CANADA IN land waters DIRECTURATE CIENTIRIC 50 Rench Environment Environnement Canada Canada Institut national de recherche en hydrologie 1988 RA `_``` 2250 PORT NO 40 DE L'INRH E.Nº 162, SERIE SCIENTIFIQUE DE LA DGEI Observations de la couverture de glace et de l'écoulement du fleuve Yukon près de Whitehorse en 1985-1986 M.E. Alford et E.C. Carmack 2.55 GB 707 ÍNT C335 UT MATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE no. 162 TRE NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE ATOON (SASKATCHEWAN) 1988 table in English on request)



Institut national de recherche en hydrologie

RAPPORT N° 40 DE L'INRH ÉTUDE N° 162, SÉRIE SCIENTIFIQUE DE LA DGEI

Observations de la couverture de glace et de l'écoulement du fleuve Yukon près de Whitehorse en 1985-1986

M.E. Alford* et E.C. Carmackt

*Anciennement à : Division des relevés hydrologiques du Canada Direction des ressources en eau Direction générale des eaux intérieures Région du Pacifique et du Yukon Whitehorse (Yukon)

†Direction générale des eaux intérieures Institut national de recherche en hydrologie Centre national de recherche en hydrologie Saskatoon (Saskatchewan) Adresse actuelle : Yukon Expeditions 127 Alsek Whitehorse (Yukon)

Adresse actuelle : Pêches et Océans Canada Institut des sciences océaniques 9860 West Saanich Road Sidney (Colombie-Britannique)



DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE CENTRE NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE SASKATOON (SASKATCHEWAN) 1988

(Available in English on request)

Publié avec l'autorisation du ministre de l'Environnement

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1988 N^o de cat. En 36-502/162F ISBN 0-662-95066-6

Table des matières

£

	_
RÉSUMÉ	Vi
ABSTRACT	vii
INTRODUCTION	1
Zone de l'étude	1
Mesures	2
OBSERVATIONS ET COMPARAISONS	2
Météorologie et hydrologie	2
Distributions de la couverture de glace	3
Caractéristiques des barrages de frasil	9
Conditions hydrauliques	11
OBSERVATIONS EN RAPPORT AVEC LE PROCESSUS	14
Changements de la température de l'eau lors de l'englacement	14
Croissance de la lisière de glaces	15
Avancement de la bordure de glace	15
Formation de crêtes de glace	16
Analyse des profils de vitesses	23
DISCUSSION	27
REMERCIEMENTS	29
RÉFÉRENCES	29
ANNEXE. Cartes illustrant l'avance et le retrait de la couverture de glace saisonnière en 1985-1986	31

Tableaux

1.	Comparaison des conditions météorologiques moyennes mensuelles pour	
	les trois années de l'étude	2
2.	Aire de la couverture de glace et volume de la glace pendant l'hiver 1985-1986	8
З.	Comparaison de la durée de la couverture de glace à BM, M et AM pour	
	chacune des trois années de l'étude	9
4.	Valeurs quotidiennes de l'écoulement et du niveau de l'eau selon les	
	données géodétiques, hiver 1985-1986	11
5.	Analyse des données historiques pour déterminer les paramètres	
	utilisés avec la méthode «486»	24
6.	Vérification de la méthode «486» en utilisant l'écoulement de la	
	centrale hydroélectrique des rapides de Whitehorse comme témoin	27
7.	Résumé de la comparaison des hivers de 1983-1984, 1984-1985 et 1985-1986	28

Page

Illustrations

Figure 1.	Zone de l'étude et emplacement des stations	1
Figure 2.	Température de l'air en fonction du temps	2
Figure 3.	Pression barométrique en fonction du temps.	2
Figure 4.	Écoulement en fonction du temps	3
Figure 5.	Cartes de la couverture de glace pendant l'englacement	3
Figure 6.	Cartes de la couverture de glace pendant le milieu de l'hiver et à	
	la débâcle	3
Figure 7.	Texture superficielle de la bordure de glace observée entre BM et	
	M (16 novembre 1985)	4
Figure 8.	Gros plan des plaquettes constituant la bordure de glace	
	(16 novembre 1986)	4
Figure 9.	Photographie illustrant le traîneau de mesure chauffé, sur le fleuve	
	près de M, après débordement et regel de la glace inondée et de	
	la couverture de glace (23 décembre 1985)	5
Figure 10.	Crêtes observées sur la surface inférieure de la glace au barrage	
	de glace en amont du pont Robert Campbell, pendant l'englace-	
	ment (21 décembre 1985)	5
Figure 11.	Photographie montrant une large plaque sur le point de se loger	
	dans la bordure de glace immédiatement en amont de XO	
	(11 février 1986)	6
Figure 12.	Photographie montrant le blocage de plaques de glace en amont	
	de la grande plaque illustrée dans la figure 11, et les zones	
	avoisinantes d'eaux libres (16 février 1986)	6
Figure 13.	Tracé de la superficie de la couverture de glace de X4 à la centrale,	
	en fonction du temps	8
Figure 14.	Tracé de l'épaisseur moyenne de la glace à M, en fonction du temps	9
Figure 15.	Volume de glace estimé dans le bief en fonction du temps	9
Figure 16.	Profils des barrages de frasil à M, à des dates particulières	10
Figure 17.	Profils des barrages de frasil à BM, à des dates particulières	10
Figure 18.	Aire de la section transversale, en pourcentage du barrage de	
	frasil à AM, M, BM et X1; température de l'air et pourcentage	
	observé de la surface de frasil à XO en fonction du temps	10
Figure 19.	Profils des barrages de frasil à AM, à des dates particulières	10
Figure 20.	Profils des barrages de frasil à X1, à des dates particulières	11
Figure 21.	Carte du dépôt des barrages de frasil dans le bief de l'étude	11
Figure 22.	Schéma d'un barrage de frasil dans une section de 200 m de	40
	longueur, prés de BM	13
Figure 23.	Niveaux de l'eau en fonction du temps	14
Figure 24.	Pentes de la surface en fonction du temps	14
Figure 25.	Pentes de la surface dans le bief a des dates choisies	14
Figure 26.	Position de la bordure de glace en fonction du niveau de l'eau à AM	14
Figure 27.	Température de l'eau le long du bief pendant l'englacement.	15
Figure 28.	Largeur de la lisière de glaces et température de l'air en fonction	15
	du temps	10
Figure 29.	Comparaison de l'avancement du front de glace pendant les trois	16
	hivers de l'étude	10
Figure 30.	Photographies montrant une vue plane de la surface intérieure	
	des plocs de glace et montrant le développement progressit de	17
	cretes de glace à des dates particulieres	17

Page

Illustrations (suite)

Figure 31.	Photographies montrant une vue latérale de la surface inférieure	
	de blocs de glace présentant une transition d'une surface plane	
	le 10 mars au moment de l'amplitude maximum des crêtes le 15 avril	20
Figure 32.	Niveau de l'eau, température de l'air et écoulement de l'eau à la débâcle	21
Figure 33.	Photographies montrant des vues obliques et latérales de la	
	surface inférieure de la glace blanche à BM le 21 avril	22
Figure 34.	Diagramme montrant les définitions des vitesses utilisées dans	
	le texte, et méthodes destinées à l'évaluation de la vitesse moyenne	23

Page

Ý

Résumé

L'Expérience de saisonnalité glacielle du Yukon (ESAGY) a été mise sur pied en vue d'améliorer les connaissances sur les processus physiques qui influent sur la couverture de glace dans les réseaux hydrographiques (lacs et cours d'eau) du Nord. Durant les hivers de 1983-1984 et de 1984-1985, on a étudié les conditions hydrauliques et le régime des glaces dans un tronçon de 4.3 km du fleuve Yukon à Whitehorse. Le présent rapport porte sur la troisième année (1985-1986) de l'étude. On y présente des données sur les conditions météorologiques et hydrologiques ainsi que sur les conditions des glaces; on y étudie les effets de conditions particulières (par exemple, chenaux, fronts de glace, dépôts de frasil et rides) sur les caractéristiques hydrauliques du fleuve, et on y introduit une nouvelle méthode de mesure du débit en hiver. Un résumé comparatif des conditions observées au cours des trois hivers d'étude est présenté.

L'hiver de 1985-1986 a été relativement doux, mais on a enregistré des extrêmes de courte durée en ce qui concerne la température et l'enneigement. Au moment de la prise de la glace, les températures de l'air étaient inférieures à la normale, tandis que l'enneigement était de deux à trois fois supérieur à la normale; au milieu de l'hiver, les températures de l'air étaient au-dessus de la normale, tandis que l'enneigement était inférieur à la normale; au moment de la débâcle, les températures de l'air étaient inférieures à la normale. Ces conditions météorologiques se sont traduites par une prise des glaces plus tôt que la normale, mais plus lente, par une débâcle plus târd que la normale et aussi par une progression très irrégulière du front de glace (principal processus de prise des glaces) dans le tronçon.

On a observé les mêmes caractéristiques spatiales pour la formation de la barrière de frasil que par les années passées, cette barrière occupant de 30 % à 40 % environ de la superficie de la section transversale du fleuve. Le dépôt à un endroit donné dépend de la vitesse d'écoulement, de la géométrie du cours d'eau et de la rugosité de la surface inférieure de la couverture de glace. En général, les barrières de frasil semblent atteindre leur dimension maximale immédiatement après la prise de la glace puis elles s'érodent graduellement vers le printemps.

En ce qui concerne la résistance hydraulique, le niveau de l'eau a augmenté rapidement à toutes les stations au moment de la prise des glaces, il a diminué graduellement au milieu de l'hiver puis il a baissé de façon marquée après la débâcle. La progression du front de glace est le principal processus qui influe sur le niveau de l'eau à un endroit donné. Des variations significatives de la pente de la ligne d'eau dans le tronçon, lesquelles étaient associées à des débordements, ont été observées au cours des périodes de temps doux.

Deux nouvelles caractéristiques des rides de glace (ondulations à l'interface glace-eau) ont été observées. Premièrement, ces rides peuvent se former n'importe quand au cours de l'hiver partout où les températures de l'eau augmentent au-dessus du point de congélation, par exemple près des exutoires des lacs et des réservoirs. Deuxièmement, les rides se propagent dans la glace blanche (de débordement) beaucoup plus rapidement que dans la glace noire (thermique) et, par conséquent, elles réduisent rapidement la résistance de la couverture de glace au moment de la débâcle.

Un examen des profils des vitesses d'écoulement a permis de confirmer des observations d'Alford et Carmack, qui montrent que dans les graphiques de la vitesse normalisée en fonction de la profondeur normalisée, la variance est minimale à une profondeur égale aux 4/10 de la profondeur totale, ce qui est également la profondeur où l'on trouve V_{max}. On a constaté que l'application d'un coefficient de 0.86 aux vitesses observées aux 4/10 de la profondeur donnait une valeur près de la vitesse moyenne pour tout le profil. À partir de cette constatation, on propose une nouvelle méthode (appelée méthode 486) pour le calcul de l'écoulement dans les cours d'eau recouverts de glace.

Abstract

The Yukon Ice Seasonality Experiment (YISEX) was initiated to obtain a better understanding of physical processes affecting the ice cover on northern lake and river systems. Subsequently, studies on the winter hydraulics and ice regime along a 4.3-km reach of the Yukon River at Whitehorse were carried out during the winters of 1983/84 and 1984/85. This report on the third year (1985/86) of the YISEX study documents meteorological, hydrological, and ice conditions, investigates the effects of specific ice conditions (e.g., leads, ice fronts, frazil deposits, and ice ripples) on river hydraulics, and introduces a new method for the measurement of river discharge in winter. A summary comparison of the three winters is presented.

The winter of 1985/86 was relatively mild, but marked by short-duration extremes in both temperature and snowfall. At freeze-up, air temperatures were below normal while snowfall was two to three times above normal; in midwinter, air temperatures were above normal and snowfall was below normal; at breakup, air temperatures were below normal. Because of these weather conditions, freeze-up was initiated earlier than normal, but took longer to complete. Breakup was later than normal. Also, the rate of ice front advance through the reach, the main process of freeze-up, was highly irregular.

Frazil dam formation followed the same spatial pattern as observed in earlier years, occupying about 30% to 40% of the cross-sectional area of the river. Deposition at a given site is influenced by velocity patterns, stream geometry, and the underside roughness of the ice cover. In general, frazil dams appear to reach maximum size immediately after freeze-up, and then to erode gradually toward spring.

In relation to the hydraulic resistance of the reach, water levels at all stations increased rapidly at freeze-up, declined gradually during midwinter, and fell sharply after breakup. Ice front advance was found to be the main process affecting water level at any given location. Significant variations in surface slope within the reach associated with overflow were observed during periods of mild weather.

Two new aspects of ice ripples (wavelike features at the ice/water interface) were noted. First, ripples may form at any time in winter wherever water temperatures rise above the freezing point, such as near the outlets of lakes and reservoirs. Second, ripples migrate through white (overflow) ice much faster than through black (thermal) ice, and thus rapidly reduce the strength of the ice cover during breakup.

An examination of velocity profiles confirmed earlier observations by Alford and Carmack that a point of minimum variance in plots of normalized velocity versus normalized depth existed at the 0.4 depth, which is also the depth of V_{max} . It was found that the application of a coefficient of 0.86 to velocities observed at the 0.4 depth yielded a value close to the mean velocity of the full profile. Using this information, a new method for computing streamflows in ice-covered rivers (called the "486" method) is proposed.

Observations de la couverture de glace et de l'écoulement du fleuve Yukon près de Whitehorse en 1985-1986

M.E. Alford et E.C. Carmack

INTRODUCTION

Le but de l'Expérience de saisonnalité glacielle du Yukon (ESAGY) est d'acquérir une meilleure compréhension des processus influant sur la couverture de glace saisonnière des rivières et des lacs du nord du Canada. À cette fin, une étude sur les caractéristiques hydrauliques de la glace a été entreprise le long d'un bief de 4.3 km du fleuve Yukon près de Whitehorse au cours de l'hiver 1983-1984, et poursuivie en 1984-1985 (Alford et Carmack, 1987a, 1987b). Ce rapport signale les observations effectuées pendant le troisième hiver de l'étude (1985-1986), ainsi que les effets d'une séquence différente de profils météorologiques sur la formation de la couverture de glace.

Le présent rapport poursuit trois objectifs. Le premier est de renseigner sur les conditions météorologiques, hydrologiques et glacielles, plus particulièrement en rapport avec les profils d'englacement et de débâcle. Le deuxième objectif est d'attirer l'attention sur des processus qui semblent avoir un effet important sur les caractéristiques hydrauliques de ce fleuve, y compris la fermeture du chenal par suite de la croissance de la lisière de glaces. l'avancement de la bordure de glace, le dépôt de frasil ainsi que la formation de crêtes dans la glace. Le troisième objectif est de vérifier si des observations de vitesse en un seul point peuvent donner, avec un coefficient approprié, des évaluations de la vitesse verticale moyenne, qui soient conformes aux normes de précision établies par la Division des relevés hydrologiques du Canada. Parallèlement, des profils de vitesse supplémentaires ont été obtenus à l'appui des observations de 1983-1984 et 1984-1985; celles-ci ont permis d'identifier un point de variance minimum dans les profils de vitesses verticales.

Zone de l'étude

On a étudié le bief du fleuve Yukon près de Whitehorse, qui s'étend du pont Robert Campbell jusqu'aux gorges à 4.3 km en aval (figure 1). À cet endroit, le fleuve draine une superficie de 19 400 km², et son écoulement annuel moyen est de 240 m³ s⁻¹. À l'intérieur de ce bief, l'écoulement a été modifié par la construction de deux barrages en amont. Le premier, situé sous l'exutoire du lac Marsh, permet le stockage en amont. Le deuxième, situé aux rapides de Whitehorse, est la centrale hydroélectrique de la Commission hydroélectrique du Nord canadien (CHNC). Présentement, l'écoulement à Whitehorse est fonction des réglages combinés des deux barrages, qui dépendent eux-mêmes de limites structurales et établies par la loi. Plus particulièrement, le niveau de l'eau en aval du barrage du lac Schwatka doit être compris entre 653.34 et 652.27 m. La régulation de l'écoulement est particulièrement critique durant l'englacement, étant donné que c'est à ce moment-là que le bief de Whitehorse présente sa plus grande résistance à l'écoulement, et est par conséquent sujet à des inondations.



Figure 1. Zone de l'étude et emplacement des stations.

Mesures

Les niveaux de l'eau ont été enregistrés sur une base quotidienne à cinq stations (XO, AM, M, BM, et X4) pendant l'englacement, ainsi qu'aux quatre premières stations pendant tout l'hiver. Ces dernières stations étaient les mêmes que celles utilisées au cours des études précédentes. La station XO a été rajoutée pour l'étude de 1985-1986 afin d'améliorer la couverture des observations du gradient du fleuve près du point de l'avancement maximum de la bordure de glace. Pour minimiser les problèmes d'échantillonnage associés à toutes variations diurnes du niveau de l'eau, on a tenté d'effectuer les lectures vers la même heure chaque jour.

À chacune des principales sections transversales indiquées ci-dessus, on a effectué des mesures de l'épaisseur de la glace, de l'accumulation de frasil, de l'aire de la coupe transversale ainsi que de la vitesse du courant à diverses époques au cours de l'hiver. Les techniques de mesures étaient les mêmes que celles décrites par Alford et Carmack (1987a). Toutefois, un traîneau à mesures plus léger et plus compact, chauffé par deux radiateurs Coleman modèle 519, a été conçu et utilisé avec beaucoup de succès pendant toute la saison.

Les valeurs quotidiennes de l'écoulement ont été obtenues pour la quantité totale d'eau traversant le barrage à la centrale hydroélectrique de la CHNC aux rapides de Whitehorse. La température de l'air et la pression barométrique ont été enregistrées à 07 : 00 à la résidence Alford à Riverdale, à environ 1 km du bief de l'étude, environ 10 m au-dessus du niveau de l'eau. De même, si on ne le mentionne pas, les données météorologiques ont été enregistrées par le Service de l'environnement atmosphérique de l'aéroport de Whitehorse, situé à environ 1 km du bief de l'étude et à environ 60 m au-dessus du niveau de l'eau.

On a pris des photographies des caractéristiques structurales des glaces au besoin. Pour observer les changements qui ont survenu sous la glace au cours du printemps, plusieurs blocs ont été extraits de la couverture, retournés et photographiés. En outre, des photos vidéos sous-marines des barrages de frasil ont été prises afin d'étudier les caractéristiques texturales de cet horizon et d'examiner le comportement actuel des compteurs à l'interface eau-slush.

OBSERVATIONS ET COMPARAISONS

Météorologie et hydrologie

Les figures 2 et 3 présentent la température de l'air et la pression barométrique en fonction du temps; le tableau 1 résume les conditions météorologiques moyennes





Figure 3. Pression barométrique en fonction du temps.

 Tableau 1. Comparaison des conditions météorologiques moyennes mensuelles pour les trois années de l'étude

Mois	1983-1984	1984-1985	1985-1986
	Températ	ure mensuelle moye	nne de l'air
Nov.	-9.3	-10.5	-18.2
Déc.	-23.9	-18.2	-6.7
Janv.	-12.8	-4.7	-7.8
Févr.	-6.3	-18.2	-12.8
Mars	0.1	-6.1	-7.3
Avr.	2.6	-1.0	-4.5
Moyenne	-8.3	-9.8	-9.6
	Degr	és-jours sous 0 °C pa	ar mois
Nov.	-279	-315	-546
Déc.	-741	-564	-208
Janv.	-397	-146	-242
Févr.	-183	-510	-358
Mars	3	-189	-226
Avr.	78	-30	-135
	Chu	tes de neige par moi	s (cm)
Nov.	5.0	19.8	24.0
Déc.	9.2	43.0	11.2
Tanv.	32.4	43.2	24.8
Févr.	15.8	33.4	5.4
Mars	8.6	12.2	62.2
Avr.	1.4	15.6	28.6
Total	72.4	167.2	156.2

du mois. Des comparaisons avec des données antérieures (Alford et Carmack, 1987a, 1987b) indiquent que l'hiver de 1985-1986 a été notablement plus chaud que ceux des deux années précédentes. L'hiver a commencé avec des périodes de froid (-20 °C) en novembre, puis il y a eu réchauffement, plus particulièrement en décembre et début janvier. Ces températures douces anormales du début janvier ont entraîné un débordement considérable pardessus la couverture de glace du bief. L'hiver de 1985-1986 a également présenté de très faibles périodes de froid intense. Ce n'est qu'à la fin novembre et qu'à la fin février que les températures ont atteint -30 °C.

La deuxième principale différence des conditions météorologiques était les importantes chutes de neige de mars 1986, qui atteignaient trois fois la valeur moyenne et constituaient un record pour ce mois depuis 30 ans.

La figure 4 indique l'écoulement en fonction du temps. L'écoulement de 1985-1986 était à la fois inférieur (de 10 % à 20 %) et moins variable que celui des deux années précédentes. Étant donné que l'écoulement peut être régularisé dans une plage très étroite par le barrage des rapides de Whitehorse, tout réglage effectué pour le changement de turbines, l'entretien ou l'étalonnage peut entraîner des fluctuations à court terme de l'écoulement. Pendant la période de 1985-1986, une nouvelle turbine (la quatrième roue) a été utilisée presque exclusivement, ce qui a permis d'obtenir un écoulement plus stable.



Distributions de la couverture de glace

La séquence d'englacement observée en 1985-1986 est résumée dans les figures 5 et 6 (voir également l'annexe). La lisière de glaces a commencé à se former dans des tronçons reculés du fleuve le 1^{er} novembre. Une reconnaissance visuelle du Yukon entre le lac Upper Laberge et



Figure 5. Cartes de la couverture de glace pendant l'englacement.



Figure 6. Cartes de la couverture de glace pendant le milieu de l'hiver et à la débâcle.



Figure 7. Texture superficielle de la bordure de glace observée entre BM et M (16 novembre 1985).



Figure 8. Gros plan des plaquettes constituant la bordure de glace (16 novembre 1986).



Figure 9. Photographie illustrant le traîneau de mesure chauffé, sur le fleuve près de M, après débordement et regel de la glace inondée et de la couverture de glace (23 décembre 1985).



Figure 10. Crêtes observées sur la surface inférieure de la glace au barrage de glace en amont du pont Robert Campbell, pendant l'englacement (21 décembre 1985).



Figure 11. Photographie montrant une large plaque sur le point de se loger dans la bordure de glace immédiatement en amont de X0 (11 février 1986).



Figure 12. Photographie montrant le blocage de plaques de glace en amont de la grande plaque illustrée dans la figure 11, et les zones avoisinantes d'eaux libres (16 février 1986).

Whitehorse le 7 novembre a révélé que la bordure de glace avait progressé jusqu'à un point situé à 1.3 km en aval de l'embouchure de la rivière Takhini, soit jusqu'à environ 14 km en aval du bief de l'étude. En ce moment, un pont de glace de 1.7 km traversait la rivière à l'embouchure de la Takhini, et de gros glaçons (30 à 50 m de diamètre) étaient entraînés par le fleuve. Le 9 novembre, la bordure de glace avait progressé jusqu'à X4.

En 1985, l'englacement du bief de l'étude était semblable à celui des années précédentes (voir Alford et Carmack, 1987a, 1987b), caractérisé par deux facteurs simultanés : d'une part la progression de la lisière de glaces vers l'intérieur formant un étroit canal le long du centre à écoulement rapide, et de l'autre l'avancement progressif vers l'amont de la bordure de glace par le dépôt à sa lisière frontale de glace de frasil, de glaçons et de floes. Puis, entre le 9 novembre et le 9 décembre, au cours d'un épisode de basses températures, de minces plaquettes de glace (épaisseur : 3 mm) ont été observées sur la surface libre restante; par la suite, la bordure de glace a avancé du point X4 jusqu'à un point à 150 m au-delà de AM, à la suite de l'agglomération régulière de ces plaquettes (figure 7). L'inspection de celles-ci a démontré qu'elles étaient ellesmêmes constituées d'une structure en mosaïque faite de plaquettes encore plus minces, présentant une structure écailleuse (figure 8). Cet assemblage de plaquettes se terminait au contact de la bordure de glace, où elles gelaient dans cette position pour donner naissance à une surface de glace très rugueuse.

Au cours de ce qui restait du mois de décembre et de la première partie du mois de janvier, alors que la température était anormalement élevée, une couverture de glace généralement plus pleine s'est développée entre les points M et AM, à la suite de la juxtaposition de grandes plaques de glace ayant déjà formé la lisière de glaces le long du bief en amont de XO.

À cause de la température exceptionnellement chaude de la mi-décembre et des trois dernières semaines de février, la couverture de glace pouvait être inondée. Cette inondation était due aux écoulements accrus ainsi qu'aux niveaux d'eau causés eux-mêmes par des températures de l'air plus douces, et à la présence de grandes plaques détachées de la lisière de glaces en amont. Par moment, ces plaques s'accumulaient sur la lisière de glaces et détournaient l'écoulement par-dessus la couverture de glace, entraînant ainsi un débordement. Alors, la hauteur du débordement pouvait atteindre jusqu'à 0.15 m, amenant la saturation de la couverture de neige et rendant difficiles les déplacements sur la glace. Le gel subséquent de l'eau de surface et de la neige saturée d'eau formait des couches additionnelles (d'environ 0.40 m) de ce qu'on appelle de la glace blanche, qui se superposaient par dessus la couche de glace noire ou thermique (figure 9).

On a été surpris d'observer la présence de crêtes de glace au cours d'un englacement. Celles-ci ont été découvertes par un heureux hasard à l'envers d'une plaque de glace de lisière retournée, provenant du bief situé entre le barrage des rapides de Whitehorse et le pont Robert Campbell (figure 10). Alors que de telles caractéristiques sont très répandues lors de la débâcle, leur formation pendant l'englacement était inattendue; leur origine possible sera étudiée ci-dessous.

Le processus de l'avancement de la bordure de glace par l'empilement de grandes plaques provenant de la lisière de glaces en amont s'est poursuivi pendant une bonne partie de l'hiver (figure 11). À cause de la forme irrégulière de ces plaques, la couverture résultante comportait d'importants vides (figure 12).

L'avance maximale vers l'amont de la couverture continue était de 50 m en aval du pont Robert Campbell du 9 au 15 mars. Toutefois, les plaques s'appuyant contre le pilier unique du pont ont formé une couverture isolée qui, à son extension maximale, atteignait un point situé à 350 m en amont.

Les premiers signes de la débâcle à la fin de mars et au début d'avril étaient des cas de débordement aux deux bordures de glace et le long des lisières de la couverture. Vers le 9 avril, des canaux de fusion occupaient le bief en amont de M. Toutefois, entre le 8 et le 15 avril, des basses températures records ont ralenti le processus de la débâcle, de sorte que le bief n'a été libéré des glaces que le 22 avril. À cette date, il ne restait que la lisière de glaces et des glaces échouées le long du bief.

Des valeurs quotidiennes de superficie de couvertures de glaces ont été calculées à partir des cartes présentées à l'annexe. Ces données (figure 13, tableau 2) indiquent une période de croissance rapide à la mi-novembre, suivie par une augmentation beaucoup plus lente de recouvrement par la suite. À cause des températures anormalement basses durant les deux semaines d'avril, la courbe de la couverture de la glace en fonction du temps accuse une forte pente.

La figure 14 indique l'épaisseur moyenne de la glace à M en fonction du temps et la figure 15, le volume estimé de glaces à l'intérieur du tronçon, calculé comme étant le produit de la superficie recouverte de glace et de l'épaisseur moyenne de la glace à M. Ces deux courbes présentent des tendances semblables d'augmentation modérée pendant l'englacement, des conditions à l'équilibre au cours du milieu de l'hiver et des diminutions rapides mais intermittentes à la débâcle.





Tableau 2. Aire de la couverture de glace et volume de la glace pendant l'hiver 1985-1986

	pendant	i niver 1	992-1980					
enter e		AM à I	4	Barrag	arrage de la CHNC à X4			
	1.1	Recou-	Couver-		Recoù-	Couver-		
	Libre	vert	ture	Libre	vert	ture		
Date	(km ²)	(km ²)	(%)	(km ²)	(km ²)	(%)		
85-11-08	0.26	0.19	43	0.91	0.60	40		
85-11-09	0.24	0.21	48	0.72	0.79	53		
85-11-10	0.23	0.22	49	0.57	0.94	63		
85-11-11		0.22	50		0.98	65		
85-11-12		0.24	55		1.04	69		
85-11-15		0.24	55		1.08	71		
85-11-16		0.24	55		1.08	72		
85-11-17		0.25	56		1.14	76		
85-11-18		0.28	63		1.18	78		
85-11-20		0.31	69		1.19	79		
35-11-21		0.31	70		1.20	80		
35-11-22		0.32	71		1.21	80		
35-11-23		0.34	76		1.23	81		
85-11-25		0.36	79		1.24	82		
5-11-26		0.36	81		1.24	83		
5-11-27		0.37	83		1.27	85		
5-11-28		0.37	84		1.29	85		
5-11-29		0.38	85		1.29	86		
5-12-01		0.38	85		1.29	86		
5-12-03		0.38	86		1.30	86		
5-12-04		0.40	90		1.31	87		
5-12-05		0.43	95		1.32	88		
5-12-06		0.43	95		1.32	88		
35-12-07		0.43	95		1.32	88		
5-12-08		0.43	97		1.32	88		
5-17-10		0.43	97		1 32	88		
25-12-10		0.44	97		1 32	88		
5-12-14		0.44	00		1 33	88		
5-12-20		0.44	99		1 33	88		
5-12-20		0.44	99		1.33	88		

Tableau 2. (Suite)									
		AM à M	N	Barrage de la CHNC à X4					
		Recou-	Couver-	8 - 14 - 1 - 1	Recou-	Couver-			
	Libre	vert	ture	Libre	vert	ture			
Date	(km²)	(<u>km</u> ²)	(%)	(km²)	(km²)	(%)			
	•.								
85-12-23		0.44	99		1.33	88			
85-12-24		0.44	99		1.33	88			
85-12-26		0.45	100		1.33	88			
86-01-03		0.45	100		1.33	89			
86-01-05		0.45	100		1.34	89			
86-01-07		0.45	100		1.34	89			
86-01-08		0.45	100		1.34	89			
86-01-14		0.45	100		1.34	89			
86-01-15		0.45	100		1.34	89			
86-01-19		0.45	100		1.35	90			
86-01-20		0.45	100		1.35	90			
86-01-21		0.45	100		1.35	90			
86-01-22		0.45	100		1.35	90			
86-01-23		0.45	100		1.35	90			
86-01-25	:	0.45	100		1.35	90			
86-01-26		0.45	100		1.35	90			
86-01-27		0.45	100		1.35	90			
86-01-30		0.45	100		1.35	90			
86-01-31		0.45	100		1.35	90			
86-02-02		0.45	100		1.35	90			
86-02-04		0.45	100		1 3 5	00			
86-02-06		0.45	100		1.35	90			
86-02-09		0.45	100		1 35	90			
86-02-10	2	0.45	100		1 35	90			
86-02-11		0.45	100		1.35	90			
94 03 13		0.45	100		1 75	00			
86 02 14		0.45	100		1.35	90			
86-02-14		0.45	100		1.32	90			
86-02-18		0.45	100		1.30	90			
86-02-20		0.45	100		1.30	.70			
00-02-22		0.45	100		1.50	90			
80-02-23		0.45	100		1.30	90			
86:02-24		0.45	100		1.30	90			
86-03-01		0.45	100		1.50	90. 00			
86-03-08	۰.	0.45	100		1.30	90			
00.00.00		0.40	100		1.50	~			
80-03-15		0.45	100		1.37	91			
80-03-25		0.45	100		1.37	91			
86-03-27		0.45	100		1.37	91			
86-03-20		0.45	100		1.57	91			
80-05-29		0.45	100		1.57	71			
86-03-30		0.45	100		1.37	91			
86-04-04		0.45	100		1.37	91			
86-04-05		0.45	100		1.36	91			
86-04-06		0.45	100		1.36	90			
86-04-07		0.43	96		1.35	90			
86-04-10		0.41	92		1.32	88			
86-04-14		0.41	91		1.31	87			
86-04-15		0.39	86		1.27	85			
86-04-16		0.34	77		1.25	83			
86-04-17		0.32	71		1.15	76			

0.28

62

0.58

38



Figure 14. Tracé de l'épaisseur moyenne de la glace à M, en fonction du temps.



Figure 15. Volume de glace estimé dans le bief en fonction du temps.

On trouvera dans le tableau 3 une comparaison des dates d'englacement et de débâcle, ainsi que la durée de la couverture continue à chacune des sections primaires pour chacune des trois années de l'étude. En général, un englacement précoce en 1985-1986, combiné à des températures douces responsables d'épisodes de débordements et de formation de glace blanche, ont fait que la couverture de glace a été plus mince de 0.25 m environ que celle observée en 1984-1985, mais semblable à celle de l'hiver 1983-1984. Même si l'hiver de 1985-1986 était le moins rigoureux des trois hivers, il était caractérisé par une plus longue durée de couverture de glace. Ceci démontre que les conditions météorologiques prévalant au cours des périodes critiques de l'englacement et de la débâcle sont celles qui sont responsables de la durée de la couverture de glace.

Caractéristiques des barrages de frasil

Les barrages de frasil sont définis comme étant une accumulation de particules de glace de frasil (slush) qui se retrouvent sous la couverture de glace. On croit que le frasil se forme dans les eaux libres turbulentes en amont de la couverture de glace stable pendant des périodes de refroidissement intense (Osterkamp, 1978; Martin, 1981; Tsang, 1982; Osterkamp et Gosiñk, 1983). Le fait que le frasil adhère ou non à un emplacement donné dépend de la vitesse de l'écoulement, de la rugosité de la couverture de glace et de l'état inhérent de viscosité du frasil.

Le barrage de frasil à Marwell a été décrit dans des rapports précédents (Alford et Carmack, 1987a, 1987b), où nous avons noté que le barrage semblait se former chaque année et que la forme de base du barrage était constante d'une année à l'autre. Nous avons également observé que la surface de la coupe transversale du barrage semblait atteindre un maximum immédiatement après l'englacement, pour diminuer ensuite, d'abord lentement au milieu de l'hiver, puis rapidement juste avant la débâcle.

Les figures 16 et 17 indiquent des changements dans les horizons de glaces ou de frasil observés à M et BM. La figure 18 illustre la coupe transversale du barrage à chaque section en fonction du temps. Ces mesures présentent un profil de croissance et de diminution semblable à ceux observés en 1983-1984 et en 1984-1985.

On a obtenu des profils supplémentaires de barrages de frasil à AM et X1 (figures 19 et 20). Le profil X1 est très intéressant, parce qu'il illustre les changements rapides qui peuvent survenir dans le voisinage d'une bordure de glace.

 Tableau 3. Comparaison de la durée de la couverture de glace à BM, M et AM pour chacune des trois années de l'étude

	1983-1984			1984-1985			1985-1986		
Station	Englacement	Débâcle	Jours	Englacement	Débâcle	Jours	Englacement	Débâcie	Jours
ВМ	4 déc.	29 mars	115	9 déc.	12 avr.	124	11 nov.	22 avr.	162
м	9 déc.	25 mars	106	13 déc.	10 avr.	118	17 nov.	19 avr.	153
AM	2 janv.	23 mars	80	29 déc.	8 avr.	100	24 déc.	18 avr.	115

La bordure de glace qui avance avait atteint le voisinage de X1 le 28 novembre. Le premier profil, qui a été obtenu le 2 décembre quand la bordure de glace n'était qu'à 150 m en amont et l'épaisseur de la glace, de seulement 0.2 m, indique le plus grand volume de dépôts de frasil, ce qui montre la rapidité avec laquelle de telles formations peuvent être édifiées. Ce qui est le plus remarquable dans les profils subséquents, c'est l'érosion rapide qui a eu lieu à X1 par rapport au barrage relativement stable de frasil situé à d'autres sections.



Figure 16. Profils des barrages de frasil à M, à des dates particulières.



Figure 17. Profils des barrages de frasil à BM, à des dates particulières.



Figure 18. Aire de la section transversale, en pourcentage du barrage de frasil à AM, M, BM et X1; température de l'air et pourcentage observé de la surface de frasil à X0 en fonction du temps. (T_a désigne la température de l'air.)



Figure 19. Profils des barrages de frasil à AM, à des dates particulières.

Une carte résumant la distribution des barrages de frasil est présentée à la figure 21. Ces données montrent que la barrage est continu le long du tronçon, qu'il occupe un volume approximativement égal à celui des glaces feuilletées, et qu'il est réparti d'un côté ou de l'autre de l'axe de zone d'écoulement maximum définie comme la zone d'écoulement rapide. Un croquis (figure 22) indique la distribution complexe d'un barrage de frasil par rapport à la géométrie du canal dans le voisinage de BM.



Figure 20. Profils des barrages de frasil à X1, à des dates particulières.



Figure 21. Carte du dépôt des barrages de frasil dans le bief de l'étude.

Conditions hydrauliques

Des observations du niveau d'eau ont été enregistrées quotidiennement durant tout l'hiver à X0, AM, M, et BM, ainsi que pendant une courte période pendant l'englacement à X4.

Pendant l'englacement, la résistance hydraulique d'une rivière augmente généralement, ce qui nécessite une augmentation correspondante de la profondeur de l'écoulement. De même, la résistance d'ensemble diminue à la suite de la débâcle. Ces effets sur la résistance sont évidents dans les données sur le niveau de l'eau (figure 23, tableau 4). Les niveaux de l'eau à toutes les stations augmentaient rapidement à l'englacement, pour diminuer graduellement pendant l'hiver, et diminuaient ensuite de façon marquée après la débâcle. De même, des observations de la pente de la surface (figure 24) indiquent des variations importantes pendant l'hiver, de fortes pentes et des variations rapides étant observées à l'englacement. On y observe aussi d'importantes variations de pente à la suite des cas de débordement survenant au milieu de l'hiver entre X0 et AM.

Tableau 4. Valeurs quotidiennes de l'écoulement (Q) et du niveau de l'eau selon les données géodétiques, hiver 1985-1986

		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			
Date	$Q(m^{3} s^{-1})$	X0 (m)	AM (m)	M (m)	BM (m)
85-10-31	137	630.785	630.630	-	
85-11-01	144	630.725	630.570	629.475	628.958
85-11-04	140	630.745	630.570	629.458	628.951
85-11-05	143	630.745	630.600	629.498	628.928
85-11-06	137	630.945	630.790	629.698	629.158
85-11-07	137	630.785	630.650	629.538	629.028
85-11-08	148	630.925	630.770	629.598	629.709
85-11-09	134	630.920	630.800	629.598	629.936
85-11-10	139	631.215	631.070	630.411	630.273
85-11-11	138	631.285	631.160	630.681	630.390
85-11-12	140	631.335	631.220	630.871	630.428
85-11-13	139	631.130	631.000	630.711	630.325
85-11-14	140	631.225	631.095	630.801	630.282
85-11-15	139	631.265	631.125	630.811	630.218
85-11-16	141	631.535	631.390	631.011	630.245
85-11-17	137	631.335	631.220	630.951	630.132
85-11-18	140	631.365	631.240	630.821	630.099
85-11-19	140	631.435	631.325	630.911	630.085
85-11-20	139	631.515	631.380	630.931	630.097
85-11-21	137	631.415	631.310	630.861	630.059
85-11-22	138	631.515	631.380	630.831	630.006
85-11-23	137	631.645	631.520	630.781	629.933
85-11-24	136	631.775	631.650	630.811	630.023
85-11-25	137	631.755	631.670	630.771	630.003
85-11-26	137	631.885	631.780	630.731	630.018
85-11-27	135	631.925	631.810	630.731	629.978
85-11-28	135	631.950	631.850	630.691	629.948
85-11-29	131	631.915	631.820	630.541	629.828
85-11-30	137	632.100	631.980	630.636	629.908
85-12-01	135	632.125	632.050	630.601	629.858

Tableau 4. (Suite)					Tableau 4. (Suite)						
Date	$Q(m^3 s^{-1})$	X0 (m)	AM (m)	M (m)	BM (m)	Date	Q (m ³ s ⁻¹)	X0 (m)	AM (m)	M (m)	BM (m)
85-12-02	135	632.085	632.010	630.551	629.818	86-01-26	119	631 755	631.200	630.081	620 454
85-12-03	134	632.145	632.070	630.581	629.828	86-01-27	126	631 715	631 220	630.081	620 464
85-12-04	134	632.205	632.090	630.481	629.838	86-01-28	123	631.765	631.210	630.091	629 468
85-12-05	134	632.065	632.000	630.531	629.818	86-01-29	122	631.755	631 200	630 101	629 478
85-12-06	135	632.005	631.910	630.551	629.818	86-01-30	120	631.875	631.160	630.021	629.384
85-12-07	134	631 975	631-890	630 521	620 808	86-01-21	127	471 00E	671 210	(10 111	
85-12-08	134	632.045	631 970	630 571	629.858	86-02-01	127	421 705	631.210	030.111	629.494
85-12-09	135	631.915	631.820	630 486	629 778	86-02-01	110	621 775	621 220	620.001	629.404
85-12-10	133	631.865	631.790	630.446	629.748	86-02-03	119	631 645	631 140	630.091	620 424
85-12-11	133	631.825	631.740	630.451	629.738	86-02-04	119	631.805	631 160	630.021	629.424
85-12-12	131	631 815	631 740	630 461	620 748	86-02-05	110	622.045	421 100	670.041	COO 404
85-12-13	132	631 795	631 720	630 431	620 718	86-02-05	110	622.045	621.190	030.041	0,29.424
85-12-14	131	631.710	631 620	630 301	629.718	86-02-00	110	622.103	671.100	~ ~ ~	(20.41)
85-12-15	129	631 865	631 740	630 441	629 733	86-02-08	120	632.235	631 320	620 111	620.414
85-12-16	133	631.675	631.590	630.371	629.678	86-02-09	120	631.835	631.210	630.051	629.478
85-12-17	179	631 745	621 640	630 451	620 769	86.00.10		<14.005	(14.000		
85-12-18	126	631 685	631 570	630 401	629.788	86 02 11	108	031.823	631,200	630.031	629.428
85-12-10	120	631 655	631 540	630 411	629.738	86 02 12	117	031.815	631.190	630.051	629.428
85-12-20	124	631 525	631 420	630 351	629.658	86-02-12	117	621.822	621.210	030.081	629.438
85-12-21	128	631.635	631.410	630.321	629.658	86-02-13	113	631 835	631 210	630.041	629.438
85-12-22	178	631 645	631 270	620 211	620 622	86-02-15	115	621 915	621 200	620.051	620 420
85-12-22	128	621 610	621 255	620.221	629.033	86-02-15	115	621 865	621 220	620.051	629.438
85-12-23	134	631 685	631 305	630 371	620 719	86-02-17	116	631.805	631.220	620.071	629.438
85-12-24	137	631 665	631 370	630.371	620 738	86-02-18	117	631 835	631.210	620.071	620 420
85-12-26	132	631 615	631-320	630 281	629.758	86-02-19	113	631 815	631.190	630.021	670 408
05 17 77	122	621 615	671 260	620 101	(20 500	86 02 12	115	671.015	621.220	(30.071	(20.452
85-12-27	132	631.013 431.505	631.200	620.191	629.388	86-02-20	115	031.00J 231.005	631.230	630.071	029.455
85-12-28	130	631.595	621 200	620.141	629.508	86-02-22	113	621 925	621.230	620.071	629.438
85-12-29	122	621 585	631.200	620 171	629,318	86-02-22	113	621 075	621 220	620.001	620.410
85-12-30	133	631 545	631.200	630 171	629.558	86-02-23	110	631.065	631 310	620 111	670 409
96 01 01	120	()1.040	621 220	(30.151	(20.522	06 02 24	110	(31.075	631.040	630.111	027.470
86-01-01	130	631.313	671 220	620.121	629.523	80-02-25	110	031.8/3	631.240	630.061	629.438
86-01-02	133	031.303	631.230	630.171	029.558	80-02-20	111	031.933	031.245	629.991	629.428
86-01-03	129	631.500	631.180	630.131	629.518	86-02-27	112	631.935	631.270	630.031	629.428
86 01 05	130	621 505	621 250	620 161	629.528	86 07 01	111	031.90U	631.230	620.031	029.428
80-01-05	150	031.375	031.250	050.101	027.520	80-05-01	110	051.045	031.290	050.021	029.420
80-01-06	130	631.705	631.270	630.141	629.518	86-03-02	111	631.695	631.220	630.011	629.418
86-01-07	126	031.025	631.200	630.171	629.568	86-03-03	113	631.670	631.225	630.041	629.428
80-01-08	124	031.393	631.270	630.141	629.528	86-03-04	105	631.640	631.195	630.021	629.418
80-01-09	123	631.015	631,240	630.121	029.488 620.488	86-03-05	108	621 645	631.220	630.061	629.428
00-01-10	151	001.000	651.250	630.101	027.400	00-03-00	110	051.045	.051.255	030.031	027.440
86-01-11	127	631.675	631.240	630.106	629.483	86-03-07	109	631.665	631.245	630.061	629.473
86-01-12	125	031.555	631.170	6,30,081	629.428	80-03-08	109	031.035	031.235	630.076	629.448
80-01-13	121	031.405	631.110	630.081	029.438	86-03-09	106	031.007	031.200	630.031	029.438
80-01-14	120	631.425	631.100	630.081	629.455	86-03-11	100	631.087	621.250	620.051	629.448
80-01-15	128	031.005	031.300	030.101	029.488	80-03-11	105	031.075	051.240	050.051	029.438
86-01-16	123	631.525	631.170	630.101	629.478	86-03-12	108	631.685	631.260	630.051	629.438
86-01-17	127	631.545	051.180	630.111	029.478	86-02 14	112	071.007	621 200	620.001	027.315
86-01-18	124	031.575	031.170	030.091	029.458	00-03-14 86-03 15	114	031.007	621 210	620.091	027.718 220 519
86-01-19	127	031.515	051.150	030.081	029.448	86_02.14	110	631 644	631 240	630 121	670 540
86-01-20	122	031.665	031.150	030.061	029.428	00-03-10	110	()1.04)	031.300	030.131	047.340
86-01-21	125	631.785	631.140	629.961	629.244	86-03-17	109	031.575	631.310	030.101	629.533
86-01-22	123	631.875	631.150	630.081	629.442	80-03-18	110	621.232	631.280	030.0/1	029.498
86-01-23	123	632.195	631.140	630.031	629.374	80-03-19	115	621.013	621.370	670 141	027.348
86-01-24	124	632.005	631.150	630.081	629.448	80-03-20	111	621 625	621 220	630.091	620 529
86-01-25	122	632.105	631.210	630.081	629.444	80-03-21	111	021.222	021.220	020.081	029.328

Tableau 4. (Suite)									
Q (m ³ s ⁻¹)	X0 (m)	AM (m)	M (m)	BM (m)					
111	631.595	631.390	630.151	629.578					
114	631.585	631.370	630.141	629.588					
109	631.535	631.330	630.121	629.558					
115	631.575	631.380	630.151	629.588					
115	631.575	631,380	630.151	629.588					
126	631.555	631.380	630.131	629.598					
130	631.635	631.370	630.201	629.658					
127	631.745	631.560	630.311	629.738					
132	631.805	631.610	630.351	629.788					
138	631.625	631.450	630.261	629.688					
139	631.735	631.560	630.321	629.758					
139	631.715	631.530	630.301	629.738					
139	631.705	631.530	630.301	629.748					
136	631.635	631.470	630.271	629.708					
146	631.725	631.560	630.361	629.808					
147	631.635	631.490	630.311	629.778					
142	631.165	630.990	630.061	629.488					
114	631.175	631.060	630.001	629.468					
121	631.525	631.360	630.231	629.698					
129	631.465	631.310	630.171	629.658					
131	631.465	631.310	630.191	629.668					
135	631.535	631.360	630.251	629.718					
134	631.515	631.340	630.231	629.708					
131	631.455	631.260	630.191	629.658					
132	631.405	631.240	630.121	629.648					
	Q (m ³ s ⁻¹) 1111 114 109 115 115 126 130 127 132 138 139 139 139 139 139 139 139 139	Tableau 4. $Q (m^3 s^{-1})$ X0 (m)111 631.595 114 631.595 109 631.535 115 631.575 115 631.575 126 631.555 130 631.635 127 631.635 138 631.625 139 631.745 132 631.635 139 631.715 139 631.705 136 631.635 147 631.635 146 631.725 147 631.635 146 631.725 129 631.465 131 631.465 135 631.535 134 631.515 132 631.405	Tableau 4. (Suite) $Q (m^3 s^{-1})$ X0 (m)AM (m)111 631.595 631.390 114 631.585 631.370 109 631.535 631.370 109 631.535 631.330 115 631.575 631.380 115 631.575 631.380 126 631.555 631.380 130 631.635 631.370 127 631.745 631.600 132 631.635 631.610 138 631.625 631.450 139 631.735 631.530 139 631.705 631.530 136 631.635 631.470 146 631.725 631.540 147 631.635 631.490 142 631.165 630.990 114 631.175 631.310 131 631.465 631.310 134 631.535 631.340 131 631.455 631.240 132 631.405 631.240	Tableau 4. (Suite) $Q (m^3 s^{-1})$ X0 (m)AM (m)M (m)111631.595631.390630.151114631.585631.370630.141109631.535631.330630.121115631.575631.380630.151115631.575631.380630.151126631.555631.380630.131130631.635631.370630.201127631.745631.560630.311132631.625631.450630.261139631.735631.560630.321139631.705631.530630.301136631.635631.470630.271146631.725631.560630.311142631.635631.470630.271146631.725631.606630.001121631.635631.310630.171131631.465631.310630.171131631.455631.340630.231132631.515631.340630.231132631.455631.340630.231132631.455631.340630.231132631.455631.340630.231134631.515631.340630.231132631.405631.240630.121					

Tableau 4. (Suite)								
Date	Q (m ³ s ⁻¹)	X0 (m)	AM (m)	M (m)	BM (m)			
86-04-16	135	631.305	631.150	630.181	629.688			
86-04-17	135	631.105	631.030	630.091	629.658			
86-04-18	150	631.015	630.920	630.031	629.588			



Figure 22. Schéma d'un barrage de frasil dans une section de 200 m de longueur, près de BM.



Figure 23. Niveaux de l'eau en fonction du temps.



Figure 24. Pentes de la surface en fonction du temps.



Figure 25. Pentes de la surface dans le bief à des dates choisies.



Figure 26. Position de la bordure de glace en fonction du niveau de l'eau à AM.

L'influence dominante de la position de la bordure de glace sur les niveaux de l'eau (qu'on appelle l'effet de remous) est indiquée dans la figure 25. Dans la figure 26, la courbe du niveau de l'eau à AM est tracée en fonction de la position de la bordure de glace à l'intérieur du bief. Il est à remarquer qu'un faible effet de remous survient à mesure que la bordure de glace dépasse BM, et qu'un effet beaucoup plus important survient à mesure que le front atteint le voisinage de X2. Cette réponse est intéressante pour ceux qui se préoccupent des problèmes de débordement et d'exploitation des barrages.

OBSERVATIONS EN RAPPORT AVEC LE PROCESSUS

Changements de la température de l'eau lors de l'englacement

À la figure 27, on présente des changements de la température de l'eau le long du bief pendant différentes périodes au cours de l'englacement. On observe des changements typiques de température de 0.2 °C à 0.3 °C entre le pont et BM, ce qui donne un gradient de température longitudinal dT/dL = 0.05-0.07 °C/km. Ce gradient peut être utilisé pour évaluer la vitesse de refroidissement à l'intérieur du bief. En utilisant la vitesse moyenne $\langle V \rangle = 0.7$ m s⁻¹, on remarque qu'une colonne d'eau se déplaçant à travers le bief se refroidit à une vitesse $dT/dt = \langle V \rangle dT/dL$, soit entre 0.3 et 0.5 $\times 10^{-4}$ °C s⁻¹. Si l'on suppose que la profondeur moyenne du bief est de 2 m, un flux de



Figure 27. Température de l'eau le long du bief pendant l'englacement. (T_W désigne la température de l'eau, T_a désigne la température de l'air.)

chaleur superficielle de 260 à 390 W m⁻² est obtenu. Cette valeur doit être considérée comme étant une évaluation grossière seulement, mais elle est en accord avec les mesures antérieures de flux thermique effectuées (Alford et Carmack, 1987a) et elle est semblable aux valeurs observées en 1984-1985.

Croissance de la lisière de glaces

Généralement, l'englacement est caractérisé par le resserrement graduel de la lisière de glaces dans un étroit canal le long de la zone d'écoulement rapide, ainsi que par l'avancement progressif de la bordure de glace par suite du dépôt des floes formés en amont. Osterkamp et Gosink (1983) soutiennent que la lisière de glaces croît latéralement par transfert thermique par convection à travers la glace, par l'accumulation de frasil à la dérive et par la perte de chaleur latente qui passe dans les eaux en surfusion du fleuve. Toutefois, en 1985-1986, le développement de la lisière de glaces n'a pas permis une étude à long terme. À cause des fluctuations de la température de l'air et des inondations fréquentes, il y avait soit formation de lisière de glaces qui se détachait et partait à la dérive, ou était recouverte par le débordement au point de congélation. À cause de ces contraintes, la vitesse de croissance de la lisière de glaces a été observée à M pendant une période de huit jours seulement (figure 28). Ces données n'indiquent qu'une faible corrélation avec la température de l'air.



Figure 28. Largeur de la lisière de glaces et température de l'air en fonction du temps.

Avancement de la bordure de glace

La vitesse d'avancement de la bordure de glace à travers le bief constitue une préoccupation du premier ordre pour les barrages et les ponts parce que c'est pendant cette période que la région de Marwell près de Whitehorse est la plus sujette aux inondations. On a noté que l'effet de remous augmentait à mesure que la bordure de glace dépassait X2, ce qui suggère que la susceptibilité aux inondations est en rapport avec la vitesse d'avancement de la bordure de glace.

Des observations de la vitesse d'avancement de la bordure de glace à travers le tronçon ont été effectuées en



Figure 29. Comparaison de l'avancement du front de glace pendant les trois hivers de l'étude.

1983-1984, en 1984-1985 et en 1985-1986 (figure 29). En général, il semble que la bordure de glace se propage très rapidement de X4 à X2, ralentissant entre X2 et X1, et se déplaçant très lentement au-delà de X1.

On croit généralement que les températures de l'air prédominantes ont l'effet le plus important sur le régime d'hiver du fleuve, bien que ces effets soient parfois imprévus. C'est ce qui a été démontré en 1985-1986 quand des renversements dramatiques des profils météorologiques ont été observés. Pendant une période de température froide coincidant avec la formation d'une grande quantité de frasil et de glace de fond, la bordure de glace est passée rapidement de X4 à juste en avai de AM, comme prévu. Ce qui était plus difficile à prévoir, c'était l'effet des températures plus élevées sur les niveaux d'eau et l'inondation de la couverture de glace existante. Des fluctuations du niveau de l'eau ont entraîné le bris d'une partie importante de la lisière de glace, qui a dérivé dans des zones libres du bief. Cette glace s'est ensuite immobilisée sur la bordure de glace de facon à la prolonger très rapidement en amont. C'est ce qui est survenu entre AM et le pont Robert Campbell.

Formation de crêtes de glace

Les recherches antérieures ont montré que, au début du printemps, des instabilités dans l'écoulement d'eaux dont la température est supérieure à celle du point de congélation peuvent entraîner la création de formations ondulées appelées crêtes de glace, à l'interface eau-glace (Carey, 1966; Ashton et Kennedy, 1972). La mécanique des fluides du transfert thermique à l'interface eau-glace en présence d'un écoulement turbulent a été calculée par Gilpin et coll. (1980). On a observé (Alford et Carmack, 1987a) que la résistance hydraulique du bief semblait augmenter de façon proportionnelle au début de la formation des crêtes.

En général, le développement des crêtes a suivi le même profil en 1986 qu'en 1985, c'est-à-dire qu'on a observé des changements importants de la texture de l'interface eau-glace pendant une très courte période de temps, comme l'indiquent les figures 30 et 31. Au début, le fond de la couche de glace était lisse; puis, à mesure que les radiations solaires ont commencé à pénétrer à travers la



a) 19 mars.



b) 24 mars.

Figure 30. Photographies montrant une vue plane de la surface inférieure des blocs de glace et montrant le développement progressif Le crêtes de glace à des dates particulières.



c) 29 mars.



d) 3 avril.

Figure 30. (Suite)



f) 15 avril.

Figure 30. (Suite)



a) 10 mars.



b) 15 avril.

Figure 31. Photographies montrant une vue latérale de la surface inférieure de blocs de glace présentant une transition d'une surface plane le 10 mars au moment de l'amplitude maximum des crêtes le 15 avril.

couverture et à réchauffer les eaux sous-jacentes, des crêtes ont commencé à se former. Au début, les crêtes étaient essentiellement droites avec des longueurs d'onde d'environ 0.10 m et des amplitudes d'environ 0.01 m. À mesure que les amplitudes des crêtes croissaient jusqu'à environ 0.02 m, des points secondaires d'instabilité et de fusion ont apparu, et les crêtes ont commencé à former des ondulations. Au cours des étapes finales, les crêtes des ondulations sont devenues discontinues et se sont brisées, et par conséquent n'ont pas pu être suivies sur des distances dépassant de beaucoup la longueur d'ondes. À ce moment, les amplitudes étaient de l'ordre de 0.05 m. La figure 32 indique le niveau de l'eau, la température de l'air et l'écoulement correspondant à la période de formation de crêtes et de la débâcle.

En 1986, on a observé deux nouveaux aspects associés avec la formation de crêtes. Le premier était en rapport avec leur développement au milieu de l'hiver. Pendant une inspection de la couverture de glace isolée s'étendant au-delà du pont Robert Campbell, le 21 décembre, on a observé qu'un des glaçons qui s'était logé dans la bordure de glace était inversé de façon à exposer la face inférieure couverte de crêtes (voir figure 10). Il est probable que ce bloc provenait de la lisière de glaces dans le bief du fleuve près de l'exutoire du barrage hydroélectrique, où les températures de l'eau sont les plus élevées. Une telle observation indique clairement que la formation de crêtes n'est pas un phénomène survenant seulement au printemps (induit par la radiation solaire), mais peut survenir quand les températures de l'eau et de l'écoulement sont favorables, c'est-à-dire à proximité des exutoires d'eau plus chaude ou de lacs.

La deuxième observation concerne les occurrences et la migration des sillons à travers la glace blanche. Il faut se souvenir que, à cause des inondations du milieu de l'hiver de la glace et de la couverture neigeuse, ainsi que du regel



Figure 32. Niveau de l'eau, température de l'air et écoulement de l'eau à la débâcle.



a) Vue de biais.



b) Vue de côté.

Figure 33. Photographies montrant des vues obliques et latérales de la surface inférieure de la glace blanche à BM le 21 avril. ultérieur, la glace présente entre M et AM était formée de couches d'environ 0.40 m de glace blanche recouvrant 0.40 m de glace noire. La figure 33 montre que le développement des crêtes continue à être l'une des caractéristiques de la base de la glace en fusion, blanche ou noire. Dans le cas de la glace noire, on a observé que les sillons migraient vers l'amont à une vitesse d'environ 0.02 m d⁻¹; toutefois, quand ils atteignaient la glace blanche, la vitesse de migration passait à 0.40 m d⁻¹. En fait, toute la couche de glace blanche disparaissait en environ un jour.

L'ablation rapide de la glace blanche est un facteur qui peut influer sur la sécurité de ceux qui traversent la rivière à pied sur la glace. En un jour, la résistance de la glace peut devenir pratiquement nulle. En outre, ce phénomène est dû à la fonte par le dessous, et il n'y a absolument aucune altération visible à la surface de la glace qui indique ce changement.

Analyse des profils de vitesses

Ici, nous utilisons une nouvelle méthode de sondage pour les rivières recouvertes de glace, basée sur une seule mesure de vitesse à chaque verticale de la section.

En se basant sur des études antérieures et les observations effectuées par notre propre programme, nous savons que la vitesse d'écoulement varie fortement dans le temps et l'espace. À cause de cette caractéristique, il est difficile, en pratique, de savoir comment obtenir des évaluations optimales de la vitesse de l'écoulement à partir de mesures sur place. Pour obtenir une évaluation de la vitesse moyenne de l'écoulement sous la glace, la méthode habituelle, utilisée par la Division des relevés hydrologiques du Canada, est d'établir la moyenne des vitesses à des profondeurs de 0.2 et 0.8 fois la profondeur (v_{0.2} et v_{0.8}) ou, si la profondeur est inférieure à 0.75 m, de multiplier la vitesse à 0.5 fois la profondeur $(v_{0.5})$ par un coefficient de 0.88 (voir figure 34). Toutefois, une analyse de profil des vitesses obtenues pendant tout l'hiver en 1983-1984 (Alford et Carmack, 1987a) a révélé que le facteur de profondeur de 0.4 correspondait à la fois à la profondeur moyenne de la vitesse maximum et à la profondeur de la variance minimale dans les tracés de vitesse normalisés en fonction de la profondeur normalisée. Par conséquent, les changements saisonniers des courbes de vitesse, compte tenu de la rugosité de la couverture neigeuse (voir Lau, 1982, pour une analyse complète) sont minimisés à cette profondeur. Ceux-ci suggèrent qu'une seule mesure de vitesse, effectuée à 0.4 fois la profondeur, multipliée par un coefficient approprié, peut donner une évaluation précise de la vitesse moyenne du profil. Par la suite, une réévaluation des profils historiques de vitesse et des données obtenues par le programme ESAGY a été effectuée. Par une évaluation mathématique et graphique (voir Papadakis et coll., 1987, pour plus de précisions), il a été confirmé que l'application d'un coefficient de 0.86 aux vitesses observées à 0.4 fois la profondeur donnait une valeur très proche de la vitesse moyenne du profil complet. Nous appelons donc cette technique la méthode «486», dont un résumé est présenté ci-dessous.



SI D < 0.75 m $\langle V \rangle = 0.88 (V_{0.5})$ MÉTHODE «486»

 $\langle V \rangle = 0.86 (v_{0.4})$

Figure 34. Diagramme montrant les définitions des vitesses utilisées dans le texte, et méthodes destinées à l'évaluation de la vitesse moyenne.

Par conséquent, nous allons évaluer la vitesse moyenne à une verticale donnée, V, en utilisant surtout l'expression algébrique V = R v_{max}, où v_{max} est la vitesse maximum. Aux fins des opérations, il est nécessaire de préciser la profondeur à laquelle v_{max} est la plus vraisemblable; cette valeur est égale à Z_{max} = z_{max}/D, la profondeur normalisée à la vitesse maximum (figure 34). De même, le coefficient R est le rapport moyen de la vitesse moyenne et de la vitesse maximum, soit R = $\langle V/v_{max} \rangle$, où le symbole $\langle \rangle$ indique la moyenne d'un nombre important d'observations de profils.

Les données utilisées pour établir les coefficients selon la méthode ci-dessus sont présentées dans le tableau 5. Dix mesures ou plus de vitesse à chaque verticale ont été ajustées selon l'équation des puissances décrites par Alford et Carmack (1987a). Les trois premières colonnes indiquent l'emplacement, la date, et la profondeur de la station. La colonne 4 indique s'il y avait présence ou non de frasil. À la colonne 5, on trouve la liste des profondeurs normalisées des vitesses maximum zmax/D. La colonne 6 indique les valeurs de v_{0.4}, la vitesse à un facteur de profondeur de 0.4 qui, comme nous le démontrons ci-dessous, est égale à une profondeur moyenne de vmax. La colonne 7 indique la vitesse moyenne V obtenue par intégration numérique du profil de vélocité; on utilise cette valeur pour évaluer la vitesse moyenne. Le rapport V/vmax est indiqué dans la colonne 8.

Comme le montre le tableau 5, la profondeur moyenne à laquelle la vitesse maximum est observée est de 0.40 (écart type = 0.12), et le coefficient R est de 0.86 (écart type = 0.05), ce qui est conforme à nos observations antérieures (Alford et Carmack, 1987a).

Les colonnes 9 et 10 du tableau 5 indiquent aussi une comparaison des évaluations des vitesses moyennes obtenues par intégration numérique avec celles obtenues par les méthodes «ordinaire» et «486». La méthode «486» se compare bien à l'évaluation de contrôle de V.

À l'aide de la méthode «486», un certain nombre de mesures d'écoulement ont été effectuées pendant l'hiver de 1985-1986, et les résultats sont comparés à des valeurs d'écoulement simultané mesurées au barrage hydroélectrique des rapides de Whitehorse, ainsi qu'à des mesures basées sur la méthode habituelle (0.2 et 0.8). Ces résultats (tableau 6) indiquent que la méthode «486» peut être très utile dans les études sur les relevés; elle est non seulement plus rapide, mais sa précision est également équivalente à celle de la méthode traditionnelle.

Tableau 5.	Analyse des	données historiques pour	déterminer les param	ètres utilisés avec	la méthode «486»
	•		A + +++		and the state of t

1	2	3	4	5	6	7	8.	9	10
Emplacement	Date	Profon- deur (m)	Conditions des glaces*	Zmax D (m)	^v 0.4 (m s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	V/v _{0.4} (m s ⁻¹)	^v 2&8 (m s ⁻¹)	^V 486 (m s ⁻¹)
Riv. Blue	66-12-14	0.732	С	0.358	0.47	0.406	0.864	0.425	0.404
Riv. Blue	66-12-14	0.732	С	0.331	0.68	0.553	0.813	0.585	0.585
Riv. Blue	67-03-20	0.610	С	0.431	0.73	0.582	0.800	0.600	0.628
Riv. Coal	66-12-10	1.067	С	0.582	0.82	0.645	0.787	0.605	0.705
Riv. Cottonwood	66-12-15	0.732	С	0.388	0.85	0.705	0.829	0.740	0.731
Riv. Cottonwood	66-12-15	0.671	С	0.311	0.87	0.717	0.824	0.755	0.748
Riv. Dease	66-12-17	2.225	С	0.309	0.41	0.357	0.870	0.365	0.410
Riv. Dease	67-03-15	1.341	С	0.267	0.36	0.302	0.839	0.300	0.461
Riv. Dease	67-03-15	1.615	С	0.417	0.34	0.279	0.821	0.290	0.292
Riv. Dezadeash	67-04-14	1.097	С	0.348	1.37	0.992	0.724	0.940	1.178
Riv. Frances	66-12-06	1.676	С	0.598	0.48	0.374	0.779	0.375	0.413
Riv. Hyland	66-12-09	1.494	С	0.303	1.14	0.951	0.834	0.950	0.980
Riv. Hyland	66-12-09	2.012	С	0.259	1.09	0.881	0.808	0.820	0.937
Riv. Iskut	67-01-18	1.920	С	0.585	0.21	0.181	0.862	0.180	0.181
Riv. Iskut	67-01-18	1.829	С	0.528	0.20	0.152	0.760	0.155	0.172
Riv. Iskut	67-03-15	1.920	С	0.484	0.23	0.214	0.930	0.230	0.198
Riv. Iskut	67-01-13	1.829	С	0.465	0.92	0.805	0.875	0.820	0.791
Riv. Kechika	66-12-08	1.219	С	0.300	1.19	0.978	0.822	1.000	1.023
Riv. Kechika	66-12-08	1.585	С	0.285	1.06	0.885	0.835	0.890	0.912
Riv. Kechika	67-03-17	1.036	С	0.388	1.05	0.883	0.841	0.905	0.903
Riv. Liard près du cours inférieur	66-12-12	3.475	С	0.459	1.16	0.994	0.857	1.005	0.998
Riv. Liard près du cours inférieur	66-12-12	3.261	С	0.431	1.12	0.930	0.830	0.930	0.963
Riv. Liard près du cours supérieur	66-12-07	4.511	С	0.547	1.21	1.008	0.833	1.035	1.041
Riv. Liard près du cours supérieur	67-03-21	3.353	С	0.490	0.48	0.409	0.852	0.430	0.413
Riv. Lubbock	67-01-16	2.042	C	0.093	0.59	0.472	0.800	0.445	0.507
Riv. M'Clintock	67-02-03	1.189	С	0.340	0.33	0.280	0.848	0.295	0.284

*Conditions des glaces : C = sans frasil; F = frasil; U = aucune donnée.

			Tableau 5. (Su	nte)					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Profon-	Conditions	^z max		v	V/m_		
Emplacement	Date	deur (m)	des glaces*	(m)	v _{0.4} (m s ⁻¹)	v (m s ⁻¹)	v/v _{0.4} (m s ⁻¹)	V2&8 (m s ⁻¹)	v486 (m s ⁻¹)
							0.004	0.000	
Riv. Stewart près de la traverse	66-11-17	1.890	C	0.362	0.31	0.277	0.894	0.280	0.267
Riv. Stewart pres de la traverse	67 01 26	2.103	C C	0.274	0.27	0.244	0.900	0.250	0.232
Riv. Stewart pres de la traverse	07-01-20	1.961	C	0.201	0.42	0.504	0.274	0.520	0.501
Riv. Stewart près de Mayo	66-11-16	3.780	С	0.484	0.16	0.140	0.875	0.140	0.138
Riv. Stewart près de Mayo	66-11-16	7.071	C	0.441	0.26	0.217	0.835	0.225	0.224
Riv. Stewart près de Mayo	67-01-27	5.608	, C	0.097	0.14	0.100	0.714	0.100	0.120
Riv. Stewart près de l'embouchure	64-04-16	2.865	С	0.260	0.31	0.277	0.894	0.270	0.270
Riv. Pelly près de la riv. Ross	66-11-23	1.829	С	0.537	0.68	0.548	0.806	0.550	0.585
Riv. Pelly près de la riv. Ross	66-11-23	2.103	C	0.335	0.78	0.693	0.890	0.715	0.671
Riv. Pelly près de la riv. Ross	67-01-31	1.524	C	0.336	0.37	0.339	0.916	0.350	0.318
Riv. Pelly près de la riv. Ross	67-01-31	1.219	С	0.696	0.36	0.345	0.958	0.335	0.310
Riv. Pelly près de la traverse	67-01-25	1.402	С	0.289	0.86	0.686	0.798	0.715	0.740
Riv. Stikine près de Telegraph Creek	67-01-22	2.530	С	0.229	0.50	0.427	0.854	0.440	0.430
Riv. Stikine près de Telegraph Creek	67-01-22	2.530	- C	0.266	0.59	0.521	0.883	0.560	0.507
Riv. Stikine près de Telegraph Creek	67-03-20	1.829	C	0.290	0.62	0.543	0.876	0.550	0.533
Riv. Stikine près de Telegraph Creek	67-03-20	2.225	· C ·	0.322	0.68	0.603	0.887	0.615	0.585
Riv. Stikine en aval de la riv. Klappan	67-01-19	1.646	С	0.293	0.81	0.718	0.886	0.745	0.697
Riv. Swift	66-12-18	1.859	С	0.559	0.91	0.805	0.885	0.825	0.783
Riv. Swift	66-12-18	2.713	С	0.706	0.68	0.593	0.872	9.635	0.585
Riv. Swift	66-02-10	1.554	Ċ	0.331	0.63	0.513	0.814	0.500	0.542
Riv. Swift	66-02-10	0.975	Ċ	0.284	0.67	0.521	0.778	0 565	0.576
Riv. Swift	67-03-22	1.859	C	0.455	0.55	0.493	0.896	0.515	0.473
Riv Teslin	66-02-11	1 404	T	0 260	Ó 49	0 4 2 1	0.977	ò 110	0.412
Riv Teslin	66-02-11	1.77	U	0.209	0,40	0.421	0.877	0.440	0.415
Riv. Teslin	66-02-11	1.402	Ŭ	0.245	0.35	0.372	0.808	0.470	0.450
Riv Watson	<u> </u>	0.640	C C	0.020	0.17	0.072	0.027	0.070	0.507
Riv Watson	66-11-30	0.040	C	0.239	0.37	0.321	0.868	0.320	0.318
Riv. Watson	67-04-05	0.040	C	0.321	0.45	0.304	0.876	0.300	0.370
El Vukon nels de Deuron	50 02 10	4.044	0	0.205	0.57	0.522	0.020	0.540	0.555
Fl. Yukon près de Dawson	59-02-18	4.840		0.345	0.29	0.263	0.907	0.260	0.249
Fl. Yukon près de Dawson	60-02-16	4.328	U	0.018	0.50	0.501	0.895	0.500	0.482
Fl. Yukon près de Dawson	60-02-16	3.810	U	0.581	0.72	0.651	0.904	0.660	0.619
El Vukon près de Dawson	60 02 16	3.201	U I	0.511	0.78	0.694	0.890	0.715	0.671
Fl. Yukon près de Dawson	63-04-00	2.749	U	0.034	0.09	0.028	0.954	0.690	0.593
Fl. Yukon près de Dawson	63-04-09	6 010	U	0.470	0.52	0.408	0.900	0.520	0.447
The Tukon pies de Dawson	03-04-09	0.919	0	0.171	0.28	0.224	0.800	9.250	0.241
Fl. Yukon près de Hootalinqua	66-02-12	2.438	U	0.319	1.26	1.002	0.795	1.030	1.084
Fi. Yukon près de Hootalinqua	66-02-12	2.012	U	0.336	1.02	0.822	0.806	0.785	0.877
Fl. Yukon près de Whitehoree	67 02 15	2.530	U .	0.308	1.19	1.013	0.851	1.110	1.023
Fl. Yukon en aval de la sir. White	50 02 22	3.297	с •	0.317	0.48	0.420	0.875	0.425	0.413
Dir. White	59-02-22	4.724	U	0.471	0.43	0.394	0.916	0.395	0.370
Riv. white	0/-04-25	2.377	U	0.536	0.66	0.572	0.867	9.575	0.568
Riv. Takhini	66-12-27	1.219	C	0.436	0.74	0.649	0.877	0.650	0.636
Riv. Taknini Div. Takhini	00-11-14	3.018	C	0.528	0.61	0.553	0.907	0.535	0.525
Riv. Takinin Div. Takini	00-11-15	2.377	C	0.573	0.60	0.514	0.857	0.550	0.516
Riv. Takinin Riv. Takhini	00-11-15	2.591	C	0.531	0.47	0.390	0.830	0.425	0.404
INV. I ANIIIII	00-11-16	2.517	C	0.547	0.67	0.542	0.810	0.560	0.576
Riv. Takhini	66-11-16	2.530	C	0.605	0,52	0.455	0.875	0.505	0.447
Riv. Takhini	66-11-17	2.530	С	0.557	0.64	0.569	0,889	0,585	0.550
Riv. Takhini	66-11-18	2.530	С	0.532	0.70	0.609	0.870	0.640	0.602
RIV. Takhini	66-11-18	2.377	С	0.643	0.45	0.448	0.996	0.485	0.387
RIV. I akhini	66-11-19	2.804	C	0.500	0.70	0.603	0.861	0.630	0.602

			Ladieau 5. (St	inte)					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Profon-	Car distance	z _{max}		17	37/		
Emplacement	Date	deur (m)	des glaces*	(m)	v _{0.4} (m s ⁻¹)	∨ (m s ⁻¹)	$(m s^{-1})$	^v 2&8 (m s ⁻¹)	^v 486 (m s ⁻¹)
				······································					
Riv. Takhini	66-11-22	1.920	C	0.575	0.48	0.397	0.827	0.450	0.413
Riv. Takhini	67-02-08	1.372	C	0.486	0.47	0.434	0.923	0.450	0.404
Riv. Takhini	56-03-27	0.610	C	0.323	0.57	0.482	0.846	0.500	0.490
Riv. Takhini	65-12-28	1.097	C	0.275	0.66	0.571	0.865	0.550	0.568
Riv. Takhini	65-12-28	1.219	С	0.329	0.70	0.568	0.811	0.575	0.602
Riv. Takhini	65-12-28	1.280	С	0.441	0.71	0.590	0.831	0.615	0.611
Riv. Takhini	65-12-28	0.518	Ċ	0.359	0.45	0.380	0.844	0.380	0.387
Riv. Takhini	65-12-28	0.914	С	0.262	0.59	0.497	0.842	0.500	0.507
Riv. Takhini	67-02-09	0.914	С	0.262	0.78	0.687	0.881	0.695	0.671
Riv. Takhini	67-02-02	0.823	С	0.358	0.60	0.557	0.928	0.580	0.516
Riv. Takhini	67-02-07	0.975	С	0.295	0.57	0.480	0.842	0.480	0.490
Riv. Takhini	67-01-28	0.884	С	0.216	0.60	0.530	0.883	0.550	0.516
Riv. Takhini	67-01-28	0.823	С	0.235	0.59	0.503	0.853	0.510	0.507
Riv. Takhini	67-01-04	1.097	С	0.351	0.75	0.657	0.876	0.600	0.645
El. Vukon près de Whitehorse (M)	83-12-14	2.62	F	0.464	1.02	0.877	0.859	0.840	0.877
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	83-12-14	4.51	F	0.530	1.01	0.894	0.885	0.970	0.869
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	83-12-14	3.47	F	0.436	1.19	1.054	0.885	1.075	1.023
Fl. Vukon près de Whitehorse (M)	84-01-06	3.05	F	0.337	1.39	1.142	0.822	1.155	1.195
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	84-01-06	3.9	F	0.282	1.36	1.207	0.888	1.240	1.170
	84 01 06	2.04	F	0.461	1 16	0.078	0 843	0.080	- À 008
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	84-01-06	3.90	r F	0.401	1.10	0.978	0.843	0.200	0.774
Fl. Yukon près de Whitehorse (BM)	84-01-12	2.07	F	0.205	0.70	0.764	0.871	0.005	0.757
Fl. Yukon près de Whitehorse (AM)	84 01 22	7.75	F	0.275	0.00	0.542	0.834	0.705	0.559
Fl. Yukon pres de Whitehorse (AM)	84-01-23	2.32	F	0.340	0.05	0.542	0.034	0.795	0.834
Fl. Yukon pres de Whitehorse (AM)	84-01-25	5.4	•	0.252	0.77	0.700	0.010	0,775	
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	84-02-07	2.74	F	0.225	1.23	1.129	0.918	1.170	1.058
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	84-02-07	3.51	F	0.333	1.29	1.193	0.925	1.195	1.109
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	84-03-01	3.08	F	0.360	1.24	1.062	0.856	1.050	1.066
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	84-03-01	3.35	F	0.316	1.27	1.077	0.848	1.090	1.092
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	84-03-01	2.04	F	0.448	1.05	0.799	0.760	0.855	0.903
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	84-03-08	2.87	F	0.448	1.00	0.853	0.853	0.870	0.860
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	84-03-14	3.66	F	0.521	1.01	0.898	0.889	0.925	0.869
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	84-03-14	3.29	F	0.494	0.97	0.816	0.841	0.810	0.834
Fl. Yukon près de Whitehorse (BM)	84-03-16	3.05	F	0.461	0.74	0.602	0.814	0.640	0.636
El Vukon près de Whitehorse (BM)	85-12-12	3 719	F	0.284	1.25	1.129	0.903	1.135	1.075
Fl. Yukon près de Whitehorse (BM)	85-12-12	3 719	F	0.247	1.29	1.156	0.896	1.180	1.109
Fl. Yukon près de Whitehorse (BM)	85-12-20	3 658	F	0.276	1.22	1.111	0.911	1.200	1.049
Fl. Vukon près de Whitehorse (BM)	85-12-20	3.658	F	0.331	1.18	1.069	0.906	1.080	1.015
Fl. Yukon près de Whitehorse (BM)	86-01-06	3.444	F	0.332	1.09	1.041	0.955	1.100	0.937
	96 10 00	2 070	F	0 404	1 27	1 1 1 1	0.875	1 105	1 092
FI. Yukon pres de Whitehorse (M)	85-12-25	3.070	F	0.707	1.26	1,105	0.877	1.145	1 084
FI. Yukon pres de Whitehorse (M)	85-12-25	3.078	F	0.375	1 34	1 1 50	0.858	1.165	1.152
FI. Yukon pres de Whitehorse (M)	86 01 14	2 057	F	0.570	117	1 099	0.939	1.115	1.006
Fl. Yukon pres de Whitehorse (M)	85 02 15	2.957	r C	0.475	1 52	1 306	0.859	1.390	1.307
Fl. Yukon pres de Whitehorse (M)	85-02-15	3,000	C	0.313	1.52	1 341	0.843	1.395	1.367
FI. Yukon pres de Whitehorse (M)	85-02-15	5.000	C	0.274		1.0.11			
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	85-02-15	3.600	С	0.373	1.51	1.313	0.870	1.330	1.299
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	85-02-15	3.600	С	0.409	1.56	1.322	0.847	1.310	1.342
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	85-02-15	1.716	F	0.543	0.83	0.696	0.839	0.675	0.719
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	85-02-15	1.716	F	0.537	0.87	0.735	0.844	0.735	0.748
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	85-02-15	1.716	F	0.543	0.91	0.778	0.855	0.770	0.783
Fl. Yukon près de Whitehorse (M)	85-02-15	1.716	F	0.541	0.88	0.783	0.890	0.790	0.757
Fl. Yukon près de la riv. Thirty Mile	85-02-22	3.200	С	0.630	0.19	1.137	0.955	1.175	1.023
Moyenne				0.396			0.858		
Écart type				0.125			0.047		

		N ^{bre} de me-	Nbre de me- Écoulement (m ³ s ⁻¹)				,		
		sures verticales	Au barrage	Méthode	Méthode	Écart (%) de la	CHNC		
Date	Section	par section	de la CHNC	«ordinaire»	«486»	«Ordinaire»	«486»		
85-11-18	Yukon à BM	13	152	154	153	1.3	0.6		
85-11-25	Yukon à M	10	130	125	123	-3.8	-5.4		
85-11-26	Yukon à BM	12	137	140	134	2.2	-2.2		
85-12-02	Yukon à X1	11	130	125	-	-3.8	. —		
85-12-04	Yukon à BM	14	136	139		2.2			
85-12-05	Yukon à X1	12	134	118	-	-11.9	-		
85-12-06	Yukon à M	16	140	144	-	2.8	-		
85-12-12	Yukon à BM	. –	139		139	_	0		
85-12-18	Yukon à M	16	141	144	141	2.1	0		
85-12-20	Yukon à BM	-	-	-	-	-	-		
85-12-23	Yukon à M	_	140	-	144	-	2.8		
86-01-06	Yukon à BM	—	130	-	128	-	-1.5		
86-01-08	Yukon à AM	20 [.]	134	137	137	2.2	2.2		
86-01-10	Yukon à X1	16	131	124	128	-5.3	-2.3		
86-01-14	Yukon à M	· _	126	-	127	_	0.8		
86-01-16	Yukon à BM	20	123	131	120	6.5	-2.4		
86-02-04	Yukon à AM	20	117	125	119	6.8	1.7		
86-02-05	Yukon à X1	23	118	-	115	-	-2.5		
86-02-06	Big Salmon	25		21.0	21.4	_	-		
86-02-10	Yukon à M	22	117	-	112	_	-4.3		
86-02-12	Yukon à BM	22	117	. –	115	-	-1.7		
86-03-11	Yukon à M	24	110	-	110	-	-4.3		
86-03-12	Yukon à BM	20	115		105	-	-8.6		
86-03-21	Yukon à XI	26	100	-	110	_	0.9		
86-03-24	Yukon à M	21	114	-	119	-	4.4		
86-03-25	. Yukon à BM	20	115	-	110	_	-4.0		
86-04-04	Yukon à M	25	145	-	149	· _	2.8		
86-04-14	Yukon à BM	22	134	_	137	-	2.2		

 Tableau 6. Vérification de la méthode «486» en utilisant l'écoulement de la centrale hydroélectrique des rapides de Whitehorse comme témoin

DISCUSSION

Des observations de la séquence d'englacement du fleuve Yukon du lac Laberge à Whitehorse (voir aussi Carmack et coll., 1987) suggèrent un profil représentatif valant pour plusieurs rivières du nord qui sont orientées en direction nord-sud. Le bief inférieur près du lac Laberge est caractérisé par des épisodes de gel en place des floes, à cause de la grande quantité de glace de lisières en amont. Plus près du barrage de Whitehorse, par ailleurs, la quantité de floes à la dérive est moins importante, et le profil général décrit dans le présent rapport prévaut.

Le tableau 7 présente une comparaison des données résumées des hivers de 1983-1984, 1984-1985 et de 1985-1986. En général, l'hiver de 1985-1986 était doux, mais caractérisé par des variations extrêmes de courte durée de la température et des chutes de neige. Plus particulièrement, à l'englacement, la température de l'air était inférieure à la normale, alors que les chutes de neige étaient de deux à trois fois supérieures à la normale. À l'inverse, la période du milieu de l'hiver a été caractérisée par des températures beaucoup plus élevées que la moyenne et des chutes de neige inférieures à la normale. Au cours de la troisième année de l'étude, l'englacement est servenu presque un mois plus tôt que l'année précédente à BM et M, mais seulement cinq jours plus tôt à AM à cause de la période de température plus élevée pendant que la bordure de glace se déplaçait de M à AM. La débâcle est survenue de huit à dix jours plus tard que prévu à cause des basses températures records du début d'avril.

Des phénomènes d'embâcle et d'empilement de glaces peuvent survenir dans les gorges à X4, à X0 près du dépôt, et immédiatement en amont du quai se prolongeant jusqu'au milieu du lit au pont Robert Campbell. Les phénomènes d'empilement de glaces sont observés avant la formation et l'avancement de la bordure de glace. Pour leur part, des niveaux d'eau élevés sont observés pendant l'avancement de la bordure de glace entre M et AM; par conséquent, il existe une période critique pour l'exploitation appropriée du barrage.

· · • ·		Hiver				
Événement	1983-1984	1984-1985	1985-1986			
Date de l'arrivée de la bordure de glace à X4	_		9 nov.			
Date de l'arrivée de la bordure de glace à BM	4 déc.	9 déc.	11 nov.			
Date de l'arrivée de la bordure de glace à M	9 déc.	13 déc.	17 nov.			
Date de l'arrivée de la bordure de glace à AM	2 janv.	29 déc.	24 déc.			
Date de l'arrivée de la bordure de glace à X0	-	-	28 janv.			
Épaisseur maximum de la glace à M	1.0 m	0.7 m	1.0 m			
Date de l'épaisseur maximum de la glace à M	7 févr.	19 mars	11 mars			
Pourcentage maximum de l'aire du barrage de frasil à M	41.6 %	39.8 %	44 %			
Date de l'aire maximum (%) du barrage de frasil à M	14 déc.	12 févr.	25 nov.			
Niveau d'eau maximum à M	3.501 m	3.471 m	3.341 m			
Date du niveau d'eau maximum à M	9 déc.	16 déc.	16 nov.			
Niveau d'eau maximum à AM	4.812 m	5.085 m	4.420 m			
Date du niveau d'eau maximum à AM	1 ^{er} janv.	30 déc.	4 déc.			
Date de la disparition des glaces au dépôt	22 mars	8 avr.	17 avr.			
Date de la disparition des glaces à AM	23 mars	8 avr.	18 avr.			
Date de la disparition des glaces à M	25 mars	10 avr.	19 avr.			
Date de la disparition des glaces à BM	29 mars	12 avr.	19 avr.			
Chutes de neige du 1 ^{er} novembre au 31 mars	0.724 m	1.672 m	127.6 m			

	Tableau 7. Résum	é de la comparaison d	es hivers de 1983-1984,	1984-1985 et 1985-198
--	------------------	-----------------------	-------------------------	-----------------------

En général, la bordure de glace avance très rapidement en amont de M, et relativement lentement plus bas. Toutefois, dans le cadre de ce profil général, les trois années d'étude montrent que la vitesse d'avancement de la bordure de glace peut varier. Ceci est partiellement dû aux différences de vitesse critiques à la bordure, dépendant de changements de la pente de la surface; cette vitesse change avec la formation de barrages de frasil et leur érosion en aval. Par conséquent, les conditions déterminant si un floe donné sera bloqué ou submergé sous la bordure sont très variables (voir Michel, 1971).

Les canaux ouverts peuvent persister pendant tout l'hiver à M et immédiatement sous le pont. Bien qu'aucun canal important ne soit resté ouvert en amont du pont au cours de l'hiver de 1985-1986, comme ce fut le cas au cours des hivers antérieurs, on a observé de nombreuses zones d'eau libre formées par l'empilement de floes irréguliers provenant du vêlage de la lisière de glace pendant les périodes chaudes. Pour les trois hivers, et probablement pour tous les hivers, l'eau est restée libre à un point situé à 350 m en amont du pont jusqu'au barrage.

Alors qu'elle augmentait la résistance hydraulique du tronçon, la débâcle n'avait que peu d'effets sur le niveau de l'eau.

Nos observations de la structure du barrage de frasil nous permettent de croire qu'il existe plusieurs types de barrages de frasil : certains sont influencés par la géométrie du cours d'eau (p. ex., des barres, des coudes et des gorges); d'autres sont influencés par des profils de vélocité (p. ex., zones d'écoulement rapide, tourbillons), alors que d'autres sont influencés par la rugosité de la surface inférieure de la couverture de glace (c.-à-d. projections, plagues en position debout). Les formations principalement influencées par la géométrie du cours d'eau (p. ex., le barrage de Marwell) occuperont vraisemblablement les mêmes emplacements chaque année, et présenteront la même section et surface transversale d'une année à l'autre. En outre, de tels barrages semblent croître jusqu'à la stabilisation de la couverture de glace (immédiatement après l'englacement), puis ils sont érodés graduellement jusqu'à la débâcle. Toutefois, les barrages dont la formation est accélérée par une couverture très irrégulière dans le voisinage d'une bordure de glace, et qui sont par conséquent dans la trajectoire de la zone d'écoulement rapide semblent être soumis à une érosion beaucoup plus rapide; le barrage à X1 en est un exemple.

Il peut y avoir des barrages composites. Le frasil peut d'abord s'accumuler sous la lisière des glaces, sous forme de dépôts latéraux. Ensuite, quand le canal principal est complètement recouvert, il peut y avoir des dépôts au milieu du canal ou au milieu du cours d'eau, dans la zone où les vitesses sont les plus élevées et la glace, la plus irrégulière. Dans ce cas, le barrage nouvellement formé peut être à l'origine d'une bifurcation de l'écoulement, ce qui influe sur la capacité d'adduction du canal. Ainsi, la déflection du canal principal peut entraîner l'érosion du barrage latéral plus ancien.

Enfin, notons que la méthode «486», évaluée dans le présent rapport, peut être utilisée avantageusement par ceux qui feront des levés hydrométriques d'hiver. Le temps sur place économisé par une seule mesure à chaque station verticale le long d'une section de mesure peut réduire d'une façon importante le temps du travail ou, mieux encore, permettre d'effectuer des mesures verticales plus rapprochées. La réduction du temps de travail peut être importante pour une meilleure utilisation des heures d'éclairement pour les levés aériens. Des mesures verticales plus rapprochées devraient permettre une meilleure résolution du courant de cisaillement horizontal, une meilleure détermination de la surface transversale des barrages de frasil et une meilleure observation des écoulements qui auraient été détournés dans des canaux latéraux. Par exemple, il arrive souvent que des barrages de frasil situés en amont des sections choisies pour les mesures dévient l'écoulement dans des canaux ne correspondant pas à la géométrie du lit.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier E. Marles et V. Chamberlain pour leur aide empressée lors du travail de cueillette et de réduction des données. Le travail de programmation requis pour cette analyse a été effectué par R. Weigand, présentement à SciTech Consultants Inc., Vancouver. Les illustrations sont le fruit du travail de B. Gordon, Gordon Enterprises, Vancouver.

Nous tenons également à remercier le personnel de la station hydroélectrique des rapides de Whitehorse qui nous a fourni des données sur l'écoulement, ainsi que la compagnie Arctic Diamond Drilling Ltd. à Marwell, qui nous a permis de passer chaque jour par sa propriété.

RÉFÉRENCES

- Alford, M.E., et E.C. Carmack. 1987a. Observations sur le mantéau glaciel et le débit du fleuve Yukon près de Whitehorse en 1983-1984. Rapport nº 32 de l'INRH, Étude nº 152, Série scientifique, Institut national de recherche en hydrologie, Direction générale des eaux intérieures et des terres, Environnement Canada, Saskatoon (Sask.).
- Alford, M.E., et E.C. Carmack. 1987b. Observations sur le manteau glaciel et le débit du fleuve Yukon près de Whitehorse en 1984-1985. Rapport nº 34 de l'INRH, Étude nº 155, Série scientifique, Institut national de recherche en hydrologie, Direction générale des eaux intérieures et des terres, Énvironnement Canada, Saskatoon (Sask.).
- Ashton, G.D., et J.F. Kennedy. 1972. Ripples on the underside of river ice covers. J. Hydraul. Eng., 98: 1603-24.
- Carey, K.L. 1966. Observed configuration and computed roughness of the underside of river ice, St. Croix River, Wisconsin. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 550-B: 192-98.
- Carmack, E.C., R.C. Wiegand, E.M. Marles, M.E. Alford, et V.A. Chamberlain. 1987. Limnologie physique d'un lac recouvert par les glaces avec écoulement sous-jacent : lac Laberge au Yukon. Rapport nº 35 de l'INRH, Étude nº 157, Série scientifique, Institut national de recherche en hydrologie, Direction générale des eaux intérieures et des terres, Environnement Canada, Saskatoon (Sask.).
- Gilpin, R.R., T. Hirrata, et K.C. Cheng. 1980. Wave formation and heat transfer at an ice-water interface in the presence of a turbulent flow. J. Fluid Mech., 99: 619-40.
- Lau, Y.L. 1982. Velocity distributions under floating covers. Can. J. Civ. Eng., 9: 76-83.
- Martin, S. 1981. Frazil ice in rivers and oceans. Annu. Rev. Fluid Mech., 13: 379-97.
- Michel, B. 1971. Winter regime of rivers and lakes. U.S. Army Corps Eng. Cold Reg. Res. Eng. Lab., Monograph 111-Bla, Hanover, N.H.
- Osterkamp, T.E. 1978. Frazil ice formation: a review. J. Hydraul. Eng., 104: 1239-55.
- Osterkamp, T.E., et J.P. Gosink. 1983. Frazil ice formation and ice cover development in interior Alaska streams. Cold Reg. Sci. Technol., 8: 43-56.
- Papadakis, J.E., E.C. Carmack, et M.E. Alford. 1987. Velocity profiles under ice cover. A paraître.
- Tsang, G. 1982. Frazil and Anchor Ice. National Research Council Subcommittee on Hydraulics of Ice Covered Rivers, Ottawa (Ont.).

Annexe

Cartes illustrant l'avance et le retrait de la couverture de glace saisonnière en 1985-1986

























. .

.

.

.

·

Canadä