

Université du Québec  
INRS – Eau, Terre, Environnement

**L'EFFET DES CONDITIONS HIVERNALES SUR LA MORTALITÉ DU  
SAUMON ATLANTIQUE JUVÉNILE ET SUR  
LA FORMATION DE LA GLACE DE FOND EN MILIEU NATUREL**

Par  
Jean-François Bisaillon  
B.Sc.

Mémoire présenté  
pour l'obtention  
du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

Jury d'évaluation

Examinateur externe

Brian Morse, Ph.D.  
Département de génie civil  
Université Laval

Examinateur interne

André St-Hilaire Ph.D.  
INRS- Eau, Terre Environnement  
Université du Québec

Directeur de recherche

Normand E. Bergeron, Ph.D.  
INRS- Eau, Terre Environnement  
Université du Québec

## Résumé

La glace de rivière recouvre la majorité des rivières canadiennes durant une période qui s'étend de quelques semaines à plusieurs mois. Cette situation unique aux régions froides crée des environnements différents de leur équivalent sans glace. En plus de modifier considérablement les conditions physiques d'une rivière, la glace affecte également la quantité et la qualité de l'habitat des salmonidés. La période hivernal est considérée comme un goulot d'étranglement pour la production du saumon atlantique juvénile mais demeure un sujet peu étudié.

Le premier objectif du projet était d'évaluer l'influence de la période hivernale sur la mortalité de l'œuf à l'alevin (0+) et de l'alevin au tacon (1+) du saumon atlantique juvénile. Il est connu que la mortalité hivernale des œufs et des juvéniles augmente lorsque les débits hivernaux sont faibles puisque la quantité et la qualité des habitats disponibles sont réduites. De plus, selon certains chercheurs, la mortalité diminue lors d'hivers doux. L'analyse des taux de mortalité interannuelle du saumon atlantique juvénile sur la rivière Trinité entre 1983 et 1992 a permis de constater que la situation est légèrement différente sur cette rivière. Premièrement, à l'instar des autres rivières étudiées, la mortalité de l'œuf à l'alevin augmente lors d'hivers doux et lorsque le débit est faible. Ce résultat suggère que les œufs pourraient bénéficier de la protection qu'offre l'établissement d'un couvert de glace stable et continu lors d'hivers froids. Toutefois, les œufs semblent fragiles aux faibles débits hivernaux qui peuvent causer leur gel dans le substrat. Deuxièmement, à l'inverse des études publiées sur le sujet, la mortalité de l'alevin au tacon (1+) sur la rivière Trinité, augmente lors d'hivers doux mais également lorsque les conditions météorologiques propices à la formation de frasil et de glace de fond sont plus fréquentes. Tout comme les œufs, les alevins semblent bénéficier de la formation d'un couvert de glace mais demeureraient sensibles à des formes de glace comme le frasil et la glace de fond qui dégradent leur habitat et force leurs déplacements. Finalement, la comparaison de nos résultats avec ceux publiés antérieurement pour d'autres rivières, suggère que l'effet de la glace de rivière pourrait être différent selon la localisation géographique de la rivière et le régime climatique présent sur celle-ci. En

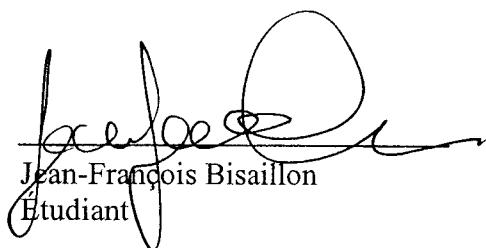
effet, un climat froid favorise l'établissement d'un couvert de glace permettant la stabilisation des conditions physiques de la rivière améliorant la survie hivernale des juvéniles. À l'inverse, sur les rivières présentant un climat plus doux, le couvert de glace est moins stable et discontinue ce qui permet la production de frasil et de glace de fond. Ces types de glace semblent néfastes pour les juvéniles et sont fréquemment évoqués comme causes de l'augmentation de la mortalité hivernale des salmonidés. Les conséquences de la glace de rivière et particulièrement de la glace de fond sont nombreuses, et afin de bien les comprendre, il est essentiel de connaître les processus de formation qui contrôlent sa formation.

La deuxième partie du projet traitait de la formation de la glace de fond en milieu naturel. La glace de fond se forme à partir de l'accrétion des cristaux de frasil transportés par l'écoulement sur le substrat du lit de la rivière. Les nuits sans nuages ayant une température de l'air inférieure à -10°C favorisent la formation de la glace de fond. De plus, le nombre de Froude qui est utilisé afin d'évaluer les conditions hydrauliques de l'écoulement, doit être compris entre 0,2 et 1,5. Malgré ces connaissances, il n'existe pas de modèle de prédiction de formation de la glace de fond. Le deuxième objectif du projet était d'élaborer un modèle statistique de formation de la glace de fond sur des rivières à lit graveleux à partir de données de terrain.

Le premier objectif spécifique consistait à élaborer un modèle permettant de prédire, à partir des conditions météorologiques enregistrées lors d'une nuit donnée, la probabilité de présence de glace de fond sur un tronçon de rivière. Les résultats indiquent que le modèle élaboré permet de prédire plus de 80% des évènements de formation de glace de fond à l'aide d'un indice qui cumule les degrés-heure de gel sur une période de 12 heures durant la nuit. Notre étude indique qu'une température moyenne de l'air inférieure à -9,3°C durant cette période entraîne la formation de glace de fond.

Le deuxième objectif spécifique visait à élaborer un modèle permettant de prédire la distribution spatiale de la glace de fond sur le lit d'une rivière en fonction des conditions météorologiques et hydrauliques locales. Le modèle élaboré permet de prédire près de

70% de la distribution spatiale de la glace de fond à l'aide du nombre de Froude. Les résultats suggèrent qu'il est possible de prédire la distribution spatiale de la glace de fond uniquement à partir des conditions hydrauliques lors d'évènements de formation. De plus, les conditions météorologiques ne semblent pas influencer les conditions critiques de formation de glace de fond sur le lit. L'analyse suggère également que l'addition d'une variable décrivant l'influence de la taille des sédiments permettrait d'améliorer l'efficacité du modèle.



Jean-François Bisailon  
Etudiant



Normand Bergeron  
Normand E. Bergeron  
Directeur de recherche

### Remerciements

J'aimerais remercier premièrement mon directeur, Normand Bergeron, pour la confiance qu'il m'a manifestée dès le début du projet ainsi que de m'avoir offert une grande liberté dans l'organisation et la planification de ce projet de maîtrise. J'ai été privilégié de côtoyer pendant deux années un professeur avec une grande passion et une imagination sans limite.

Je tiens également à souligner l'apport exceptionnel de toute l'équipe du labo Bergeron qui a été une source importante de motivation, de dépassement et de nombreuses discussions. Ces deux années passées ensemble les deux pieds dans l'eau ou entre quatre murs beiges on été très enrichissantes et agréables. Donc, merci à Giselle, Julie Claire, Patricia, Francis, Marc-André, Patrice, Mylène et Annie.

La réalisation de ce projet a été possible grâce à la participation de partenaires tels que le CIRSA, la société de la faune et des parcs (FAPAQ), François Caron ainsi que l'INRS. Mes projets ont été financés grâce à une subvention à la découverte du CRSNG à mon directeur et mes études ont été financées grâce à une bourse de l'INRS-ETE.

Je veux également remercier mes parents qui m'ont appuyé dans cette aventure et qui ont toujours cru en moi. Merci de m'avoir donné autant d'outils pour relever les petits et les grands défis de la vie. Finalement, je remercie Marie-Eve, ma plus grande admiratrice, qui a subi les hauts et les bas de ces deux ans, qui m'a encouragé sans conditions, qui a vu nos plans changer des dizaines de fois en quelques jours à cause du terrain et des différents délais et qui a fait la «20» *ad nauseam* sans jamais se décourager. Merci de tout cœur d'être encore à mes côtés après cette aventure.

## Table des matières

Résumé .....	ii
Remerciements .....	v
Table des matières.....	vi
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux.....	x
CHAPITRE 1 Introduction .....	1
1.1    Contexte .....	1
1.2    Objectifs du projet.....	4
1.3    Structure du mémoire.....	5
CHAPITRE 2 Formation de la glace de rivière .....	6
2.1    Processus de formation de la glace de rivière .....	6
2.1.1    Frasil .....	6
2.1.2    Glace de fond.....	10
2.2    Progression et stabilité du couvert de glace .....	15
2.2.1    Formation statique du couvert de glace.....	15
2.2.2    Formation dynamique.....	16
2.2.3    Transport, déposition et érosion sous le couvert .....	18
2.2.4    Croissance thermale et fonte du couvert.....	19
2.3    Débâcle et formation d'embâcle .....	20
2.3.1    Débâcle .....	20
2.3.2    Embâcle .....	21
2.4    Cas spéciaux.....	22
2.4.1    Rivière avec forte pente.....	22
2.4.2    Couvert suspendu .....	23
2.4.3    Couvert sous pression.....	24
CHAPITRE 3 Les impacts biologiques de la période hivernale sur le saumon atlantique .....	25
3.1    Biologie et écologie du saumon atlantique .....	25
3.2    Les impacts de la période hivernale et de la glace de rivière sur l'habitat du saumon atlantique .....	28
3.2.1    Période de formation du couvert de glace .....	28
3.2.2    Période de maintien du couvert de glace .....	31
3.2.3    Réchauffement et débâcle printanière .....	35

CHAPITRE 4 Résumé des travaux de recherche .....	37
4.1 Les impacts de la rigueur de l'hiver sur la mortalité inter-annuelle de l'oeuf à l'alevin et de l'alevin au tacon (1+) du saumon atlantique.....	37
4.1.1 Introduction .....	37
4.1.2 Méthodologie.....	38
4.1.3 Résultats .....	39
4.1.4 Discussion.....	41
4.2 Modélisation de la formation de la glace de fond sur des rivières à lit graveleux.....	43
4.2.1 Introduction .....	43
4.2.2 Méthodologie.....	44
4.2.3 Résultats .....	47
4.2.4 Discussion.....	50
4.3 Conclusion générale.....	52
CHAPITRE 5 Effect of winter harshness on Atlantic salmon ( <i>Salmo salar</i> L.).....	54
egg to fry and fry to parr over-winter mortality .....	54
5.1 Abstract .....	56
5.2 Introduction.....	56
5.3 Material and methods.....	59
5.4 Results.....	63
5.5 Discussion .....	66
5.6 Acknowledgements.....	71
5.7 References .....	72
CHAPITRE 6 Modeling anchor ice formation on gravel bed rivers .....	82
6.1 Abstract .....	84
6.2 Introduction.....	84
6.3 Methodology .....	86
6.4 Results.....	93
6.5 Discussion .....	96
6.6 Acknowledgement .....	99
6.7 References .....	100
Liste des références.....	110

Liste des figures

Figure 2.1	Cristaux de frasil .....	6
Figure 2.2	Composantes des échanges thermiques entre l'atmosphère et l'eau d'une rivière. $\phi_S$ radiation solaire, $\phi_L$ radiation à grande longueur d'onde, $\phi_E$ évaporation ou condensation, $\phi_H$ convection et $\phi_P$ précipitation, (Ashton, 1986) .....	7
Figure 2.3	Formation et évolution du frasil, (Ashton, 1986) .....	8
Figure 2.4	Frasil qui s'écoule à la surface de la rivière York, Gaspésie.....	9
Figure 2.5	Plaques de frasil gelées sur la berge de la rivière York, Gaspésie.....	10
Figure 2.6	Formation de glace de fond par a) nucléation d'eau en surfusion, b) accrétion de cristaux de frasil, (Tsang, 1982).....	11
Figure 2.7	Tapis de glace de fond sur le lit graveleux de la rivière York, Gaspésie.....	12
Figure 2.8	Point d'initiation de la formation de la glace de fond, (Kerr <i>et al.</i> , 1997)....	13
Figure 2.9	Patrons de croissance de la glace de fond, (a) queue, (b) écaille et (c) balle, (Kerr <i>et al.</i> , 1997).....	15
Figure 2.10	Formation d'un couvert de glace par accumulation de frasil à l'intérieur d'un méandre, rivière York, Gaspésie.....	16
Figure 2.11	Étapes schématisées de la formation d'un couvert de glace.....	17
Figure 2.12	Coupe longitudinale d'un barrage suspendu de près de 20 km sur la rivière la Grande, Québec, (Michel et Drouin, 1981) .....	19
Figure 2.13	Formation d'un couvert de glace discontinue sur un ruisseau avec une forte pente. Ruisseau Allaire, rivière Ste-Marguerite, Québec.....	23
Figure 3.1	Cycle de vie du saumon atlantique. Adapté de «Wild Atlantic salmon, a wondrous life cycle», Atlantic Salmon Federation, <a href="http://www.asf.ca">www.asf.ca</a> .....	27
Figure 3.2	Représentation de l'utilisation par un tacon d'un tapis de glace de fond sur le substrat d'un seuil. Les cristaux de frasil adhèrent au substrat et forment la glace de fond. L'espace entre le substrat et la glace de fond permet aux tacons de se réfugier dans une zone où la vitesse de courant est faible. Les pertes de chaleur vers l'atmosphère sont réduites et l'apport de chaleur géothermale permet de réchauffer légèrement l'eau dans ce micro-habitat. Adaptée de Roussel <i>et al.</i> (2004).....	31

Figure 3.3	Changement dans la disponibilité de l'habitat durant la période hivernale. Au début de l'hiver, le couvert et de la glace de fond commencent à se former (a) près des berges où l'on note une diminution de l'espace disponible (b) mais peu de contrainte au centre de l'écoulement (c). Vers la fin de l'hiver, le couvert de glace occupe la totalité de la surface (d), alors que près des berges la glace occupe tout l'espace disponible (e). La disponibilité de l'habitat est réduite (f) Adaptée de Power <i>et al.</i> (1993).....	34
Figure 3.4	Érosion des berges et du lit d'une rivière suite à la débâcle printanière, (Prowse et Culp, 2003) .....	35
Figure 5.1	Relation of cumulated freezing degree-day and egg to fry mortality on the Trinité River (●), Indian River (□) and Catamaran Brook (Δ). Solid line: linear regressions of cumulated freezing degree-day and egg to fry mortality on the Trinité River (adj. $r^2 = 0.81$ , $n = 9$ , $P < 0.001$ ) .....	80
Figure 5.2	Linear regressions of cumulated freezing degree-day and egg to fry mortality on Trinité River (●) ( $r^2 = 0.91$ ; $n = 7$ , $P < 0.001$ ) and Catamaran Brook (Δ) (adj. $r^2 = 0.94$ , $n = 5$ , $P < 0.01$ ). 1: denotes outlier.....	83
Figure 6.1	Schematic representation of the sampling procedure on the Beauport and Duberger rivers. Transects ( $T_i$ ) were evenly distributed between pools and riffles. Three parcels were equally spaced on each transect for anchor ice presence-absence evaluation.....	107
Figure 6.2	Presence (□) and absence (●) of anchor ice as a function of cumulated freezing-degree-hours during 12 hours (FDH-12) and water temperature averaged during 12 hours (W-12) .....	108
Figure 6.3	Velocity (a), Depth (b) and Froude number (c) (mean, standard error, standard deviation) as a function of presence and absence of anchor ice on a parcel, * indicates significant differences at $p < 0.05$ (t-test) .....	109

Liste des tableaux

Tableau 5.1 Egg, fry and parr abundance and inter-stage mortality .....	77
Tableau 5.2 Independent variables used in the analysis and sorted by category. FDD: Freezing degree-day, subscripts O, N, D, J, F, M and A denote respectively October, November, December, January, February, Mars and April.....	78
Tableau 5.3 Regression results and significant variables for inter-stage mortality. $\beta$ : regression coefficient for variable 1 and 2, $P$ : probability for regression and correlation coefficients, $r$ : cross-correlation coefficient between variable 1 and 2 multiple regression coefficients. ....	79
Tableau 6.1 Presence (1) and absence (0) of anchor ice on the Trinité, Duberger and York rivers and associated freezing degree-hour cumulated during 12 hours (FDH-12) when water temperature was equal or inferior to 0°C. ....	102
Tableau 6.2 Estimated coefficient, Standard error (Std. Err.), z-score (z), two-tailed p- value ( $p > \text{Chi-2}$ ), Hosmer-Lemeshow test (H-L), Area under the ROC curve (ROC-AUC), and the correct classification rate (CCR) for the final logistic regression model for the presence and absence of anchor ice. n = 21.....	103
Tableau 6.3 Number of parcels sampled on each river site (n), cumulated freezing degree-hours during 12 hours (FDH-12) for the events with anchor ice formation on at least one parcel per site .....	104
Tableau 6.4 Estimates for the hierarchical logistic regression of anchor ice presence as a fonction of micro ( <i>Froude</i> ) and macro variables (FDH-12) and their interactions.....	105
Tableau 6.5 Estimated coefficient, Standard error (Std. Err.), F-score (F), two-tailed p- value ( $p > F$ ), Hosmer-Lemeshow test (H-L), Area under the ROC curve (ROC-AUC), and the correct classification rate (CCR) for the final logistic regression model for the spatial distribution of anchor ice. n = 10. ....	106

## Chapitre 1

### **Introduction**

#### **1.1 Contexte**

La glace recouvre la majorité des rivières canadiennes durant la période hivernale. Cette situation unique aux régions froides crée des environnements lotiques et lenticques qui sont physiquement et biologiquement distincts de leurs équivalents libres de glace (Prowse et Ferrick, 2002). D'une perspective physique, la glace peut modifier considérablement le régime hydrologique des rivières, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau, ainsi que les processus d'érosion, de transport et de déposition des sédiments (Ashton, 1986; Beltaos *et al.*, 1993; Prowse, 1993, 2001b, a). Par exemple, une des manifestations la plus spectaculaire de l'effet de la glace sur les rivières est associée aux embâcles printanières. Durant cette période, les vitesses d'écoulements, le débit et l'érosion peuvent varier considérablement comparativement au reste de l'année.

D'une perspective biologique, la glace de rivière peut également affecter la quantité et la qualité des habitats aquatiques. Les premières études portant sur les impacts écologiques de la glace sur les salmonidés ont été effectués par Maciolek et Needham (1952) et par Benson (1955) au début des années cinquante. Leurs résultats ainsi que ceux de Reimers (1957; 1963) et de Needham et Jones (1959) suggèrent que les conditions instables rencontrées durant l'hiver sur les rivières sont néfastes à la survie des truites juvéniles. Quelques années plus tard, McNeil (1966) ainsi que Reiser et Weishe (1979) ont rapporté des taux de mortalité hivernale variant de 75 à 99% chez les œufs de truites. Ces auteurs ont attribué cette très forte mortalité hivernale au faible niveau d'oxygène dissout dans les nids durant l'hiver, à l'érosion et au gel des œufs dans les nids. Au début des années quatre-vingt, encore peu d'information était disponible sur l'habitat d'hiver des salmonidés (Walsh et Calkins, 1986) et sur les conséquences de cette période sur la mortalité des poissons. Toutefois, les travaux de Chadwick (1982) et particulièrement ceux de Cunjak (1988c) vers la fin des années quatre-vingt ont permis de comprendre avec plus de détails l'effet de l'hiver sur les salmonidés. Leurs résultats et ceux de plusieurs autres chercheurs (Mason, 1976; Frenette *et al.*, 1984; Baglinière *et al.*, 1993;

Cunjak et Rendall, 1993; Power *et al.*, 1993; Cunjak, 1996; Meyer et Griffith, 1997; Annear *et al.*, 2002) suggèrent que les conditions environnementales associées à l'hiver influencent la survie des différents stades de vie des salmonidés au cours de cette période. Selon Cunjak et Therrien (1998), l'hiver serait un goulot d'étranglement pour la production de saumon atlantique juvénile. Par exemple, sur la rivière Indian à Terre-Neuve, Chadwick (1982) a noté une mortalité de l'œuf à l'alevin élevée durant la période hivernale. Certaines études tendent à démontrer que la survie hivernale des œufs et des juvéniles semble être favorisée par des débits hivernaux élevés (Chadwick, 1982; Gibson et Myers, 1988; Cunjak et Therrien, 1998) permettant de préserver la quantité et la qualité de l'habitat disponible. De plus, d'autres études suggèrent que la survie du saumon juvénile augmente lors d'hivers plus doux (Chadwick, 1982; Baglinière *et al.*, 1993; Cunjak *et al.*, 1998). Toutefois, malgré ces travaux, les causes de la mortalité hivernale du saumon atlantique juvénile sont rarement étudiées. Cette situation empêche l'identification précise des facteurs responsables du goulot d'étranglement de ces populations durant la période hivernale (Cunjak et Therrien, 1998).

Parmi les différents types de glace retrouvés en rivière, le frasil et la glace de fond sont ceux qui sont le plus fréquemment évoqués pour leurs effets négatifs possibles sur les poissons car ils modifient significativement les habitats lentiques (Chisholm *et al.*, 1987). Ainsi, il a été observé que le frasil et la glace de fond peuvent forcer le déplacement des juvéniles dans des conditions hydrauliques difficiles afin qu'ils trouvent un habitat plus convenable (Brown et Mackay, 1995b; Brown, 1999; Simpkins *et al.*, 2000; Roussel *et al.*, 2004), puisant ainsi dans leurs réserves énergétiques limitées (Walsh et Calkins, 1986). De plus, l'établissement d'un épais couvert de glace de surface peut réduire significativement l'habitat disponible aux juvéniles. Les conséquences de la glace de rivière sont nombreuses, et afin de bien les comprendre, il est essentiel de connaître les processus physiques qui contrôlent sa formation.

Les différents types de glace se forment selon une combinaison complexe de processus statiques et dynamiques (Beltaos *et al.*, 1993). Parmi ceux-ci, on retrouve le frasil et la glace de fond qui se forment généralement en début de saison lorsque le couvert de glace

à la surface de l'écoulement n'est pas encore formé. Le frasil est caractérisé par des cristaux de glace qui sont produits dans un écoulement turbulent lorsque la température de l'air durant la nuit est suffisamment froide pour abaisser la température de l'eau légèrement sous 0°C (Ashton, 1986). Ces cristaux peuvent demeurer à la surface de l'écoulement ou être transportés en suspension dans la colonne d'eau par la turbulence. La glace de fond est définie comme un type de glace qui se forme sur le substrat du lit d'une rivière (Beltaos *et al.*, 1993) lorsque la turbulence est suffisante pour transporter les cristaux de frasil vers le lit. Le frasil adhère alors au substrat et forme une couche de glace qui peut atteindre jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur (Parkinson, 1984; Hammar *et al.*, 1996; Hiramaya *et al.*, 2002). Il a été observé que la glace de fond peut parfois devenir le type de glace dominant sur des petites rivières (Calkins et Brockett, 1988; Beltaos *et al.*, 1993). Ce type de glace est reconnu pour modifier considérablement les conditions hydrauliques d'une rivière. Premièrement, la glace de fond peut être suffisamment épaisse pour éléver le niveau de l'eau et modifier la vitesse et la profondeur de l'écoulement (Needham et Jones, 1959; Beltaos *et al.*, 1993; Hammar *et al.*, 1996). De plus, des observations suggèrent que l'écoulement inter-granulaire diminue considérablement suite à l'établissement d'une couche continue de glace sur le substrat (Beltaos *et al.*, 1993; Prowse, 1994). Des sédiments peuvent également être mobilisés lorsque de larges morceaux de glace de fond se détachent du lit de la rivière et sont transporté dans l'écoulement (Prowse, 2001a). La présence de glace de fond affecte donc significativement les conditions hydrauliques, géomorphologiques et biologiques d'une rivière.

Des travaux en laboratoire et en milieu naturel ont permis de déterminer les conditions de formation de la glace de fond (Arden et Wigle, 1972; Tsang, 1992; Hammar *et al.*, 1996; Kerr *et al.*, 1997; Hiramaya *et al.*, 2002). Les conditions météorologiques propices à la formation de la glace de fond comprennent une température de l'air nocturne inférieure à -10°C, un ciel dégagé et un minimum de vent afin de favoriser un refroidissement maximal de l'eau (Needham et Jones, 1959; Parkinson, 1984; Terada *et al.*, 1998). Le nombre de Froude est largement utilisé dans l'étude de la glace de fond pour estimer l'effet combiné de la vitesse et de la profondeur (Terada *et al.*, 1998). Les études

indiquent qu'un nombre de Froude situé entre 0,2 et 1,5 conduit à la formation de la glace de fond lorsque les conditions météorologiques sont favorables (Hiramaya *et al.*, 2002).

Des travaux ont également permis la modélisation de la formation de la glace de fond dans un modèle complet de formation de glace de rivière (RICEN) (Lal et Shen, 1991; Shen *et al.*, 1995). La formulation de ce modèle repose sur un budget des échanges énergétiques entre l'eau et l'air ainsi que sur les conditions hydrauliques (Lal et Shen, 1991; Shen *et al.*, 1995). Toutefois, il ne semble pas exister dans la littérature d'applications de ce modèle afin d'analyser spécifiquement la formation de la glace de fond. De plus, malgré la caractérisation des conditions de formation de la glace de fond en milieu naturel par Hiramaya (2002), aucun modèle basé sur des données de terrain ne semble, à notre connaissance, avoir été mis au point.

## 1.2 Objectifs du projet

Ce projet de maîtrise comprend deux objectifs principaux. Le premier objectif aborde l'effet de la période hivernale sur la mortalité interstade de l'œuf à l'alevin (0+) et de l'alevin au tacon (1+) du saumon atlantique juvénile. Plus spécifiquement, l'objectif spécifique de cette partie de la maîtrise consiste à étudier les impacts de la température de l'air, du débit et des conditions de glace sur la mortalité hivernale. De plus, une comparaison des résultats obtenus lors de ce projet avec ceux publiés antérieurement sur des rivières situées dans l'est du Canada permet d'explorer l'influence des différentes conditions hydro-climatiques sur la mortalité des juvéniles.

Le second objectif général du projet de maîtrise consiste à élaborer un modèle statistique de formation de la glace de fond sur des petites rivières à partir de données de terrain. Le premier objectif spécifique consiste à élaborer un modèle permettant de prédire, à partir des conditions météorologiques enregistrées lors d'une nuit donnée, la probabilité de présence de glace de fond sur un tronçon de rivière. Le deuxième objectif spécifique vise à élaborer un modèle permettant de prédire à quel endroit sur le lit d'une rivière se formera la glace de fond en fonction des caractéristiques hydrauliques locales et des conditions météorologiques.

### **1.3 Structure du mémoire**

Le mémoire est divisé en six chapitres. Le deuxième chapitre introduit les notions de base reliées à la formation de la glace de rivière et accorde une attention particulière à la formation du frasil et de la glace de fond. Le troisième chapitre résume le cycle de vie du saumon atlantique ainsi que les impacts négatifs et positifs de la glace de rivière sur celui-ci. Suite à cette revue de littérature, les résultats du projet de recherche sont présentés. Le quatrième chapitre résume les activités de recherche effectuées dans le cadre des deux objectifs principaux de la maîtrise. Le chapitre 5 présente une description détaillée des travaux de recherche portant sur la mortalité hivernale du saumon atlantique juvénile alors que le sixième chapitre porte sur la création d'un modèle statistique de formation de la glace de fond en milieu naturel. Ces deux derniers chapitres sont exposés sous forme d'articles rédigés en anglais. L'article portant sur la mortalité hivernale du saumon atlantique juvénile sera soumis à la revue *Journal of Fish Biology*. Le second article sera également soumis à une revue avec comité de lecture qui sera déterminée ultérieurement.

## Chapitre 2

### Formation de la glace de rivière

#### **2.1 Processus de formation de la glace de rivière**

Le formation de glace de rivière est un phénomène extrêmement complexe. Le couvert de glace subit de nombreuses transformations durant l'hiver selon les conditions climatologiques et hydrauliques de la rivière. Ce chapitre présente une synthèse de la dynamique des glaces depuis sa formation jusqu'à son évacuation de la rivière au printemps. Le chapitre couvre les processus physiques qui causent la formation de la glace de rivière et les facteurs qui influencent son évolution. De plus, une attention particulière est portée au frasil et à la glace de fond. La présentation des types de glace suit l'ordre chronologique typique de leur formation. Toutefois, selon les conditions locales, certains phénomènes peuvent se produire dans un ordre différent ou ne jamais exister.

##### **2.1.1 Frasil**

Le frasil est composé de cristaux de glace de tailles et de formes variables (Figure 2.1) qui sont transportés en suspension ou à la surface de l'écoulement. L'évolution spatiale et temporelle du frasil peut être divisée en trois grandes phases : (1) la formation, (2) la



Figure 2.1 Cristaux de frasil.

transformation, et (3) l'intégration du frasil dans un couvert de glace (Daly, 1994). La prochaine section présente les 2 premières phases alors que la troisième sera traitée dans la partie concernant la formation dynamique du couvert de glace.

### ***Formation***

La formation du frasil débute lorsque les conditions atmosphériques entraînent la diminution légèrement sous 0°C de la température de l'eau (surfusion). L'eau en surfusion est produite lorsque les échanges thermiques entre l'air et l'eau sont importants. Ces échanges s'effectuent principalement par évaporation, convection et émission de chaleur par radiation d'ondes longues (Ashton, 1986) (Figure 2.2). Les conditions météorologiques qui maximisent les pertes énergétiques sont rencontrées durant les nuits froides, sans nuages, lorsque l'humidité relative de l'air est minimale et avec un léger vent (Tsang, 1982; Parkinson, 1984; Ashton, 1986). Lorsque l'eau atteint l'état de surfusion, la formation des cristaux de glace est initiée par des particules en suspension dans l'eau et qui agissent comme catalyseur de nucléation. L'origine de ces particules est

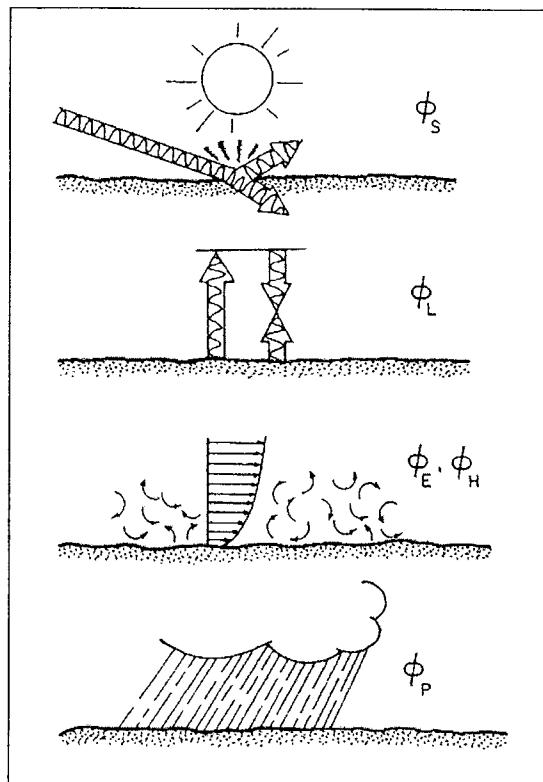


Figure 2.2 Composantes des échanges thermiques entre l'atmosphère et l'eau d'une rivière.  $\phi_s$  radiation solaire,  $\phi_L$  radiation à grande longueur d'onde,  $\phi_E$  évaporation ou condensation,  $\phi_H$  convection et  $\phi_P$  précipitation, (Ashton, 1986).

diverse. Il s'agit généralement de gouttelettes d'eau qui sont introduites dans l'air par les éclaboussures de l'eau contre les roches, par l'éclatement de bulles à la surface et par l'évaporation de l'eau. Ces éclaboussures gèlent, retournent dans l'écoulement et agissent comme semences favorisant ainsi la production de frasil (Yapa et Shen, 1985; Daly, 1994). Toutefois, la majorité du frasil produit par une section de rivière ne s'explique pas seulement par l'introduction de semences exogènes dans l'écoulement. Les cristaux de frasil qui sont déjà formés à cette étape se fragmentent sous l'effet de la turbulence et de la collision avec d'autres cristaux de frasil. L'introduction de ces fragments de cristaux initie le processus de nucléation secondaire qui agit alors comme support de croissance pour de nouveaux cristaux de frasil (Yapa et Shen, 1985). Selon Yapa et Shen (1985), le taux de nucléation primaire associé aux impuretés de l'eau est un phénomène marginal comparativement à la nucléation secondaire. À cette étape, l'eau est chargée de minuscules particules de frasil en suspension dans l'eau.

### ***Transformation***

La phase de transformation est caractérisée par une température de l'eau approximativement à l'équilibre ( $0^{\circ}\text{C}$ ) et par la formation d'agglomération de frasil de différentes tailles à la surface de l'écoulement (Figure 2.3 et Figure 2.4). Le frasil se concentre à la surface de l'écoulement en raison de sa flottabilité et de l'agglomération des particules entre elles (Daly, 1994). La taille des agglomérations de frasil varie généralement selon la distance que les cristaux ont parcourue depuis leur génération. Par exemple, les cristaux de frasil qui se trouvent près de leur point de génération forment de

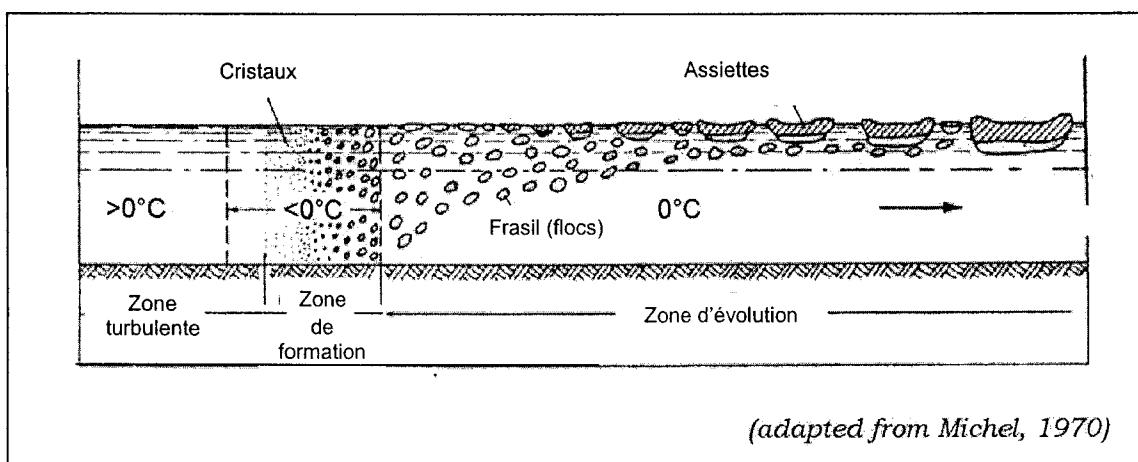


Figure 2.3 Formation et évolution du frasil, (Ashton, 1986).

la *slush*, puis s'agglomèrent pour former des accumulations floconneuses (*flocs*). Par la suite, ces agglomérations peuvent geler ensemble et former des assiettes (*pan*) (Figure 2.5) et des plaques (*floe*) de grandeurs variables selon le temps passé à la surface. Les assiettes peuvent également s'agglomérer et former des plaques beaucoup plus larges qui peuvent atteindre des dimensions comparable à la largeur de la rivière (Daly, 1994).

Le frasil peut également être transporté en suspension dans l'écoulement par la turbulence mais retourne à la surface aussitôt que les conditions hydrauliques ne permettent plus son mélange dans la colonne d'eau. Lorsque le frasil revient vers la surface, il peut s'accumuler sous le couvert de glace déjà existant pour former des barrages suspendus (Michel et Drouin, 1981). À l'inverse, lorsque la turbulence est suffisamment importante, une partie du frasil peut entrer en collision avec le substrat de la rivière et initier la formation de la glace de fond (Daly, 1994).



Figure 2.4 Frasil qui s'écoule à la surface de la rivière York, Gaspésie



Figure 2.5 Plaques de frasil gelé sur la berge de la rivière York, Gaspésie.

### 2.1.2 Glace de fond

La glace de fond se forme sur le lit d'une rivière lorsque la turbulence est suffisante pour transporter les cristaux de frasil vers le substrat (Beltaos *et al.*, 1993). Il existe trois modes distincts de formation de la glace de fond. Premièrement, le principal mode de formation observé dans la nature est l'adhésion de cristaux de frasil sur le substrat (Tsang, 1982). Lors de sa formation, le frasil possède des propriétés adhésives qu'il conserve aussi longtemps qu'il demeure dans une eau en surfusion (Prowse, 1994). Le frasil, transporté vers le lit de la rivière par de l'eau en surfusion, adhère alors au substrat ou à tout autre objet où il forme une couche de glace de faible densité (Figure 2.6b) (Tsang, 1982; Parkinson, 1984; Prowse, 1994; Hammar *et al.*, 1996; Hiramaya *et al.*, 2002). Le deuxième mode de formation se produit lorsque l'eau en surfusion transportée vers le substrat par un écoulement turbulent forme une mince couche de glace sur le lit de la rivière par nucléation sous-marine (Tsang, 1982; Ashton, 1986; Prowse, 1994; Shen, 2003b). Ce type de formation produit une couche de glace lisse et de forte densité (Prowse, 1994) (Figure 2.6a). Toutefois, des expériences effectuées en laboratoire par

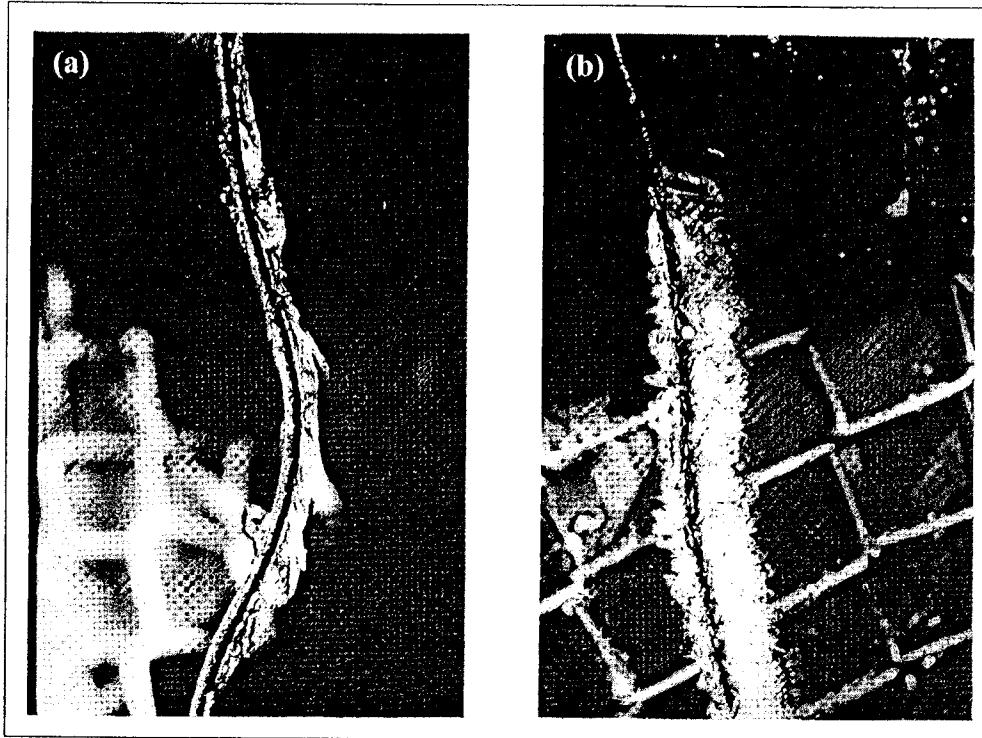


Figure 2.6 Formation de glace de fond sur un fil d'acier par (a) nucléation d'eau en surfusion, (b) accrétion de cristaux de frasil, (Tsang, 1982).

Kerr (2002) indiquent que ce phénomène semble marginal (Tsang, 1982). Le troisième mode de formation est également peu fréquent et rarement abordé dans la littérature. La glace de fond formée par l'adhésion de frazil sur le substrat présente une surface irrégulièrement et recouverte de nombreux cristaux de glace. Cette surface agit comme un piège à frazil et favorise une augmentation de la croissance de la glace de fond (Tsang, 1982). À ce stade, le frazil s'accumule sur le lit de la rivière sans être adhésif puisque c'est la surface rugueuse de la glace de fond qui agit comme piège à cristaux de frazil et qui permet la croissance d'une couche de glace de fond.

La formation de la glace de fond est dépendante de trois principaux facteurs : les conditions météorologiques, les conditions hydrauliques et la rugosité du substrat. Puisque la formation de la glace de fond est reliée à la production de frazil, les échanges thermiques doivent être suffisants afin d'abaisser la température de l'eau légèrement sous  $0^{\circ}\text{C}$  (surfusion) et initier sa production. Lorsque le frazil est présent dans l'écoulement, les observations de terrain suggèrent que la formation de glace de fond s'effectue à des

températures de l'air inférieures à approximativement -10°C durant quelques heures (Parkinson, 1984; Hirayama *et al.*, 1997) .



Figure 2.7 Tapis de glace de fond sur le lit graveleux de la rivière York, Gaspésie.

La déposition du frasil sur le substrat est fonction de la vitesse de l'écoulement et du mélange turbulent (Hammar *et al.*, 1996). Lorsque les conditions de vitesse d'écoulement, de profondeur et de turbulence sont favorables, le frasil et l'eau en surfusion sont transportés vers le lit de la rivière et forment de la glace de fond. Ces conditions d'écoulement sont généralement estimées à l'aide du nombre de Froude qui est largement utilisé dans l'étude de la glace de fond (Terada *et al.*, 1998). Les résultats de recherches effectuées en milieu naturel et en laboratoire indiquent que la formation de glace de fond est généralement observée à un nombre de Froude situé entre 0,15 et 1,5 (Hammar *et al.*, 1996; Terada *et al.*, 1998).

Il est rare d'observer la présence de glace de fond sur les lits de rivière composés de sédiments fins puisque ce type de sédiments offre peu de surface de contact pour l'initiation de la glace (Prowse, 1994). Aussi, bien que la glace de fond puisse

éventuellement se former sur un lit composé de sédiments fins, ces sédiments sont généralement rapidement emportés dans l'écoulement puisque leur masse offre peu de résistance à la flottabilité de la glace de fond (Arden et Wigle, 1972; Tsang, 1982). De plus, les sédiments fins sont fortement influencés par les échanges géothermiques comparativement aux sédiments de grandes tailles freinant ainsi la croissance de la glace sur les lits de sables et de limons (Tsang, 1982; Ashton, 1986; Prowse, 1994). La taille des sédiments influence également la turbulence et le transport du frasil vers le lit de la rivière (Hammar *et al.*, 1996). Le développement de la glace de fond est favorisé par un lit composé d'un substrat grossier puisqu'il augmente la turbulence et le transport du frasil vers le lit de la rivière (Shen, 2003b). À l'inverse, la formation d'un tapis de glace de fond et le recouvrement du substrat par la glace (Figure 2.7) diminue la résistance à l'écoulement et ralentit sa croissance (Kerr *et al.*, 2002).

À l'échelle d'une particule du lit, la formation de la glace de fond s'effectue de trois façons distinctes. Selon le nombre de Froude de l'écoulement, l'initiation de la formation de la glace de fond sur le substrat s'effectue sur la face (1) amont, (2) aval ou (3) au point de contact entre deux roches du substrat (Kerr *et al.*, 2002). Les observations indiquent

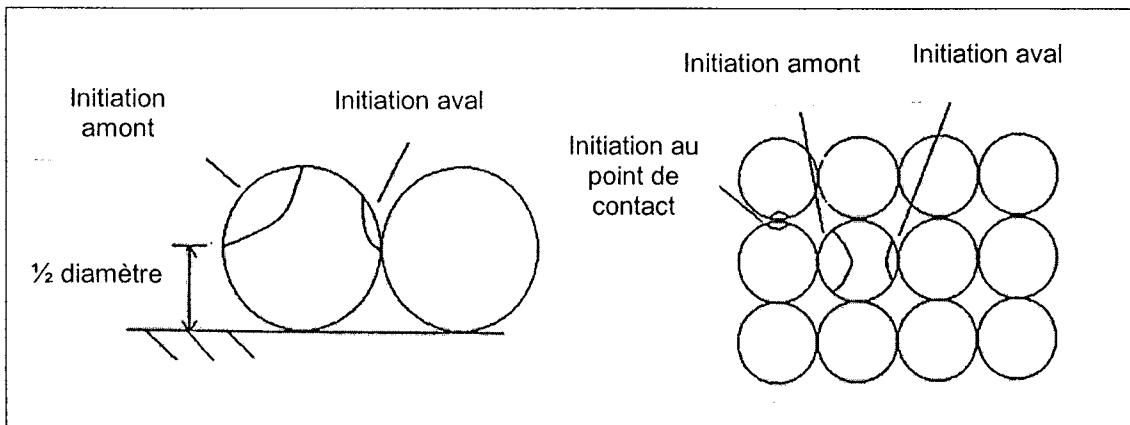


Figure 2.8 Point d'initiation de la formation de la glace de fond, (Kerr *et al.*, 1997).

que le frasil ne pénètre pas plus profondément dans le lit que la moitié de la taille des sédiments ce qui limite la formation de la glace de fond à la moitié supérieure du substrat (Kerr *et al.*, 2002) (Figure 2.8). Les trois types d'initiation (amont, aval, point de contact) entraînent des patrons de croissance différents. Par exemple, lorsque le nombre de Froude est faible (Froude 0,3-0,5), l'initiation tend à se réaliser aux points de contact entre les particules du lit et la croissance s'effectue sous forme de queue (Figure 2.9a). Ce type de glace de fond est instable et se détache généralement rapidement du lit. Lorsque l'écoulement devient modérément turbulent (Froude 0,5-0,8), l'initiation s'effectue plutôt sur la partie amont des particules et quelques fois aux points de contact des particules du substrat. La glace de fond forme alors des écailles sur le substrat (Figure 2.9b). Lorsque la turbulence est plus élevée (Froude >0,8), les conditions d'écoulement ne permettent pas la croissance de queues et d'écailles. La croissance s'effectue plutôt dans la partie frontale du substrat et forme des balles de glace (Figure 2.9c). Les balles de glace sont extrêmement stables et se détachent difficilement du lit. La croissance de la glace de fond sur le substrat est ensuite surtout fonction de la concentration de frasil qui atteint le lit (Shen *et al.*, 1995; Hammar *et al.*, 1996) mais elle qui est également reliée aux pertes de chaleur. Selon Kerr (2002), la croissance de la glace de fond est constante et proportionnelle à la perte de chaleur de la masse d'eau.

En fonction de la vitesse d'écoulement et des échanges thermiques, la glace de fond peut se détacher du substrat. Par exemple, le gain énergétique causé par les radiations solaires au début du jour est habituellement suffisant pour diminuer la force des liens qui unis la glace de fond au substrat (Tsang, 1982). Ces liens sont beaucoup plus faibles que ceux entre les particules de glace solide, favorisant ainsi le détachement de la glace de fond (Ashton, 1986). La flottabilité de la glace devient alors suffisante pour détacher la glace du substrat (Ashton, 1986). Lorsque la glace se détache du lit, les morceaux de glace de fond sont entraînés dans l'écoulement et s'ajoute éventuellement au couvert de surface déjà existant (Kerr *et al.*, 2002).

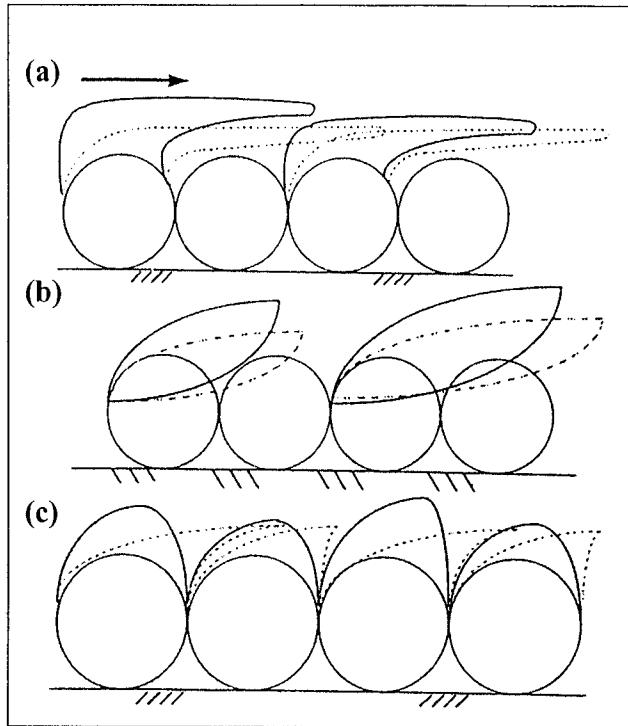


Figure 2.9 Patrons de croissance de la glace de fond, a) queue, b) écaille et c) balle, (Kerr *et al.*, 1997).

## 2.2 Progression et stabilité du couvert de glace

Lorsque les échanges thermiques entre l'eau et l'air sont importants, un couvert de glace commence à se former à la surface de l'eau. Il existe deux types de formation du couvert de glace : la formation statique et la formation dynamique (Ashton, 1986).

### 2.2.1 Formation statique du couvert de glace

La formation statique du couvert de glace débute généralement par la formation de glace latérale. Sa formation est habituellement initiée près des rives ou autour des obstacles qui dépassent de la surface de l'écoulement comme les blocs et les branches d'arbres. Lorsque les matériaux de la rive sont refroidis sous une température critique et que l'écoulement est peu turbulent, la glace se développe latéralement dans l'écoulement (Ashton, 1986; Prowse, 1994). La glace latérale peut aussi croître par accrétion de cristaux de frasil lorsque la vitesse du courant et du vent permettent à ceux-ci d'adhérer à la marge du couvert de glace déjà existant (Lal et Shen, 1991). Lal et Shen (1991)

distinguent un autre type de formation statique du couvert de glace fortement reliée à la production de frasil. Ce type de glace, appelé glace en feuillet (*skim ice*), se forme lorsqu'une mince couche de cristaux de frasil s'accumule à la surface de l'eau. Cette couche peut être en mouvement et évoluer tel que discuté précédemment. Par contre, lorsque l'écoulement est lent, les feuillets de frasil demeurent presque immobiles à la surface de l'eau et forment un mince couvert statique.



Figure 2.10 Formation d'un couvert de glace par accumulation de frasil à l'intérieur d'un méandre, rivière York, Gaspésie.

### 2.2.2 Formation dynamique

Au début de l'hiver, lorsque le couvert de glace est inexistant, une partie significative du frasil produit par la rivière flotte à la surface de l'écoulement et sa concentration augmente rapidement vers l'aval. Le mouvement de la *slush*, des assiettes et des plaques de frasil cesse lorsque ces éléments rencontrent un obstacle ou lorsque la capacité de transport d'une section de rivière est insuffisante (Figure 2.10) (Shen *et al.*, 1986; Prowse, 1994). La capacité de transport d'une rivière est influencée par sa géométrie et ses

conditions hydrauliques (Yapa et Shen, 1985). Lorsque celle-ci est insuffisante, un pont de glace entre les deux rives se forme par congestion des éléments de glace en transport. La capacité de transport d'un section de rivière diminue donc lorsque le débit est faible et que les vitesses de courant diminuent. De plus, les étranglements causés par la croissance de glace latérale et par les méandres sont des endroits propices à la formation de pont de glace (Prowse, 1994).

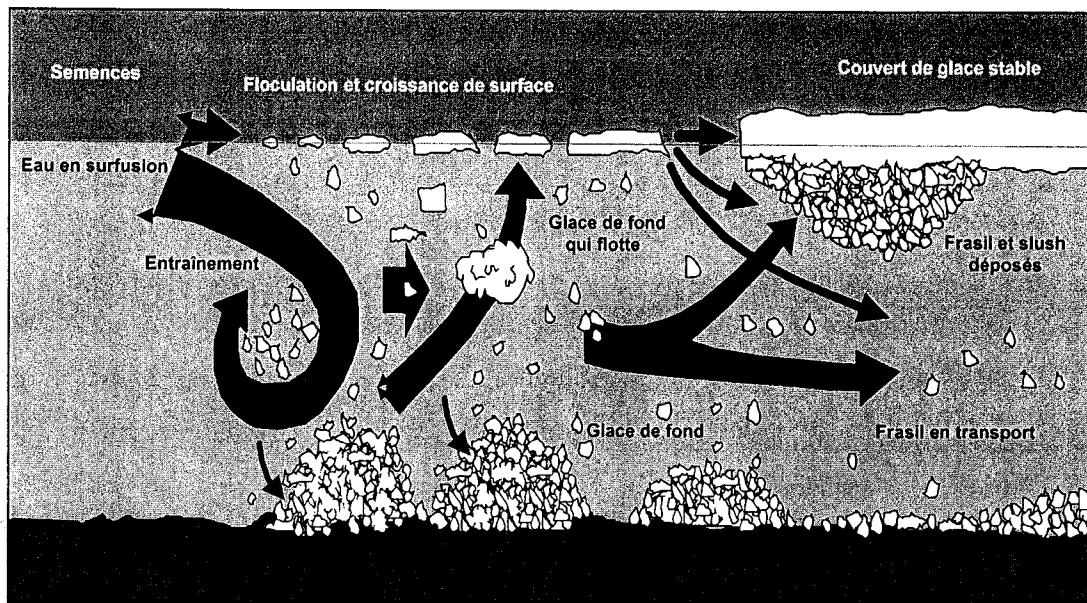


Figure 2.11 Étapes schématisées de la formation d'un couvert de glace

Suite à la formation d'un pont de glace entre les deux rives, la formation du couvert de glace progresse selon trois modes distincts: par juxtaposition, par épaissement hydraulique, et par épaissement mécanique. Ces modes de formation sont déterminés principalement par le taux d'échange thermique à la surface de l'eau et de la glace ainsi que par les conditions hydrauliques (Daly, 1994). La Figure 2.11 représente schématiquement quelques processus de la formation d'un couvert de glace.

### *Juxtaposition*

La progression par juxtaposition est définie par l'accumulation continue d'une couche simple d'assiettes et de plaques de glace produites par le frasil (Figure 2.11). Sur de

larges cours d'eau, la juxtaposition est habituellement le fruit de l'accumulation de plaques ayant de très grandes dimensions (Michel, 1984).

### ***Épaississement hydraulique***

Lorsque les conditions hydrauliques ne permettent plus la juxtaposition, le front du couvert devient instable et la progression vers l'amont cesse. La force hydraulique provoque l'accumulation des plaques de glace sous le front du couvert et cause son épaissement (Michel, 1984; Daly, 1994).

### ***Épaississement mécanique***

L'épaississement mécanique se produit lorsque le front du couvert de glace se brise et qu'il est transporté vers l'aval pour se réaccumuler à un nouvel endroit. Ce nouveau front est habituellement plus épais que le front initial (Michel, 1984; Lal et Shen, 1991). Lorsque le couvert se fragmente, les morceaux de glace n'ont aucune cohésion interne. Ces fragments atteindront une nouvelle épaisseur d'équilibre en relation avec les conditions hydrauliques et la géométrie de la section (Michel, 1984). Selon Michel (1984), ce type d'évolution existe principalement lors des périodes de dégel ou lors d'une hausse soudaine du débit durant la débâcle printanière puisque la glace est moins résistante. Ce phénomène de progression du couvert semble peu fréquent sur les rivières au climat nordique et plus fréquent sur les rivières au climat tempéré (Michel, 1984).

### **2.2.3 Transport, déposition et érosion sous le couvert**

La glace présente à la surface de l'écoulement et le frasil en suspension dans l'eau peuvent être transportés sous le couvert de glace sur de longues distances. Lorsque les conditions hydrauliques ne permettent leurs transport, le frasil et la glace se déposent sous le couvert. Ces accumulations de glace sous le couvert augmentent son épaisseur, forment des barrages suspendus (Figure 2.12) (Ashton, 1986) ou des dépôts longitudinaux de frasil (Lawson *et al.*, 1986). Les particules de frasil qui composent ces accumulations peuvent geler entre elles et s'incorporer au couvert de glace. À l'inverse, le courant peut également éroder le frasil et le remettre en transport mais peu d'informations sont actuellement disponibles concernant ce phénomène (Shen et Wang, 1995).

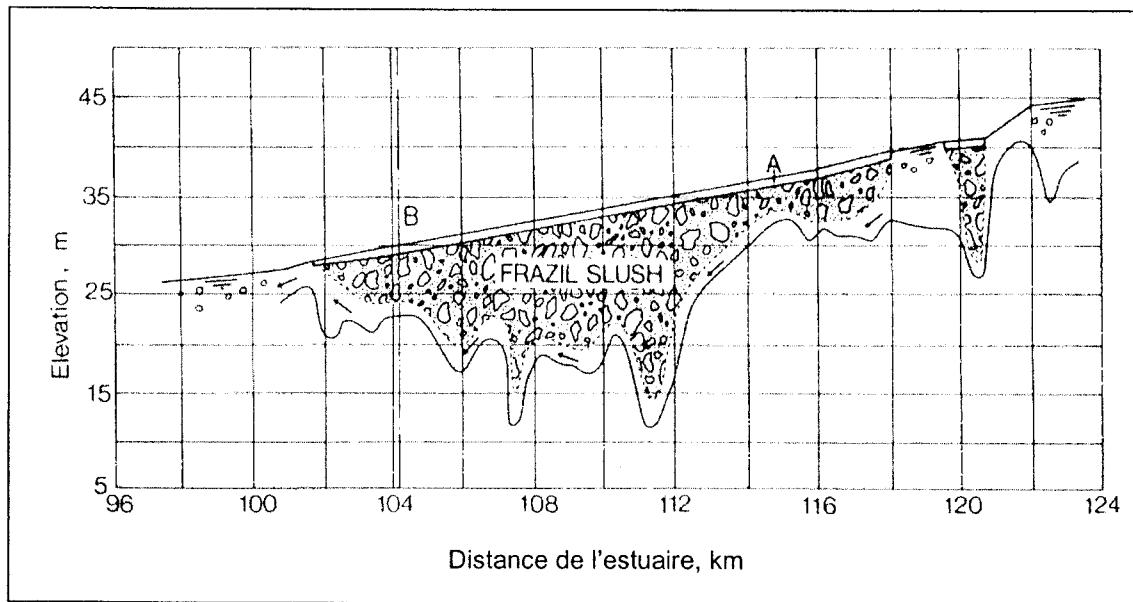


Figure 2.12 Coupe longitudinale d'un barrage suspendu de près de 20 km sur la rivière la Grande, Québec, (Michel et Drouin, 1981).

## 2.2.4 Croissance thermale et fonte du couvert

### *Croissance thermale du couvert*

La croissance du couvert de glace est possible à ses surfaces supérieures (air-glace) et inférieures (glace-eau). Un écoulement lent favorise l'épaisseissement du couvert de glace à sa surface inférieure puisque la friction de l'eau sur le couvert est insuffisante pour ralentir sa croissance (Lal et Shen, 1991). La déposition de frasil sous le couvert entraîne également la croissance du couvert puisque les cristaux de frasil gèlent facilement entre eux à cause de leur faible concentration en eau (Yapa et Shen, 1985; Ashton, 1986; Prowse, 1994). Le couvert de glace peut également s'épaissir à la surface supérieure par l'accumulation de neige sur le couvert de glace. Lorsque celle-ci est importante, le poids de la couche de neige peut être suffisant pour submerger le couvert de glace et introduire de l'eau dans la neige accumulée (Yapa et Shen, 1985; Ashton, 1986; Prowse, 1994). Une accumulation de neige équivalente à la moitié de l'épaisseur de la glace est généralement suffisante pour submerger le couvert (Ashton, 1986; Beltaos *et al.*, 1993). Cette couche d'eau et de neige sera éventuellement incorporée à la glace sous forme de glace de neige (*snow ice*). Par contre, la neige est un isolant efficace qui peut freiner

complètement l'épaississement du couvert de glace (Yapa et Shen, 1985; Ashton, 1986; Beltaos *et al.*, 1993).

Il est possible d'évaluer la croissance du couvert de glace à l'aide d'un budget détaillé des échanges énergétiques qui inclus les échanges d'énergie entre l'air, l'eau, la glace et le lit de la rivière (Ashton, 1986). Cette dernière méthode est plus précise, mais rarement applicable avec les données de terrain disponibles. Il est également possible d'estimer la croissance du couvert à l'aide de la relation de Stephan qui utilise les degrés-jour de gel cumulés durant une période spécifique (Michel, 1971; Ashton, 1986). Cette relation est beaucoup plus simple à utiliser qu'un budget détaillé.

### ***Fonte du couvert***

La fonte du couvert est considérablement différente du processus de croissance puisqu'elle s'effectue simultanément à la surface et sous le couvert. Cette particularité limite l'utilisation d'un budget énergétique simple (Ashton, 1986). La fonte de la glace débute généralement lorsque la neige accumulée sur le couvert fond et forme une pellicule d'eau sur le couvert de glace. L'eau présente sur le couvert diminue l'albédo et favorise l'absorption des radiations solaires par celui-ci. Lorsque la température de la glace atteint 0°C, les liens entre les cristaux de glace se brisent provoquant une diminution importante de la résistance interne du couvert (Ashton, 1986). De plus, les échanges thermiques sous le couvert causent l'apparition d'ondulations qui augmentent le la résistance à l'écoulement et les forces de cisaillements affaiblissant ainsi encore plus le couvert (Ashton, 1986).

## **2.3 Débâcle et formation d'embâcle**

### **2.3.1 Débâcle**

Durant la période pré-débâcle, le couvert devient plus susceptible aux fractures et au mouvement par une réduction de sa résistance interne causée par l'augmentation des échanges thermiques. L'augmentation du débit et du niveau d'eau provoque le détachement du couvert de glace des rives et marque le déclenchement de la débâcle printanière (Michel, 1971). L'initiation de cet événement est influencée par l'état

physique du couvert de glace, par la géométrie hydraulique de la rivière, et par les conditions météorologiques et hydrologiques (Yapa et Shen, 1985). Il existe deux types opposés de débâcle qui sont le résultat de l'interaction de ces variables. La débâcle d'origine thermale est graduelle et peu spectaculaire alors que la débâcle d'origine mécanique est extrêmement dynamique (Beltaos, 1989).

La débâcle thermale est le résultat d'un transfert important de chaleur vers le couvert de glace causée par le réchauffement graduel de l'air et l'eau, par l'accroissement du temps d'ensoleillement et par l'augmentation de l'angle d'incidence du soleil (White et Moore, 2002). Ces phénomènes entraînent la fonte du couvert de neige et de glace sans mouvement important de ce dernier. Les possibilités d'embâcles associées à ce type de débâcle sont faibles. À l'opposée, la débâcle mécanique est associée à un ruissellement de surface important dû à la pluie et à la fonte rapide du couvert de neige (Beltaos, 2000). Les forces hydrodynamiques sont assez importantes pour soulever et briser le couvert avant même qu'il y ait détérioration thermale du couvert (Beltaos, 2003).

### 2.3.2 Embâcle

Les embâcles se forment lorsque la glace qui est transportée à la surface de l'écoulement est arrêtée par un obstacle ou lorsque la capacité d'une section de rivière à transporter la glace est insuffisante pour l'évacuer complètement (Beltaos, 2000). Les embâcles qui se forment durant la débâcle sont généralement sous contrôle mécanique puisque les morceaux de glace sont poussés contre un obstacle. Les morceaux se trouvent alors compactés et l'embâcle gagne en épaisseur. La profondeur de l'eau augmente rapidement au pied de l'accumulation et la pente hydraulique atteint des valeurs qui dépassent celles qui sont possible en écoulement libre (Prowse, 1994). Lorsque l'embâcle cède, l'eau emmagasinée peut créer une importante vague de crue. Ce déferlement rapide d'eau et de glace peut éventuellement reformer un nouvel embâcle (Jasek, 2003).

## 2.4 Cas spéciaux

### 2.4.1 Rivière avec forte pente

Les sections précédentes expliquent la formation et l'évolution de la glace de rivière sur des cours d'eau qui ont une pente faible et une coupe transversale de taille suffisante pour exercer peu d'influence sur l'évolution du couvert de glace. Toutefois, la formation de la glace sur des cours d'eau de petite taille et de forte pente présente des différences majeures par rapport aux rivières de grande taille. Ces différences ont d'ailleur été observées lors d'études effectuées en Norvège (Tesaker, 1994), au Japon (Hiramaya *et al.*, 2002) et également à la tête des bassins versants en Amérique du nord lors de nos travaux de terrain. La formation de la glace sur ces rivières est influencée par divers phénomènes dynamiques et est fortement dépendante de la topographie, des conditions locales d'écoulement (Tesaker, 1994) et de la taille du substrat (observations personnelles).

La production de glace sur ces tronçons de rivière est ralentie par les échanges importants d'énergie turbulente entre la surface et le lit de la rivière. Ces échanges empêchent l'établissement d'une couche stable et continue d'eau en surfusion à la surface et freinent ainsi la formation d'un couvert de glace stable (Tesaker, 1994). De plus, la formation par accumulation vers l'amont d'éléments de glace observée sur les grandes rivières est habituellement impossible à cause de la vitesse d'écoulement supérieure à la vitesse critique de progression dynamique. Le couvert de glace sur ce type de cours d'eau est typiquement discontinu et présente de nombreuses zones d'eau libre (Hiramaya *et al.*, 2002). Sur les rivières qui présentent une pente importante, l'évolution du couvert de glace est causée par la formation de glace de fond sur le lit de la rivière et par la formation de glace latérale près des berges (Hiramaya *et al.*, 2002). La glace de fond forme des barrages avec des zones d'écoulement turbulent qui favorise la production de frasil. Ce frasil nouvellement produit favorise la formation de glace de fond supplémentaire. Les barrages de glace de fond créent également des bassins d'eau calme qui vont se couvrir de glace de surface. Lorsque les bassins d'eau calme se recouvrent, la production de glace de fond ralentie et un équilibre est atteint entre la production de glace et la dissipation de l'énergie cinétique due à la turbulence. Fréquemment, plusieurs

endroits d'une rivière demeurent libres de glace durant tout l'hiver (Figure 2.13). Ce phénomène est dû à la transformation de l'énergie potentielle en énergie cinétique qui est dissipée par de l'énergie thermique. Cette situation n'existe que sur les rivières de forte pente ou en aval d'une chute (Tesaker, 1994).



Figure 2.13 Formation d'un couvert de glace discontinue sur un ruisseau avec une forte pente.  
Ruisseau Allaire, rivière Ste-Marguerite, Québec.

#### 2.4.2 Couvert suspendu

Le couvert de glace peut reposer directement sur le lit dans les rivières où le substrat du lit est de très forte taille par rapport à la profondeur de l'eau. Cette situation est fréquente lorsque le débit diminue durant l'hiver ou lorsque l'apport d'eau souterraine chaude fait fondre la partie inférieure du couvert. Une couche d'air sépare alors le couvert et la surface de l'eau (Beltaos *et al.*, 1993) et agit comme isolant thermique entre la glace et l'eau.

### 2.4.3 Couvert sous pression

L'écoulement de l'eau sous pression est une situation rare qui existe lorsque le couvert est attaché solidement aux berges et que le débit augmente soudainement (Beltaos *et al.*, 1993). Ce phénomène est généralement de courte durée puisque la glace cède habituellement sous la pression engendrée par l'écoulement. De plus, lorsque la glace atteint le lit de la rivière, l'érosion du substrat peut former des canaux afin de favoriser l'écoulement et libérer la pression existante.

## Chapitre 3

### **Les impacts biologiques de la période hivernale sur le saumon atlantique**

Ce chapitre décrit brièvement la biologie du saumon atlantique ainsi que les caractéristiques de son habitat estival et hivernale, en fonction des différents stades de vie en rivière. La deuxième partie du chapitre aborde plus spécifiquement les impacts de la période hivernale sur le saumon atlantique. Cette période peut être définie comme débutant après la fraie du saumon atlantique et se terminant à la fonte du couvert de glace (Cunjak *et al.*, 1998). Au début de l'hiver, les températures de l'air et de l'eau diminuent graduellement et l'eau atteint éventuellement une température avoisinant 0°C. Une fois l'eau près du point de congélation, les différents types de glace de rivière se forment selon les conditions météorologiques, hydrauliques, et géomorphologiques. Durant cette période, les poissons qui vivent en rivière adoptent des stratégies de survie variées en réponse aux nombreux changements de leur environnement (Cunjak, 1996).

#### **3.1 Biologie et écologie du saumon atlantique**

Le saumon atlantique (*Salmo salar*) est un poisson anadrome qui réalise la majorité de sa croissance en mer (Bardou et Baglinière, 2000) (Figure 3.1). La fraie s'effectue généralement en octobre et en novembre dans l'ensemble de son aire de répartition (Leim et Scott, 1972). Les œufs sont déposés par les femelles dans des nids creusés dans le substrat de la rivière (diamètre moyen de 16 à 64 mm) (Calkins, 1989) et recouvert de 15 à 25 cm de substrat. Les nids sont situés généralement sur les seuils ou en aval des fosses. Ces endroits présentent un écoulement rapide et de faible profondeur qui offrent aux œufs un débit inter-granulaire optimal afin de leur assurer un apport suffisant en oxygène (Stanley et Trial, 1995). Les nids sont généralement situés à des profondeurs variant entre 20 et 40 cm (Stanley et Trial, 1995) où les vitesses d'écoulement se situent entre 25 et 90  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$  (Calkins, 1989). Les œufs demeurent enfouis dans le substrat durant tout l'hiver jusqu'à leur éclosion en avril ou en mai.

Une fois éclos, les alevins vésiculés vivent environ un mois à l'intérieur du substrat de leur nid avant d'émerger de celui-ci pour débuter leur alimentation orale. Durant la

période estivale, les alevins sont principalement actifs durant le jour et se cachent dans les interstices du substrat lorsqu'ils sont inactifs. Calkins (1989) a observé que les alevins préfèrent un substrat similaire à celui des nids (16-64 mm) mais le diamètre utilisé par ces derniers varie selon leur taille. Durant leur premier été de vie, les alevins recherchent un habitat où ils pourront se maintenir dans le courant tout en capturant facilement leurs proies. Les alevins utilisent des vitesses de courant modérées ( $10$  à  $30 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) dans des zones peu profondes (10-40 cm) (Walsh et Calkins, 1986; Cunjak, 1988b; Stanley et Trial, 1995). Au début de l'automne, lorsque la température de l'eau devient inférieure à  $8$ - $12^\circ\text{C}$ , les alevins adoptent un comportement nocturne (Cunjak, 1988b; Heggenes et Saltveit, 1990; Fraser *et al.*, 1995; Johnston *et al.*, 2004). De plus, leur capacité de réaction et de maintien dans le courant diminue significativement et les alevins deviennent beaucoup plus vulnérable aux prédateurs (Fraser *et al.*, 1995) et aux conditions environnementales. Afin de diminuer les risques de prédation durant la période hivernale, les juvéniles adoptent donc un patron d'activité nocturne (Rimmer *et al.*, 1983; Cunjak, 1988a; Johnston *et al.*, 2004). En effet, les juvéniles émergent de leur interstice durant la nuit pour s'alimenter mais demeurent enfouis dans le substrat durant le jour afin d'éviter les prédateurs.

Les alevins utilisent sensiblement le même habitat durant l'hiver que durant l'été (Rimmer *et al.*, 1983; Johnston *et al.*, 2004). Généralement, durant la période hivernale, les alevins utilisent plus abondamment les seuils et moins fréquemment les fosses. Whalen et Parrish (1999) ont observé que durant la nuit les alevins utilisent des vitesses de courant entre  $0$  et  $45 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  mais en moyenne inférieure à  $19 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . L'utilisation de ces faibles vitesses permet aux saumons de minimiser leurs dépenses énergétiques (Heggenes *et al.*, 1993). Durant le jour, les observations de Cunjak (1988b) montrent que les alevins trouvent refuge sous des roches d'un diamètre moyen de 40 cm dans un écoulement peu profond (18-49 cm) et où la vitesse moyenne de l'écoulement se situe entre  $10$  et  $50 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

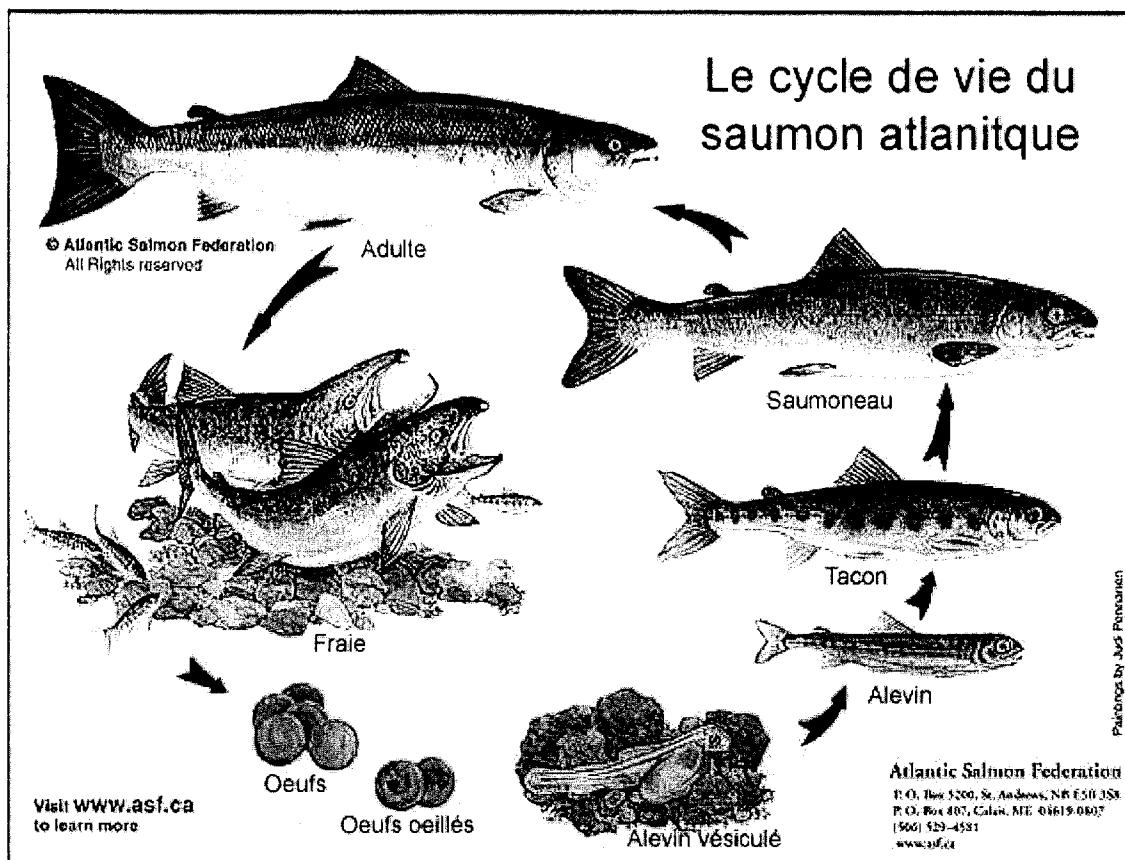


Figure 3.1 Cycle de vie du saumon atlantique. Adaptée de «Wild Atlantic salmon, a wondrous life cycle», Atlantic Salmon Federation, WWW.asf.ca.

Les alevins qui ont survécus à leur premier hiver deviennent des tacons 1+. Lorsque les tacons en sont à leur deuxième année en rivière, ils portent le nom de tacon 2+ et ainsi de suite, selon le nombre d'années passées en rivière. Au printemps, suite au réchauffement de l'eau, les tacons adoptent un comportement diurne similaire à celui des alevins. Au cours de leur croissance, les tacons occupent des zones d'écoulement plus profondes et plus rapides selon leurs tailles (Walsh et Calkins, 1986). Selon les observations estivales de Wash et Calkins (1986), les tacons 1+ utilisent des vitesses de  $20\text{-}40 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  alors que les tacons 2+ utilisent des vitesses de 30 à  $50 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Toutefois, ils évitent systématiquement les endroits présentant des vitesses supérieures à  $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Stanley et Trial, 1995). La profondeur de l'écoulement utilisée à ce stade de vie est très variable et s'étend de 10 cm à environ 100 cm (Stanley et Trial, 1995) mais, selon les observations

de Cunjak (1988b), les profondeurs variant de 24 à 36 cm sont généralement plus utilisées. Les tacons sélectionnent un substrat plus grossier que celui utilisé par les alevins pour se cacher mais le diamètre utilisé par les tacons est généralement inférieur à 200 mm.

À l'approche du second hiver en rivière, les tacons 1+ adoptent de nouveau un comportement nocturne lorsque la température de l'eau atteint entre 8 et 12°C. Durant l'hiver les tacons utilisent sensiblement le même habitat que durant l'été mais tentent de réduire leur travail métabolique en utilisant des vitesses de courant plus faibles que durant la période estivale. Selon Cunjak (1988b), durant l'hiver, les tacons utilisent des seuils recouverts de 41 à 49 cm d'eau.

Les tacons peuvent demeurer en rivière entre 2 et 8 ans avant d'entreprendre le processus de smoltification qui les rend apte à vivre en eau salée (Klemetsen *et al.*, 2003). Suite à ce processus physiologique, les smolts quittent leur rivière natale pour entreprendre la dévalaison qui les mènera en mer pendant une à trois années selon les individus. Les saumons adultes reviendront se reproduire dans leur rivière natale durant l'automne après leur séjour en mer. Les saumons qui survivent au processus de reproduction sont nommés saumons noirs et suite à la fraie, ils cherchent un endroit pour passer l'hiver où ils minimiseront leurs dépenses énergétiques.

### **3.2 Les impacts de la période hivernale et de la glace de rivière sur l'habitat du saumon atlantique**

#### **3.2.1 Période de formation du couvert de glace**

##### **Débit**

Durant l'hiver, la majorité des précipitations s'accumule sous forme de neige sur le sol et sur les étendues gelées des lacs et des rivières. Le ruissellement de surface diminue graduellement et les rivières sont principalement alimentées par les apports souterrains qui déclinent également. Typiquement, les rivières atteignent leur niveau d'étiage le plus important vers la fin de l'hiver (Prowse et Gridley, 1993). Toutefois, l'étiage peut se produire également au début de l'hiver lorsque la croissance de la glace est maximale et

qu'il se forme des embâcles (Prowse, 1994). Ce faible débit diminue considérablement la quantité d'habitat disponible pour le saumon (Cunjak *et al.*, 1998).

### ***Frasil***

La glace de fond et le frasil sont généralement considérés comme étant les types de glace les plus nuisibles pour le saumon juvénile et adulte (Power *et al.*, 1993). Pour les poissons, et particulièrement pour les saumons noirs suite à la période de fraie, le fond des fosses représente souvent un endroit calme qui permet de réduire les dépenses énergétiques durant la saison hivernale. Toutefois, la formation d'un barrage suspendu de frasil peut concentrer l'écoulement près du lit et augmenter significativement les vitesses d'écoulement (Walsh et Calkins, 1986; Cunjak et Caissie, 1994; Cunjak *et al.*, 1998). Par exemple, jusqu'à 80% d'une fosse peut être occupée par un barrage suspendu, causant d'importants changements hydrauliques (Brown *et al.*, 2000). Certains barrages suspendus peuvent demeurer en place durant des mois ou durant la saison hivernale entière rendant des sections complètes de rivière peu favorables aux populations de poissons (Brown *et al.*, 2000). Le frasil peut également s'accumuler sous le couvert de glace en différents endroits de la rivière et former des accumulations moins spectaculaires. Ces accumulations moins épaisses entraînent également des changements hydrauliques importants. Dans les deux cas, les accumulations de frasil et les barrages suspendus favorisent l'érosion du lit en augmentant les vitesses de courant. De plus, les accumulations de frasil entraînent une diminution du débit à l'aval de celles-ci, diminuant le niveau d'eau dans la rivière. Cette baisse de niveau diminue l'habitat disponible aux saumons adultes et juvéniles (Brown *et al.*, 2000).

L'augmentation des vitesses près du lit de la rivière, les changements locaux de débit et l'érosion accrue de certaines portions de la rivière causés par les barrages suspendus et les accumulations de frasil, peuvent avoir d'importantes conséquences énergétiques chez les saumons adultes et juvéniles. Ces derniers doivent se déplacer à l'extérieur de leurs habitats ce qui entraîne une dépense énergétique supplémentaire afin de trouver un nouvel habitat plus convenable (Walsh et Calkins, 1986; Cunjak, 1988b; Power *et al.*, 1993; Brown et Mackay, 1995a; Brown *et al.*, 2000). Cet exil hors de l'habitat initial peut durer de quelques jours à plusieurs mois selon la durée des accumulations de frasil (Brown *et*

*al.*, 2000). Le frasil peut également affecter directement les poissons en obstruant leurs branchies causant d'importants problèmes d'échange gazeux et pouvant possiblement les tuer (Beltaos *et al.*, 1993).

### ***Glace de fond***

La glace de fond peut occuper une partie importante du lit de la rivière lorsque les conditions atmosphériques et les conditions hydrauliques favorables sont réunies (Cunjak *et al.*, 1998). Les caractéristiques d'écoulement recherchées par les saumons juvéniles sont également favorables à la formation de la glace de fond (Beltaos *et al.*, 1993). Les conséquences biologiques de la présence de ce type de glace peuvent être directes comme le gel des organismes et des œufs (McNeil, 1966; Reiser et Weshe, 1979; Walsh et Calkins, 1986) ou indirectes comme la réduction du débit intergranulaire et la diminution associée du niveau d'oxygène dissout (Calkins, 1989; Power *et al.*, 1993; Cunjak *et al.*, 1998). La glace de fond est probablement plus néfaste pour les œufs que le frasil en raison de sa plus grande densité et de sa perméabilité réduite à l'écoulement (Cunjak *et al.*, 1998). Le mouvement vers l'aval des morceaux de glace de fond qui se détachent du lit peut également déloger les saumons juvéniles qui utilisent les interstices présents dans le substrat pour s'abriter lorsque les roches et sédiments qui servaient d'abris aux salmonidés (Cunjak *et al.*, 1998). En effet, les saumons juvéniles utilisent les interstices présents dans le substrat pour s'abriter (Cunjak, 1988b). D'autre part, dans les écoulements peu profonds, la glace de fond peut rediriger l'écoulement et diminuer l'habitat disponible pour les salmonidés provoquant leur mort par suffocation (Maciolek et Needham, 1952; Needham et Jones, 1959; Brown et Mackay, 1995a). Selon Walsh et Calkins (1986), près de 70% de la section transversale peut être recouverte de glace de fond ce qui force les poissons à occuper un habitat beaucoup plus restreint et provoque des déplacements.

D'autre part, la glace de fond pourrait aussi possiblement offrir un refuge aux saumons juvéniles. Roussel et ses collaborateurs (2004) ont observés des tacons séquestrés sous 10 cm de glace de fond. Selon ces auteurs, ces microhabitats offrent un refuge ayant de faibles vitesses de courant et une eau légèrement plus chaude que l'écoulement principal (Figure 3.2).

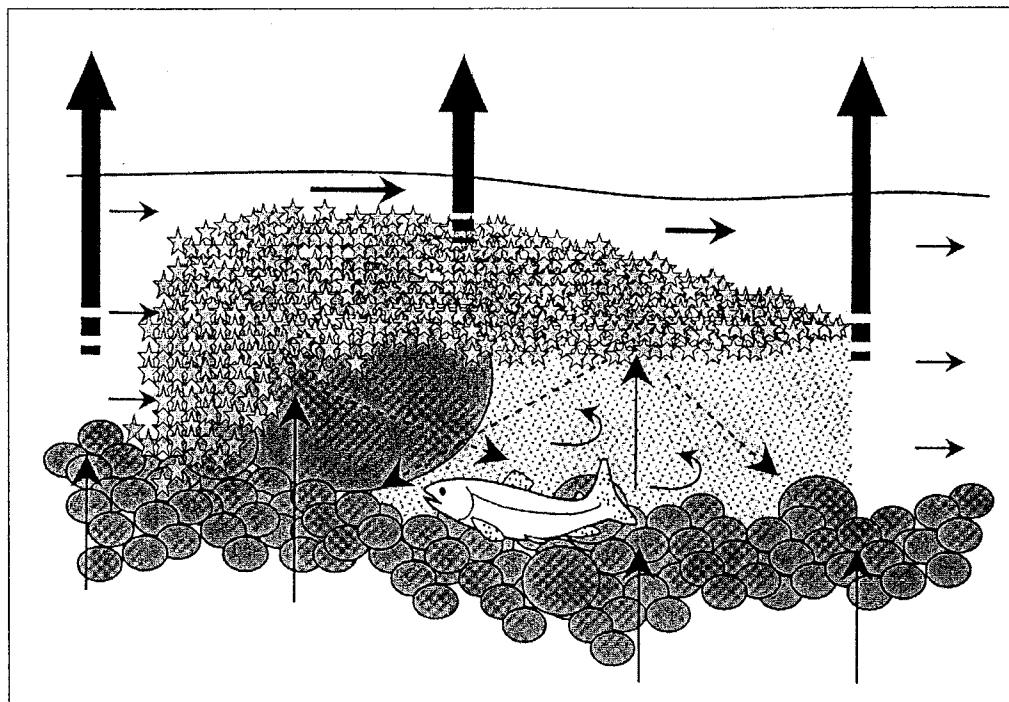


Figure 3.2 Représentation de l'utilisation par un talon d'un tapis de glace de fond sur le substrat d'un seuil. Les cristaux de frasil adhèrent au substrat et forment la glace de fond. L'espace entre le substrat et la glace de fond permet aux tacons de se réfugier dans une zone où la vitesse de courant est faible. Les pertes de chaleur vers l'atmosphère sont réduites et l'apport de chaleur géothermique permet de réchauffer légèrement l'eau dans ce micro-habitat. Adaptée de Roussel (2004).

### 3.2.2 Période de maintien du couvert de glace

#### *Glace de surface*

La formation d'un couvert de glace peut produire des changements importants dans les conditions hydrauliques de la rivière en diminuant jusqu'à 60% l'aire d'écoulement disponible et en augmentant la résistance à l'écoulement (Beltaos et al., 1993; Cunjak et Therrien, 1998). Ces modifications provoquent habituellement des augmentations rapides et importantes du niveau d'eau inondant des habitats situés dans des plaines d'inondations et près du littoral (Cunjak et al., 1998). Toutefois, après la formation du couvert, le

niveau de l'eau redescend à un niveau inférieur à celui présent avant la formation de la glace et peut occasionnellement être en deçà de l'étiage calculé durant la période hivernale entière (Cunjak *et al.*, 1998). Cette baisse importante du débit est généralement causée par la rétention d'eau lors de la formation du couvert de glace et par la diminution des précipitations liquides. Le débit minimal associé à ce phénomène et le faible niveau d'eau peuvent avoir d'importantes implications écologiques. On remarque alors l'assèchement du lit de la rivière à l'aval d'embâcles lors de la formation de la glace qui en retour provoque une augmentation de la mortalité chez les poissons (Cunjak *et al.*, 1998). Lorsque l'hiver se poursuit, les sections peu profondes gèlent jusqu'au lit et l'écoulement devient concentré dans la portion la plus profonde du chenal, réduisant davantage l'habitat disponible aux saumons (Cunjak *et al.*, 1998)(Figure 3.3). Cette réduction peut être accentuée par l'accumulation de frasil dans les zones d'eau calme et par la formation de la glace de fond.

La présence d'un couvert de glace et la réduction associée de la photosynthèse causée par la baisse de la température et par la diminution du niveau d'ensoleillement sous la glace influencent le niveau d'oxygène dissout en rivière au cours de l'hiver (Prowse, 1994). Cette diminution en oxygène dissout est habituellement rapide lors de la formation du couvert de glace et s'effectue normalement en quelques jours (Prowse, 1994, 2001a). Les oeufs et les embryons sont très sensibles au niveau d'oxygène dissout et peuvent périr si une eau anoxique pénètre dans les nids (Power *et al.*, 1993; Cunjak *et al.*, 1998; Beltaos, 2000). De plus, un faible niveau d'oxygène dissout peut également affecter la survie des alevins lorsque le pH de l'eau est faible (Cunjak *et al.*, 1998). Toutefois, selon Cunjak (1998), il n'existe qu'une étude publiée par Bustard (1986) qui démontre l'existence d'anoxie hivernale chez le saumon atlantique. Cet auteur a documenté la mort de plus de 100 saumons juvéniles tués par anoxie causée par la présence d'un couvert de glace et d'un faible niveau d'eau.

D'autre part, la formation d'un couvert de glace à la surface de l'écoulement peut offrir de nombreux avantages aux saumons (Cunjak et Power, 1986; Cunjak *et al.*, 1998) (Figure 3.3). Par exemple, lorsque le niveau d'eau baisse durant l'hiver, le couvert de

glace peut demeurer suspendu sur les roches présentes sur le lit de la rivière, créant ainsi un espace d'air entre la glace et l'eau. Cet espace peut agir comme couche isolante, offrant aux poissons un environnement protecteur contre les conditions hivernales difficiles et contre la prédatation, ce qui améliore la survie hivernale des salmonidés (Beltaos *et al.*, 1993; Prowse, 1994; Finstad *et al.*, 2004). De plus, ce microclimat unique réchauffé par les radiations solaires est favorable à l'émergence d'invertébrés. Ces insectes sont une source importante de nourriture pour les saumons (Cunjak *et al.*, 1998).

La formation d'un couvert de glace près des berges peut également offrir un habitat relativement stable aux juvéniles lorsque l'écoulement est concentré vers le centre de la rivière (Power *et al.*, 1993). Ce changement dans l'écoulement offre des faibles vitesses de courant près des berges qui peuvent être ainsi utilisées par les salmonidés comme protection et habitat (Needham et Jones, 1959; Power *et al.*, 1993). De plus, le couvert de glace formé près des berges offre une protection contre les prédateurs tels que les mammifères.

Finalement, l'établissement d'un couvert de glace de surface stable durant la période hivernale permet de diminuer les évènements de production de frasil et de glace de fond. Ces conditions demandent aux poissons une activité continue afin de s'adapter constamment aux nouvelles conditions physiques, (Reimers, 1963) et forcent le maintient des activités d'alimentation (Cunjak et Power, 1986). L'établissement d'un couvert de glace et la stabilisation des conditions hivernales pourraient donc offrir également des conditions avantageuses aux salmonidés.

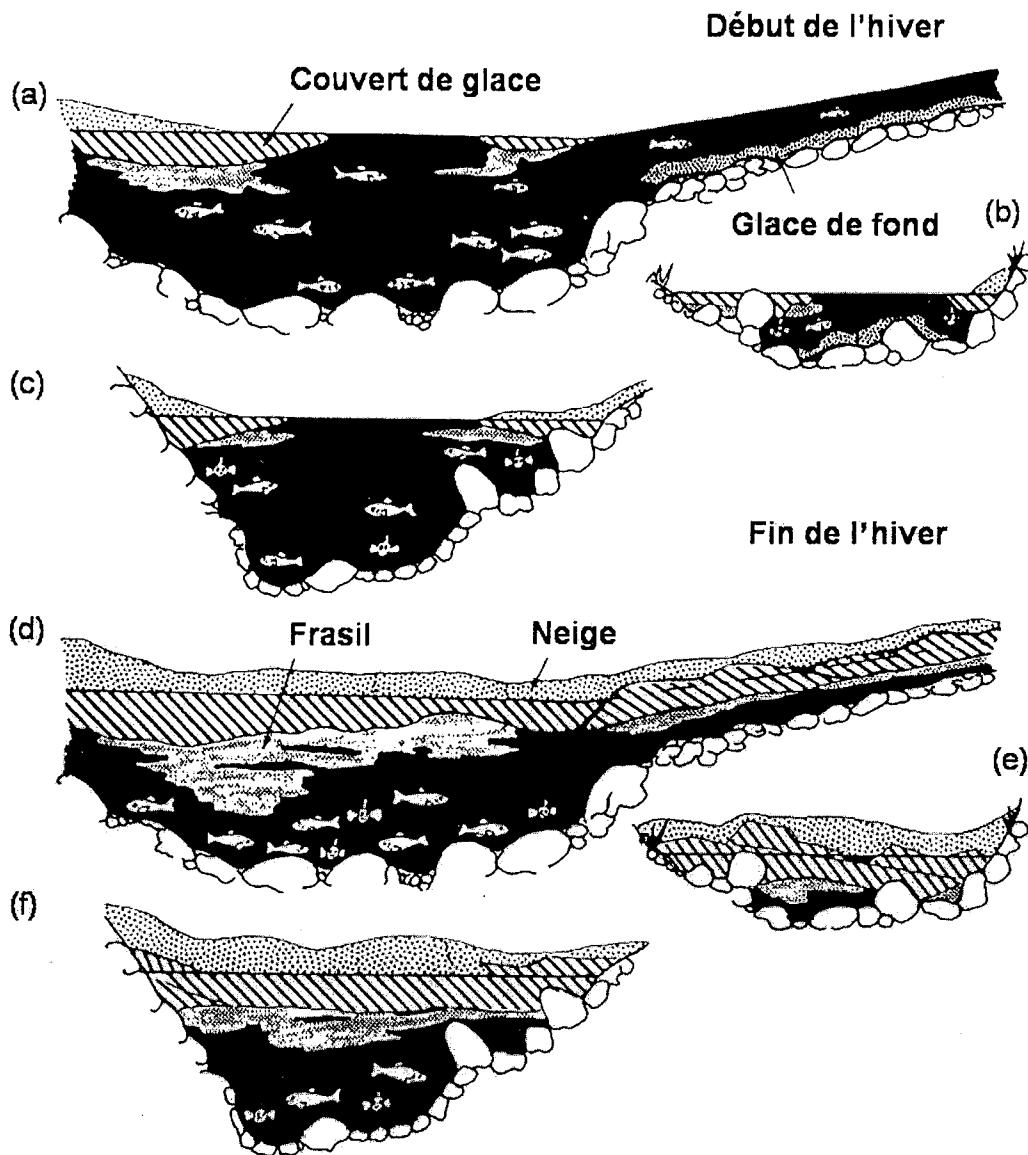


Figure 3.3 Changement dans la disponibilité de l'habitat durant la période hivernale. Au début de l'hiver, le couvert et de la glace de fond commencent à se former (a) près des berges où l'on note une diminution de l'espace disponible (b) mais peu de contrainte au centre de l'écoulement (c). Vers la fin de l'hiver, le couvert de glace occupe la totalité de la surface (d), alors que près des berges la glace occupe tout l'espace disponible (e). La disponibilité de l'habitat est réduite (f) Adaptée de Power *et al.* (1993).

### 3.2.3 Réchauffement et débâcle printanière

Selon Beltaos et al. (1993) et Prowse et Culp (2003), les impacts les plus importants de la glace sur la survie des salmonidés surviennent lors de la débâcle printanière. La débâcle possède un potentiel plus important à modifier l'écologie d'une rivière que les crues en eau libre (Cunjak *et al.*, 1998; Prowse et Culp, 2003). Il a été proposé que les organismes aquatiques, tels que les poissons, adoptent un comportement différent afin d'éviter les effets néfastes de la crue et de la débâcle. La recherche d'un abri dans le substrat pour se protéger des dommages causés par l'érosion peut être un moyen efficace de protection sauf lors d'une débâcle dynamique qui génère assez de mouvement du lit pour modifier complètement le lit d'une rivière



Figure 3.4 Érosion des berges et du lit d'une rivière suite à la débâcle printanière,(Prowse et Culp, 2003).

Les niveaux d'eau atteints lors de la débâcle et de la crue printanière peuvent excéder considérablement ceux atteints lors de crue en eau libre. La rapidité des fluctuations du niveau d'eau semble être néfaste pour les salmonidés. Par exemple, la récession rapide de la crue peut causer la mort de poissons qui se retrouvent piégés dans des zones rapidement asséchées (Prowse et Culp, 2003).

Les embâcles printaniers peuvent avoir un impact significatif sur le chenal et les berges. Lorsqu'un embâcle cède, la vague produite est un puissant agent d'érosion et de déposition (Figure 3.4), spécialement dans une rivière alluviale (Cunjak *et al.*, 1998). L'érosion du lit de la rivière et le déplacement des fosses peut affecter la survie des

différents stades de vie du saumon et particulièrement des œufs qui ne peuvent se déplacer (Prowse et Culp, 2003). L'érosion du lit et des berges par la glace, ainsi que l'érosion due aux fortes vitesses de courant peuvent également entraîner une augmentation importante de la concentration en sédiments en suspension (Prowse et Culp, 2003). La déposition de ces sédiments et particulièrement des sédiments fins, peut nuire au développement des œufs en diminuant l'apport d'eau oxygénée et en limitant l'évacuation des déchets des nids (Prowse et Culp, 2003). Toutefois, les crues peuvent également nettoyer les nids des sédiments fins accumulés durant la période hivernale. Les phénomènes associés aux crues printanières peuvent donc déplacer et blesser les poissons et modifier leurs habitats (Walsh et Calkins, 1986; Power *et al.*, 1993; Cunjak *et al.*, 1998).

L'énergie importante des crues concentrée dans une courte période de temps peut également être bénéfique aux salmonidés. Le délogement d'invertébrés offre une source considérable de nourriture aux poissons qui résident dans la rivière (Power *et al.*, 1993). De plus, l'ajout de matières organiques en suspension offre une nouvelle source d'énergie et de nutriments à la chaîne alimentaire lotique. En considérant que le niveau d'eau atteint lors de la crue de la débâcle est généralement supérieur au niveau atteint lors de crue en eau libre, la débâcle est considérée comme la principale source de matière organique allochtone de plusieurs rivières ayant un couvert de glace (Prowse et Culp, 2003) augmentant donc la quantité de nourriture disponible pour les salmonidés.

## Chapitre 4

### **Résumé des travaux de recherche**

Le prochain chapitre présente et résume les activités de recherche qui ont été effectuées afin de répondre aux objectifs du projet de maîtrise. Il s'agit essentiellement d'un résumé des deux articles rédigés en anglais qui se trouvent aux chapitres 5 et 6. Les deux objectifs sont présentés séparément puisqu'il s'agit de deux sujets relativement distincts. Les figures et tableaux utilisés dans ce chapitre sont joints aux chapitres 5 et 6 afin d'alléger le contenu du mémoire. Ce chapitre débute par la présentation des travaux reliés à la mortalité hivernale et se termine par les travaux portant sur la glace de fond.

#### **4.1 Les impacts de la rigueur de l'hiver sur la mortalité inter-annuelle de l'oeuf à l'alevin et de l'alevin au tacon (1+) du saumon atlantique**

##### **4.1.1 Introduction**

La période hivernale est reconnue comme une période qui affecte de façon significative la mortalité hivernale des salmonidés et qui peut agir comme goulot d'étranglement sur ces populations. L'hiver est associé à une diminution importante de la température de l'eau et de l'air, à un faible débit, et à la production de différentes formes de glace de rivière. Le frasil et la glace de fond sont généralement produits en début de saison alors que le couvert de surface prend forme au milieu de l'hiver pour disparaître lors de la débâcle printanière (Ashton, 1986). En réponse à ces changements, les saumons atlantique juvéniles doivent modifier leur patron journalier d'activités et se trouver un habitat convenable afin de survivre aux conditions hivernales exigeantes (Walsh et Calkins, 1986; Cunjak et Therrien, 1998; Brown, 1999), alors que les œufs sont particulièrement vulnérables puisqu'ils sont immobiles (Cunjak et Therrien, 1998).

Habituellement, la sévérité des conditions d'habitats durant la période hivernale est évaluée à l'aide de variables qui moyennent les valeurs de débit et de température au cours de l'hiver. Toutefois, cette période est composée d'une succession d'évènements

distincts et l'utilisation de variables globales peut être inadaptée pour expliquer la mortalité hivernale du saumon atlantique juvénile. Une analyse des conditions hydro-climatiques mensuelles en relation avec la mortalité hivernale pourrait permettre de comprendre avec plus de détails les facteurs responsables du goulot d'étranglement hivernal. Le but de cette étude était d'évaluer l'impact de la sévérité de l'hiver et des conditions hydro-climatiques sur la mortalité inter-stade de l'œuf à l'alevin et de l'alevin au tacon (1+) du saumon juvénile. Dans un deuxième temps, nos résultats ont été comparés avec ceux publiés dans la littérature pour des rivières situées dans les provinces Atlantique et qui présentaient des conditions climatiques différentes.

#### **4.1.2 Méthodologie**

##### ***Sites d'études***

###### ***Rivière de la Trinité, rivière Indian et ruisseau Catamaran***

La rivière de la Trinité est située au nord-est du Québec dans un climat de type boréal (Anonymous, 2003). Cette rivière coule sur plus de 80 km et draine une superficie de 562 km<sup>2</sup>. La rivière Indian est située au nord-est de Terre-Neuve et le ruisseau Catamaran est situé au centre nord du Nouveau-Brunswick. Ces deux rivières sont caractérisées par un climat de type maritime atlantique (Anonymous, 2003). Le ruisseau Catamaran draine approximativement une superficie de 60 km<sup>2</sup> et coule sur près de 21 km. Les hivers sur ces deux rivières sont moins rigoureux que sur la rivière de la Trinité. Le débit hivernal moyen de la rivière de la Trinité entre 1983 et 1992 était de 9,3 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> alors qu'il était de moins de 1 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> sur le ruisseau Catamaran.

##### ***Abondance et mortalité inter-stade***

###### ***Rivière de la Trinité***

La déposition des œufs sur la rivière de la Trinité a été estimée par la Société de la faune et des parcs du Québec entre 1983 et 1992 (FAPAQ, Gouvernement du Québec). L'estimation de l'abondance des juvéniles a été effectuée à partir des données de pêche à l'électricité effectuée par la FAPAQ entre 1984 et 1992. La mortalité inter-stade de l'œuf à l'alevin (0+) et de l'alevin au tacon (1+) fut calculée à partir de l'estimation des abondances des œufs et des juvéniles (Tableau 5.1, p.77).

### *Rivière Indian et ruisseau Catamaran*

Les taux de survie de l'œuf à l'alevin estimés entre 1963 et 1972 pour la rivière Indian (Chadwick, 1982) et de l'œuf à l'alevin et de l'alevin au tacon pour le ruisseau Catamaran (Cunjak *et al.*, 1998; Cunjak et Therrien, 1998) estimé entre 1990 et 1996 ont été convertis en taux de mortalité (Tableau 5.1, p.77).

### *Données hydro-climatiques et analyses des données*

Les variables hydro-climatiques ont été regroupées en trois périodes distinctes selon le régime des glaces de rivière afin d'évaluer leur impact sur la mortalité inter-annuelle (Tableau 5.2, p.78). Ces périodes sont en ordre chronologique : la période de la prise du couvert (octobre à décembre), la période principale hivernale (janvier et février) et la débâcle printanière (mars et avril). Parmi les variables utilisées, on retrouve des indices de degrés-jours de gel cumulés (FDD) lorsque la température est inférieure à 0°C et calculées sur une période mensuel. Ces indices ont été calculés pour les trois périodes d'évolution de la glace. Les débits mensuels et le débit moyen hivernal, les ratios entre les débits mensuels durant l'automne et durant la période hivernale ont également été calculés. Finalement, le nombre de jours où la température moyenne était inférieure à -10°C en novembre et décembre a été compilé. Un total de 30 variables environnementales a été analysé à l'aide de régressions linéaires simples et multiples afin de trouver une relation entre la mortalité et les conditions hydro-climatiques hivernales (Tableau 5.2, p.78).

#### **4.1.3 Résultats**

##### *Mortalité de l'œuf à l'alevin*

###### *Rivière de la Trinité*

La mortalité inter-annuelle de l'œuf à l'alevin varie entre 83,3% et 93,3% (Tableau 5.1, p.77). Les résultats de l'analyse indiquent que la mortalité est négativement reliée aux degrés-jours de gel cumulés entre le 1<sup>er</sup> octobre et le 31 janvier ( $FDD_{O-J}$ ) ( $r^2 = 0,81$ ,  $n = 9$ ,  $P < 0,001$ ). De plus, la variable  $FDD_{O-J}$  combinée à la variation du débit mensuel entre le mois de novembre et le mois de février ( $Flow_{N/F}$ ) permet d'expliquer plus de 93% de la variabilité de la mortalité ( $adj. r^2 = 0,93$ ,  $n = 9$ ,  $P < 0,001$ ). La variable  $Flow_{N/F}$  est positivement corrélée avec la mortalité alors que  $FDD_{O-J}$  est négativement corrélée

avec la mortalité. De plus, ces variables ne sont pas corrélées entre elles ( $r = -0.31$ ,  $n = 9$ ,  $P > 0.05$ ) et sont donc considérées comme des variables explicatives valables. Ces résultats suggèrent que la mortalité augmente lorsque le débit à l'automne est élevé et qu'il diminue de façon importante durant l'hiver. La mortalité augmente également lorsque la température de l'air durant la période comprise entre octobre et janvier est douce.

#### *Comparaison entre les rivières*

Les mortalités de l'œuf à l'alevin des rivières Trinité, Indian et du ruisseau Catamaran ont été comparées. L'analyse indique que les taux de mortalités de la rivière Indian et du ruisseau Catamaran sont similaires (Mann-Withney U-Test,  $P > 0,05$ ). Toutefois, la mortalité observée sur la rivière Trinité était supérieure aux taux observés sur les deux autres cours d'eau (Mann-Withney U-Test,  $P < 0,05$ ). Ces résultats ainsi que l'observation de la Figure 5.1 (p.80) suggèrent l'existence d'une tendance générale positive entre la mortalité et la rigueur de la première moitié de l'hiver. De plus, on remarque également que le maximum de mortalités est atteint environ à la valeur médiane de degrés-jours de gel cumulés sur ces rivières.

#### ***Mortalité de l'alevin au tacon***

##### *Rivière de la Trinité*

La mortalité inter-annuelle de l'alevin au tacon varie entre 42,9% et 73,3% (Tableau 5.1, p. 77). Les résultats des régressions simples démontrent que la mortalité inter-annuelle est négativement corrélée aux degrés-jours de gel cumulés en janvier et février ( $FDD_{JF}$ ) ( $r^2 = 0,91$ ;  $n = 7$ ,  $P < 0,001$ ) (Tableau 5.3, p.79). Les résultats indiquent également que  $FDD_{JF}$  combiné au nombre d'événements lorsque la température moyenne journalière est inférieure à  $-10^{\circ}\text{C}$  permet d'expliquer plus de 97% de la variance de la mortalité ( $\text{adj. } r^2 = 0,97$ ,  $n = 7$ ,  $P < 0,001$ ). De plus, ces variables ne sont pas corrélées entre elles ( $r = 0,21$ ,  $n = 9$ ,  $P > 0,05$ ) et sont donc considérées comme des variables explicatives valables. Ces résultats suggèrent que des températures clémentes durant les mois de janvier et février ainsi que des températures favorables à la production de frasil et la formation de glace de fond au début de l'hiver favorisent une augmentation de la mortalité.

### *Comparaison entre les rivières*

Les résultats indiquent que la variable  $FDD_{JF}$  explique plus de 94% ( $adj. r^2 = 0,94, n = 5, P < 0,01$ ) de la mortalité inter-annuelle de l'alevin au tacon sur le ruisseau Catamaran (Figure 5.2, p. 81). De plus, l'analyse indique que la mortalité observée sur ce ruisseau est supérieur à la mortalité de la rivière Trinité. Ces résultats ainsi que l'observation de la Figure 5.2 suggère l'existence d'une relation générale négative entre la mortalité de l'alevin au tacon et la température de l'air durant les mois de janvier et février indiquant que les conditions les plus néfastes pour les juvéniles sont présentes lorsque les conditions météorologiques en janvier et février sont clémentes.

#### **4.1.4 Discussion**

##### *Mortalité de l'œuf à l'alevin*

Les résultats de l'analyse de la rivière Trinité démontrent que la mortalité augmente lorsque la température de l'air est plus douce. Les rivières qui sont situées en milieu boréal sont probablement plus susceptibles d'expérimenter la formation d'un couvert de glace complet alors que les rivières en région plus tempérée comme la rivière Indian et le ruisseau Catamaran ont plus de chance d'avoir un couvert discontinu. Un couvert complet offre une protection thermique contre la production de frasil et la formation de la glace de fond. Les frayères et les œufs sont habituellement localisés dans des endroits où la formation de la glace de fond est très probable (Beltaos *et al.*, 1993) et l'absence d'un couvert de glace permet la production de glace de fond sur les frayères. La glace de fond est reconnue pour augmenter la mortalité des œufs en modifiant les conditions d'écoulement des frayères (Cunjak *et al.*, 1998).

Les différences notées dans les taux de mortalité pour les trois cours d'eau étudiés en relation avec les conditions météorologiques ainsi que l'existence d'une valeur de mortalité maximale à des valeurs de température médiane suggèrent l'existence d'un effet différent du climat sur la mortalité des œufs. En effet, un hiver peu rigoureux serait probablement beaucoup plus néfaste pour les œufs qu'un hiver froid.

Les résultats indiquent également que les œufs sont sensibles à une diminution du débit entre la période de la fraie et le milieu de l'hiver. Un débit faible durant les mois les plus froids favorise la congélation des œufs à l'intérieur du substrat (Walsh et Calkins, 1986).

#### ***Mortalité de l'alevin au tacon***

Les résultats de l'analyse de la mortalité de la rivière de la Trinité et du ruisseau Catamaran démontrent que les hivers doux sont associés à une plus grande mortalité inter-annuelle. Sur la rivière de la Trinité, les hivers rigoureux semblent être bénéfiques pour la survie des juvéniles suggérant qu'un couvert de glace complet pourrait inhiber la production de frasil et de glace de fond. Les résultats de la Trinité indiquent également que le frasil et la glace de fond pourraient avoir un rôle néfaste sur la survie inter-annuelle particulièrement durant la période de formation du couvert à l'automne. À partir d'observation de terrain, il a été proposé que les conditions les plus néfastes pour les juvéniles se retrouvent sur les sections de rivière qui se situent à une altitude moyenne où les conditions de glace de rivière sont les plus instables (Chisholm *et al.*, 1987). Il apparaît, selon les données recueillies durant cette étude, que la mortalité augmente également lorsque les conditions de glace sont instables et imprévisibles.

#### ***Mortalité densité-dépendante***

L'absence de mortalité densité-dépendante de l'œuf à l'alevin et de l'alevin au tacon sur la rivière de la Trinité suggère que la compétition pour les frayères et l'habitat hivernal est probablement peu significatif sur cette rivière et s'explique possiblement par la faible densité de reproducteurs et de juvéniles.

#### ***Utilisation de variables spécifiques***

Aucune variable à large échelle temporelle n'était significative sur la rivière de la Trinité. Par contre, l'analyse statistique a démontré l'existence de plusieurs variables significatives spécifiques à certaines périodes précises de l'hiver. L'utilisation de variables spécifiques a permis de préciser la nature du goulot d'étranglement dans la production du saumon atlantique juvénile.

## 4.2 Modélisation de la formation de la glace de fond sur des rivières à lit graveleux

### 4.2.1 Introduction

La glace de fond est un phénomène commun à plusieurs rivières nordiques. Elle se forme principalement par l'accumulation de cristaux de frasil sur le lit des rivières (Ashton, 1986; Beltaos *et al.*, 1993; Hammar *et al.*, 1996; Kerr *et al.*, 1997) où elle peut s'accumuler suffisamment pour modifier les conditions hydrauliques, géomorphologiques et biologiques (Cunjak, 1996; Brown, 1999; Prowse, 2001a).

Malgré l'importance physique et biologique considérable de la glace de fond, l'étude de ses conditions de formation a reçue beaucoup moins d'attention que les autres formes de glace de rivière. Les conditions atmosphériques favorisant la formation de la glace de fond sont rencontrées lors de nuits où la température de l'air atteint -10°C, qu'il vente légèrement et que le ciel est dégagé (Parkinson, 1984; Yapa et Shen, 1985; Beltaos *et al.*, 1993; Forest, 1994; Terada *et al.*, 1998). Malgré de nombreuses observations du phénomène en milieu naturel (Arden et Wigle, 1972; Parkinson, 1984; Terada *et al.*, 1998) et en laboratoire (Hammar *et al.*, 1996; Kerr *et al.*, 1997, 2002), il n'existe présentement aucun modèle statistique de prédiction de la formation de la glace de fond sur une rivière à lit de gravier à partir des conditions météorologiques.

Des observations en rivière indiquent que la glace de fond se forme à des vitesses d'écoulements élevées et à de faibles profondeurs correspondant à des nombres de Froude se situant entre 0,2 et 1,5 (Yamasaki *et al.*, 1996; Hirayama *et al.*, 1997; Terada *et al.*, 1998). Toutefois, il n'existe aucune relation statistique supportant les observations de terrain qui relie la formation de la glace de fond à la vitesse et à la profondeur de l'écoulement.

Cette étude propose une analyse de la formation de la glace de fond basée sur un modèle de régression logistique multiple et hiérarchique à partir de données météorologiques et hydrauliques pour des rivières à lit graveleux. Le premier objectif de l'étude était de déterminer les conditions météorologiques conduisant à la formation de la glace de fond.

Le second objectif consistait à déterminer l'influence des conditions hydrauliques et de la température de l'air ainsi que leurs effets combinés sur la distribution spatiale de la glace de fond sur le lit des rivières.

#### **4.2.2 Méthodologie**

L'approche générale était de documenter durant l'hiver 2005 la présence et la distribution spatiale de la glace de fond sur trois rivières à lit graveleux situées au sud du Québec. Les travaux de terrain ont été effectués en novembre et décembre 2005 avant que la formation d'un couvert de glace complet n'arrête définitivement les travaux.

#### **Description des sites**

##### *Rivière York, Beauport et Duberger*

La rivière York est située dans la péninsule gaspésienne sur la rive sud du fleuve St-Laurent ( $48^{\circ}52'$  N,  $65^{\circ}05'$  W) et coule sur 98 km avant de terminer son cours dans la Baie de Gaspé. Elle draine une superficie de  $659 \text{ km}^2$  de territoire principalement forestier. La température moyenne en novembre et décembre est respectivement de  $-3.0^{\circ}\text{C}$  et  $-9.8^{\circ}\text{C}$  (Environnement Canada, station 7055380). La rivière Beauport est située sur la rive nord du St-Laurent près de la ville de Québec ( $46^{\circ}51'$  N,  $71^{\circ}11'$  W) et termine son cours dans le fleuve St-Laurent après 12,5 km. La rivière Duberger se trouve également dans la région de la ville de Québec à environ 15 km de la rivière Beauport et coule sur 8 km. La rivière Beauport draine une superficie de  $22 \text{ km}^2$  principalement située en milieu urbain. Les deux rivières ont une température moyenne de l'air de respectivement  $-0.7^{\circ}\text{C}$  et  $-9.1^{\circ}\text{C}$  durant les mois de novembre et décembre (Aéroport International Jean-Lesage International, station 7016294).

#### **Échantillonnage de la glace de fond**

##### *Rivière York*

Quatre sites représentant des types d'écoulement différents ont été sélectionnés sur la rivière York afin de déterminer les conditions météorologiques qui conduisent à la formation de la glace de fond. Les évaluations de présence-absence sur les sites étaient effectuées durant une visite quotidienne vers 07h00 (12 visites). Le site était classifié comme une absence de glace lorsque aucune formation de glace de fond sur le lit de la

rivière n’était observée durant la visite. À l’inverse, lorsque de la glace se formait sur un site, peu importe sa superficie, il était classifié comme une présence de glace de fond.

#### *Rivières Beauport et Duberger*

À chacun des deux sites sur les rivières Beauport et Duberger, 54 parcelles de  $0.25 \text{ m}^2$  ont été sélectionnées afin d’évaluer la présence et l’absence de glace de fond. Ces parcelles étaient situées sur 18 *transects* perpendiculaires à l’écoulement et distribuées également entre les fosses et les mouilles (Figure 6.1 p.107). La présence-absence de glace de fond était déterminée pour chacune des parcelles lors d’une visite quotidienne entre 06h00 et 08h00 (12 visites). Lorsque toutes les parcelles étaient évaluées, la glace de fond était manuellement retirée sur chacune d’elles afin de permettre à la glace de fond de se former la nuit suivante. Cette opération déplaçait une quantité négligeable de sédiments fins et selon nos observations, l’enlèvement de la glace n’influençait aucunement la formation de la glace de fond

L’évaluation des événements de présence-absence sur chacune des parcelles a été utilisée de deux façons. Premièrement, lorsqu’une absence de glace de fond sur chacune des parcelles d’un site était observée, le site était classifié comme une absence. À l’inverse, lorsqu’au minimum une parcelle avec de la glace de fond était observée, le site était classifié comme une présence de glace. Ces informations ont été utilisées avec les données de la rivière York afin de déterminer les conditions météorologiques qui conduisent à la formation de la glace de fond à l’échelle d’un tronçon de rivière (30 événements). Deuxièmement, l’évaluation des présence-absence pour chacune des parcelles a été utilisée individuellement afin d’étudier l’effet des conditions hydrauliques et météorologiques sur la distribution spatiale de la glace de fond à l’échelle des parcelles (448 parcelles durant 10 événements).

#### **Variables climatiques et hydrauliques**

À partir des données de température de l’air recueillies sur chacun des sites, des indices de degrés-heure de gel cumulés sur des périodes de 6, 8, 12, 24 et 48 heures précédant l’évaluation de la présence de glace de fond à 07h00 ont été calculé et notés *FDH-6*,

*FDH-8, FDH-12 , FDH-24 et FDH-48* respectivement. La température de l'eau mesurée sur chacun des sites a été moyennée durant des périodes de 6, 8, 12, 24 et 48 heures consécutives précédant l'évaluation de la présence de glace de fond à 07h00 et notés *W-6, W-8, W-12, W-24* et *W-48* respectivement. Sur les sites des rivières Beauport et Duberger, la vitesse moyenne et la profondeur de l'écoulement ont été mesurées au centre de chacune des parcelles durant chaque visite. De plus, le nombre de Froude ( $Fr = v^2/gd$ ) a été calculé à partir de la vitesse de courant ( $v$ ) et de la profondeur ( $d$ ).

### **Modèle logistique de formation de la glace de fond**

#### *Modèle de prédiction de la présence de glace de fond à l'échelle d'une rivière*

Un modèle de régression logistique a été utilisé pour l'analyse et la prédiction des événements de formation de glace de fond à partir des températures de l'air et de l'eau puisque la variable dépendante (présence-absence) est dichotomique. La régression logistique est une approche statistique qui permet de prédire la probabilité d'occurrence d'une variable réponse dichotomique à l'aide de plusieurs variables explicatives (Hosmer et Lemeshow, 2000). Les données décrivant la présence-absence de glace de fond à l'échelle d'une section de rivière ainsi que dix variables explicatives associées à la température de l'air (*FDH-6, FDH-8, FDH-12, FDH-24 et FDH-48*) et de l'eau (*W-6, W-8, W-12, W-24 et W-48*) ont été utilisées pour cette analyse.

#### *Modèle de prédiction de la distribution spatiale de la glace de fond à l'échelle des parcelles*

L'objectif de cette analyse était d'évaluer la probabilité de formation de glace de fond au niveau d'une parcelle selon différentes conditions météorologiques et hydrauliques à l'aide des données de présence-absence mesurées sur les parcelles de la rivière Beauport et Duberger. Le modèle incluait la variable réponse dichotomique présence-absence de glace de fond sur une parcelle alors que les variables communes à chaque parcelle sur une section de rivière tel que la température de l'air et de l'eau et les variables spécifiques à chaque parcelle (vitesse, profondeur, nombre de Froude) ont été utilisées comme variables explicatives. Afin de modéliser adéquatement les variables mesurées à l'échelle de la rivière et de la parcelle, un modèle de régression logistique hiérarchique a été

développé (Wong et Mason, 1985). Ce modèle est fondé sur l'analyse par régression logistique mais les variables explicatives sont classées en deux niveaux pour l'analyse hiérarchique. Le niveau micro était relié aux conditions hydrauliques alors que le niveau macro était associé aux conditions présentes durant une nuit et sur une rivière spécifique. Ce type de modèle permet de mesurer l'effet de chacun des niveaux respectifs sur la formation de la glace de fond.

### **Évaluation du modèle et validation**

L'évaluation de l'adéquation de chacun des modèles avec les données a été effectuée à l'aide du test de Hosmer et Lemeshow (Hosmer et Lemeshow, 2000). De plus, la méthode de la courbe *receiver-operating characteristics* (ROC) a été utilisée afin d'évaluer la performance du modèle à tous les seuils possible de probabilité à laquelle la présence de glace de fond peut être acceptée ( $0 < p < 1$ ) (Manel et al., 2001). Le seuil optimal de probabilité afin de prédire la présence ou l'absence de glace de fond tout en minimisant les chances de mauvaises classifications a été identifié à l'aide de la courbe ROC (Fielding et Bell, 1997; Manel et al., 2001).

La modélisation a été validée à l'aide de la procédure de validation croisée *leave-one-out* qui permet la séparation d'un ou plusieurs événements à partir du jeu de données (Efron, 1982). La validation croisée a été effectuée sur chacun des modèles élaborés en excluant un évènement à la fois. Finalement, le taux des cas correctement classifiés (CCR), la sensibilité (pourcentage des présences correctement prédites) et la spécificité (pourcentage des absences correctement prédites) du modèle ont été déterminés à partir de la matrice de confusion (*confusion matrix*) suite à la détermination du seuil optimal de probabilité et à la validation croisée.

#### **4.2.3 Résultats**

##### *Modèle de prédiction de la présence de glace de fond à l'échelle d'une rivière*

L'examen des données indique que la glace de fond se forme lorsque la température de l'eau est égale ou inférieure à  $0^{\circ}\text{C}$  et à partir d'une large gamme de température de l'air ( $59,3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  à  $300,0^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  FDH-12) (Table 6.1, p.102 et Figure 6.2, p.108). La glace peut donc se former à partir de températures nocturnes moyennes d'environ  $-5^{\circ}\text{C}$ . Cinq

modèles différents utilisant les indices de degrés-heure de gel cumulés durant 6 heures (*FDH-6*), 8 heures (*FDH-8*), 12 heures (*FDH-12*), 24 heures (*FDH-24*) et 48 heures (*FDH-48*) ont été utilisés afin de prédire la formation de la glace de fond. Selon le test de Wald ( $n = 21$ ,  $z = 8,01$ ,  $p > 0,005$ ), la régression logistique indique que seul les degrés-heure de gel cumulés durant 12 heures (*FDH-12*) permettent d'expliquer la présence et l'absence de la glace de fond sur une section de rivière.

L'évaluation du modèle à l'aide du test de Hosmer-Lemeshow ( $p > 0,5$ ) (Hosmer et Lemeshow, 2000), des statistiques de diagnostique de régression (Deviance delta et Pearson Chi-2 delta) et de l'aire sous la courbe ROC indique que le modèle explique bien les données et qu'il est très efficace à discriminer les événements de formation de glace de fond (Hosmer et Lemeshow, 2000) (Table 6.2, p.103). Le seuil optimal de probabilité a été fixé à 0,82 et indique que tous les événements ayant une probabilité de formation supérieure à ce seuil ont été classifié dans la catégorie présence de glace de fond. De plus, le seuil indique qu'au moins 111,7°C·hr cumulés durant 12 heures est nécessaire pour la formation de glace de fond ce qui correspond à une moyenne de -9,33°C durant la nuit. Les résultats de l'analyse indiquent que 81,3% des événements de présence (sensibilité) et que 80,0% des absences (spécificité) ont été correctement classifiés. Globalement, 80,9% des événements ont été correctement classifiés (CCR).

#### *Modèle de prédiction de la distribution spatiale de la glace de fond à l'échelle des parcelles*

Une comparaison des conditions hydrauliques présentes sur les 448 parcelles des rivières Beauport et Duberger (Table 6.3, p.104) montrent que la glace de fond se forme généralement sur des parcelles qui ont des vitesses de courant importantes (t-test,  $n = 448$ ,  $p < 0,0001$ ) (Figure 6.3a, p.109) et de faible profondeur (t-test,  $n = 448$ ,  $p < 0,05$ ) (Figure 6.3b, p.109). Les données indiquent également que la glace de fond était présente plus souvent sur des parcelles ayant un nombre de Froude élevé (t-test,  $n = 448$ ,  $p < 0,0001$ ) (Figure 6.3c, p.109).

Le nombre de Froude a été sélectionné afin de représenter le niveau micro de l'analyse hiérarchique puisqu'il combine l'effet de la vitesse et de la profondeur. Les variables du niveau macro sont (1) les degrés-heure de gel cumulés sur 12 heures (*FDH-12*) et (2) la température de l'eau moyenne durant la même période (*W-12*). La variable (*FDH-12*) a été utilisée puisque la première analyse statistique démontre que cette variable permet d'expliquer et de la prédire la formation de la glace de fond.

Le modèle final a été obtenu en utilisant la procédure par élimination à rebours (*backward removal*). Les résultats indiquent que seulement la variable du niveau micro, *Froude*, est significative selon le test de Wald (Table 6.4, p.105) et que les variables du niveau macro n'influencent pas significativement la formation de glace de fond sur une parcelle. Ces résultats suggèrent que la température de l'air n'influence pas la distribution spatiale de la glace de fond alors que le nombre de Froude est le principal facteur de formation.

L'évaluation du modèle à l'aide du test de Hosmer-Lemeshow ( $p > 0,38$ ), des statistiques de diagnostique de régression (Pearson Chi-2 delta) et de l'aire sous la courbe ROC indique que le modèle correspond aux données et qu'il est moyennement efficace à discriminer les évènements de formation de glace de fond. (Table 6.5, p.106) (Hosmer et Lemeshow, 2000).

Le seuil de probabilité optimal a été fixé à 0,62 et indique que tous les évènements ayant une probabilité de formation supérieure à ce seuil ont été classifiés dans la catégorie présence de glace de fond. De plus, ce seuil indique qu'un nombre de Froude supérieur à 0,01 est favorable à la formation de la glace de fond sur une parcelle. L'analyse des résultats indique que 71,5% des évènements de présence (sensibilité) et que 51,3% des absences (spécificité) ont été correctement classifiés ce qui suggère que le modèle est plus performant pour la prédiction des évènements de présence de glace de fond. Globalement, 67,5% des évènements de formation de glace de fond sur une parcelle ont été correctement classifiés (CCR) par le modèle.

#### 4.2.4 Discussion

##### *Modèle de prédiction de la présence de glace de fond à l'échelle d'une rivière*

En utilisant les degrés-heure de gel cumulés durant 12 heures (*FDH-12*), le modèle permet de prédire 80,5% des évènements de formation de glace de fond et confirme l'importance de la température de l'air dans la formation de la glace de fond. Ce résultat est différent des résultats de Terada et al. (1998) qui ont observée que la formation de la glace de fond était corrélée avec les degrés-heure de gel cumulés durant 6 heures. Toutefois, nos résultats, par l'utilisation d'une variable qui cumule la température durant une plus longue période, suggèrent que le début de la nuit est également une période critique pour la formation de la glace. L'analyse indique aussi que sur les rivières York, Beauport et Duberger, la glace de fond se forme généralement à une température de l'air moyenne de -9,3°C durant la nuit ce qui correspond aux résultats de Terada et al. (1998).

À deux occasions, des évènements survenus sur la rivière York, ont été incorrectement classifiés dans la catégorie absence de glace par le modèle. Durant ces évènements, la glace de fond s'est formée malgré des valeurs de *FDH-12* relativement faibles (59.3°C-h et 96.7°C-h *FDH-12* respectivement). Au cours de ces deux épisodes, la température a diminuée considérablement durant la dernière partie de la nuit initiant possiblement la formation de glace de fond durant une courte période de temps. Ces résultats suggèrent que même si *FDH-12* est une variable explicative significative, une période de six heures consécutives de température froide (Terada *et al.*, 1998) peut être suffisante pour initier la formation de glace de fond.

##### *Modèle de prédiction de la distribution spatiale de la glace de fond à l'échelle des parcelles*

Les résultats de l'analyse de la distribution spatiale de la glace de fond sur les parcelles situées sur les rivières Beauport et Duberger indiquent que le modèle hiérarchique permet de prédire 67,5% des évènements de formation de glace de fond. Ce modèle logistique est la première tentative afin de prédire la distribution spatiale de la glace de fond malgré de nombreux autres travaux de terrain et de laboratoire (Arden et Wigle, 1972; Parkinson, 1984; Tsang, 1992; Terada *et al.*, 1998).

L'examen des résultats indique que le modèle est plus performant lors de la prédiction des événements de présence (71,5%) que lors des événements d'absence (50,0%) de glace. Cette différence peut être causée par la méthode de classification utilisée lors de l'analyse qui favorise le groupe d'événements le plus nombreux (présence) (Hosmer et Lemeshow, 2000). Toutefois, d'autres variables, tel que la taille des sédiments et la submersion relative, contrôlent également la formation de glace de fond sur le lit d'une rivière. La formation de la glace de fond est de façon générale favorisée par un substrat grossier (Tsang, 1982; Ashton, 1986; Prowse, 1994; Hammar *et al.*, 1996; Shen, 2003a) et l'addition d'une variable décrivant la contribution de la taille des sédiments pourrait probablement améliorer les performances du modèle.

Le modèle hiérarchique indique que le nombre de Froude est le facteur étudié qui contrôle la distribution de la glace de fond sur les parcelles des rivières Beauport et Duberger. Le nombre de Froude critique au-dessus duquel la glace de fond se forme sur les rivières Beauport et Duberger est de 0,1 ce qui est légèrement inférieur aux valeurs de 0,15 et 0,2 obtenues par Kerr *et al.* (1997) et Terada *et al.* (1998) respectivement. Sur les rivières Beauport et Duberger, la présence de glace de fond a été observée sur des parcelles composées de sédiments fin ce qui est plutôt inhabituel comparé aux observations rapportées dans la littérature (Arden et Wigle, 1972; Terada *et al.*, 1998). Toutefois, la formation de glace sur ces parcelles pourrait avoir été causée par l'accrétion de cristaux de frasils sur de la glace de fond déjà formée au lieu de l'accrétion du frasil sur le substrat. Les observations de terrain accomplies durant cette étude indiquent que ces parcelles étaient généralement situées directement en amont des seuils. L'accrétion continue de cristaux de frasil sur le front amont de la glace de fond situé au début d'un seuil pourrait avoir favorisé la progression vers l'amont de la glace de fond.

Nos résultats démontrent également que lorsque la température de l'air a atteint la valeur critique de formation, la distribution spatiale de la glace de fond n'est affectée que par les conditions hydrauliques.

#### **4.3 Conclusion générale**

Ce projet de maîtrise avait comme premier objectif principal d'étudier l'effet de la période hivernale sur la mortalité interstade de l'œuf à l'alevin (0+) et de l'alevin au tacon (1+) du saumon atlantique juvénile. En règle générale, l'hiver est considéré comme une période difficile pour les salmonidés. Nos observations montrent que sur certaines rivières, un hiver rigoureux peut, au contraire, offrir un habitat stable favorisant la survie durant cette période. L'établissement d'un couvert de glace de surface permanent permettrait d'offrir une protection contre les fluctuations de température et contre la production de frasil et de glace de fond. De plus, nos résultats suggèrent fortement que ces deux types de glace sont nuisibles pour la survie des saumons juvéniles puisqu'ils sont associés à une diminution de la qualité et de la quantité de l'habitat disponible.

Nos observations suggèrent également que l'effet de l'hiver et de la glace de rivière pourrait être différent selon la localisation géographique de la rivière. Les rivières situées dans des climats ayant des hivers généralement doux seraient associées à des taux de mortalité croissant lorsque les hivers deviennent légèrement plus froids. À l'inverse, les rivières situées dans des régions plus froides seraient possiblement associées à des taux de mortalité décroissant lorsque les hivers sur ces rivières deviennent plus rigoureux. Cette différence pourrait potentiellement s'expliquer par un régime de glace différent sur ces rivières.

Le second objectif général du projet de maîtrise consistait à élaborer un modèle statistique de formation de la glace de fond sur des petites rivières à partir de données de terrain. Nos résultats démontrent qu'il est possible de prédire les évènements de formation de glace de fond sur une rivière en utilisant la température de l'air cumulée sur 12 heures. De plus, nos résultats montrent, à l'instar des résultats déjà publiés, que la glace de fond se forme lorsque la température de l'air moyenne durant la nuit est inférieure à -9,3°C.

De plus, à partir de nos données, un premier modèle de prédiction de la distribution spatiale de la glace de fond sur le lit d'une rivière a été créé. Ce modèle nécessite un raffinement, mais pourrait éventuellement être inclus dans un modèle hydro-dynamique

afin de prédire l'étendu de la formation de la glace de fond en relation avec la température et les conditions hydrauliques.

Nos observations suggèrent également un mécanisme alternatif de formation de la glace de fond sur un lit de rivière lorsque les conditions hydrauliques sont peu propices à sa formation. Toutefois, ce mécanisme nécessite une confirmation à l'aide de nouvelles observations de terrain.

Chapitre 5

**Effect of winter harshness on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)**

**egg to fry and fry to parr over-winter mortality**

Effect of winter harshness on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)

egg to fry and fry to parr over-winter mortality

Bisaillon, Jean-François and Bergeron, Normand E.

INRS-Eau, Terre et Environnement,

840 rue de la Couronne, Québec, QC, G1K 9A9

Tel.: 514-767-3258 (J.F. Bisaillon), 418-654-3703

[jean-francois.bisaillon@inrs-ete.quebec.ca](mailto:jean-francois.bisaillon@inrs-ete.quebec.ca), [normand.bergeron@inrs-ete.quebec.ca](mailto:normand.bergeron@inrs-ete.quebec.ca)

Caron, François

Société de la faune et des parcs du Québec,

675, boul. René-Lévesque Est, Québec, QC, G1R 5V7

Tel.: 418-521-3955

[francois.caron@fapaq.gouv.qc.ca](mailto:francois.caron@fapaq.gouv.qc.ca)

### 5.1 Abstract

Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) egg to fry (0+) and fry to parr (1+) over-winter mortality were studied on the Trinité and Indian rivers as well as Catamaran Brook (Eastern Canada) between 1983 and 1992. On the Trinité River, egg to fry mortality was negatively correlated with cumulated freezing degree-day between October 1<sup>st</sup> and January 31<sup>st</sup> and positively correlated with the variation between mean monthly discharge in November and February. These results suggest that on the Trinité River eggs may benefit from the protection of a complete ice cover formed during cold winters and are sensitive to discharge variation that can possibly freeze them within the substrate. On Indian River and Catamaran Brook, the climate is milder as well as egg to fry mortality compared to Trinité River. This difference observed in mortality rates between the Trinité and Indian rivers and Catamaran Brook suggest that the impact of winter harshness on eggs is potentially different according to rivers size or climatic regime. Secondly, on the Trinité River and Catamaran Brook, fry to parr (1+) mortality was negatively correlated with cumulated freezing-degree day in January and February. In addition, fry to parr mortality on the Trinité River was positively associated to the meteorological conditions conducive to frazil and anchor ice formation. The results suggest that cold winters and associated ice cover may be beneficial for overwintering fry but that juveniles are sensitive to frazil ice and anchor ice formation.

**Keywords:** winter, mortality, river ice, egg, fry, parr, Atlantic salmon

### 5.2 Introduction

Although winter mortality has long been regarded as a major factor affecting salmonid survival in cold-region rivers (Reimers, 1957; Needham and Jones, 1959; Power *et al.*, 1993; Cunjak, 1996), only few studies have explored the impact of winter harshness on juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) inter-stage mortality. In many of these studies, winter harshness was described by hydrological and meteorological variables that were averaged during the entire winter season. In two studies conducted in Eastern Atlantic

Canada, egg to fry mortality was found negatively related to mean winter discharge and air temperature (Chadwick, 1982; Cunjak *et al.*, 1998). Similarly in Normandie (France), Baglinière *et al.* (1993) noted higher egg to fry inter-stage mortality during cold winters. However, on these rivers, fry to parr mortality were not explained by cold winters. In Eastern Canada, fry to parr mortality increased with low winter stream discharge (Gibson and Myers, 1988; Cunjak *et al.*, 1998). In their review of juvenile salmon mortality on six rivers, Gibson and Myers (1988) found that high juvenile mortality was related to low mean February discharge. They also concluded that this variable could be used as a proxy to winter harshness. In many cases, the hydrological and meteorological winter conditions acted as a bottleneck on the Atlantic salmon juvenile population (Cunjak and Therrien, 1998). Conversely, biological factors such as habitat crowding, reduced food availability and predation do not appear to be critical for winter mortality (Reimers, 1957; Hunt, 1969; Holtby, 1988; Cunjak *et al.*, 1998; Jakober *et al.*, 1998) even if competition for suitable habitats have been documented (Cunjak, 1988b; Heggenes *et al.*, 1993; Harwood *et al.*, 2002).

The cold season is associated with diminishing air and water temperature, limited discharge and production of various forms of river ice. Beginning in late autumn, the freeze-up period is typically associated with declining air and water temperatures, periodic sub-freezing water temperature, flow recession and subsurface ice production (Beltaos *et al.*, 1993; Prowse, 2001a). In response to the declining water temperature, juvenile salmonids alter their diel activity patterns and shift microhabitats (Jakober *et al.*, 1998). In addition, modification of their habitat by frazil ice and anchor ice force the juveniles to move to find more suitable habitats (Brown and Mackay, 1995b; Brown, 1999; Simpkins *et al.*, 2000; Roussel *et al.*, 2004) expending critical energy reserves in physically exhaustive conditions (Walsh and Calkins, 1986). Eggs are particularly vulnerable to winter conditions due to their immobility (Cunjak *et al.*, 1998) and may suffer greatly from flow restriction when anchor ice covers the redds (Stuart, 1953; Calkins, 1989; Power *et al.*, 1993; Brown *et al.*, 2000). Following freeze-up, the main winter period is characterized by low discharge, stable water temperature and thickening of the ice cover. Low discharge combined with a thick ice cover can reduce habitat

availability for juveniles and promote freezing of the eggs within the redds (Walsh and Calkins, 1986). Eggs that are deposited at high discharge and thus located on higher riverbed location are particularly at risk of being dried out and frozen during the main winter low flow period (Walsh and Calkins, 1986). The ice break-up period at the end of the winter, is associated with ice runs, fluctuating water levels and high flow velocities causing significant bed movement and erosion (Calkins, 1989). Although river-ice break-up is primarily a spring event, it can occur at any time during the winter season. Given the variability in seasonal timing, river ice break-up poses a potential threat to all life-stages of river biota, the less mobile being the more vulnerable (Prowse, 2001b).

Since the winter season is characterized by many distinct events, broad temporal scale variables such as mean winter temperature may not be appropriate to explain winter mortality. For example, air temperature averaged over the entire winter period does not give any indications of cold spells that occurred at the beginning of the season and producing large amount of frazil ice. Atlantic salmon mortality may be related to many hydrologic, climatic and ice related events of short duration during the entire winter season. However, existing studies have focused on one or two variables to describe the entire range of physical conditions prevailing through the winter. In addition, these studies have examined rivers located in costal regions where winters are usually milder than for rivers located in boreal regions. The impact of the winter season on juvenile mortality is likely to be different among these rivers due to dissimilarities in the climate and river ice regime. However, no studies have examined the difference between mortality on rivers located in different climatic zones.

In this paper, we assessed the effect of winter harshness on Atlantic salmon egg to fry (0+) and fry to parr (1+) over-winter mortality on the Trinité River. In particular, the impact of discharge, air temperature and ice events affecting winter mortality was explored with a special attention given to other studies conducted on rivers located in Eastern Canada and presenting different hydro-climatic conditions.

### 5.3 Material and methods

#### Study sites

##### *Trinité River*

The Trinité River ( $49^{\circ}25' N$ ;  $67^{\circ}18' W$ ) is located on the north shore of the St-Lawrence River (Québec, Canada) and drains an area of  $562 \text{ km}^2$  over granitic rocks of the Canadian Shield. The main stem of the river is 80 km long but only the first 70 km is available to salmon. The Trinité River basin is characterized by a boreal climate (Anonymous, 2005) with average monthly air temperatures lower than  $0^{\circ}\text{C}$  from November to April (Environment Canada, station 7042749). The coldest months are generally January and February with monthly means temperature near  $-15^{\circ}\text{C}$ . Because discharge data for the Trinité River was only available for the summer period, the winter discharge was obtained from a correlation between the common summer discharge series of the Godbout River (Centre d'expertise hydrique, Ministère de l'environnement du Québec, Government of Québec, gauge 071401, 1983-1992) and the Trinité River ( $r^2 = 0.70$ ,  $n = 1284$ ,  $P < 0.001$ ). The Godbout River is located 25 km west of the Trinité River and it was assumed that both rivers were under similar river ice and hydrologic regimes. Between 1983 and 1992, the estimated mean winter discharge (October to April) on the Trinité River was  $9.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  and the lowest monthly discharge estimated during the winter was  $4.9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . The river is generally covered by ice from mid-November until the end of April.

##### *Indian River and Catamaran Brook*

Indian River is located in north-eastern Newfoundland ( $49^{\circ}30' N$ ;  $54^{\circ}04' W$ ) and Catamaran Brook is located in central northern New Brunswick ( $46^{\circ}52' N$ ;  $66^{\circ}06' W$ ). Although both rivers are characterized by an Atlantic maritime climate (Anonymous, 2005), they experience slightly different temperature regime. On these rivers, January and February are the coldest months with average monthly air temperatures on Indian River ( $-11.6^{\circ}\text{C}$  and  $-11.7^{\circ}\text{C}$ ) (Environment Canada, station 8403700) slightly lower than Catamaran Brook ( $9.0^{\circ}\text{C}$  and  $-10.5^{\circ}\text{C}$ ) (Environment Canada, station 8101200). Typically, both rivers experience sub-zero air temperature between November and March.

There are no discharge data available for Indian River but on Catamaran Brook, the mean winter discharge (November-March) is less than  $1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  and a complete ice cover typically forms by early December and persists until mid-April (Cunjak and Therrien, 1998).

### **Abundance and inter-stage mortality**

#### *Trinité River*

Inter-stage mortality was estimated from egg, fry and parr abundance calculated by the Société de la faune et des parcs du Québec (FAPAQ, Government of Québec) between 1983 and 1992. Egg deposition was estimated from the weight and abundance of spawners captured at a fish ladder near the river mouth (Caron and Fournier, 1994; Caron *et al.*, 2004). Spawners count and weight were multiplied by a fecundity factor (grils: 2 430 eggs  $\text{kg}^{-1}$ ; multi-sea-winter: 1 535 eggs  $\text{kg}^{-1}$ ) and then summed up to estimate the annual egg production on the river (Caron *et al.*, 2004). No correction for predation, egg loss from retention in the female body cavity and non-fertilization during spawning was applied to the estimated egg abundance.

Electrofishing data collected by the FAPAQ between 1984 and 1992 was used to estimate the annual abundance of fry (0+) and parr (1+). From photo interpretation, the river was classified into four habitat units: pool, riffle, rapid and run (Clavet, 1982). These habitats covered respectively 46 100  $\text{m}^2$  (3%), 778 300  $\text{m}^2$  (50%), 312 700  $\text{m}^2$  (20%), 427 300  $\text{m}^2$  (27%) of the river superficies available to the fish (Caron and Fournier, 1994). A total of 84 sampling parcels were randomly selected among the four habitat type following a random stratified procedure. One parcel per habitat type was sampled using three-pass electrofishing removal and closed by barrier nets. Three-pass removal data were analyzed using the Zippin maximum likelihood removal estimator (Zippin, 1958) applying the explicit solution for three pass removal (Junge and Libosvarsky, 1965). The mean capture probability at the first pass was calculated from the data obtained from the closed parcels. The remaining parcels were kept open and sampled using a single-pass removal procedure. The relative abundance within open parcels was calculated using the mean capture probability calibrated for each type of habitat (Ricker, 1975). Average juvenile

densities were estimated for each habitat from relative abundance calculated for closed and open parcels. Total abundance within each habitat was then computed by multiplying juvenile density by the area of the respective habitat. Fish scales were used for age determination of the juveniles. Juvenile population were then distributed in different age classes according to age-length frequency distribution of the catches. Parr older than 1+ were excluded of the analysis because migration starts at that age (Caron *et al.*, 2004) and migration data could not be reliably matched with abundance data. Thus only fry (0+) and parr (1+) abundance data was used in the present analysis.

Egg to fry (0+) mortality  $M_E$  (%) was derived from the estimated total egg deposition ( $E$ ) at year  $t$  and fry abundance ( $F$ ) at year  $t+1$  [ $M_E = (E_t - F_{t+1})/E_t * 100$ ]. Similarly, fry (0+) to parr (1+) mortality ( $M_F$ ) was estimated from fry abundance at year  $t$  and parr abundance ( $P$ ) at year  $t+1$  [ $M_F = (F_t - P_{t+1})/F_t * 100$ ] (Table 5.1).

#### *Indian River and Catamaran Brook*

Egg to fry (0+) survival rates estimated between 1963 and 1972 for Indian River (Chadwick, 1982) and egg to fry and fry to parr (1+) survival rates estimated between 1990 and 1996 for Catamaran Brook (Cunjak *et al.*, 1998; Cunjak and Therrien, 1998) were converted to mortality estimates for consistency with our methodology (Mortality (%) = 100-Survival (%)). A detailed description of the methodology for the estimation of egg deposition and juvenile abundance can be found in Chadwick (Chadwick, 1982) for Indian River and in Cunjak and Therrien (1998) for Catamaran Brook.

#### **Hydro-climatic data**

The winter period was divided in three periods related to the river ice regime and hydro-climatic variables were grouped in three distinct groups (Table 5.2). These periods are, in chronological order, the freeze-up period (October to December), the main winter period (January-February) and the break-up period (March-April). The first group of variables was composed of variables derived from air temperature such as cumulated freezing degree-day indices calculated for each month and for the three winter periods. In addition, freezing degree-days indices were calculated from October 1<sup>st</sup> until the end of

each month to evaluate the cumulative impact of air temperature. The cumulated freezing degree-days index (FDD) was selected to describe the influence of the atmosphere on the river and has already been used as a reliable estimation of river ice growth (Ashton, 1986; Hiramaya *et al.*, 2002). In addition, two variables that compiled the number of days when the mean daily temperatures is inferior to -10°C in November and December were created. These variables were used to assess frazil ice production and anchor ice formation during the freeze-up period since anchor ice is usually observed when air temperature is below -10°C (Hirayama *et al.*, 1997). The second group of variables was related to discharge and included mean monthly discharges, mean winter discharge and the peak flow reached during the break-up period. Discharge ratios between the autumn and the winter periods were calculated in order to evaluate the variation of flow level between these periods. Finally, the third group of variable is directly related to river ice and included the freeze-up date of the ice cover.

### **Data analysis**

A total of 30 environmental variables ( $k$ ) (Table 5.2) were analysed to look for possible relationships between the hydro-climatic conditions and inter-stage mortality. Firstly, simple linear regressions were used between the hydro-climatic variables and mortality on the Trinité River. The Bonferroni technique for limiting the overall experimentwise error rate was applied as a precautionary principle. The approach aim was to reduce the probability of making a type I error using a set of  $k$  significance tests (Sokal and Rohlf, 1995). The Bonferroni correction lowered the significance level at  $\alpha' = 0.0017$  ( $\alpha' = \alpha/k$ ) for an equivalent and non-corrected level of significance level ( $\alpha$ ) of 0.05. Since Indian River discharge data were unavailable, only significant temperature variables from the Trinité River were tested on Indian River and Catamaran Brook. Predictors in multiple regressions analysis were limited to two in order to obtain significant results comparatively to the small sample size ( $n = 9$  and 8 years). In addition, significant predictors in a multiple regression were accepted as valid only if they were not cross-correlated. Statistical analysis were performed in Statistica 6.0 computer package (Statsoft, 2001).

## 5.4 Results

### Eggs and juveniles abundances

#### *Trinité River*

From 1983 to 1991, estimation of annual egg deposition on the Trinité River ranged between 2·19 million to 4·17 million eggs (mean = 2·62 million) (Table 5.1). From 1984 to 1992, annual fry abundance ranged from 196 679 to 386 215 individuals (mean = 292 798) and annual parr abundance from 76 772 to 203 639 individuals (mean = 130 889) (Table 5.1). The highest egg deposition value recorded in 1988-1989 was considered exceptionally high (Grubbs' Test,  $n = 9$ ,  $P > 0\cdot05$ ) but was associated to a high return rate of multi-sea-winter spawners and thus was included in the analysis (Caron and Fournier, 1994).

### Egg to fry mortality

#### *Trinité River*

Annual estimates of egg to fry mortality ranged from 83·3 to 93·3% (Mean = 88·0%) for the period studied (Table 5.1). Density-dependent relationships between egg deposition, fry abundance and egg to fry mortality were explored but no significant relationships were found. However, the analysis showed that egg to fry mortality can be explained by climatic and hydrologic factors. The results of the analysis of the hydro-climatic factors included in this study indicate that only the freezing-degree-day cumulated from October 1<sup>st</sup> to January 31<sup>st</sup> ( $FDD_{O-J}$ ) was significantly related to egg to fry mortality. This variable was found to explain up to 81% of the inter-annual mortality variance and is negatively correlated to mortality ( $r^2 = 0\cdot81$ ,  $n = 9$ ,  $\beta = -0\cdot90$ ,  $P < 0\cdot01$ ) indicating that mortality decreased during cold winters. Multiple regression analysis indicated that egg to fry mortality was negatively correlated ( $\beta_1 = -0\cdot75$ ) with freezing-degree-day cumulated from October 1<sup>st</sup> to January 31<sup>st</sup> ( $FDD_{O-J}$ ) and positively correlated ( $\beta_2 = 0\cdot39$ ) with monthly flow ratio between November and February ( $Flow_{N/F}$ ) ( $adj. r^2 = 0\cdot92$ ,  $n = 9$ ,  $P < 0\cdot05$ ) (Table 5.3). Both variables were not significantly correlated and considered valid predictors of mortality ( $r = -0\cdot31$ ,  $n = 9$ ,  $P > 0\cdot05$ ). The variable  $Flow_{N/F}$  is larger when discharge is high at freeze-up (November) and low during the main winter period

(February). These results indicate that mortality increases during high autumn discharge, followed by low winter discharge during a mild early winter (October to January). These results suggest the importance of air temperature during the beginning of the winter as well as the impact of discharge fluctuations between the autumn and the main winter periods.

#### *Rivers comparison*

Inter-annual egg to fry mortality on Indian River between 1963 and 1972 ranged from 33·1 to 88·0% (mean = 62·5%). Chadwick (1982) have demonstrated that on this river, egg to fry mortality was caused by cold winters (mean winter temperature) combined to large variation in discharge between the spawning period and the main winter period. On Catamaran Brook, egg to fry mortality between 1990 and 1996 ranged from 39·0 to 90·8% (mean = 69·3%) (Cunjak and Therrien, 1998). Increased mortality on Catamaran Brook was correlated with low mean winter discharge.

Mortalities from Trinité and Indian rivers as well as Catamaran Brook were compared. The analysis indicates that egg to fry mortality rates for Indian River and Catamaran Brook were significantly similar (Mann-Whitney U-Test,  $P > 0\cdot05$ ). However, mortality was superior on Trinité River compared to Catamaran Brook and Indian River (Mann-Whitney U-Test,  $P < 0\cdot05$ ). These results and the Figure 5.1 suggests the existence of a general positive trend between mortality and air temperature indicating that mortality increases when the freeze-up and the main winter periods are colder. Furthermore, Figure 5.1 shows that the mortality rates peak at approximately 600 to 800°C-day which is the intermediate range of temperature found on these rivers. This observation suggests that the harshest winter conditions for eggs are associated to moderately cold winters.

#### **Fry to parr mortality**

##### *Trinité River*

Annual estimates of fry to parr mortality between 1984 and 1992 ranged from 42·9 to 73·3% (mean = 59·8%) (Table 5.1). However, one mortality rate was excluded from further analysis because it was negative. For instance, fry abundance reached its lowest

value in 1988 while parr abundance peaked in 1989 which resulted in a negative mortality value for the 1988-1989 winter. The electrofishing data collected in 1988 might be slightly underestimated due to unusual rainy weather during the sampling period which possibly resulted in a lower parr abundance estimate (F. Caron, personal communication).

Density-dependent relationships between fry and parr abundance and inter-stage mortality were explored but no significant relationships were found. However, the analysis showed that fry to parr mortality can be explained by climatic and hydrologic factors. Simple linear regression analysis suggest that fry to parr mortality was negatively correlated ( $r^2 = 0.91$ ,  $n = 7$ ,  $\beta = -0.95$ ,  $P < 0.01$ ) with cumulated FDD during January and February ( $FDD_{JF}$ ) (Table 5.3) signifying that mortality is higher during mild winters. Multiple regression analysis indicated that fry to parr mortality was negatively correlated ( $\beta_1 = -1.02$ ) with FDD cumulated during January and February ( $FDD_{JF}$ ) and positively correlated ( $\beta_2 = 0.27$ ) with the number of days when mean daily air temperature in December is inferior to  $-10^\circ\text{C}$  ( $Inf -10_D$ ) ( $adj. r^2 = 0.97$ ,  $n = 7$ ,  $P < 0.05$ ) (Table 5.3). These variables were not significantly cross-correlated and considered valid predictors of mortality ( $r = 0.21$ ,  $n = 9$ ,  $P > 0.05$ ). These results strongly suggest that episodes of frazil and anchor ice formation in December combined with a mild main winter period are detrimental to juvenile salmon.

#### *Rivers comparisons*

Results from Catamaran Brook were compared with those obtained for the Trinité River. Fry to parr inter-annual mortality between 1990 and 1996 on Catamaran Book ranged from 25·3 to 86·0% (mean = 66·9%). Cunjak and Therrien (1998) associated the highest mortality event of their study to a midwinter thaw and freshet which resulted in bed erosion. In addition, according to Cunjak and Therrien, up to 72% of the mortality variability was explained by mean winter discharge (Cunjak *et al.*, 1998). However, the results of this study indicated that fry to parr mortality on Catamaran Brook had a strong negative correlation with cumulated FDD during January and February ( $FDD_{JF}$ ) ( $adj. r^2 = 0.94$ ,  $n = 5$ ,  $P < 0.01$ ) after exclusion of one outlier (Grubbs' test,  $n = 6$ ,  $P < 0.05$ ) (Figure 5.2).

In addition, the analysis indicates that fry to parr mortality rates for Catamaran Brook were significantly superior to mortality on the Trinité River (Mann-Whitney U-Test,  $n = 7$ ,  $P < 0.05$ ). These results as well as the Figure 5.2 suggest the existence of a general negative trend between mortality and air temperature indicating that harshest winter conditions for fry are associated to moderately cold winters.

## 5.5 Discussion

### Egg to fry mortality

The results of the analysis of the Trinité River data demonstrate the existence of a strong and significant negative relationship between the inter-annual egg to fry mortality and winter coldness. On rivers located in boreal climate, a cold winter ( $FDD_{0.1} \approx 1\,000\text{--}1\,100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ) may be conducive to the formation of a complete and thick ice cover. A thicker ice cover over much of the stream would act as an insulator sufficient to prevent heat losses and thus prevent frazil and anchor ice formation (Needham and Jones, 1959). Conversely, during mild winters on the Trinité River, ( $FDD_{0.1} \approx 700\text{--}800^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ) some portion of the river, usually fast flowing water, may stay free from ice. During cold nights, water in these open sections will be supercooled and will contribute to the generation of frazil ice and to anchor ice formation. The stream conditions selected by salmonids for spawning are known to be favourable to anchor ice formation (Beltaos *et al.*, 1993) and the eggs are particularly vulnerable to these winter conditions due to their immobility. As a result of anchor ice formation, eggs may freeze into the substrate (McNeil, 1966; Reiser and Weshe, 1979; Walsh and Calkins, 1986) or suffer from the restriction of the intergranular flow causing a depletion in dissolved oxygen within the substrate and limiting the elimination of metabolic waste (Stuart, 1953; Bakkala, 1970; Walsh and Calkins, 1986; Calkins, 1989; Power *et al.*, 1993; Cunjak *et al.*, 1998; Beltaos, 2000). Thus, mild winters on boreal rivers as well as sub-surface ice production may be detrimental to the survival of the eggs.

These results of the Trinité River are opposite to the findings of Chadwick (1982) on Indian River and of Cunjak (1998) on Catamaran Brook who observed a positive relationship between cold winters and egg to fry mortality. These disparities might be explained by the differences in winter coldness on these rivers and its associated river ice conditions. For example, winters on Indian River and Catamaran Brook, are generally milder than winters on the Trinité River. During mild winter ( $FDD_{o.J} \approx 250^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ) on these rivers, lateral ice cover may form on the shore and around objects protruding above the flow but the cover is less likely to grow laterally and vertically. In addition, climatic conditions during mild winters are less favourable to the production of supercooled water, frazil ice and anchor ice which are known to be detrimental to salmon eggs survival. However, rivers that are located in these regions are also susceptible to experience cold winters ( $FDD_{o.J} \approx 700^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ) and high egg to fry mortality rates. During these winters, river ice is likely to cover more extensively the river but would be insufficient to freeze-up the fastest sections of the flow. Since open section of rapids and riffles are associated to frazil production and anchor ice formation, egg to fry mortality is likely to increase.

It is interesting to note that egg to fry mortality rates reported for the three rivers peak at approximately  $650\text{--}800^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ . This value corresponds to cold winters for rivers located in maritime regions and to mild winters for rivers located in boreal regions. This intermediate FDD value could be associated to the most variable meteorological and river ice conditions and ultimately to the highest mortality rate. Thus, influence of temperature on egg to fry mortality may be different depending on the geographical location of the river which could explain the difference in mortality observed between the rivers. In addition to the meteorological conditions, river size could also partly explain the different relationship observed in this study. Depending of the river size, accumulated freezing degree-day necessary to decrease the water temperature and to form river ice might be different. For example, the Trinité River might need colder winters for the formation of a complete ice cover compared to the Catamaran Brook which could influence egg to fry mortality rate.

The results of the analysis of the Trinité River data also indicates that discharge in combination with air temperature is playing an additional role on egg to fry inter-stage winter mortality. On the Trinité River, large variation of discharge between the freeze-up period (November) and the main winter period (February) increases egg to fry mortality. The freeze-up period on the Trinité River correspond to the end of the spawning period and egg to fry mortality increases especially when the eggs are deposited during high flow and when discharge during the main winter period is low. On Indian River, Chadwick (1982) also found that large fluctuation in discharge between the spawning period and the main winter period was detrimental to the eggs. High discharge and water level during the spawning period increases the surface available to the female to deposit their eggs and redds located near the banks could be dewatered when the water level drops during the winter. During winters of large flow variations, redds may be dewatered promoting freezing of the eggs within the substrate (Walsh and Calkins, 1986).

### **Fry to parr mortality**

The results of the analysis of the Trinité River and Catamaran Brook data show that higher rate of fry to parr (1+) mortality is associated to mild winters (January and February). These results are opposite to what is generally found in the literature. For example, in Normandie (Baglinière *et al.*, 1993) and Newfoundland (Chadwick, 1982) fry to parr mortality was greater during cold winters. Many other studies exploring salmonids life cycle, winter mortality and behaviour have been conducted during the past 50 years (Needham and Jones, 1959; Hunt, 1969; Chadwick, 1982; Baglinière *et al.*, 1993; Smith and Griffith, 1994; Brown and Mackay, 1995a; Meyer and Griffith, 1997; Cunjak and Therrien, 1998; Jakober *et al.*, 1998; Whalen *et al.*, 1999; Roussel *et al.*, 2004) but most of these researches were conducted in milder climate and on smaller rivers than the Trinité River. Among these studies, many concluded that cold weather and associated surface and sub-surface ice formation have negative impacts on salmonids and may be the harshest condition that fish may encounter (Chisholm *et al.*, 1987). However, similarly to egg to fry mortality on the Trinité River, cold winters on boreal rivers may be protective for over-wintering juveniles. Cold weather, especially during January and February, as suggested by our results, is related to lower mortality on the

Trinité River and on the Catamaran Brook. These climatic conditions are conducive to the formation of a complete and thick ice cover, especially over fast flowing water and may be protective against water temperature fluctuation, frazil ice production and anchor ice formation. In addition, river ice conditions promoted by a cold main winter period are likely to be more stable and predictable. These conditions might increase habitat availability and reduce juvenile movements during a period of critically limited energy reserve which is recognized to negatively affect the survival of young salmonids (Maciolek and Needham, 1952; Needham and Jones, 1959; Chisholm *et al.*, 1987; Cunjak and Rendall, 1993; Brown and Mackay, 1995a; Jakober *et al.*, 1998; Brown, 1999; Whalen *et al.*, 1999; Simpkins *et al.*, 2000; Roussel *et al.*, 2004).

The highest mortality rates for the Trinité River and Catamaran Brook are observed at the lowest value of cumulated freezing degree-day ( $FDD_{JF} = 550^{\circ}\text{C-d}$ ). From field observations, Chisholm *et al.* (1987) proposed that the harshest winter conditions are encountered at mid-elevation where surface ice cover is incomplete and anchor ice frequently observed. These observations are confirmed by Brown (1999) who observed that conditions with multiple and recurring freezing-thawing cycles leading to anchor ice events are hazardous for trout. If conditions with unstable ice conditions are detrimental to salmon and trout, a complete and stable ice cover might be beneficial to the salmonids. Calkins (1989) has proposed that there is no direct evidence that surface ice cover limits fry and parr habitat. The ice cover may provide protection against predation from birds and mammals (Power *et al.*, 1993). Furthermore, the ice cover may play a positive role on the energy budget of Atlantic salmon by raising food consumption (Finstad *et al.*, 2004; Parrish *et al.*, 2005) and decreasing resting metabolic rates (Crawshaw, 1984; Finstad *et al.*, 2004) decreasing the energy losses during a critical period.

The results of the analysis of the Trinité River data also indicates that sub-surface ice have negative impacts on fry to parr mortality particularly during the freeze-up period. Early winter is a stressful period of acclimatization to a changing environment (Cunjak and Therrien, 1998) and is critical for juvenile trout survival especially during their first winter (Smith and Griffith, 1994). Modification of their habitat by frazil and anchor ice

might force the juveniles to move and find a new shelter (Brown and Mackay, 1995b; Brown, 1999) using critical energy reserves (Walsh and Calkins, 1986). Additionally, Beltaos *et al.* (1993) have noted that frazil ice can directly harm or kill salmons by plugging their gills causing important problems for gaseous exchanges.

### Density-dependent mortality

On Trinité River no significant egg to fry and fry to parr mortality density-dependent relationships were found. Conversely, on Catamaran Brook, low egg to fry survival has been associated with high density of spawning by Cunjak and Therrien (1998). Increased predation risk and superposition of redds were among the mechanisms suggested by the authors to explain the relationship between mortality and egg density. For juveniles, winter mortality may reflect density-dependent use of shelter (Heggenes *et al.*, 1993; Armstrong and Griffith, 2001) since over-wintering salmonids population may be severely limited by the availability of suitable sheltering habitat in streams (Cunjak, 1988b; Armstrong and Griffith, 2001). Winter habitat requirements may also be more restricted and specific than in summer, contributing to inter and intra-specific competition for habitat (Heggenes *et al.*, 1993; Harwood *et al.*, 2002). The absence of density relationships on the Trinité River may be an indication that the river is far below its maximum carrying capacity. In this case, competition for spawning location and overwintering habitat would be almost non existent. However, density-dependent mortality seems to occur at spatial scales much smaller than that of the whole population (Eimum and Nislow, 2005). The scale of this study, which analysed the entire population of the Trinité River, may not be sensitive enough to capture density-relationship at a finer scale such as on a riffle. Thus, density-dependant mortality may not be totally excluded as a mortality factor in our analysis.

### Specific hydro-climatic variables

The analysis of the Trinité River data suggests that there were no significant hydro-climatic variables averaged over the entire winter. The use of many specific hydro-climatic variables in this study has permitted to highlight critical periods and events for eggs and juveniles survival. For example, the results indicated that eggs are fragile to

cold weather at the beginning of the winter and to large discharge variation between November and February. The results of the study illustrate that the winter season is a succession of many distinct events and the use of broad temporal scale variables such as the mean winter temperature and the mean winter discharge may not be appropriate to explain juvenile over-winter mortality. Existing studies have focused on one or two variables to describe the entire range of physical conditions prevailing through the winter even if researchers have proposed to use more specific variable. For example, Smith and Griffith (1994) have suggested that an index of early winter severity should be used to assess the impact of this period on salmonids and a variables such as  $Inf -10_D$  and the discharge during the freeze-up period may give a good estimate of early winter harshness.

### **5.6 Acknowledgements**

This research was supported by a NSERC research grant to Normand Bergeron. The authors are grateful to the FAPAQ for providing the data that supported this research.

### 5.7 References

- Anonymous (2005). Climatic map of Canada, Vol. 2005. Environment Canada.
- Armstrong, J.C. and Griffith, S.W. (2001). Density-dependent refuge use among overwintering wild Atlantic salmon juveniles. *Journal of Fish Biology*, **58**, 1524-1530.
- Ashton, G.D. (1986). *Rivers and Lake Ice Engineering* Colorado, USA: Water Resources Publications.
- Baglinière, J.L., Maisse, G., and Nihouarn, A. (1993). Comparison of two methods of estimating Atlantic salmon (*Salmo salar*) wild smolt production. *Production of juvenile Atlantic salmon, Salmo salar, in natural waters*, **118**, 189-201.
- Bakkala, R.G. (1970). *Synopsis of biological data on the chum salmon, Oncorhynchus keta (Walbaum 1972)*, Rep. No. FAO Species Synop. No. 41. U.S. Fish and Wildlife Service.
- Beltaos, S. (2000). Advances in river ice hydrology. *Hydrological Processes*, **14**, 1613-1625.
- Beltaos, S., Calkins, D.J., Gatto, L.W., Prowse, T.D., Reedyk, S., Scrimgeour, G.J., and Wilkins, S.P. (1993). Physical effects of river ice. In *Environmental impacts of river ice* (Prowse, T. and Gridley, N., eds). Saskatoon, Canada: National Hydrology Research Institute.
- Brown, R.S. (1999). Fall and early winter movements of cutthroat trout, *Oncorhynchus clarki*, in relation to water temperature and ice conditions in Dutch Creek, Alberta. *Environmental biology of fishes*, **55**.
- Brown, R.S. and Mackay, W.C. (1995a). Fall and winter movements of and habitat use by cutthroat trout in the Ram River, Alberta. *Transactions of the American Fisheries Society*, **124**, 873-885.
- Brown, R.S. and Mackay, W.C. (1995b). Spawning ecology of cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki*) in the Ram River, Alberta. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **52**, 983-992.
- Brown, R.S., Power, G., Beltaos, S., and Beddow, T.A. (2000). Effects of hanging ice dams on winter movements and swimming activity of fish. *Journal of Fish Biology*, **57**, 1150-1159.
- Calkins, D.J. (1989). *Winter habitats of Atlantic salmon, brook trout and rainbow trout: a literature review*. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Caron, F. and Fournier, D. (1994). *Rapport d'opération de la rivière Trinité en 1992*. Ministère de l'environnement et de la faune, Direction de la faune et des habitats, Service de la faune aquatique, Québec.

- Caron, F., Gauthier, C., and Fournier, D. (2004). *Travaux de recherche sur le saumon des rivières St-Jean et de la Trinité en 2003*. Société de la faune et des parcs du Québec, Direction de la recherche sur la faune, Québec.
- Chadwick, E.M.P. (1982). Stock-recruitment relationship for Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Newfoundland rivers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **39**, 1496-1501.
- Chisholm, I.M., Hubert, W.A., and Weshe, T.A. (1987). Winter stream conditions and use of habitat by brook trout in high-elevation Wyoming streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, **116**, 176-184.
- Clavet, D. (1982). *Relevés hydrogéomorphologiques de la rivière de la Trinité (Grande), Côte-Nord*. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction générale de la faune, Québec.
- Crawshaw, L.I. (1984). Low-temperature dormancy in fish. *American Journal of Physiology*, **246**, 479-486.
- Cunjak, R.A. (1988). Behaviour and microhabitat of young Atlantic salmon (*Salmo salar*) during winter. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **45**, 2156-2160.
- Cunjak, R.A. (1996). Winter habitat of selected stream fishes and potential impacts from land-use activity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **53**, 267-282.
- Cunjak, R.A., Prowse, T.D., and Parrish, D.L. (1998). Atlantic salmon (*Salmo salar*) in winter: "the season of parr discontent"? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **55**, 161-180.
- Cunjak, R.A. and Rendall, R.G. (1993). In-stream movements of young Atlantic salmon (*Salmo salar*) during winter and early spring. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **118 (Special Publication)**, 43-51.
- Cunjak, R.A. and Therrien, J. (1998). Inter-stage survival of wild juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Fisheries Management and Ecology*, **5**, 209-223.
- Einum, S. and Nislow, K.H. (2005). Local-scale density-dependent survival of mobile organisms in continuous habitats: an experimental test using Atlantic salmon. *Oecologia*, **143**, 203-210.
- Finstad, A.G., Forseth, T., Naesje, T.F., and Ugedal, O. (2004). The importance of ice cover for energy turnover in juvenile Atlantic salmon. *Journal of Animal Ecology*, **73**, 959-966.

- Gibson, R.J. and Myers, R.A. (1988). Influence of seasonal river discharge on survival of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **45**, 344-348.
- Harwood, A.J., Metcalfe, N.B., Griffiths, S.W., and Armstrong, J.C. (2002). Intra-and inter-specific competition for winter concealment habitat in juvenile salmonids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **59**, 1515-1523.
- Heggenes, J., Krog, O.M.W., Lindas, O.R., Dokk, J.G., and Bremnes, T. (1993). Homeostatic behavioral responses in a changing environment: brown trout (*Salmo trutta*) become nocturnal during winter. *Journal of Animal Ecology*, **62**, 295-308.
- Hiramaya, K., Yamasaki, M., and Shen, H.T. (2002). Aspects of river ice hydrology in Japan. *Hydrological Processes*, **16**, 891-904.
- Hirayama, K., Terada, K., Sato, M., Hirayama, K., Sasmoto, M., and Yamasaki, M. (1997). Field measurements of anchor ice and frazil ice. *9th Workshop on river ice*, 141-151.
- Holtby, L.B. (1988). Effects of logging on stream temperatures in Carnation Creek, British Columbia, and associated impacts on the coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **45**, 502-515.
- Hunt, R.L. (1969). Overwinter survival of wild fingerling brook trout in Lawrence Creek, Wisconsin. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, **26**, 1473-1483.
- Jakober, M.J., McMahon, T.E., Thurow, R.E., and Clancy, C.G. (1998). Role of stream ice on fall and winter movements and habitat use by bull trout and cutthroat trout in Montana headwater streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, **127**, 223-235.
- Junge, C.O. and Libosvarsky, J. (1965). Effect of size selectivity on population estimates based on successive removals with electric fishing gear. *Zoologische Listy*, **14**, 171-178.
- Maciolek, J.A. and Needham, P.R. (1952). Ecological effects of winter conditions on trout and trout foods in Convict Creek, California, 1951. *Transactions of the American Fisheries Society*, **81**, 202-217.
- McNeil, W.J. (1966). Effect of the spawning bed environment on reproduction of pink and chum salmon. *Fishery Bulletin*, **65**, 495-523.
- Meyer, K.A. and Griffith, J.S. (1997). First-winter of rainbow trout and brook trout in the Henrys Fork of the Snake River, Idaho. *Canadian Journal of Zoology*, **75**, 59-63.
- Needham, P.R. and Jones, A.C. (1959). Flow, temperature, solar radiation, and ice in relation to activities of fishes in Sagehen Creek, California. *Ecology*, **40**, 465-474.

- Parrish, D.L., Hawes, E.J., and Whalen, K.P. (2005). Winter growth and survival of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) in experimental raceways. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **61**, 2350-2357.
- Power, G., Cunjak, R.A., Flannagan, J., and Katopodis, C. (1993). Chapter 4: Biological effects of river ice. In *Environmental aspects of river ice* (Prowse, T.D. and Gridley, N.C., eds), pp. 97-119. Saskatoon: Environnement Canada, National Hydrology Research Institute.
- Prowse, T.D. (2001a). River-ice ecology I: Hydrologic, Geomorphic, and Water-Quality Aspects. *Journal of Cold Regions Engineering*, **15**, 1-16.
- Prowse, T.D. (2001b). River-ice ecology II: Biological Aspects. *Journal of Cold Regions Engineering*, **15**, 17-33.
- Reimers, N. (1957). Some aspects of the relation between stream foods and trout survival. *California Fish and Game*, **43**, 43-69.
- Reiser, D.W. and Weshe, T.A. (1979). In situ freezing as a cause of mortality in brown trout eggs. *The Progressive Fish Culturist*, **41**, 58-60.
- Ricker, W.E. (1975). Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, **191**, 382 p.
- Roussel, J.M., Cunjak, R.A., Newbury, R., Caissie, D., and Haro, A. (2004). Movements and habitat use by PIT-tagged Atlantic salmon parr in early winter: the influence of anchor ice. *Freshwater Biology*, **49**, 1026-1035.
- Simpkins, D.G., Hubert, W.A., and Wesche, T.A. (2000). Effects of fall-to-winter changes in habitat and frazil ice on the movement and habitat use of juvenile rainbow trout in a Wyoming tailwater. *Transactions of the American Fisheries Society*, **129**, 101-118.
- Smith, R.W. and Griffith, J.S. (1994). Survival of Rainbow trout during their first winter in the Henrys Fork of the Snake River, Idaho. *Transactions of the American Fisheries Society*, **123**, 747-756.
- Sokal, R.R. and Rohlf, F.J. (1995). *Biometry: the principles and Practice of Statistics in Biological Research*, 3d edn. New-York: W.H. Freeman and Company.
- Statsoft (2001). Statistica.
- Stuart, T.A. (1953). Water currents through permeable gravels and their significance to spawning salmonids, etc. *Nature*, **172**, 77-94.
- Walsh, M. and Calkins, D.J. (1986). River ice and salmonids. *4th workshop on hydraulics of river ice*, D.4.4-D.4.26.

- Whalen, K.P., Parrish, D.L., and Mather, M.E. (1999). Effect of ice formation on selection of habitats and winter distribution of post-young-of-the-year Atlantic salmon parr. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **56**, 87-96.
- Zippin, C. (1958). The removal method of population. *Journal of Wildlife Management*, **22**, 82-90.

Table 5.1 Egg, fry and parr abundance and inter-stage mortality.

Winter	Egg deposition	Fry (0+)	95% confidence limits		Egg to fry Mortality (%)	Fry (0+)	Parr (1+)	95% confidence limits		Fry to parr Mortality (%)
1983-1984	2 364 651	386 215	357 213	415 204	83,7	N/A	110 805	102 484	119 122	N/A
1984-1985	2 191 974	265 966	218 799	320 537	87,9	386 215	144 910	119 212	174 643	62,5
1985-1986	2 254 762	376 860	323 605	437 161	83,3	265 966	76 772	65 923	89 056	71,1
1986-1987	2 425 953	254 395	221 623	287 157	89,5	376 860	100 646	87 680	113 607	73,3
1987-1988	2 507 970	196 679	162 507	230 862	92,2	254 395	110 911	91 641	130 188	56,4
1988-1989	4 166 199	280 742	239 502	325 829	93,3	196 679	203 639	173 725	236 343	*
1989-1990	2 239 664	296 995	250 397	346 493	86,7	280 742	117 657	99 197	137 266	58,1
1990-1991	2 319 842	312 229	265 188	377 106	86,5	296 995	169 571	144 023	204 806	42,9
1991-1992	2 378 498	265 097	217 762	318 127	88,9	312 229	143 090	117 540	171 714	54,2
Average	2 538 835	292 798	250 733	339 831	88,0	296 260	130 889	111 270	152 972	59,8

\* Data excluded

N/A: data not available

Table 5.2 Independent variables used in the analysis and sorted by category. FDD: Freezing degree-day, subscripts O, N, D, J, F, M and A denote respectively October, November, December, January, February, Mars and April.

Temperature				Discharge			Ice
Cumulated freezing degree-day				Monthly	Ratio	Peak Flow	Cover
Monthly	Bimonthly	Period starting Oct 1 <sup>st</sup>	Frazil and anchor ice	Monthly			
FDD <sub>O</sub>	FDD <sub>ND</sub>	FDD <sub>O-N</sub>	Inf-10 <sub>N</sub>	Flow <sub>N</sub>	Flow <sub>N/F</sub>	Peak flow	Freeze-up date
FDD <sub>N</sub>	FDD <sub>JF</sub>	FDD <sub>O-D</sub>	Inf-10 <sub>D</sub>	Flow <sub>D</sub>	Flow <sub>N/M</sub>		
FDD <sub>D</sub>	FDD <sub>MA</sub>	FDD <sub>O-J</sub>		Flow <sub>J</sub>	Flow <sub>O/F</sub>		
FDD <sub>J</sub>		FDD <sub>O-F</sub>		Flow <sub>F</sub>			
FDD <sub>F</sub>		FDD <sub>O-M</sub>		Flow <sub>M</sub>			
FDD <sub>M</sub>		FDD <sub>O-A</sub>		Flow <sub>A</sub>			
FDD <sub>A</sub>				Mean Winter			

Table 5.3 Regression results and significant variables for inter-stage mortality.  $\beta$ : regression coefficient for variable 1 and 2,  $P$ : probability for regression and correlation coefficients,  $r$ : cross-correlation coefficient between variable 1 and 2 multiple regression coefficients.

Egg to fry mortality									
	Adjusted $r^2$	Variable 1	$\beta_1$	$P_1$	Variable 2	$\beta_2$	$P_2$	$r_{1-2}$	$P_{1-2}$
Simple regression <sup>a</sup>	0,81	FDD <sub>0-J</sub>	-0,90	0,01	-	-	-	-	-
Multiple regression <sup>b</sup>	0,92	FDD <sub>0-J</sub>	-0,75	0,01	Flow <sub>N/F</sub>	0,39	0,01	-0,31	> 0,05
Fry to parr mortality									
	Adjusted $r^2$	Variable 1	$\beta_1$	$P_1$	Variable 2	$\beta_2$	$P_2$	$r_{1-2}$	$P_{1-2}$
Simple regression <sup>a</sup>	0,91	FDD <sub>J-F</sub>	-0,95	0,01	-	-	-	-	-
Multiple regression <sup>b</sup>	0,97	FDD <sub>J-F</sub>	-1,02	0,01	Inf-10 <sub>D</sub>	0,27	0,02	0,21	> 0,05

<sup>a</sup> Significant at  $\alpha' < 0,002$

<sup>b</sup> Significant at  $\alpha < 0,05$

Figure 5.1 Relation of cumulated freezing degree-day and egg to fry mortality on the Trinité River ( $\bullet$ ), Indian River ( $\square$ ) and Catamaran Brook ( $\Delta$ ). Solid line: linear regressions of cumulated freezing degree-day and egg to fry mortality on the Trinité River (adj.  $r^2 = 0.81$ ,  $n = 9$ ,  $P < 0.001$ ).

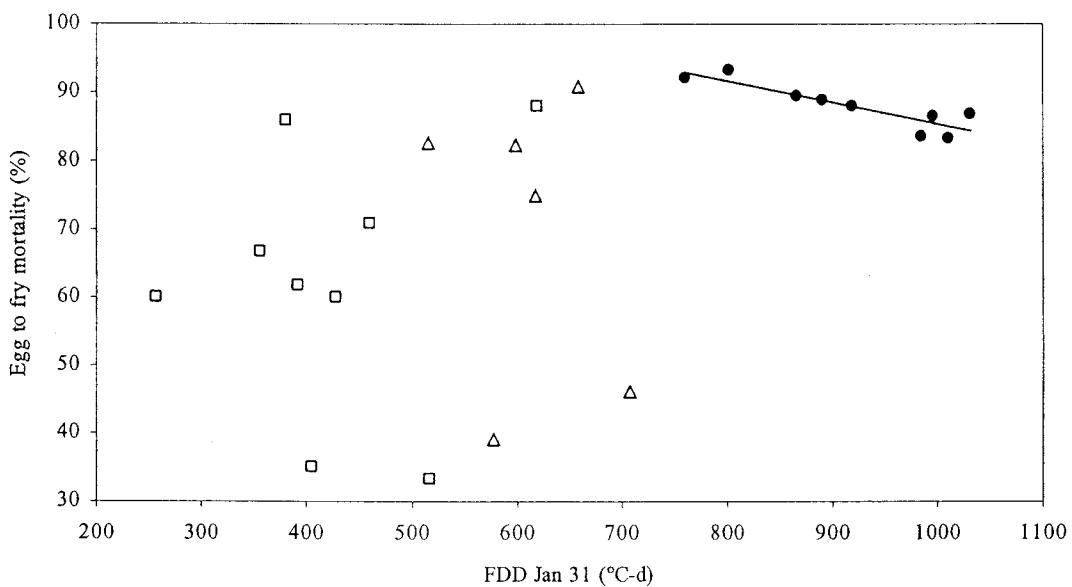
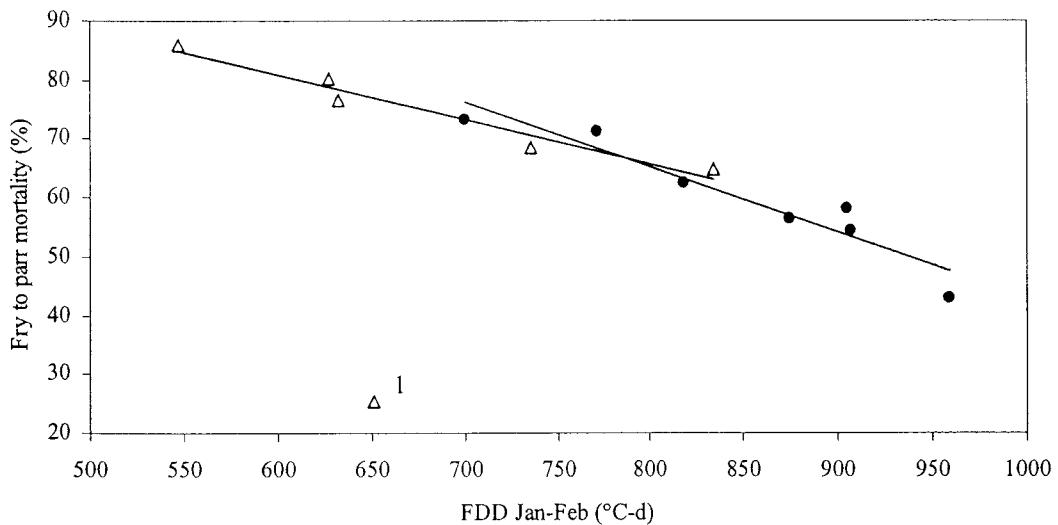


Figure 5.2 Linear regressions of cumulated freezing degree-day and egg to fry mortality on Trinité River ( $\bullet$ ) ( $r^2 = 0.91$ ;  $n = 7$ ,  $P < 0.001$ ) and Catamaran Brook ( $\Delta$ ) (adj.  $r^2 = 0.94$ ,  $n = 5$ ,  $P < 0.01$ ). 1: denotes outlier.



Chapitre 6**Modeling anchor ice formation on gravel bed rivers**

Modeling anchor ice formation on gravel bed rivers

Bisaillon, Jean-François and Bergeron, Normand E.

INRS-Eau, Terre et Environnement,

840 rue de la Couronne, Québec, QC, G1K 9A9

Tel.: 514-767-3258 (J.F. Bisaillon), 418-654-3703

[jean-francois.bisaillon@inrs-ete.quebec.ca](mailto:jean-francois.bisaillon@inrs-ete.quebec.ca), [normand.bergeron@inrs-ete.quebec.ca](mailto:normand.bergeron@inrs-ete.quebec.ca)

### 6.1 Abstract

Meteorological and hydraulic conditions conducive to anchor ice formation were studied on three gravel bed rivers. The first objective of the study was to determine the meteorological conditions leading to anchor ice formation in gravel bed rivers. A logistic regression analysis demonstrated that anchor ice formation on these rivers can be explained and predicted at 80.9% using freezing degree-hours cumulated during 12 hours. The results also indicate that a mean air temperature inferior to -9.3°C during the entire night was conducive to anchor ice formation but that any period of 6 consecutive hours could be adequate to initiate ice formation. Once the conditions for anchor ice formation at the river level were established, the second objective consisted to determine the influence of hydraulic conditions, air temperature and their combined effects on the spatial distribution anchor ice. A hierarchical logistic regression model showed that when air temperature reached the critical temperature for anchor ice formation, average flow velocity and water depth represented by the Froude number were the unique parameters controlling anchor ice distribution on the streambed of the rivers studied. On these rivers, anchor ice predominantly formed in shallow and fast flowing water and the results of the model indicated that the critical Froude number for anchor ice formation was 0.1. The model predicted 67.5% of anchor ice occurrence and was the first attempt to predict the spatial distribution of anchor ice. In addition, the analysis suggests that model improvement could be achieved by the inclusion of a variable related to bed particle size. On the rivers studied, anchor ice was also observed in slow and deep flow sections located upstream of riffles which is opposite to the majority of the observations reported in the literature. Field observations and data analysis indicated that an alternate formation mechanism may have promoted anchor ice formation on these locations. Indeed, continuous accretion of frazil ice crystals on the upstream front of anchor ice located at the beginning of a riffle could have resulted in its upstream progression in slower and deeper flow.

### 6.2 Introduction

Anchor ice is a phenomenon common to most northern rivers. It generally forms by the accretion of frazil ice crystals on the streambed (Beltaos *et al.*, 1993; Hammar *et al.*,

1996; Kerr *et al.*, 1997) where it can reach thickness sufficient to modify local flow and sediment transport processes. For example, anchor ice accumulations have been shown to increase locally the stage, divert the flow to other portions of the channel and cause flow concentration capable of inducing local erosion of stream-bed material (Beltaos *et al.*, 1993). Anchor ice also has important ecological consequences for fish inhabiting rivers during the winter season. For example, it may affect the survival of incubating salmonid eggs by reducing the intergravel flow supplying the oxygen to the eggs (Walsh and Calkins, 1986; Calkins, 1989; Power *et al.*, 1993). It may also be detrimental to juvenile salmonids by flooding or dewatering entire stream sections (Chisholm *et al.*, 1987; Beltaos *et al.*, 1993; Prowse, 2001a), thereby forcing them to move to find a more suitable habitat in a period of the year where spending critical energy reserve may induce mortality (Cunjak, 1996; Brown, 1999).

Despite considerable physical and biological importance of anchor ice, the study of the conditions leading to its formation has received much less attention than other forms of river ice. Because anchor ice is formed of frazil ice crystals entrained toward the bed by turbulent flow eddies, its initiation is closely related to the production of frazil ice. Such frazil ice is produced when atmospheric conditions promote large and rapid radiative losses from the water mass which causes water temperature to drop slightly below 0°C. These conditions are generally optimally attained during clear windy nights (Parkinson, 1984) with air temperature below -10°C (Beltaos, 1993; Forest, 1994; Yapa and Shen, 1986). These atmospheric conditions are also conducive to anchor ice formation which have been reported to form at air temperature below approximately -10°C (Parkinson, 1984; Terada *et al.*, 1998). Despite numerous field (Arden and Wigle, 1972; Parkinson, 1984; Terada *et al.*, 1998) and laboratory observations (Hammar *et al.*, 1996; Kerr *et al.*, 1997, 2002) there exists no statistical model to predict the presence of anchor ice on a river reach from meteorological conditions.

Once frazil ice crystals are produced, anchor ice does not form everywhere along the wetted perimeter of the channel. Field observations by Terada *et al.* (1998) and Yamazaki *et al.* (1996) showed that anchor ice tend to form in shallow, fast flowing

sections having Froude number values ranging between 0.2 and 1.5. Hiramaya et al. (1997) suggested that the critical Froude number at which anchor ice will form should be positively related to air temperature. However, there exist to date no statistical relationship to support the field observations relating anchor ice formation to water depth and flow velocity.

The purpose of this study was to use multiple logistic regression and hierarchical logistic regression models to predict the formation of anchor ice in natural gravel bed rivers from meteorological and hydraulic conditions. The first objective of the study was to determine the meteorological conditions leading to anchor ice formation in gravel bed rivers. Once the conditions for anchor ice formation at the river level were established, the second objective consisted to determine the influence of hydraulic conditions, air temperature and their combined effects on the spatial distribution anchor ice.

### **6.3 Methodology**

The general approach was to document, at the beginning of winter 2005, the daily presence and spatial distribution of anchor ice on the streambed of three gravel bed rivers of southern Québec (Canada). Field work was conducted in November and December 2005 before the ice completely covered the rivers and halted the formation of anchor ice.

#### **Site description**

##### *York River*

The York River is located in the Gaspé Peninsula on the south shore of the St-Lawrence River ( $48^{\circ}52' N$ ,  $65^{\circ}05' W$ ). The source of the river is located in the Notre-Dame mountain range in the Appalachian Mountains. The main stem is 98 km long and ends in the Baie of Gaspé, draining a watershed of  $659 \text{ km}^2$  mostly located in forested land. The mean air temperature in November and December is  $-3.0^{\circ}\text{C}$  and  $-9.8^{\circ}\text{C}$  respectively (Environment Canada weather station # 7055380).

*Beauport and Duberger Rivers*

The Beauport River is located on the north shore of the St-Lawrence River near Québec City ( $46^{\circ}51' N$ ,  $71^{\circ}11' W$ ). It takes its origin from two small lakes and ends its course after 12.5 km into the St-Lawrence River where it drains an area of  $22.5 \text{ km}^2$  mostly located in urban landscape. The Duberger River ( $46^{\circ}49' N$ ,  $71^{\circ}18' W$ ) is also located in the urban area of Québec City, approximately 15 km west of the Beauport River. It is a tributary of the St-Charles River and flows over 8 km. For both rivers, the mean November and December monthly air temperature is respectively  $-0.7^{\circ}\text{C}$  and  $-9.1^{\circ}\text{C}$  (Jean-Lesage International Airport weather station # 7016294).

**Anchor ice measurements***York River*

On the York River, four sites were selected to determine the meteorological conditions leading to anchor ice formation at the river level. Two of these sites were pool-riffle sections, one was a rapid and one was a pool. Each site was approximately 100 m long and 25 m wide. Data on the York River were collected between November 10 and November 18 during a daily visit at 7:00 a.m. A total of 12 presence and absence events were evaluated on the four sites during this 8-days period. On four occasions, two sites per day were assessed. During these visits, a lack of anchor ice was noted as an absence while any amount of anchor ice within a site was noted as a presence of anchor ice.

*Beauport and Duberger rivers*

On the Beauport River, data were collected between December 2 and December 7 when the formation of a complete ice cover stopped data collection for 6 days. On December 14, the cover melted and field work resumed until December 21 when the ice cover reestablished over the entire reach. On the Duberger River, data were collected during 4 days from December 4 to December 7. The ice cover formed permanently on December 8 and no supplementary field work was conducted on this river. A total of 12 events were evaluated on both sites.

The study sites on the Duberger and Beauport rivers were approximately 150 m long by 5 m wide and comprised several pool-riffle units. At each site, 54 parcels of 0.25 m<sup>2</sup> were used to evaluate the presence or absence of anchor ice. The parcels were located on 18 transects perpendicular to the flow and equally distributed between riffles and pools to capture the maximum of variability of the formation conditions (Figure 6.1).

Presence and absence of anchor ice was determined for every parcel during a daily visit between 7:00 a.m. and 8:30 a.m. It was assumed that anchor ice formation and decay was negligible during the 2 hour window during which both sites were assessed. Once all parcels had been evaluated, all existing anchor ice was manually removed from each parcel to allow new anchor ice to form during the following event. It was assumed and latter confirmed by field observations that anchor ice formation was negligible during the daytime period comprised between the morning and evening assessments.

These presence-absence evaluations of each parcel on both sites were used twofold. Firstly, a lack of anchor ice on every parcel of a site was classified as an absence of ice on the entire site while any amount of anchor ice within a parcel was classified as a presence of anchor ice on the site. These data were used in combination with the data collected on the York River to determine the meteorological conditions leading to anchor ice formation at the river level ( $n = 30$  events). Secondly, the presence-absence assessments for each parcel were used individually to study the effect of hydraulic conditions and air temperature on the spatial distribution of anchor ice at the parcel level ( $n = 448$  parcels assessed during 10 events).

### **Climatic and hydraulic variables**

Air temperature on the York River was recorded hourly at each site with Optic StowAway temperature data loggers (Onset Computer Corp.,  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  precision). Air temperature on the Beauport and Duberger rivers were obtained from the nearest Environment Canada weather station (Jean-Lesage International Airport weather station # 7016294). From these data, cumulated freezing degree-hours indices were calculated for periods of 6, 8, 12, 24 and 48 hours preceding anchor ice assessment at 7:00 a.m. These

indices were denoted *FDH-6*, *FDH-8*, *FDH-12*, *FDH-24* and *FDH-48* respectively and were used to estimate the heat flux from the atmosphere to the water mass (Ashton, 1986).

Water temperature was measured hourly on the three rivers using StowAway TidBit data loggers (Onset Computer Corp.,  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  precision). On the Beauport and Duberger rivers, a data logger was installed at each end of the study sections while only one data logger per study section was used on the York River. On the Beauport and Duberger rivers, water temperatures recorded by the two data loggers located at each sites were averaged. From these data, water temperature was averaged for each river site during periods of 6, 8, 12, 24 and 48 hours preceding anchor ice assessment at 7:00 a.m. These variables were denoted *W-6*, *W-8*, *W-12*, *W-24* and *W-48* respectively.

On the Beauport and Duberger rivers, mean flow velocity and total water depth were recorded on each parcel at every visit. Flow depth and velocity were measured at the center of each parcel in late afternoon and used to evaluate formation conditions for the following night. Flow velocity was measured using an electromagnetic flow meter (Flow-Mate 2000, Marsh-McBirney Inc.) at 0.4 of the depth from the streambed and averaged during 60 seconds. In addition, the Froude number ( $\text{Fr} = v^2/gd$ ) was calculated from velocity ( $v$ ) and depth ( $d$ ) measured at each parcel.

### **Logistic modeling of anchor ice formation**

#### *Prediction model of anchor ice presence at the river level*

The objective of this analysis was to elaborate a predictive model of anchor ice presence on a river site from air and water temperature only. A logistic regression model was used to analyze and predict the presence of anchor ice on a site since the response variable (presence-absence) was dichotomous. Logistic regression is a statistical approach that predicts the probability of occurrence of a dichotomous response variable based on explanatory variables (Hosmer and Lemeshow, 2000). The logit transformation of the probability of presence ( $p$ ) produces a linear function according to the equation:

$$(1) \quad \text{Logit}(p) = \log \frac{p}{1-p} = \beta_0 + \sum_i^k \beta_{1i} x_i$$

in which  $\beta_0$  and  $\beta_1$  are the regression constants and  $x_i$  the explanatory variables (Hosmer and Lemeshow, 2000). The predicted values in each case have a value between 0 and 1.

The data set describing the presence-absence of anchor ice at the river section level was used for the analysis. The dataset included the dichotomous response variable presence-absence of anchor ice at a river section, and ten continuous predictors related to air (*FDH-6, FDH-8, FDH-12, FDH-24* and *FDH-48*) and water temperature (*W-6, W-8, W-12, W-24* and *W-48*).

#### *Prediction model of the spatial distribution of anchor ice at the parcel level*

The objective of this analysis was to assess the probability of anchor ice formation on a parcel across different rivers, meteorological conditions and hydraulic conditions using the presence-absence data collected at the parcel level on the Beauport and Duberger rivers. The model estimated the dichotomous response variable presence-absence of anchor ice on a parcel. Covariates common to all parcels on a river section, such as air and water temperature, and hydraulic variables specific to each parcel (water velocity, depth and Froude number) were used as the explanatory variables. To appropriately model river-level and hydraulic-level covariates, a two-level hierarchical logistic regression model was developed (Wong and Mason, 1985). Hierarchical regression models are useful for understanding relationships in hierarchical data structures (Sullivan *et al.*, 1999) such as sampled parcels nested within a river.

The observations were classified into two levels for the hierarchical analysis. The micro-level accounted for the hydraulic conditions and the macro-level accounted for a specific day on a specific section of a river. Each macro level unit  $J$  included  $n_j$  micro-level units (i.e.  $n_j$  parcels in the  $j$ th river site). Separate micro-level models were developed for each of the  $J$  macro-level units. The response variable (*Pres*) was a dichotomous variable distinguishing between presence (1) or absence (0) of anchor ice on a parcel. The micro-

level model for a single predictor or covariate ( $x_1$ ) was in the form (Wong and Mason, 1985; Sullivan *et al.*, 1999):

$$(2) \quad \text{Logit}(\text{Pres}_{ij}) = \beta_{0j} + \beta_{1j}x_1 + \varepsilon_{ij}$$

where  $\text{Pres}_{ij}$  is the dependent variable on the  $i$ th level unit (i.e. sampling plots) nested within the  $j$ th macro-level unit (i.e. river-date),  $\beta_{0j}$  is the intercept for the  $j$ th macro-level unit,  $x_1$  is the micro-level predictor,  $\beta_{1j}$  is the regression coefficient associated with the micro-level predictor and  $\varepsilon_{ij}$  is the random error associated with the  $i$ th micro-level unit nested within the  $j$ th macro-level unit.

The hierarchical model is composed of  $J$  models using the micro-level variables. These models are in the form shown in equation 1 and each one has a different intercept and slope coefficient ( $\beta_{0j}$  and  $\beta_{1j}$ ). In the macro-level model, the regression coefficients were considered as dependent variables and related to appropriate macro-level covariates. For the analysis of two macro-level covariates ( $z_1$  and  $z_2$ ), the macro-level models were in the form (Wong and Mason, 1985; Sullivan *et al.*, 1999):

$$(3) \quad \beta_{0j} = \gamma_{00} + \gamma_{01}z_1 + \gamma_{02}z_2 + v_{0j}$$

$$(4) \quad \beta_{1j} = \gamma_{10} + \gamma_{11}z_1 + \gamma_{12}z_2 + v_{1j}$$

where  $\beta_{0j}$  and  $\beta_{1j}$  are the intercept and the slope for the  $j$ th macro-level unit,  $\gamma_{00}$  and  $\gamma_{10}$  are the overall mean intercept and slope adjusted for  $z$ , respectively  $z_j$  is the macro-level predictor,  $\gamma_{01}$  and  $\gamma_{11}$  are the regression coefficients associated with the macro-level predictor  $z$  relative to the macro-level intercept and slopes, respectively and  $v_{0j}$  and  $v_{1j}$  are the random effect on the intercept and slope respectively adjusted for  $z$ . The hierarchical model combining the micro-level and macro-level models was (Wong and Mason, 1985; Sullivan *et al.*, 1999):

$$(5) \quad \text{Logit}(\text{Pres}_{ij}) = \gamma_{00} + \gamma_{01}z_1 + \gamma_{02}z_2 + \gamma_{10}x_1 + (\gamma_{11}z_1 + \gamma_{12}z_2)x_1 + v_{0j} + v_{1j}x_1 + \varepsilon_{ij}$$

### **Model assessment and validation**

Assessment of the goodness-of-fit of each model was obtained from the Hosmer and Lemeshow test (Hosmer and Lemeshow, 2000). This test is effective to evaluate the fit of a model for data set having many different covariate patterns, as typically occurs if one of the predictor is continuous such as air and water temperature (Hosmer and Lemeshow, 2000).

The receiver-operating characteristics curve (ROC) procedure was used to assess the model performance at all possible probability threshold at which anchor ice presence might be accepted ( $0 < p < 1$ ) (Manel *et al.*, 2001). The curve was obtained by plotting the sensitivity (percentage of true presence correctly predicted) vs. 1-specificity (percentage of true absence correctly predicted) over all the probability of anchor ice formation. Good model performances are characterized by a curve that maximizes sensitivity for low value of specificity and are indicated by large areas under the ROC curve (AUC).

While the AUC measured from the ROC curve is considered useful for comparing the performance of presence-absence models in a threshold independent fashion, truly predictive modeling might require some probability at which to accept the presence of anchor ice (Fielding and Bell, 1997). The optimum probability threshold can be identified using the ROC curves by reading the point on the curve at which the sum of sensitivity and specificity is maximized (Manel *et al.*, 2001). This optimal threshold was used instead of the normal threshold of  $p = 0.05$  to predict the presence or absence of anchor ice and to equalize the cost of misclassifying anchor ice as present (sensitivity) and absent (specificity) (Fielding and Bell, 1997).

The modeling procedure was tested on independent cases which were derived by partitioning data into a training set and a test set. The leave-one-out cross validation procedure allowed the separation of one or more events from the entire dataset (Efron, 1982). The cross-validation was performed on both analyses each time leaving out one

case at a time. For example, for the multilevel hierarchical logistic regression,  $J-1$  macro-level units formed the training set and the presence was predicted for the isolated macro-level site and compared with the true value. The process was iterated for all of the  $J$  macro-level units.

Once the optimal threshold was identified from the ROC procedure and the models validated, the correct classification rate (percentage of all cases correctly predicted, CCR), the sensitivity and the specificity were obtained from the confusion matrices to evaluate the model accuracy.

#### 6.4 Results

##### *Prediction model of anchor ice presence at the river level*

Examination of anchor ice presence-absence data from York, Beauport and Duberger rivers shows that, as expected, anchor ice formed only when water temperature was equal or inferior to  $0^{\circ}\text{C}$  (Figure 6.2). Of the 30 presence-absence events analyzed, 9 had water temperature superior to  $0^{\circ}\text{C}$  and 21 events had water temperature equal or inferior to  $0^{\circ}\text{C}$ . A closer examination of the events having subfreezing water temperature indicates that anchor ice formed in a wide range of cumulated freezing degree-hours. For instance, using *FDH-12* as an example, the data indicate that anchor ice formed at values ranging between  $59.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  and  $300.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ , but also that it was absent at values as high as  $111.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ , showing that even during cold nights, anchor ice did not always form.

Only presence-absence events having subfreezing water temperature ( $n = 21$ ) were used in the analysis since anchor ice formation is impossible when water temperature is superior to  $0^{\circ}\text{C}$  (Table 6.1). Five different models using freezing degree-hours cumulated during six hours (*FDH-6*), 8 hours (*FDH-8*), 12 hours (*FDH-12*), 24 hours (*FDH-24*) and 48 hours (*FDH-48*) were tested to predict the occurrence of anchor ice. Analysis of the parameter estimates indicates that among the five models independently tested, only the one using *FDH-12* was significant according to the Wald test. The intercept was non significant and removed from the model.

The result of the Hosmer-Lemeshow test was not significant ( $p > 0.5$ ) and suggests that the model significantly fits the data (Table 6.2) (Hosmer and Lemeshow, 2000). The analysis of the regression diagnostic statistics (Deviance delta and Pearson Chi-2 delta) did not reveal the presence of outliers, suggesting that the model support the entire set of data which is consistent with the Hosmer-Lemeshow and ROC curve tests. The area calculated under the ROC curve was 0.95 indicating that the model is highly accurate in discriminating event of anchor ice formation independently of any specified threshold.

The optimal decision threshold selected to equalize the cost of misclassifying events as presence or absence of anchor ice using the ROC plot was 0.82. Any predicted event with a probability of occurrence superior to 0.822 was classified as a presence of anchor ice, otherwise it was classified as an absence. The threshold also indicates that at least 111.7°C-hr cumulated during 12 hours was necessary for anchor ice to form which is equivalent to -9.3°C averaged over 12 hours. Using this threshold, the confusion matrix from the validated model provided three measures to evaluate the accuracy of the model. The sensitivity and the specificity indicate that respectively 81.3% of the presence events and 80.0% of the absence events were correctly classified. The third measure, the correct classification rate (CCR), indicates that the model correctly classified 80.9% of the anchor ice presence-absence events.

#### *Prediction model of the spatial distribution of anchor ice at the parcel level*

Presence and absence data collected on the parcels located on the Beauport and Duberger rivers were used to elaborate a prediction model of anchor ice spatial distribution. Of the 14 presence-absence events characterized on both sites, anchor ice was present on at least one parcel of a site during 10 events. For these 10 events, a total of 448 parcels were characterized and used in the analysis (Table 6.3).

A comparison of the hydraulic conditions prevailing on parcels with and without anchor ice showed that parcels where anchor ice was present had significantly higher mean flow velocities (t-test,  $n = 448$ ,  $p < 0.001$ ) (Figure 6.3a) and were significantly shallower (t-test,  $n = 448$ ,  $p < 0.05$ ) (Figure 6.3b) than parcels where anchor ice was absent. The

combined effect of flow velocity and water depth was captured by calculating the Froude number of each parcel. Comparing parcels with and without anchor ice showed that those where anchor ice was present had a significantly higher Froude number (mean = 0.22) than those where it was absent (mean = 0.10) ( $t$ -test,  $n = 448$ ,  $p < 0.0001$ ) (Figure 6.3c).

For the hierarchical logistic model, the Froude number was selected as the micro-level variable to characterize the hydraulic conditions on the parcels since it combines the effects of water depth and velocity. The macro-level variables included in the model were the freezing degree-hours cumulated over 12 hours (*FDH-12*) and the water temperature averaged over 12 hours (*W-12*). The variable *FDH-12* was selected because the results of the analysis of anchor ice formation at the river level indicated that *FDH-12* significantly described and predicted the formation of anchor ice. The variables included in the full hierarchical logistic model were therefore *Froude*, *FDH-12* and *W-12*, and the interaction terms between the micro-level and the macro-level variables were *Froude\*FDH-12* and *Froude\*W-12*.

The final model was obtained using a backward removal logistic regression procedure. The results of this procedure showed that only the micro-level variable, *Froude*, was significant according to the Wald test (Table 6.4). The final model indicated that the macro-level variable *FDH-12* had no significant effect on the presence of anchor ice on a parcel. In addition, there was no interaction between the macro-level variable *FDH-12* and the micro-level variable *Froude*, suggesting that the Froude number conducive to anchor ice formation on a parcel was not significantly affected by air temperature. The intercept was not significant and excluded from the final model. The final logistic model indicated that only the Froude number significantly controlled spatial distribution of anchor ice on the streambed during anchor ice events (Table 6.4).

The Hosmer-Lemeshow test was not significant ( $p > 0.38$ ) and indicated that the model significantly fitted the data. The analysis of the regression residuals (Pearson Chi-2 residuals) did not reveal any outliers signifying that the model support the entire set of data, a result consistent with the one of the Hosmer-Lemeshow test. The area calculated

under the ROC curve was 0.78, suggesting that the model was moderately accurate in discriminating presence or absence of anchor ice on a parcel (Table 6.5) (Hosmer and Lemeshow, 2000).

The optimal decision threshold selected to equalize the cost of misclassifying events as presence or absence of anchor ice using the ROC plot was 0.62. This threshold value corresponds to a Froude number of 0.1 which signifies that anchor ice formation is likely to occur over this critical value. The results of the leave-one-out validation indicated that the average CCR predicted by the cross-validated model was 67.5%. On average, the validated model was better at predicting the presence (CCR of 71.5%) than the absence (CCR of 51.3%) of anchor ice.

## 6.5 Discussion

### *Prediction model of anchor ice presence at the river level*

The results of the logistic regression analysis at the river level confirm the importance of air temperature as a key variable controlling the formation of anchor ice. Of the five freezing degree-hours indices used in the analysis (*FDH-6*, *FDH-8*, *FDH-12*, *FDH-24* and *FDH-48*) only *FDH-12* was found to be significantly related to the presence-absence of anchor ice, with an 80.5 percentage of correct predictions.

This result differs from the observations of Terada et al. (1998) on a river in Japan who found that anchor ice formation was correlated with freezing degree-hours cumulated over 6 hours. Both results suggest the importance of the night period preceding the formation of anchor ice. However, our results suggest that the beginning of the night is also important for anchor ice formation.

The analysis also indicates that when more than 111.7°C-h are cumulated over 12 hours, anchor ice was likely to form on the York, the Duberger and the Beauport rivers. This cumulated value is equivalent to an average of -9.3°C over the entire night. This result is consistent with the work of Terada et al. (1998) who observed that the threshold temperature for anchor ice formation was approximately -10°C.

The logistic model did not perform perfectly in predicting the presence-absence events. Approximately 20% of the events were misclassified by the model which, in our study, corresponds to 3 presence-absence events. Examination of the misclassified events revealed that on November 11, anchor ice did not form on the York River when the model predicted that it would. Further analysis of the atmospheric conditions during the night of that particular event (Environment Canada station # 7016294) revealed that the sky was cloudy, which may have reduced radiative losses to the atmosphere and impede the formation of anchor ice despite relatively cold air temperature ( $111.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  FDH-12).

In addition, two events that occurred on November 12 and 18 on the York River, were wrongly classified as an absence of anchor ice by the model. During these events, anchor ice was present on both despite low *FDH-12* values ( $59.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  and  $96.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  *FDH-12* respectively). During both events, air temperature dropped sharply in the last half of the night presumably initiating anchor ice formation during a short period. These results suggest that even if *FDH-12* has been shown to be a good predictor of anchor ice formation, only few consecutive hours of cold air temperature may be sufficient to produce anchor ice. This supports the observations of Terada et al. (1998) that freezing degree-hours cumulated over 6 hours is a good predictor of anchor ice formation. However, their index was calculated for the last 6 hours of the night (1:00 a.m. to 7:00 a.m.) while our analysis of the misclassified events suggests that cold air temperature occurring over any consecutive period of 6 hours during the night could be conducive to the formation of anchor ice.

#### *Prediction model of the spatial distribution of anchor ice at the parcel level*

The results of the analysis of the spatial distribution of anchor ice on the parcels located on the Beauport and the Duberger rivers indicated that the cross-validated hierarchical logistic model correctly predicted 67.5% of the events. This logistic model is the first attempt to predict the spatial distribution of anchor ice on the streambed despite numerous other field and laboratory works (Arden and Wigle, 1972; Parkinson, 1984; Tsang, 1992; Terada et al., 1998). Since the Froude number of the flow is the only variable included in the model, it could be easily combined with any 2-D hydrodynamic modelling of the flow

to produce a predicted map of the spatial distribution of anchor ice in a river. However, more work remains to be done in order to improve the predictive power of the model especially when predicting the absence of anchor ice on a parcel.

Indeed, a closer examination of the results indicated that the model performed better at predicting the presence (71.5%) than the absence (50.0%) of anchor ice on a parcel. The discrepancy may be caused by the classification method used in the analysis. The correct classification rate always favor the group having the most numerous events (Hosmer and Lemeshow, 2000). The presence events were almost 3 times more frequent compared to the absence events which may have skewed the classification. The use of a different classification method may have solved the problem of group size sensitivity. However, other variables such as sediment size and the relative submergence may also control the formation of anchor ice on the streambed. Anchor ice generally forms on coarse sediments because they offer more surface for the frazil ice crystals to adhere and accumulate (Hammar *et al.*, 1996; Shen, 2003a). In addition, coarse sediments increase turbulent mixing which promotes frazil ice deposition on the streambed and anchor ice formation (Hammar *et al.*, 1996). Coarse sediments are also less influenced by the geothermal heat flux from the bed and are supercooled faster than finer sediments (Tsang, 1982; Ashton, 1986; Prowse, 1994). The addition of a variable describing the contribution of sediment size to anchor ice formation could probably improve the performance of the model.

The hierarchical logistic model indicates that the Froude number was an important factor controlling the spatial distribution of anchor ice. In our study, the critical Froude number over which anchor ice formed was 0.1, which is close but slightly lower than the value of 0.148 obtained by Kerr *et al.* (1997) and the value of 0.2 reported by Terada *et al.* (1998). On the Beauport and the Duberger rivers, anchor ice was observed on parcels composed of fine sediments with low Froude number which may seems unusual compared to the observations reported in the literature (Arden and Wigle, 1972; Terada *et al.*, 1998). However, formation of anchor ice on these parcels may have been caused by the accretion of frazil ice crystals to anchor ice already formed instead of adhesion of frazil crystals to

the substrate. Field observations accomplished during this study indicate that these parcels were usually located directly upstream of a riffle. Continuous accretion of frazil ice crystals on the upstream front of anchor ice located at the beginning of the riffle could have thus resulted in its upstream progression. Despite the weak bonds between anchor ice and fine sediments, the bonds between the ice crystals could compensate and support the progression of the anchor ice front. However, anchor ice on these parcels is not likely to accumulate substantially because the buoyancy of the ice will eventually be greater than the bonds between the ice crystals.

Our results also showed that air temperature did not influence the spatial distribution of anchor ice. When air temperature reached the critical temperature for anchor ice formation, the hydraulic conditions were the unique parameters controlling distribution of anchor ice on the streambed of the Beauport and Duberger rivers. These results do not support the suggestion of Terada et al. (1998) that cold air temperature would reduced the critical Froude number for anchor ice formation.

### **6.6 Acknowledgement**

Financial support was provided by a NSERC research grant to Normand Bergeron. The authors are thankful to Patricia Johnston for field assistance.

## 6.7 References

- Arden, R.S. and Wigle, T.E. (1972). Dynamics of ice formation in the Upper Niagara River. *The role of snow and ice in hydrology*, 1296-1313.
- Ashton, G.D. (1986). *Rivers and Lake Ice Engineering* Colorado, USA: Water Resources Publications.
- Beltaos, S., Calkins, D.J., Gatto, L.W., Prowse, T.D., Reedyk, S., Scrimgeour, G.J., and Wilkins, S.P. (1993). Physical effects of river ice. In *Environmental impacts of river ice* (Prowse, T. and Gridley, N., eds). Saskatoon, Canada: National Hydrology Research Institute.
- Brown, R.S. (1999). Fall and early winter movements of cutthroat trout, *Oncorhynchus clarki*, in relation to water temperature and ice conditions in Dutch Creek, Alberta. *Environmental biology of fishes*, **55**.
- Calkins, D.J. (1989). *Winter habitats of Atlantic salmon, brook trout and rainbow trout: a literature review*. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Chisholm, I.M., Hubert, W.A., and Weshe, T.A. (1987). Winter stream conditions and use of habitat by brook trout in high-elevation Wyoming streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, **116**, 176-184.
- Cunjak, R.A. (1996). Winter habitat of selected stream fishes and potential impacts from land-use activity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **53**, 267-282.
- Fielding, A.H. and Bell, J.F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, **24**, 38-49.
- Hammar, L., Kerr, D.J., Shen, H.T., and Liu, L. (1996). Anchor ice formation in gravel-bedded channels. *13th IAHR International Symposium on Ice*, 843-850.
- Hirayama, K., Terada, K., Sato, M., Hirayama, K., Sasmoto, M., and Yamasaki, M. (1997). Field measurements of anchor ice and frazil ice. *9th Workshop on river ice*, 141-151.
- Hosmer, D.W. and Lemeshow, S. (2000). *Applied logistic regression*, Second edn. New York: Wiley-Interscience Publication.
- Kerr, D.J., Shen, H.T., and Daly, S.F. (1997). Anchor ice formation and growth on gravel channel bed. *9th Workshop on river ice*, 153-171.
- Kerr, D.J., Shen, H.T., and Daly, S.F. (2002). Evolution and hydraulic of anchor ice on gravel bed. *Cold Regions Science and Technology*, **35**, 101-114.

- Manel, S., Williams, H.C., and Ormerod, S.J. (2001). Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology*, **38**, 921-931.
- Parkinson, F.E. (1984). Anchor ice effects on water levels. *Workshop on the hydraulics of river ice*, 345-370.
- Power, G., Cunjak, R.A., Flannagan, J., and Katopodis, C. (1993). Chapter 4: Biological effects of river ice. In *Environmental aspects of river ice* (Prowse, T.D. and Gridley, N.C., eds), pp. 97-119. Saskatoon: Environnement Canada, National Hydrology Research Institute.
- Prowse, T.D. (1994). Environmental significance of ice to streamflow in cold regions. *Freshwater Biology*, **32**, 241-259.
- Prowse, T.D. (2001). River-ice ecology I: Hydrologic, Geomorphic, and Water-Quality Aspects. *Journal of Cold Regions Engineering*, **15**, 1-16.
- Shen, H.L., L (2003). Shokotsu River Ice Jam formation. *Cold Regions Science and Technology*.
- Sullivan, L.M., K.A., D., and Losina, E. (1999). Tutorial in biostatistics: an introduction to hierarchical linear modelling. *Statistics in medicine*, **18**, 855-888.
- Terada, K., Hirayama, K., and Sasmoto, M. (1998). Field measurement of anchor and frazil ice. *14th IAHR Symposium on ice*, 697-702.
- Tsang, G. (1982). *Frazil and anchor ice - a monograph*. National Research Council, Ottawa, Canada.
- Tsang, G. (1992). *Laboratory investigation of frazil evolution, flocculation and the formation of anchor ice*, Rep. No. NHRI Contribution CS-92057. Environnement Canada.
- Walsh, M. and Calkins, D.J. (1986). River ice and salmonids. *4th workshop on hydraulics of river ice*, D.4.4-D.4.26.
- Wong, G.Y. and Mason, W.M. (1985). The hierarchical logistic regression model for multilevel analysis. *Journal of the American Statistical Association*, **80**.
- Yamasaki, M., Hirayama, K., Sakai, S., Sasmoto, M., Kiyohara, M., and Takiguichi, H. (1996). Formation of frazil and anchor ice. *IAHR Ice Symposium*, 488-496.

Table 6.1 Presence (1) and absence (0) of anchor ice on the Trinité, Duberger and York rivers and associated freezing degree-hour cumulated during 12 hours (*FDH-12*) when water temperature was equal or inferior to 0°C.

River	Site	Date	P/A	<i>FDH-12</i>
Beauport		December 6	1	191.2
Beauport		December 7	1	167.7
Beauport		December 15	1	172.9
Beauport		December 16	1	153.2
Beauport		December 17	1	207.4
Beauport		December 18	0	70.8
Beauport		December 19	1	163.4
Beauport		December 20	1	300
Duberger		December 21	1	134.2
Duberger		December 5	0	39.8
Duberger		December 6	1	191.2
Duberger		December 7	1	167.7
York	65	November 10	1	117
York	65	November 11	0	111.5
York	65	November 12	1	59.3
York	65	November 14	1	188.6
York	57	November 11	0	77.33
York	57	November 12	0	33.79
York	57	November 13	1	141.61
York	Pont	November 17	1	113.55
York	Pont	November 18	1	96.7

Table 6.2 Estimated coefficient, Standard error (Std. Err.), z-score (z), two-tailed p-value ( $p > \text{Chi-2}$ ), Hosmer-Lemeshow test (H-L), Area under the ROC curve (ROC-AUC), and the correct classification rate (CCR) for the final logistic regression model for the presence and absence of anchor ice.  $n = 21$ .

Variable	Coefficient	Std Err.	z	Wald test ( $p$ )	H-L	ROC-AUC <sup>1</sup>	CCR <sup>1</sup> (%)
FDH-12	0.014	0.005	8.01	0.005	0.50	0.95	80.9

<sup>1</sup>: cutpoint at 82.2

Table 6.3 Number of parcels sampled on each river sites (n), cumulated freezing degree-hours during 12 hours (*FDH-12*) for the events with anchor ice formation on at least one parcel per site.

River	Date	n	<i>FDH-12</i>
Beauport	December 6	50	191.2
Beauport	December 7	30	167.7
Beauport	December 15	50	172.9
Beauport	December 16	32	153.2
Beauport	December 18	36	207.4
Beauport	December 20	37	163.4
Beauport	December 21	8	300
Duberger	December 4	53	134.2
Duberger	December 6	46	191.2
Duberger	December 7	20	167.7

Table 6.4 Estimates for the hierarchical logistic regression of anchor ice presence as a function of micro (*Froude*) and macro variables (*FDH-12*) and their interactions.

Regressor	Logistic regression					
	1		2		3	
	Coefficient	p	Coefficient	p	Coefficient	p
Intercept	-0.7176	0.7142	-0.4944	0.1517		
<i>Froude</i>	6.2775	0.5901	8.4928	0.0035	7.4654	0.0036
<i>FDH-12</i>	0.0011	0.9135				
<i>Froude</i> * <i>FDH-12</i>	0.0132	0.8294				

Table 6.5 Estimated coefficient, Standard error (Std. Err.), F-score (F), two-tailed p-value ( $p > F$ ), Hosmer-Lemeshow test (H-L), Area under the ROC curve (ROC-AUC), and the correct classification rate (CCR) for the final logistic regression model for the spatial distribution of anchor ice.  $n = 10$ .

Variable	Coefficient	Std Err.	F	Wald test ( $p$ )	H-L	ROC-AUC <sup>1</sup>	CCR <sup>1</sup> (%)
<i>Froude</i>	7.47	1.91	3.9	0.004	0.38	0.78	67.5

<sup>1</sup>: cutpoint at 62.5

Figure 6.1 Schematic representation of the sampling procedure on the Beauport and Duberger rivers. Transects ( $T_i$ ) were evenly distributed between pools and riffles. Three parcels were equally spaced on each transect for anchor ice presence-absence evaluation.

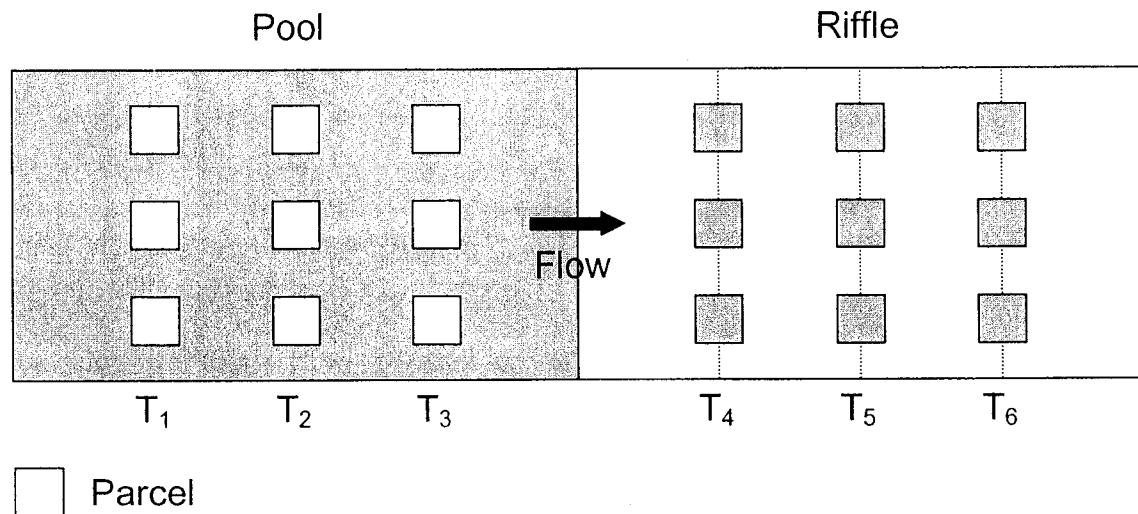


Figure 6.2 Presence ( $\square$ ) and absence ( $\bullet$ ) of anchor ice as a function of cumulated freezing-degree-hours during 12 hours ( $FDH-12$ ) and water temperature averaged during 12 hours ( $W-12$ ).

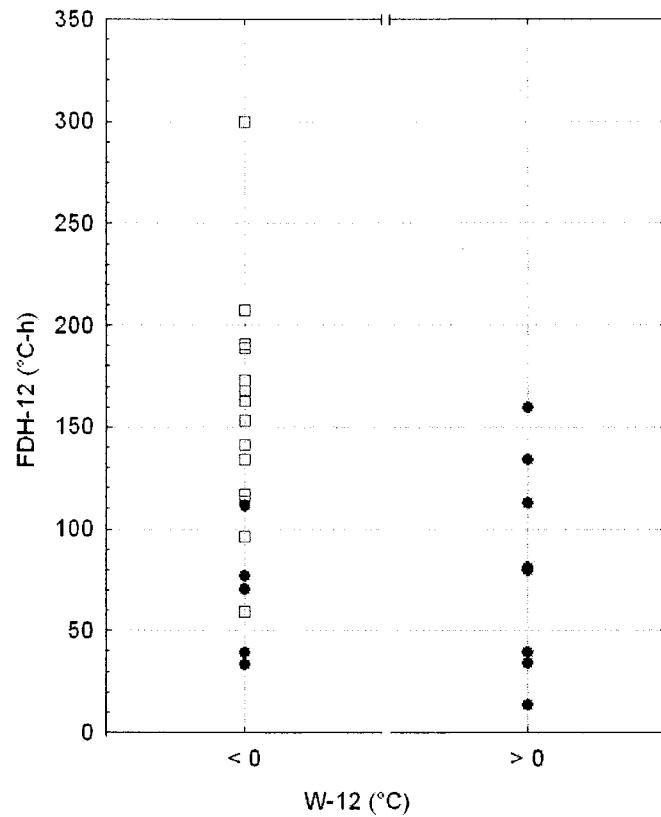
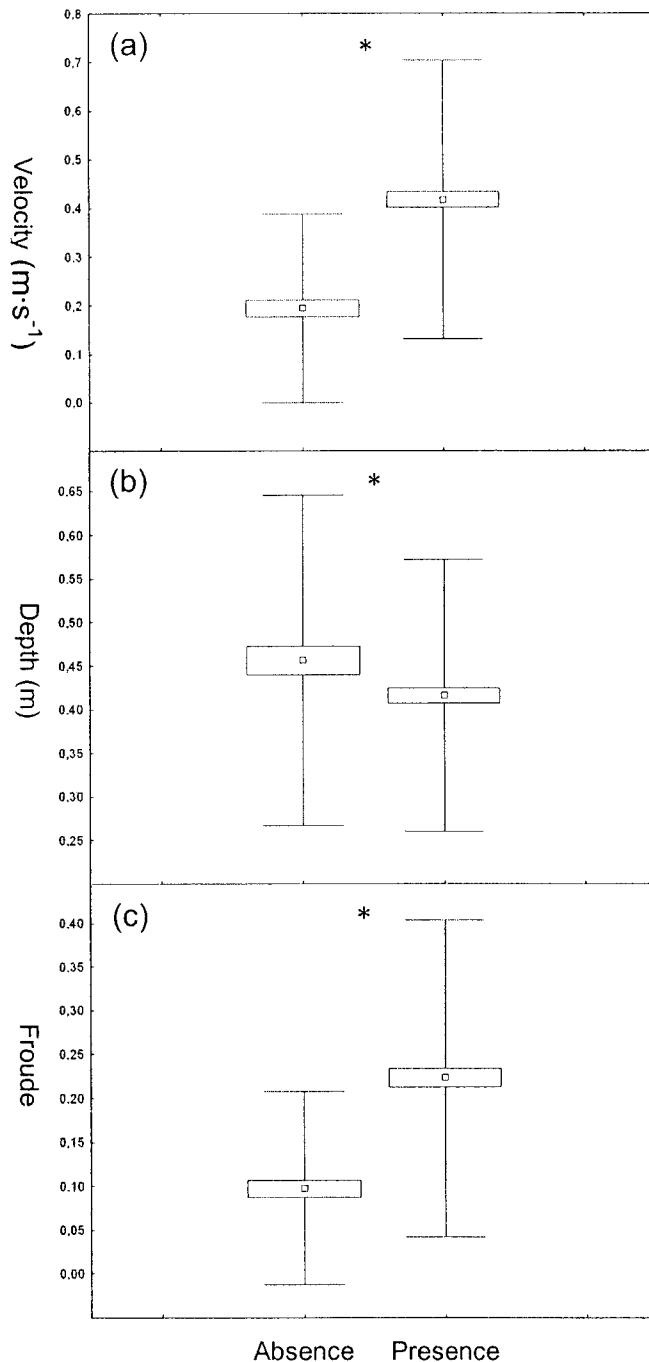


Figure 6.3 Velocity (a), Depth (b) and Froude number (c) (mean, standard error, standard deviation) as a function of presence and absence of anchor ice on a parcel, \* indicates significant differences at  $p < 0.05$  (t-test).



Liste des références

- Annear, T.C., Hubert, W.A., Simpkins, D.G., et Hebdon, L. (2002). Behavioral and physiological response of trout to winter habitat in tailwaters in Wyoming, USA. *Hydrological Processes*, **16**, 915-925.
- Anonymous (2003). Canadian Climate Regions, Vol. 2005. Environment Canada.
- Anonymous (2005). Climatic map of Canada, Vol. 2005. Environment Canada.
- Arden, R.S. et Wigle, T.E. (1972). Dynamics of ice formation in the Upper Niagara River. *The role of snow and ice in hydrology*, 1296-1313.
- Armstrong, J.C. et Griffith, S.W. (2001). Density-dependent refuge use among over-wintering wild Atlantic salmon juveniles. *Journal of Fish Biology*, **58**, 1524-1530.
- Ashton, G.D. (1986). *Rivers and Lake Ice Engineering* Colorado, USA: Water Resources Publications.
- Baglinière, J.L., Maisse, G., et Nihouarn, A. (1993). Comparison of two methods of estimating Atlantic salmon (*Salmo salar*) wild smolt production. *Production of juvenile Atlantic salmon, Salmo salar, in natural waters*, **118**, 189-201.
- Bakkala, R.G. (1970). *Synopsis of biological data on the chum salmon, Oncorhynchus keta (Walbaum 1972)*, Rep. No. FAO Species Synop. No. 41. U.S. Fish and Wildlife Service.
- Bardonnet, A. et Baglinière, J.L. (2000). Freshwater habitat of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **57**, 497-506.
- Beltaos, S. (1989). Fracture and breakup of river ice cover. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **17**, 173-183.
- Beltaos, S. (2000). Advances in river ice hydrology. *Hydrological Processes*, **14**, 1613-1625.
- Beltaos, S. (2003). Threshold between mechanical and thermal breakup of river ice cover. *Cold Regions Science and Technology*, **37**.
- Beltaos, S., Calkins, D.J., Gatto, L.W., Prowse, T.D., Reedyk, S., Scrimgeour, G.J., et Wilkins, S.P. (1993). Physical effects of river ice. In *Environmental impacts of river ice* (Prowse, T. & Gridley, N., eds). Saskatoon, Canada: National Hydrology Research Institute.
- Benson, N.G. (1955). Observation of anchor ice in a Michigan trout stream. *Ecology*, **36**, 529-530.

- Brown, R.S. (1999). Fall and early winter movements of cutthroat trout, *Oncorhynchus clarki*, in relation to water temperature and ice conditions in Dutch Creek, Alberta. *Environmental biology of fishes*, **55**.
- Brown, R.S. et Mackay, W.C. (1995a). Fall and winter movements of and habitat use by cutthroat trout in the Ram River, Alberta. *Transactions of the American Fisheries Society*, **124**, 873-885.
- Brown, R.S. et Mackay, W.C. (1995b). Spawning ecology of cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki*) in the Ram River, Alberta. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **52**, 983-992.
- Brown, R.S., Power, G., Beltaos, S., et Beddow, T.A. (2000). Effects of hanging ice dams on winter movements and swimming activity of fish. *Journal of Fish Biology*, **57**, 1150-1159.
- Bustard, D.R. (1986). Some differences between coastal and interior stream ecosystems and the implications to juvenile fish production. *Proceedings of the Workshop on Habitat Improvements*, **1483**, 117–126.
- Calkins, D.J. (1989). *Winter habitats of Atlantic salmon, brook trout and rainbow trout: a literature review*. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Calkins, D.J. et Brockett, B. (1988). Ice cover distribution in Vermont and New Hampshire Atlantic salmon rearing streams. *5th River ice workshop*.
- Caron, F. et Fournier, D. (1994). *Rapport d'opération de la rivière Trinité en 1992*. Ministère de l'environnement et de la faune, Direction de la faune et des habitats, Service de la faune aquatique, Québec.
- Caron, F., Gauthier, C., et Fournier, D. (2004). *Travaux de recherche sur le saumon des rivières St-Jean et de la Trinité en 2003*. Société de la faune et des parcs du Québec, Direction de la recherche sur la faune, Québec.
- Chadwick, E.M.P. (1982). Stock-recruitment relationship for Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Newfoundland rivers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **39**, 1496-1501.
- Chisholm, I.M., Hubert, W.A., et Weshe, T.A. (1987). Winter stream conditions and use of habitat by brook trout in high-elevation Wyoming streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, **116**, 176-184.
- Clavet, D. (1982). *Relevés hydrogéomorphologiques de la rivière de la Trinité (Grande), Côte-Nord*. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction générale de la faune, Québec.
- Crawshaw, L.I. (1984). Low-temperature dormancy in fish. *American Journal of Physiology*, **246**, 479-486.

- Cunjak, R.A. (1988a). Behaviour and microhabitat of young Atlantic salmon (*Salmo salar*) during winter. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **45**, 2156-2160.
- Cunjak, R.A. (1988b). Behaviour and microhabitat of young Atlantic salmon (*Salmo salar*) during winter. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **45**, 2156-2160.
- Cunjak, R.A. (1988c). Physiological Consequences of Overwintering in streams: The cost of Acclimatization? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **45**, 443-452.
- Cunjak, R.A. (1996). Winter habitat of selected stream fishes and potential impacts from land-use activity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **53**, 267-282.
- Cunjak, R.A. et Caissie, D. (1994). Frazil ice accumulation in a large salmon pool in the Miramichi river, New-Brunswick: ecological implications for the overwintering fishes. In *Proceedings of the workshop on Environmental aspects of river ice*. (Prowse, T.D., ed., Vol. NHRI Symposium series No. 12,, pp. 279-295.National Hydrology Research Institute.
- Cunjak, R.A. et Power, G. (1986). Winter habitat utilization by stream resident brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and brown trout (*Salmo trutta*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **43**, 1970-1981.
- Cunjak, R.A., Prowse, T.D., et Parrish, D.L. (1998). Atlantic salmon (*Salmo salar*) in winter: "the season of parr discontent"? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **55**, 161-180.
- Cunjak, R.A. et Rendall, R.G. (1993). In-stream movements of young Atlantic salmon (*Salmo salar*) during winter and early spring. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **118 (Special Publication)**, 43-51.
- Cunjak, R.A. et Therrien, J. (1998). Inter-stage survival of wild juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Fisheries Management and Ecology*, **5**, 209-223.
- Daly, S.F. (1994). Chapter 3: Evolution of Frazil Ice in Natural Water Bodies. In *Report offrazil ice* (S.F., D., ed., Vol. CRREL special report 94-23International Association for Hydraulic Research, Working group on thermal regimes. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Einum, S. et Nislow, K.H. (2005). Local-scale density-dependent survival of mobile organisms in continuous habitats: an experimental test using Atlantic salmon. *Oecologia*, **143**, 203-210.

- Fielding, A.H. et Bell, J.F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, **24**, 38-49.
- Finstad, A.G., Forseth, T., Naesje, T.F., et Ugedal, O. (2004). The importance of ice cover for energy turnover in juvenile Atlantic salmon. *Journal of Animal Ecology*, **73**, 959-966.
- Forest, T. (1994). Chapter 1: Physics of frazil ice. In *Report of frazil ice* (Daly, S.F., ed., Vol. CRREL special report 94-23) International Association for Hydraulic Research, Working group on thermal regimes. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Fraser, N.H.C., Heggens, J., Metcalfe, N.B., et Thorpe, J.E. (1995). Low summer temperatures cause juvenile Atlantic salmon to become nocturnal. *Canadian Journal of Zoology*, **73**, 446-451.
- Frenette, M., Caron, M., Julien, P., et Gibson, R.J. (1984). Interaction entre le débit et les populations de tacons (*Salmo salar*) de la rivière Matamec, Québec. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **41**.
- Gibson, R.J. et Myers, R.A. (1988). Influence of seasonal river discharge on survival of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **45**, 344-348.
- Hammar, L., Kerr, D.J., Shen, H.T., et Liu, L. (1996). Anchor ice formation in gravel-bedded channels. *13th IAHR International Symposium on Ice*, 843-850.
- Harwood, A.J., Metcalfe, N.B., Griffiths, S.W., et Armstrong, J.C. (2002). Intra-and inter-specific competition for winter concealment habitat in juvenile salmonids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **59**, 1515-1523.
- Heggens, J., Krog, O.M.W., Lindas, O.R., Dokk, J.G., et Bremnes, T. (1993). Homeostatic behavioral responses in a changing environment: brown trout (*Salmo trutta*) become nocturnal during winter. *Journal of Animal Ecology*, **62**, 295-308.
- Heggens, J. et Saltveit, S.J. (1990). Seasonal and spatial microhabitat selection and segregation in young Atlantic salmon, *Salmo salar* L., and brown trout, *Salmo trutta* L., in a Norwegian river. *Journal of Fish Biology*, **36**, 707-720.
- Hiramaya, K., Yamasaki, M., et Shen, H.T. (2002). Aspects of river ice hydrology in Japan. *Hydrological Processes*, **16**, 891-904.
- Hirayama, K., Terada, K., Sato, M., Hirayama, K., Sasmoto, M., et Yamasaki, M. (1997). Field measurements of anchor ice and frazil ice. *9th Workshop on river ice*, 141-151.

- Holtby, L.B. (1988). Effects of logging on stream temperatures in Carnation Creek, British Columbia, and associated impacts on the coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **45**, 502-515.
- Hosmer, D.W. et Lemeshow, S. (2000). *Applied logistic regression*, Second edn. New York: Wiley-Interscience Publication.
- Hunt, R.L. (1969). Overwinter survival of wild fingerling brook trout in Lawrence Creek, Wisconsin. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, **26**, 1473-1483.
- Jakober, M.J., McMahon, T.E., Thurow, R.E., et Clancy, C.G. (1998). Role of stream ice on fall and winter movements and habitat use by bull trout and cutthroat trout in Montana headwater streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, **127**, 223-235.
- Jasek, M. (2003). Ice jam release surges, ice runs, and breaking fronts: field measurements, physical descriptions, and research needs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **30**.
- Johnston, P., Bergeron, N.E., et Dodson, J.J. (2004). Diel activity patterns of juvenile Atlantic salmon in rivers with summer water temperature near the temperature-dependent suppression of diurnal activity. *Journal of Fish Biology*, **65**, 1305-1318.
- Junge, C.O. et Libosvarsky, J. (1965). Effect of size selectivity on population estimates based on successive removals with electric fishing gear. *Zoologische Listy*, **14**, 171-178.
- Kerr, D.J., Shen, H.T., et Daly, S.F. (1997). Anchor ice formation and growth on gravel channel bed. *9th Workshop on river ice*, 153-171.
- Kerr, D.J., Shen, H.T., et Daly, S.F. (2002). Evolution and hydraulic of anchor ice on gravel bed. *Cold Regions Science and Technology*, **35**, 101-114.
- Klemetsen, A., Amundsen, P.-A., Dempson, J.B., Jonsson, B., Jonsson, N., O'Connell, M.F., et Mortensen, E. (2003). Atlantic salmon *Salmo salar* L., brown trout *Salmo trutta* L. and Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.): a review of aspects of their life histories. *Ecology of Freshwater Fish*, **12**, 1-59.
- Lal, A.M.W. et Shen, H.T. (1991). Mathematical model for river ice processes. *Journal of Hydraulic Engineering*, **117**, 851-867.
- Lawson, D.E., Chacho, E.F., et Brockett, B.E. (1986). Sub-ice channels and longitudinal frazil bars, ice-covered Tanana river, Alaska. In *Proceeding of the XX IAHR symposiumIAHR*.
- Leim, A.H. et Scott, W.B. (1972). *Poissons de la côte Atlantique du Canada*. Environnement Canada.

- Maciolek, J.A. et Needham, P.R. (1952). Ecological effects of winter conditions on trout and trout foods in Convict Creek, California, 1951. *Transactions of the American Fisheries Society*, **81**, 202-217.
- Manel, S., Williams, H.C., et Ormerod, S.J. (2001). Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology*, **38**, 921-931.
- Mason, J.C. (1976). Response of underyearling coho salmon to supplement feeding in a natural stream. *Journal of Wildlife Management*, **40**, 775-778.
- McNeil, W.J. (1966). Effect of the spawning bed environment on reproduction of pink and chum salmon. *Fishery Bulletin*, **65**, 495-523.
- Meyer, K.A. et Griffith, J.S. (1997). First-winter of rainbow trout and brook trout in the Henrys Fork of the Snake River, Idaho. *Canadian Journal of Zoology*, **75**, 59-63.
- Michel, B. (1971). Winter regime of rivers and lakes. *Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Monograph 3-B1a*.
- Michel, B. (1984). Comparison of field data with theories on ice cover progression in large rivers. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **11**, 798-814.
- Michel, B. et Drouin, M. (1981). Courbes de remous sous les couverts de glace de La Grande Rivière. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **8**, 351-363.
- Needham, P.R. et Jones, A.C. (1959). Flow, temperature, solar radiation, and ice in relation to activities of fishes in Sagehen Creek, California. *Ecology*, **40**, 465-474.
- Parkinson, F.E. (1984). Anchor ice effects on water levels. *Workshop on the hydraulics of river ice*, 345-370.
- Parrish, D.L., Hawes, E.J., et Whalen, K.P. (2005). Winter growth and survival of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) in experimental raceways. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **61**, 2350-2357.
- Power, G., Cunjak, R.A., Flanagan, J., et Katopodis, C. (1993). Chapter 4: Biological effects of river ice. In *Environmental aspects of river ice* (Prowse, T.D. & Gridley, N.C., eds), pp. 97-119. Saskatoon: Environnement Canada, National Hydrology Research Institute.
- Prowse, T.D. (1993). Suspended sediment concentration during river ice breakup. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **20**, 872-875.
- Prowse, T.D. (1994). Environmental significance of ice to streamflow in cold regions. *Freshwater Biology*, **32**, 241-259.

- Prowse, T.D. (2001a). River-ice ecology I: Hydrologic, Geomorphic, and Water-Quality Aspects. *Journal of Cold Regions Engineering*, **15**, 1-16.
- Prowse, T.D. (2001b). River-ice ecology II: Biological Aspects. *Journal of Cold Regions Engineering*, **15**, 17-33.
- Prowse, T.D. et Culp, J.M. (2003). Ice breakup: a neglected factor in river ecology. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **30**, 128-144.
- Prowse, T.D. et Ferrick, M.G. (2002). Hydrology of ice-covered rivers and lakes: scoping the subject. *Hydrological Processes*, **16**, 759-762.
- Prowse, T.D. et Gridley, N.C. (1993). *Environmental aspect of river ice* Saskatoon, Canada: National Hydrology Research Institute.
- Reimers, N. (1957). Some aspects of the relation between stream foods and trout survival. *California Fish and Game*, **43**, 43-69.
- Reimers, N. (1963). Body condition, water temperature, and over-winter survival of hatchery-reared trout in Convict Creek, California. *Transactions of the American Fisheries Society*, **92**, 39-46.
- Reiser, D.W. et Weshe, T.A. (1979). In situ freezing as a cause of mortality in brown trout eggs. *The Progressive Fish Culturist*, **41**, 58-60.
- Ricker, W.E. (1975). Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, **191**, 382 p.
- Rimmer, D.M., Paim, U., et Saunders, R.L. (1983). Autumnal habitat shift of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) in a small river. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **40**, 671-680.
- Roussel, J.M., Cunjak, R.A., Newbury, R., Caissie, D., et Haro, A. (2004). Movements and habitat use by PIT-tagged Atlantic salmon parr in early winter: the influence of anchor ice. *Freshwater Biology*, **49**, 1026-1035.
- Shen, H.L., L (2003a). Shokotsu River Ice Jam formation. *Cold Regions Science and Technology*.
- Shen, H.T. (2003b). Research on river ice processes: Progress and missing links. *Journal of Cold Regions Engineering*, **17**, 135-142.
- Shen, H.T., Poojitha, D., et Yapa, A.M. (1986). Flow resistance of River Ice Cover. *Journal of Hydraulic Engineering*, **112**.
- Shen, H.T. et Wang, D.S. (1995). Under cover transport and accumulation of frazil granules. *Journal of Hydraulic Engineering*, **121**, 184-194.

- Shen, H.T., Wang, D.S., et Wasantha, A.M.L. (1995). Numerical simulation of river ice processes. *Journal of Cold Regions Engineering*, **9**, 107-118.
- Simpkins, D.G., Hubert, W.A., et Wesche, T.A. (2000). Effects of fall-to-winter changes in habitat and frazil ice on the movement and habitat use of juvenile rainbow trout in a Wyoming tailwater. *Transactions of the American Fisheries Society*, **129**, 101-118.
- Smith, R.W. et Griffith, J.S. (1994). Survival of Rainbow trout during their first winter in the Henrys Fork of the Snake River, Idaho. *Transactions of the American Fisheries Society*, **123**, 747-756.
- Sokal, R.R. et Rohlf, F.J. (1995). *Biometry: the principles and Practice of Statistics in Biological Research*, 3d edn. New-York: W.H. Freeman and Company.
- Stanley, J.G. et Trial, J.G. (1995). *Habitat suitability index models: nonmigratory freshwater life stages of Atlantic salmon*. U. S. Department of the interior, National biological service.
- Statsoft (2001). Statistica.
- Stuart, T.A. (1953). Water currents through permeable gravels and their significance to spawning salmonids, etc. *Nature*, **172**, 77-94.
- Sullivan, L.M., K.A., D., et Losina, E. (1999). Tutorial in biostatistics: an introduction to hierarchical linear modelling. *Statistics in medicine*, **18**, 855-888.
- Terada, K., Hirayama, K., et Sasmoto, M. (1998). Field measurement of anchor and frazil ice. *14th IAHR Symposium on ice*, 697-702.
- Tesaker, E. (1994). Ice formation in steep rivers. *12th International Symposium on Ice*.
- Tsang, G. (1982). *Frazil and anchor ice - a monograph*. National Research Council, Ottawa, Canada.
- Tsang, G. (1992). *Laboratory investigation of frazil evolution, flocculation and the formation of anchor ice*, Rep. No. NHRI Contribution CS-92057. Environnement Canada.
- Walsh, M. et Calkins, D.J. (1986). River ice and salmonids. *4th workshop on hydraulics of river ice*, D.4.4-D.4.26.
- Whalen, K.P. et Parrish, D.L. (1999). Nocturnal habitat use of Atlantic salmon parr in winter. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **56**, 1543-1550.
- Whalen, K.P., Parrish, D.L., et Mather, M.E. (1999). Effect of ice formation on selection of habitats and winter distribution of post-young-of-the-year Atlantic salmon parr. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **56**, 87-96.

- White, K.D. et Moore, J.N. (2002). Impacts of Dam Removal on Riverine Ice Regime. *Journal of Cold Regions Engineering*, **16**.
- Wong, G.Y. et Mason, W.M. (1985). The hierarchical logistic regression model for multilevel analysis. *Journal of the American Statistical Association*, **80**.
- Yamasaki, M., Hirayama, K., Sakai, S., Sasmoto, M., Kiyohara, M., et Takiguichi, H. (1996). Formation of frazil and anchor ice. *IAHR Ice Symposium*, 488-496.
- Yapa, P.D. et Shen, H.T. (1985). River Ice Processes. In *Hydraulics of River Ice*, Vol. CRREL report 85-1. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Zippin, C. (1958). The removal method of population. *Journal of Wildlife Management*, **22**, 82-90.

## REPROGRAPHIE DE LA REMISE FINALE DU MÉMOIRE OU DE LA THÈSE

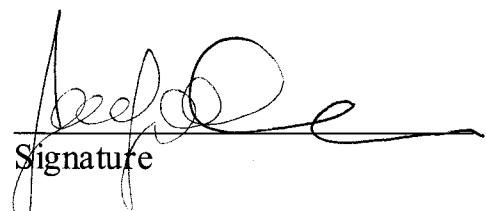
Lors de la remise finale de mon mémoire ou de ma thèse, les photocopies ont été effectuées par :

l'étudiant(e) :



*Les photocopies effectuées par l'étudiant(e)  
seront sous sa responsabilité.*

JEAN-FRANÇOIS BRACCION  
Nom

  
Signature

Nom du directeur de recherche: NORMAND BERGERON

Nom du co-directeur de recherche: \_\_\_\_\_

Boursier ou non-boursier: NON