce et de l'eau salée</i> |
| ⑤ 0°C isotherm | ⑤ <i>Isotherme de 0° C</i> |
| ⑥ -1°C isotherm | ⑥ <i>Isotherme de - 1° C</i> |

5.8. REFERENCES

- ANDERSLAND, O.B. and ANDERSON, D.M. (ed.) 1978. *Geotechnical engineering for cold regions*. McGraw-Hill, New York, NY, 576p.
- BIYANOV, G.F. 1973. *Experience in construction and operation of low-head dams on permafrost soils* (in Russian), *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*, No. 9.
- BIYANOV, G.F. 1975. "Dams on permafrost", *US Army Corps of Engineers, CRREL*, Hanover, N.H, draft transl. 555, 234 p.
- BOGOSLOVSKIY, P.A. 1950. "Ice regime of hydroelectric station pipelines." *US Army CRREL* draft transl. 605, 1977, 133p.
- BOGOSLOVSKIY, P.A., VESELOV, V.A., UKHOV, S.B., STOTSENKO, A.V., and TSVID, A.A. 1963. "Dams in permafrost". *Proc. Int. Conf. on Permafrost*, Lafayette, Ind., pp. 450-455.
- BROWN, G.A. and JOHNSTON, G.H. 1970. "Dikes on permafrost: Predicting thaw and settlement". *Can. Geotech. J.* Vol. 7, No. 4, p. 365-371.
- BROWN, R.J.E. 1967. "Permafrost in Canada". *Canada National Research Council, Div. Building Research, Map NRC 9769, and Geol. Surv. Can., Map 1246A*.
- BROWN, R.J.E. and KUPSCH, W.O. 1974. "Permafrost Terminology". *Canada National Research Council, Associate Committee Geotechnical Research, Tech. Memo. 111, 62p*.
- DEPARTMENTS OF THE ARMY AND THE AIR FORCE 1987. "Arctic and subarctic construction - General provisions", *Tech. manual No.5-852-1*, Washington D.C., 58 p.
- DUFOUR, S. and HOLUBEC, I. 1988. "Performance of two earthfill dams at lupin", *N.W.T. Proc. 5th Int. Conf. on Permafrost*, Trondheim, Norway, pp. 1217-1222.
- FLAATE, K. 1987. "Permafrost in the Northern Hemisphere". *J. Frost Action in Soil*, XII 1987, No. 26, Oslo, Norway, pp.11-13.
- GOLD, L.W., and LACHENBRUCH, A.H. 1973. "Thermal conditions in permafrost - A review of North American literature". *Proc. 2nd Int. Conf. on Permafrost*, Yakutsk, USSR, pp. 3-25.
- IVERSEN, S. and GOTTLIEB, L. 1990. Arctic lakes, "Thermodynamical and hydrodynamical engineering". In: *Hydropower in permafrost* (H. Mai ed.), *Danish Society for Arctic Technology*, Copenhagen, 1995, (in press).
- JOHNSTON, G.H. (Ed.) 1981. *Permafrost, Engineering design and construction*, Wiley, New York, NY, 540 p.
- JOHNSTON, G.H. and BROWN, R.J.E. 1966. "Occurrence of permafrost at an Arctic lake". *Nature*, Vol. 211, No. 5022, pp. 952-953.
- JOHNSTON, T.C. and SAYLES, F.H. 1980. "Embankment dams on permafrost in the USSR", *US Army CRREL* special report 80-41.

- JUDGE, A.S. 1973a. "Deep temperature observations in the Canadian North". *Proc. 2nd Int. Conf. on Permafrost*, Yakutsk, USSR, pp. 35-40.
- JUDGE, A.S. 1973b. "The prediction of permafrost thickness". *Can. Geotech. J.*, Vol. 10. No.1, pp.1-11.
- KNUTSSON, S. SHENG, D., EURENIUS, J., NORSTEDT, U.B., and REHBINDER G. 1990. "Dams and Embankments on Permafrost". In: *Hydropower in permafrost* (H. Mai ed.), Danish Society for Arctic Technology, Copenhagen, 1995 (in press).
- KRZEWSKI, T.G. and TART Jr., R.G. (Ed.) 1985. *Thermal design: Considerations in frozen ground engineering*. ASCE, New York, NY, 277 p.
- MACKAY, J.R. 1967. "Permafrost depths, Lower Mackenzie Valley", *N.W.T. Arctic*, Vol. 20, No. 1, pp. 21-26.
- MAI, H. 1987. "Hydropower tunnels in permafrost". *Proc. Int. Conf. on Hydropower*, Oslo, Norway, pp. 783-794.
- MAI, H. Ed. 1995. *Hydropower in permafrost - Computerized models for reservoir, tunnels and dams*. Danish Society for Arctic Technology, Copenhagen.
- MAI, H., STIGEBRANDT, A. and BERGANDER, B. 1987. "Submerged outlet into a fiord from a power station in Greenland". *Proc. Workshop on Hydropower in Arctic Climates*, Trondheim, Norway, July 1987, 18 p.
- MELNIKOV, P.I. and OLOVIN, B.A. 1983. "Permafrost zone dynamics in the area of the Vilyuy River hydroelectric scheme". *Proc. 4th int. conf. on permafrost*, Washington D.C., p. 838-842.
- MUKHETDINOV, N.A. 1969. "Thermal regime of the downstream shoulder of rock-fill dams". *US Army CRREL transl.* 586, 1977.
- MUKHETDINOV, N.A. 1973. "Development of methods for calculation of the thermal regime of rockfill dams in the regions of severe climate". *US Army Corps of Eng., CRREL*, Hanover N.H, draft transl. 616, 1977, 11p.
- MULLER, S.W. 1947. "Permafrost or permanently frozen ground and related engineering problems". J.W. Edwards - Ann Arbor, Michigan, 231 p.
- MYRVANG, A.M. 1988. "Rock mechanics related to coal mining in permafrost on Spitsbergen". *Proc. 5th Int. Conf. on Permafrost*, Trondheim, Norway, pp. 1435-1440.
- PÉWÉ, T.L. 1982. "Geologic hazards of the Fairbanks area", *Alaska. Special Report 15, Division of Geological and Geophysical Surveys*, State of Alaska, 109 p.
- PHUKAN, A. 1985. "Frozen ground engineering". *Prentice-Hall*, New Jersey, 336 p.
- SAGE, B.L. 1986. "The Arctic & its wildlife". *Facts On File Publications*. New York, NY, 190 p.
- SAYLES, F.H. 1987. "Embankment dams on permafrost - design and performance summary, bibliography and an annotated bibliography". *US Army Corps of Eng., CRREL*, Hanover, N.H, special report 87-11, 109 p.

- SONDBØ, L. and ORHEIM, A. 1987. "Experience from tunneling in Svalbard." *J. Frost Action in Soil*, XII 1987, No. 26, Oslo, Norway, pp. 43-49.
- TSYTOVIDH, N.A. 1975. "The mechanics of frozen ground". *McGraw-Hill*, 426 P.
- TSYTOVIDH, N.A., KRONIK, YA.A., and BIYANOV, G.F. 1978. "Design, construction, and performance of earth dams on permafrost in the far North". *Proc. 3rd Int. Conf. on Permafrost*, Ottawa, Ont., p. 137-149
- TSYTOVIDH, N.A., UKHOVA, N.V. and UKHOV, S.B. 1972. "Prediction of the temperature stability of dams built of local materials on permafrost", *US Army Corps of Eng., CRREL*, Hanover, N.H, transl 435.
- WASHBURN, A.L. 1951. "Geography and Arctic lands". *In: Geography in the Twentieth Century*. (H.Mai ed.) Philosophical Library, New York, pp. 269-271.

6. EXPÉRIENCE D'EXPLOITATION ET EXEMPLES

6.1. DÉGÂTS AUX VANNES D'ÉVACUATEUR

6.1.1. Barrage Imnäs - Suède

Le 12 février 1979, on a constaté qu'une des trois vannes segment du barrage Imnäs, situé au centre de la Suède, avait été endommagée par des glaces (Billfalk, 1979). La partie supérieure de la vanne avait subi une déformation permanente de 0,05 mètre. On a aussi constaté que certaines des poutrelles verticales de la vanne avaient flambé.

Une analyse mécanique a permis d'estimer qu'une force horizontale d'environ 235 kN/m s'était exercée sur la vanne au niveau du plan d'eau.

On a installé sur les vannes un chauffage à infrarouge, afin qu'il y ait toujours de l'eau devant celles-ci et de manière à éliminer la dangereuse pression des glaces. Cependant, on a observé que cette mesure ne parvenait à maintenir qu'une couche d'eau peu profonde, au niveau supérieur de la couverture de glace. Sous cette mince couche d'eau, il semblait bien que la vanne restait en contact avec la couverture de glace, de 2,0 mètres d'épaisseur à cet endroit.

On pouvait imaginer deux mécanismes distincts susceptibles d'avoir occasionné les dégâts constatés. Ce pouvait être des pressions de la glace résultant des variations du plan d'eau, ou bien des pressions de la glace d'origine thermique.

i) *Pressions des glaces résultant des variations du plan d'eau*

L'épaisseur de la couverture de glace était de 2,0 m, 1,3 m et 1,1 m à des distances respectives de 1 m, 7 m et 15 m de la vanne. En tenant compte du fait que la glace touchait la vanne, on a conclu que son épaisseur augmentait près de la vanne à cause des variations du plan d'eau.

La retenue du barrage Imnäs alimente la centrale Kilforsen, qui ne fonctionnait que de jour. Par conséquent, entre 6h00 et 19h00 le niveau de l'eau baissait d'environ 0,5 m. La nuit, l'eau remontait d'autant, d'où un cycle quotidien de son niveau.

En supposant des conditions élastiques, on peut estimer grosso modo que la baisse du niveau de l'eau produisait une force horizontale de quelque 230 kN/m sur la vanne. Puisque le niveau de l'eau variait lentement, la déformation plastique réduisait sans doute considérablement cette force, de sorte qu'on ne pouvait guère envisager que ces seules variations avaient été responsables des dégâts causés à la vanne.

6. OPERATIONAL EXPERIENCE AND CASE STUDIES

6.1. DAMAGE TO SPILLWAY GATES

6.1.1. Imnäs dam - Sweden

On February 12, 1979, it was observed that one of three tainter gates at Imnäs Dam located in mid-Sweden had been damaged due to ice induced forces [Billfalk, 1979]. The gate had gotten a permanent deflection on its upper part of about 0.05 meter. It was also noticed that a number of vertical girders on the gate had buckled.

On the basis of a structural mechanics analysis, it was estimated that the gate had experienced a horizontal force at the water level of about 235 kN/m.

Infrared heaters were installed on the gate, the idea being to maintain open water in front of the gates and thereby eliminate dangerous ice pressure. However, observations made it clear that the supplied heat was only able to maintain a shallow trench of open water at the upper part of the ice cover. The ice cover, that was 2.0 meter thick close to the gate, apparently was in contact with the gate beneath that shallow trench.

Two different mechanisms could be imagined as being the cause of the observed damage. One mechanism could be ice forces induced by water level variations and the other one might be thermally induced ice pressure.

i) *Ice forces induced by water level variations*

The ice cover thickness was measured to be 2.0 m, 1.3 m and 1.1 m at a distance of 1 m, 7 m and 15 m respectively upstream of the gate. Together with the observation that the ice cover rested against the gate, it indicated that the thickening of the ice close to the gate was caused by the water level variations.

The reservoir at Imnäs Dam feeds the power station Kilforsen, that was operated at daytime only. The result was that between 6.00 and 19.00 hours the water level in the reservoir was lowered about 0.5 meter. During the night the water level then rose again with the same amount causing a daily cycling of the reservoir level.

A very rough estimate, assuming elastic conditions, indicates that the lowering of the water level might have induced a horizontal force in the order of 230 kN/m against the gate. Due to the slow water level variation, plastic deformation probably reduced the actual force quite considerably. The water level variations could therefore hardly be the mechanism that alone caused the damage of the gate.

ii) *Pression thermique de la glace*

On a établi que la vanne avait dû être endommagée entre le 5 et le 12 février. Une station météorologique proche avait enregistré les températures de l'air suivantes (températures en °C) :

Date/mois	Temps (heures)		
	7:00 h	13:00 h	19:00 h
8/2	-20,0	-15,8	-20,2
9/2	-20,2	-7,2	-9,8
10/2	-23,0	-3,6	-4,4

Ces observations révèlent une hausse de la température d'environ 3°C par heure dans la matinée du 10 février.

Aucun renseignement n'est disponible, malheureusement, quant à l'épaisseur de la neige sur la glace à ce moment-là. Pour d'autres raisons encore, il est difficile d'évaluer avec précision la pression thermique de la glace, résultant de la hausse de température notée. Cependant, avec peu ou pas de neige sur la glace, une pression considérable a pu s'exercer.

iii) *Conclusion*

L'analyse permet de supposer que la vanne a été endommagée par l'un des mécanismes examinés ci-dessus, ou plus probablement par une combinaison de ces mécanismes.

Un autre facteur a pu jouer : le mouvement lent, mais plus ou moins continu, de la couverture de glace en direction des vannes de l'évacuateur, qu'on peut constater devant plusieurs barrages en Suède. On a noté, au cours de l'hiver, un déplacement de un mètre ou plus devant des barrages où se produisent quotidiennement des variations considérables du plan d'eau [Billfalk, 1979].

6.1.2. Barrage de la Rivière des Prairies - Canada

Hydro-Québec possède une expérience de plus de 50 ans dans l'exploitation d'une centrale au fil de l'eau sur la Rivière des Prairies, dans la région de Montréal.

L'évacuateur situé près de la centrale doit évacuer la glace durant tout l'hiver. Les blocs de glace proviennent du chenal de navigation qui doit être maintenu ouvert par un brise-glace. D'autre part, à l'approche du printemps, Hydro-Québec est obligé de provoquer une débâcle hâtive de la couverture de glace qui couvre le bief amont de la centrale, pour éviter les obstructions créées par des grandes plaques de glace arrivant à ce bief de l'amont. Des plaques de glace immenses, de 300 à 500 m de largeur sur 1 000 à 1 500 m de longueur, peuvent descendre vers l'évacuateur. Elles heurtent les piles, puis se brisent et sont ensuite évacuées à travers les 13 vannes de l'évacuateur de crue de la centrale de la Rivière des Prairies. Chaque vanne mesure 12,2 m de large par 8 m de haut.

ii) *Thermal ice pressure*

It was established that the gate must have been damaged between the 5th and the 12th of February. At a nearby weather station the following air temperatures were measured (temperatures in °C):

Date/month	Time (hours)		
	7:00 h	13:00 h	19:00 h
8/2	-20.0	-15.8	-20.2
9/2	-20.2	-7.2	-9.8
10/2	-23.0	-3.6	-4.4

As can be seen from these observations, a temperature rise of about 3°C per hour occurred in the morning of February 10.

Unfortunately there is no reliable information available about the snow depth on the ice for the actual period. It is also for other reasons difficult to estimate with any accuracy the size of the thermal ice pressure that developed due to the observed temperature rise. However, with little or no snow on the ice, quite a substantial ice pressure might have developed.

iii) *Conclusion*

On the basis of the analysis, it can be assumed that the gate could have been damaged due to one, or more probably, a combination of the discussed mechanisms.

A contributing factor might also have been the slow but more or less continuous movement of the ice cover towards the spillway gates that is observed at several Swedish dams. A displacement of one meter or more during the winter has been observed at dams where substantial daily water level variations occur [Billfalk, 1979].

6.1.2. *Rivière des Prairies Dam - Canada*

Hydro-Québec has operated the run-of-river plant at Rivière des Prairies in the Montreal area for more than 50 years.

The spillway near the powerhouse has to discharge ice throughout the entire winter. The ice comes from the shipping channel, which has to be kept open by an icebreaker. As spring approaches, Hydro-Québec has to force early breakup of the ice cover on the forebay of the power plant to prevent obstruction when ice sheets from further upstream arrive at the forebay. Immense sheets of ice, 300 to 500 m wide and 1 000 to 1 500 m long sometimes descend to the spillway. These ice sheets collide with the piers, break up and pass through the 13 gates of the spillway of the Rivière des Prairies power plant. Each gate is 12.2 m wide and 8 m high.

Au fil des ans, plusieurs vannes ont été déformées sous l'impact des plaques de glace. Quatre déformations importantes ont été notées sur les tabliers amont au cours d'une cinquantaine d'années d'exploitation, à savoir :

- une déformation couvrant une bande horizontale de 0,76 m de hauteur et de 2,0 m de largeur, et un enfoncement uniforme de 13,3 cm sur cette bande ;
- trois déformations couvrant la même surface que la précédente (0,76 m x 2,0 m), mais avec un enfoncement uniforme de 9,3 cm. Selon leur emplacement, on peut déduire que l'impact des blocs de glace peut se produire n'importe où sur la partie immergée de la vanne, mais cela se produit surtout sur la partie inférieure.

Au début des années 80, Hydro-Québec a décidé de construire un nouvel évacuateur en remplacement de l'ancien, trop vétuste. Des jauges de contrainte ont été installées sur 2 longrines inférieures de deux vannes pour tenter de mesurer les contraintes causées par l'impact des glaces. Les 2 vannes équipées d'appareils de mesure opéraient sous une charge d'eau de 3 m.

Les forces d'impact mesurées pendant un hiver étaient de 1 870 kN. Celles-ci étaient modestes comparativement à celles ayant pu provoquer les déformations existant sur le tablier des vannes. On a alors décidé de calculer les forces d'impact des glaces sur les vannes à partir des quatre déformations importantes indiquées ci-dessus. Pour faire les calculs, on a utilisé le modèle d'une coque mince préformée selon la courbure du tablier amont et attachée à ses extrémités par les longrines horizontales de la vanne.

Les calculs ont donné la pression à laquelle les tabliers amont peuvent résister sans déformation plastique additionnelle.

La plus importante déformation avait pu être causée par une force d'impact de 4 800 kN générée par un immense bloc de glace exerçant une pression uniforme de 3 100 kPa sur une surface effective de 0,76 m x 2,0 m de la vanne. Sur le site, il est difficile d'observer la surface exacte de contact d'un bloc de glace sur la vanne lors de l'impact, à cause de l'amoncellement de glace devant l'évacuateur. La surface donnée ci-dessus correspond à l'empreinte laissée sur la vanne.

Trois autres déformations de même importance avaient pu être provoquées par l'impact d'un immense glaçon exerçant sur la vanne une pression uniforme de 2 065 kPa sur une surface effective de 0,76 m x 2,0 m, soit l'équivalent d'une poussée de 3 200 kN.

C'est cette force d'impact de glace équivalant à une charge de 3 200 kN distribuée sur une bande horizontale de 0,76 m de hauteur et de 2,0 m de largeur, qui a été adoptée pour la conception des vannes du nouvel évacuateur (Prescriptions techniques, 1981). Dans la conception, on a considéré que cette bande d'application de la force pouvait se trouver n'importe où sur le tablier.

Le poids de la vanne conçue selon ce critère de chargement est de 105 Mg, soit 3 fois celui de la vanne dimensionnée pour résister à une poussée d'expansion thermique de 150 kN/m, critère adopté pour la conception des vannes d'évacuateur du complexe La Grande (chapitre 3.6).

Over the course of the years, a number of gates have deformed under the impact of these ice sheets because not all the gates can be opened completely when the ice passes through. Four major deformations have been noted on the skin plates over the 50 years of operation:

- Deformation of a horizontal strip 0.76 m high and 2.0 m wide and a uniform 13.3 cm indentation of the strip.
- Three deformations covering the same area (0.76 m x 2.0 m) with uniform indentation of 9.3 cm. Locations of these deformations suggest that ice floes can strike anywhere on the submerged portion of the gate, though it is mainly the lower part of the gate that is affected.

In the early 1980s, Hydro-Québec decided to build a new spillway to replace the old one, which was in poor condition. Stress meters were installed on two lower beams of two gates to try to measure stress due to ice impact. The two instrumented gates ran some 3 m below the surface of the water.

Impact forces of 1 870 kN were measured during the winter, rather small forces considering the existing damage to the gate steel. It was therefore decided to use the four major deformations mentioned above to calculate ice impact forces exerted on the gates. A thin-shell model preformed to match the curve of the upstream plate and attached at its ends by the horizontal beams of the gate was used for the calculations.

The calculations showed the pressure which the upstream gate plates could withstand without further plastic deformation.

The largest of the deformations could have been caused by an impact force of 4 800 kN generated by an immense ice floe exerting uniform pressure of 3 100 kPa on an effective area of 0.76 m x 2.0 m of the gate. On the site, it is difficult to see the exact area of contact of ice floe and gate because of the pile up of ice in front of the spillway. The area given above was that of the imprint left on the gate.

The three other comparable deformations may have been caused by the impact of an immense ice floe exerting uniform pressure of 2 065 kPa on an effective gate area of 0.76 x 2.0 m and generating a force of 3 200 kN.

This ice impact force (a load of 3 200 kN over a horizontal band 0.76 m high by 2.0 m wide) was adopted for design of the new spillway gates (Technical Specifications, 1981). For design purposes, it was assumed that the band subject to application of force could be anywhere on the skin plate.

A gate designed to this loading criterion weighs 105 Mg, that is, three times as much as a gate designed to withstand a thermal expansion thrust of 150 kN/m, the criterion adopted for design of the spillway gates of La Grande complex (section 3.6).

6.2. EXPÉRIENCE DANS L'EXPLOITATION DES PRISES D'EAU EN FINLANDE

6.2.1. Description générale des problèmes

Il faut concevoir les prises d'eau des barrages de manière que, même l'hiver, elles puissent fonctionner (ex. vannes à glissières) sans se boucher (ex. grilles). On peut éviter la plupart des problèmes liés aux glaces en chauffant les équipements ou en les installant dans une chambre chauffée. Des problèmes risquent toutefois de surgir à cause de la surfusion de l'eau, surtout dans le cas des grilles qui risquent de se faire endommager ou recouvrir de glace (frasil). Il en résultera une diminution de la production d'électricité, à cause des pertes de charge ou de l'eau déversée par l'évacuateur, ou encore la centrale peut être inondée. On peut d'habitude écarter ces problèmes si on évite la surfusion de l'eau en cherchant à obtenir une couverture de glace entière quand c'est possible. Pour y parvenir, on peut s'appuyer sur des modèles opérationnels et/ou sur des modèles mathématiques des glaces à partir de mesures hydrologiques (Huokuna, 1990).

Des complications concernant les prises d'eau risquent de se produire dans les cas suivants :

- la température de la masse d'eau d'une rivière tombe aux environs de 0°C, alors qu'il n'y a toujours pas de couverture de glace devant la prise d'eau, ce qui risque de se produire si l'hiver est doux ;
- la vitesse de l'eau est trop forte pour permettre la formation d'une couverture de glace, et il peut en résulter de la glace de frasil ;
- les grilles ne sont pas dégagées. Dans les rivières qui servent au transport de bois flottants ou dans les réservoirs artificiels, des billots, des mottes de tourbe ou divers débris peuvent obstruer en partie les grilles. Il n'en résulte pas forcément une perte de charge mesurable, mais le risque de formation de glace de frasil augmente.

En pareils cas, des difficultés peuvent surgir si :

- la température de l'air tombe rapidement au-dessous de 0°C ;
- des vents forts soufflent perpendiculairement au barrage ; de hautes vagues empêchent alors la formation d'une couverture de glace ;
- il neige, et une surfusion rapide de l'eau provoque la formation de glace visqueuse à la surface.

A noter aussi que l'utilisation de l'évacuateur peut s'avérer difficile ou que des problèmes peuvent surgir dans les chenaux de l'évacuateur, qui peuvent être recouverts de glace et servent en même temps à des activités humaines comme la pêche.

Les cas mentionnés se sont produits sur la rivière Kemijoki et ses affluents, qui se trouvent pour l'essentiel au nord du Cercle Arctique. En voici deux exemples.

6.2. OPERATIONAL EXPERIENCE WITH INTAKES IN FINLAND

6.2.1. General description of the problems

Intake structures for dams must be designed to be operated (e.g., slide gates) and kept clean (e.g., trash racks) even under winter conditions. Most problems due to ice can be avoided by heating the structures or by placing them in a heated chamber. Some problems may, however, occur due to supercooled water especially with trash racks, which can be damaged or covered by ice (frazil ice). This will cause a reduction in the power production because of head losses or spilled water, or it may cause a flooding of the power station. In ordinary cases these problems can be avoided by preventing the water from being supercooled by trying to form a solid ice-cover when possible. The operation procedure can be based on operational models and/or mathematical ice models based on hydrological measurements [Huokuna, 1990].

Some complications related to the intakes may occur when:

- The temperature of the water body in the river has decreased to near 0°C and there is still no ice-cover in front of the intake. This may occur during mild winters.
- The velocity of water is too high to allow formation of an ice-cover, and production of frazil ice may take place.
- The trash racks are not clean. In rivers with floating logs or in artificial reservoirs, the trash racks can be partly blocked by logs, peat or other trash. This may not show as a measurable head loss but it may increase the risk for formation of frazil ice.

Under these circumstances, difficulties may occur when:

- The air temperature rapidly decreases to below 0°C.
- The weather becomes windy with strong wind perpendicular to the dam. This will create high waves and prevent formation of an ice-cover.
- Snowfall occurs, which will cause a rapid supercooling and slush at the water surface.

One more remarkable factor is that the use of spillways can be difficult or may cause problems in spillway channels, which can be covered by ice having some human activities like fishing at the same time.

The above mentioned experiences are from the Kemijoki River system, mainly north of the Arctic Circle. In the following two examples are given.

6.2.2. Centrale Permantokoski

La centrale est petite (11 MW), avec un réservoir de 19 km². Au début de l'hiver 1985, soit le 26 octobre, une violente tempête s'est abattue, provoquant de fortes vagues qui déferlaient contre le barrage et la centrale. Pendant la tempête, la température de l'air est tombée à -3°C, et l'eau près de la centrale s'est trouvée en surfusion. Le lendemain la tempête s'est calmée, et la température de l'air est restée en dessous de 0°C.

Les pertes de charge à la grille étaient plus élevées que la normale, et le réservoir n'était toujours pas recouvert de glace. La nuit suivante, les pertes de charge à la grille ont rapidement augmenté ; on a arrêté les turbines dans l'après-midi. Une inspection effectuée par des plongeurs a révélé que la grille était complètement obstruée par 0,40 m d'épaisseur de glace contenant de la tourbe qui venait du fond du réservoir.

Heureusement, on s'est rendu compte de la situation à cause des pertes de charge anormales, et il a été possible d'utiliser sans difficulté l'évacuateur. Un dynamitage a permis de briser la couverture de glace.

6.2.3. Cours principal de la rivière Kemijoki

Le début de l'hiver 1985 a été très doux, et aucune couverture de glace ne s'était formée sur le cours principal de la rivière Kemijoki au 1^{er} décembre, ce qui est très inhabituel. La température de l'eau variait de 0,05°C à 0,23°C sur le cours principal, qui a 200 km de longueur et compte huit centrales. Le débit était plus élevé que la normale. Un vent fort a soufflé, et la température de l'air est tombée de -2°C à -13°C en l'espace d'une seule journée. Toute l'eau de la rivière s'est trouvée en surfusion rapidement, et on a noté la présence de glace de frasil dans les grilles de cinq centrales. Il a fallu arrêter deux des centrales, et deux jours ont été nécessaires pour retirer la glace des grilles. A l'une des centrales, la glace de frasil et des billots immergés avaient ensemble formé un très solide couvercle sur la grille. La situation avait beau être prévisible, elle restait bien difficile à maîtriser.

Dans cette longue chaîne de centrales hydroélectriques comportant de tout petits réservoirs, il est difficile de maintenir un débit constant jour après jour en période de demande de pointe. Quand on utilise des systèmes de contrôle à distance et que les centrales fonctionnent sans personnel sur place, il faut suivre de près la situation et avoir une idée précise des mesures à prendre en toutes circonstances.

6.3. ÉROSION DU TALUS D'UN BARRAGE

L'expérience vécue pour les ouvrages de retenue du Complexe La Grande concerne le déchaussement de blocs d'enrochement en saillie sur le riprap. Ce phénomène qui a lieu au printemps s'applique surtout au riprap à forte pente. Les blocs bien enchevêtrés du riprap ne peuvent pas être délogés par la glace. Ces dégâts sont très localisés (SEBJ, 1992). Des dégâts similaires ont été observés sur le riprap d'un barrage en Suède, mais à une échelle plus importante (voir paragraphe 3.5.3).

6.2.2. Permankoski Power Station

The power plant is quite small (11 MW) having an upper reservoir of 19 km². Early in the winter of 1985, on October 26, a heavy storm rose causing high waves against the dam and the power station. During the storm the air temperature decreased to -3°C, and the water close to the power station was supercooled. Next day the storm calmed down and the air temperature remained below 0°C.

The head losses in the trash rack were above normal, and the reservoir was still not ice-covered. During the next night head losses in the trash rack began to increase quickly and the turbines were stopped in the afternoon. From a divers inspection it was found that the trash rack was totally blocked by ice 0.40 m thick containing peat from the bottom of the reservoir.

Fortunately, the situation was observed because of the abnormal head losses, and the spillways could be operated without any problems. The ice-cover was broken by blasting.

6.2.3. The Kemijoki River Main Course

The early winter 1985 was very mild, and the main course of the river had consequently no ice-cover even on December 1, which is very unusual. The temperature of the water varied between 0.05°C and 0.23°C in the main course, 200 km in length, with eight power plants. The flow was higher than normal. A heavy wind rose and the air temperature decreased from -2°C to -13°C during one day. The water in the whole river was rapidly supercooled, and frazil ice was found in trash racks at five power stations. Two of the stations had to be stopped, and it took two days to remove the ice from the trash racks. At one of the power stations frazil ice and sunken logs together had formed a very firm cover on the trash racks. Even though the situation could be expected, it was very difficult to control.

In the long chain of hydroelectric power plants with quite small upper reservoirs, it is difficult to keep the flow constant from day to day during a peak load period. When remote control systems are used and power plants are unmanned, the staff has to follow the situation very carefully and they must have clear instructions for the operation.

6.3. EROSION OF DAM SLOPE

Jutting rocks of the riprap on the retaining structures of La Grande Complex have dislodged in the spring, mainly where the slope of the riprap is steep. Well-imbricated riprap rocks cannot be dislodged by ice. The damage has been very localized (SEBJ, 1992). Similar damage was noted on the riprap of a Swedish dam, though on a large scale (section 3.5.3).

Le mécanisme de la détérioration est illustré sur la Fig. 24. Au cours de l'hiver, le niveau d'eau baisse et la couverture de glace près du rivage se fissure en plusieurs bandes de quelques mètres de largeur, disposées plus ou moins parallèlement au riprap (Fig. 25). Dans le cas du riprap à forte pente, le massif de glace en porte-à-faux, formé lors de l'affaissement de la couverture de glace, reste soudé aux blocs en saillie qui sont eux-mêmes solidement ancrés au riprap par adhérence due au gel. Au printemps, la glace entourant les blocs du riprap dégèle plus vite que le massif de glace. Les blocs en saillie, n'étant plus retenus au riprap par adhérence due au gel, sont déchaussés et tombent au bas du talus sous l'action du poids du massif de glace en porte-à-faux (Fig. 24 et 26).

Le même processus s'applique au cas du riprap à faible pente, sauf que le bloc d'engrènement est simplement soulevé, puis redéposé pratiquement à la même place lors du dégel (Fig. 24B et 25b). Le talus est peu perturbé contrairement au riprap à forte pente. Les petits blocs d'engrènement emprisonnés dans le massif de glace sont affectés par les mêmes mécanismes.

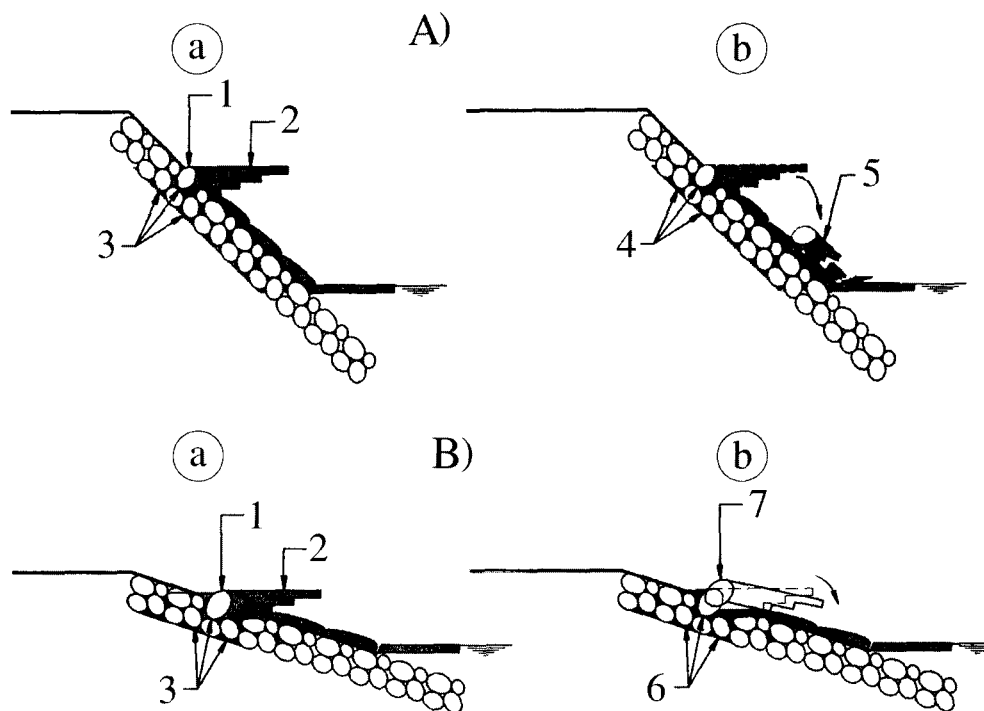


Fig. 24 shows the mechanism of deterioration. Water level drops over the winter, and the ice cover close to the shoreline cracks into a number of bands several metres wide more or less parallel to the riprap (Fig. 25). Where the slope of the riprap is steep, the cantilevered ice mass may form when the ice cover drops. This ice mass remains frozen solid to the rest of the riprap. In spring, the ice around the riprap thaws more quickly than the ice mass. Since ice no longer holds the jutting rocks to the rest of the riprap, they are plucked and fall to the bottom of the slope under the weight of the cantilevered ice mass (Fig. 24 and 26).

If the riprap slopes is mild, the rock is also plucked, but it is redeposited in about the same place during the thaw (Fig. 24B and 25b). The talus is hardly disturbed compared to when the slope of the riprap is steep. Small rocks imprisoned in the ice mass are also affected by these mechanisms.

Fig. 24

Ice and stones interaction in a riprap structure

Interaction de la glace et des blocs d'enrochement dans un riprap

A) Steep slope	A) <i>Pente raide</i>
B) Flat slope	B) <i>Pente douce</i>
Ⓐ Winter	Ⓐ <i>Hiver</i>
Ⓑ Spring	Ⓑ <i>Printemps</i>
1 Protruding stones	1 <i>Blocs d'enrochement en saillie</i>
2 Ice sheet frozen to the riprap structure	2 <i>Couverture de glace gelée sur le riprap</i>
3 Frozen stones in a thick layer of ice	3 <i>Blocs gelés dans une couche épaisse de glace</i>
4 Partial thawing and breaking of ice	4 <i>Dégel partiel et rupture de la glace</i>
5 Stones falling due to failure of ice sheet	5 <i>Blocs tombés par suite de la rupture de la glace</i>
6 Moment exerted on stones leading to rotation	6 <i>Moment exercé sur les blocs, créant une rotation</i>
7 Fractured ice cover resting on embankment and loosened protruding stones	7 <i>Couverture de glace brisée sur les berges, avec détachement des blocs en saillie</i>

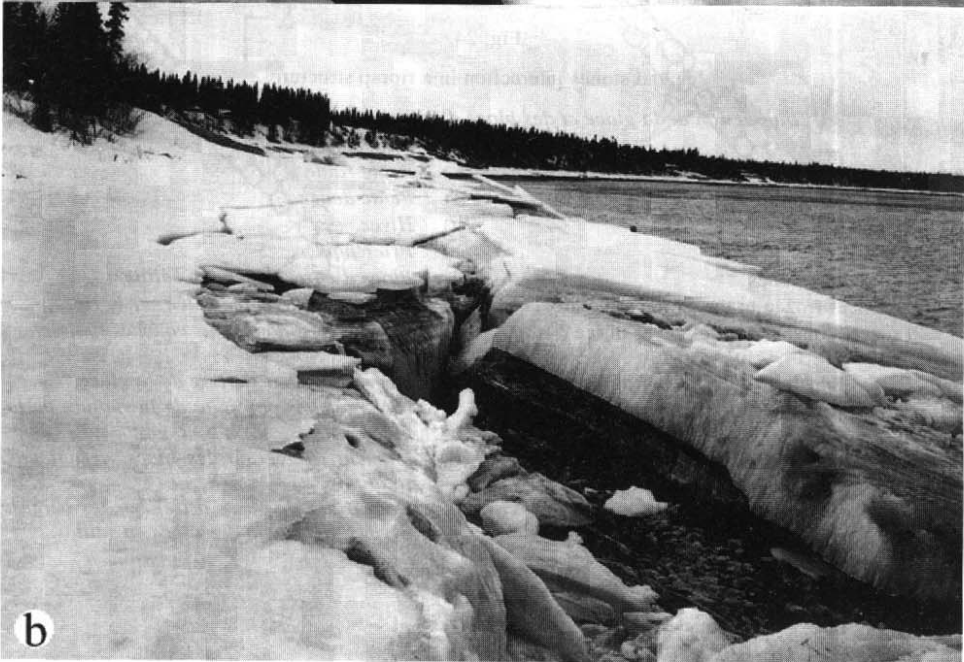


Fig. 25

Typical bands of ice on the embankment formed during decrease in water level

Bandes de glace cassées sur les digues lors de la baisse du niveau d'eau

- Ⓐ Steep slope
- Ⓑ Mild slope

- Ⓐ *Pente raide*
- Ⓑ *Pente douce*

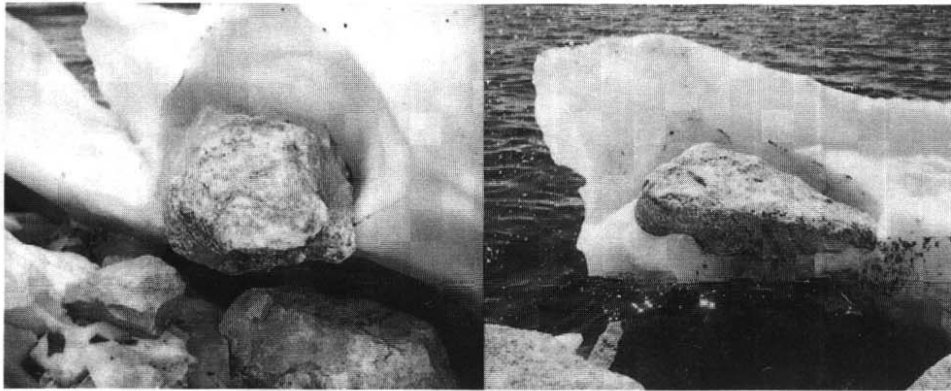


Fig. 26

Protruding stones are often pulled out of riprap structure when water level decreases in winter

Des blocs d'enrochement en saillie sont souvent arrachés du riprap quand le niveau d'eau baisse pendant l'hiver

6.4. REFERENCES

- BILLFALK, L. 1979. "Ice against gates and dams" (in Swedish). Report BKL-LB/KJ-3558. *Vattenfall*, Älvkarleby Laboratory.
- DIRECTION INGÉNIERIE ET ENVIRONNEMENT. 1992. "Étude de stabilité de la protection amont des ouvrages de retenue du Complexe La Grande phase1". *Synthèse de comportement des ouvrages*, vol.1, SEBJ, Montréal.
- HUOKUNA, M. 1990. "The Finnish River Ice Research Project, The Numerical River Ice Model in Use". *IAHR Symposium on Ice*, 1990, Helsinki. Proceedings vol. 3, pp 215 - 230.
- TECHNICAL SPECIFICATIONS, 1981. "Rivière des Prairies Project". Fourniture et installation de treize (13) vannes d'évacuateur de crues. *Hydro-Québec*, 1981.

Imprimerie Louis-Jean
05003 Gap
Dépôt légal : Août 1996
N° 571
ISSN 0534-8293

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne  *Computerized Archives on line*

***The General Secretary / Le Secrétaire Général :
André Bergeret - 2004***



**International Commission on Large Dams
Commission Internationale des Grands Barrages
151 Bd Haussmann -PARIS -75008**
<http://www.icold-cigb.net> ; <http://www.icold-cigb.org>