

Rapport de la
Phase II - Faisabilité

**Développement de solutions techniques
innovatrices pour le contrôle des embâcles
de la rivière Montmorency**



Rapport conjoint enregistré à
l'Université Laval - Département de Génie civil - GCT-2002-03
et à l'INRS-Eau-Terre-Environnement R577b

Février 2002

Rapport de la
Phase II - Faisabilité

**Développement de solutions techniques
innovatrices pour le contrôle des embâcles
de la rivière Montmorency**

Rapport présenté au

Comité de suivi

Projet de contrôle des embâcles de la rivière Montmorency

Rapport conjoint enregistré à
l'Université Laval - Département de Génie civil - GCT-2002-03
et à l'INRS-Eau-Terre-Environnement R577b

février 2002

? Université Laval, 2002 et
Institut national de la recherche scientifique - Eau-Terre-Environnement (ETE)

Pour fins de citation :

Morse B., M. Leclerc, H. Delcourt, J. Francoeur, P. Boudreau (2002). *Développement de solutions techniques innovatrices pour le contrôle des embâcles de la rivière Montmorency – Rapport de la Phase II – Faisabilité.* Rapport présenté au Comité de suivi. Rapport conjoint enregistré à l'Université Laval - Département de Génie civil GCT-2002-03 et à l'INRS-Eau-Terre-Environnement R577b. Janvier. 178 pages.

ÉQUIPE DE RÉALISATION ET/OU DE SUIVI DES DEUX PHASES

Responsabilité administrative, co-direction de projet

Michel Leclerc, D. Ing., professeur, INRS-Eau-Terre-Environnement (INRS-ETE)

Brian Morse, Ph.D., Ing., professeur, département de Génie civil, Université Laval

Solutions techniques, essais en laboratoire et numériques, relevés de glace, identification de sites

Hugues Delcourt, étudiant à la maîtrise, Génie civil, U.L.

Jean Francoeur, Ing. stagiaire, étudiant à la maîtrise, Génie civil, U.L.

Pierrick Blin, étudiant à la maîtrise, INRS-ETE

Marie-Hélène Tremblay, assistante Génie civil, U.L.

Guy Trudeau, assistant Génie civil, U.L.

Jean-François Gagnon, assistant Génie civil, U.L.

Laetitia Delem, assistant Génie civil, U.L.

Véronique Dubos, assistante, INRS-ETE

Modèle numérique de terrain, infographie

Paul Boudreau, M.Sc., agent de recherche, INRS-ETE

Base de données sur les embâcles, planimétrie, entrevues avec les partenaires

Paul Boudreau, M.Sc., agent de recherche, INRS-ETE

Jean Francoeur, Ing. stagiaire, étudiant à la maîtrise, Génie civil, U.L.

Analyse de risques

Michel Leclerc, D. Ing., professeur, INRS-ETE

Pierrick Blin, étudiant à la maîtrise, INRS-ETE

Avis d'expert pour la recherche de solutions techniques

Donald Carter, Ph.D. Ing., consultant (glaces)

Bernard Doyon, Ph.D. Sciences de l'eau, consultant Recherche++(hydrologie des embâcles)

Support numérique et informatique

Yves Secretan, Ph.D., professeur, INRS-ETE

Rédaction du rapport

Brian Morse

Michel Leclerc

Jean Francoeur

Hugues Delcourt

Partenaire privé pour la recherche de solutions techniques

Claude Beaulieu¹, Ing., Groupe-Conseil BPR, (seuils en rivière)

Jean Gauthier, Ing., Groupe-Conseil BPR, (faisabilité)

Pierre Labrie, Ing., Groupe-Conseil BPR, (coûts de réalisation)

Partenaires municipaux et supra-municipaux

Claude Côté¹, Directeur, Sécurité publique, Municipalité de Sainte-Brigitte-de-Laval

Marcel Roy¹, Ing., Directeur des Services techniques, Ville de Beauport

Michel Lefebvre¹, Secrétaire-trésorier, Municipalité de Boischatel

André Bouillon¹, Communauté urbaine de Québec

Claude Langlois¹, M.R.C. de la Jacques-Cartier

Partenaires gouvernementaux

Ministère de l'Environnement

Marcel Laganière¹, Ing., Direction de l'hydraulique et du milieu hydrique (central)

Guy Guilbert, Technicien principal, Direction régionale de Québec

Julie Lafleur, Direction de l'hydraulique et du milieu hydrique (central)

Ministère de la Sécurité Publique

Michel Gascon¹, conseiller en Sécurité civile

Claude Lebel¹, conseiller en Sécurité civile

Daniel Dupuis¹, conseiller en Sécurité civile

Riverains

Représentant l'ensemble des voisinages riverains :

Noël Bédard¹, Président du Comité de citoyens de l'Île-Enchanteresse

ou Pierre Lussier, Sous-Comité des Inondations du Comité de citoyens de l'Île-Enchanteresse

Partenaires privés pour la fourniture de données topographiques

Lasermap, Boucherville (par balayage laser aéroporté)

Géolocation Pagé et Leclair inc., Loretteville (échosondage, DGPS)

¹ Membres du Comité de suivi

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Contexte	1
1.2	Rappel des conclusions de la phase de pré-faisabilité	2
1.2.1	Le coût du risque d'embâcles : 260 000\$/année	2
1.2.2	Un système d'alerte précoce amélioré	3
1.2.3	Quatre scénarios envisagés	3
1.3	Objectifs de la phase de faisabilité	4
2	NOUVELLES DONNÉES CONCERNANT LA GENÈSE DES EMBÂCLES SUR LA MONTMORENCY	6
2.1	Historique des embâcles sur la Montmorency	6
2.1.1	Portée de la base de donnée	7
2.1.2	Description de quelques cas d'embâcles	9
2.1.3	Embâcle du 5 janvier 1999	12
2.1.3.1	Évaluation de la situation des glaces le 25 janvier 1999	12
2.1.3.2	Description physique de l'embâcle	13
2.1.3.3	Interventions réalisées	15
2.1.4	Embâcle du février 1996	15
2.1.5	Embâcle du 12 mars 1992	17
2.1.5.1	Description physique de l'embâcle	18
2.1.5.2	Interventions réalisées	19
2.1.6	Embâcle du 10 février 1986	19
2.1.7	Embâcle du 11 avril 1980	20
2.1.8	Embâcle du 11 janvier 1978	22
2.1.9	Événements antérieurs à 1977	22
2.1.9.1	Embâcle du 7 avril 1976	22
2.1.9.2	Embâcle de décembre 1973	23
2.1.9.3	Embâcle du 15 avril 1964	23
2.1.9.4	Embâcle du 28 décembre 1964	23
2.1.9.5	Embâcle du 21 décembre 1957	23
2.1.9.6	Embâcle de 1947 (date indéterminée)	25
2.1.10	Travaux effectués sur la rivière	25
2.1.10.1	Surcreusement du lit de la rivière	25
2.1.10.2	Dynamitage	25
2.1.10.3	Déblaiement de la glace	26
2.2	Résumé des nouvelles observations sur le terrain : dynamique des glaces	26
2.2.1	Observations recueillies lors des hivers 1999-2000 et 2000-2001	27
2.2.1.1	Faits saillants	27
2.2.1.2	Conclusions pertinentes à l'étude d'implantation d'estacades	28
2.2.2	Évaluation sommaire de la quantité de glace lors d'un embâcle	29
2.2.3	Observation visuelle de l'évolution et de la progression du couvert de glace	30
2.2.3.1	Description des tronçons suivis	30
2.2.3.2	Comparaison et analyse des deux séquences	33

2.2.4	Embâcle du 17 décembre 2000	34
2.2.4.1	Progression de l'embâcle	34
2.2.4.2	Suite des événements	35
2.3	Analyse des facteurs explicatifs de la débâcle et des embâcles	36
2.3.1	Démarche	37
2.3.2	Cueillette des données	37
2.3.3	Facteurs favorisant la débâcle	38
2.3.3.1	Influence du débit	38
2.3.3.2	Influence des conditions météorologiques	40
2.3.3.3	Influence combinée de la pluie et du couvert de neige en place	42
2.3.3.4	Influence de l'état du couvert de glace	44
2.3.4	Facteurs déterminant l'emplacement d'un embâcle	45
2.3.4.1	Influence du débit	45
2.3.4.2	Influence de l'épaisseur du couvert de glace	47
2.3.5	Débit évacuateur	48
2.3.6	Divers	50
2.4	Contribution au système d'alerte précoce	50
3	SOLUTIONS ENVISAGÉES DE CONTRÔLE STRUCTUREL DES EMBÂCLES ET INVENTAIRE DES EXPÉRIENCES ANTÉRIEURES	53
3.1	Scénarios envisagés	53
3.2	Nouvelles voies	56
3.3	Efficacité des estacades conventionnelles existantes	57
3.3.1	L'estacade de Saint-Raymond de Portneuf	57
3.3.2	L'estacade de la rivière Duberger	60
3.3.3	L'estacade de la rivière Saint-Charles	63
3.3.4	L'estacade du pont Champlain (Montréal)	64
3.3.5	L'estacade de Hardwick (Vermont)	66
3.3.6	L'estacade de la rivière Credit (Ontario)	68
3.3.7	Le barrage Sartigan sur la rivière Chaudière	69
3.4	Conclusions	71
4	ANALYSE EN LABORATOIRE DE DISPOSITIFS DE CONTRÔLE DES EMBÂCLES ET ANALYSES NUMÉRIQUES	73
4.1	Méthodologie générale	73
4.1.1	La modélisation physique en laboratoire	73
4.1.1.1	La modélisation de la glace	73
4.1.1.2	La représentation topographique des biefs d'écoulement	75
4.1.1.3	Exemples d'application de la modélisation physique d'embâcles et de structures de contrôle	75
4.1.2	Principes de similitude pour la modélisation physique	79
4.2	Construction du modèle physique	80
4.2.1	Caractéristiques géométriques	81
4.2.2	Fondations de la maquette	82
4.2.3	Réalisation du fond	82

4.2.4	Instrumentation	83
4.2.4.1	Vanne de sortie pour le contrôle du niveau d'eau	83
4.2.4.2	Instrumentation des piliers pour la mesure des forces	83
4.2.4.3	Piézomètres pour la mesure des lignes d'eau	85
4.2.4.4	Fenêtres d'observation en plexiglas	85
4.2.4.5	Déversoirs triangulaires pour la mesure des débits	85
4.2.4.6	Enregistrement vidéoscopique	86
4.2.5	Caractéristiques du modèle de glace	86
4.3	Programme d'essais en laboratoire	87
4.3.1	Plan de test pour les estacades fixes avec ou sans filet	88
4.3.2	Plan de test pour les estacades flottantes avec filet	89
4.4	Résultats des essais : estacades fixes avec filet	90
4.4.1	Tests de référence pour une pente de 0,2 %	90
4.4.1.1	Mesures sur les piliers	90
4.4.1.2	Analyses des forces en fonction du débit	91
4.4.1.3	Analyse des forces en fonction des hauteurs d'eau	93
4.4.1.4	Analyse des distances d'application des forces	96
4.4.1.5	Autres observations	98
4.4.2	Comparaison des tests de référence pour des pentes de 0,2 et 0,66 %	99
4.4.2.1	Les forces	100
4.4.2.2	Analyse des distances d'application des forces	102
4.4.3	Influence de la taille des mailles	103
4.4.3.1	Test des petites mailles	104
4.4.3.2	Test de très grandes mailles	104
4.4.4	Influence de la présence d'une plaine inondable	105
4.4.5	Influence de la hauteur du filet	106
4.4.6	Influence de la présence d'un seuil	106
4.5	Analyses des tests pour une pente de 1.1 %	108
4.5.1	Tests réalisés	108
4.5.2	Forces et hauteurs d'application	109
4.5.3	Relation niveau-débit dans l'embâcle	110
4.5.4	Influence de la hauteur du filet	111
4.5.5	Conclusions pour les tests avec une pente de 1,1%	111
4.6	Résultats des essais : estacades fixes sans filets	112
4.6.1	Estacade de 10 piliers avec gros blocs	113
4.6.2	Rapports entre forces mesurées et forces théoriques	115
4.6.3	Rapports entre les hauteurs d'application des forces et les niveaux d'eau	116
4.6.4	Proportion du débit total passant dans la plaine	117
4.7	Conclusions des essais en maquette : estacades fixes	118
4.7.1	Avantages comparatifs du concept d'estacade fixe avec filet	118
4.7.2	Paramètres d'efficacité	119
4.7.2.1	Grosseur de maille et soutien	119
4.7.2.2	Hauteur de filet et capacité de rétention	119
4.7.2.3	Présence d'un plaine de débordement	120
4.7.2.4	Caractéristiques des forces appliquées sur la structure	120
4.8	Résultats des essais : estacades flottantes à filet	121
4.8.1	Filet, pontons et ancrages utilisés lors des tests	121
4.8.2	Analyse des tests avec une pente de 0,2%	123

4.8.2.1	Forces en fonction du débit	123
4.8.2.2	Influence de la présence de gros blocs devant la structure	125
4.8.2.3	Diamètre des pontons	126
4.8.2.4	Influence de la présence d'un seuil	126
4.8.2.5	Analyse des forces en fonction des hauteurs d'eau	127
4.8.2.6	Analyse des hauteurs d'application	128
4.8.2.7	Proportion du débit total passant dans la plaine de débordement	130
4.8.2.8	Débordement de la structure et « lâchers » de glace	131
4.8.3	Analyse des tests faits avec une pente de 0,66%	132
4.8.3.1	Forces en fonction du débit	132
4.8.3.2	Influence de la rugosité des parois	132
4.8.3.3	Analyse des forces en fonction des hauteurs d'eau	136
4.8.4	Tests faits avec une pente de 1,1%	136
4.8.5	Conclusions des tests avec les estacades flottantes à filet	136
4.8.5.1	Efficacité des estacades flottantes à filet en fonction du débit	137
4.8.5.2	Influence des divers facteurs	137
4.8.5.3	Analyse des forces et des hauteurs d'application	139
4.9	Calculs complémentaires	139
4.9.1	Objectifs spécifiques des simulations numériques	140
4.9.2	Méthodologie de simulation	140
4.9.2.1	Modèle utilisé	141
4.9.2.2	Topographie de la rivière	141
4.9.2.3	Débits et volume de glace	142
4.9.2.4	Calibration et validation	142
4.9.3	Simulations pour les sites #1 et #2	144
4.9.3.1	Conditions simulées	144
4.9.3.2	Résultats	145
4.9.4	Simulations pour le site d'amont du 300 avenue Sainte-Brigitte	146
4.9.4.1	Conditions simulées	146
4.9.4.2	Résultats	146
4.9.5	Simulations du risque résiduel pour le site de la rue des Deux-Rapides	148
4.9.5.1	Conditions simulées	148
4.9.5.2	Résultats	148
4.10	Résumé des conclusions des simulations numériques	149
4.10.1	Abandon des sites #1 et #2	152
4.10.2	Un site retenu : l'amont du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte	152
4.10.3	Les embâcles résiduels en aval de l'Île-Enchanteresse	152
5	FAISABILITÉ DANS LES BIEFS IDENTIFIÉS	154
5.1	Identification des critères de faisabilité	154
5.2	Le rapport coût-bénéfice	154
5.3	Faisabilité technique	156
5.3.1	Site d'implantation	157
5.3.2	Érosion, affouillements et stabilité des talus	157
5.3.3	Accessibilité en phase de travaux	157
5.4	Impact environnemental et conflit d'usage du cours d'eau	158

5.5	Acceptabilité du risque résiduel	159
6	RISQUES D'INONDATION À L'EAU LIBRE DANS LES SECTEURS DE L'ÎLE-ENCHANTERESSE ET DEUX-RAPIDES	160
6.1	But de l'exercice	160
6.2	Portée de l'évaluation	160
6.3	Approche pour l'évaluation	161
6.4	Risques d'inondations par les crues à l'eau libre	161
6.4.1	Propriétés statistiques des crues à l'eau libre	161
6.4.2	Lignes d'eau correspondant aux crues de référence pour l'aide d'étude	162
6.5	La vulnérabilité résidentielle	163
6.5.1	Identification des résidences présumées vulnérables	163
6.5.2	Caractérisation des résidences vulnérables	164
6.5.3	Le stock de résidences	167
6.5.4	Hauteurs de submersion en fonction du débit	167
6.6	Calcul du risque moyen annuel relié aux inondations à l'eau libre	168
6.7	Résultat	170
6.8	Équité	170
6.9	Conclusion	171
7	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	172
7.1	Sur le choix d'une méthode d'intervention	172
7.2	Sur le choix d'un site d'implantation	173
7.3	Sur la faisabilité basée sur les autres critères	173
7.4	Sur la faisabilité d'une relocalisation des populations de l'Île-Enchanteresse et de la rue des Deux-Rapides	174
7.5	Sur la bonification du système d'alerte précoce	174
7.6	Sur la méthodologie utilisée pour l'étude	174
8	BIBLIOGRAPHIE	176
	ANNEXE 1 : CLASSIFICATION DE LA SÉVÉRITÉ DES EMBÂCLES	179
	ANNEXE 2 : ESTIMATION DES COÛTS DE LA SOLUTION	180

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Chaînage kilométrique du réseau hydrographique inférieur de la rivière Montmorency, topographie, pentes typiques et éléments toponymiques	11
Figure 2 : Localisation de l'embâcle survenu le 25 janvier 1999	13
Figure 3 : Situation du couvert de glace en aval de l'Île-Enchanteresse le 25 janvier 1999 (Source : Ministère de l'Environnement du Québec).....	14
Figure 4 : Situation du couvert de glace à la pointe Nord de l'Île-Enchanteresse le 25 janvier 1999 (Source : Ministère de l'Environnement du Québec).....	14
Figure 5 : Tête de l'embâcle du 25 janvier 1999 (Ministère de l'Environnement du Québec).....	15
Figure 6 : Localisation de l'embâcle du 26 février 1996	16
Figure 7 : Vue de l'embâcle du 26 février 1996 (Ministère de l'Environnement du Québec).....	16
Figure 8 : Niveau d'eau atteignant la hauteur de la rue des Deux-Rapides le 26 janvier 1996 (Ministère de l'Environnement du Québec)	17
Figure 9 : Températures maximums et précipitations journalières dans la semaine précédant l'embâcle du 12 mars 1992	17
Figure 10 : Localisation de l'embâcle du 12 mars 1992	18
Figure 11 : Situation à la pointe Sud (aval) de l'Île-Enchanteresse (a) et au pont (b) le 12 mars 1992 (Ministère de l'Environnement du Québec)	18
Figure 12 : Embâcle du 12 mars 1992 - Les glaces envahissent la majeure partie de l'Île. La zone encadrée à l'image (a) est agrandie en (b) (Source : Ministère de l'Environnement du Québec)	19
Figure 13 : Pelle mécanique en difficulté lors des travaux effectués suite aux événements de mars 92 (Ministère de l'Environnement du Québec)	19
Figure 14 : Localisation de l'embâcle du 10 février 1986	20
Figure 15 : Intervention réalisée dans le chenal ouest à la hauteur du centre de l'Île-Enchanteresse (a) et à la pointe amont (b) (Source : Ministère de l'Environnement du Québec).....	20
Figure 16 : Inondation créée par un embâcle sur la rue des Deux-Rapides le 11 avril 1980 (Source : Ministère de l'Environnement du Québec)	21
Figure 17 : Températures maximums et précipitations journalières dans la semaine précédant l'embâcle du 11 avril 1980	21
Figure 18 : Localisation de l'embâcle du 11 janvier 1978	22

Figure 19 : Températures maximums et précipitations journalières dans la semaine précédant l'embâcle du 7 avril 1976.....	23
Figure 20 : Érosion des berges suite à la purge rapide de l'eau retenue derrière l'embâcle de décembre 1957.....	24
Figure 21 : Épaisseur des glaces dans le secteur "Vieille École" en février 2000	28
Figure 22 : Zones d'observation lors des campagnes de terrain 1999-2000 et 2000-2001	31
Figure 23 : Vue vers l'amont à la hauteur du 300 avenue Sainte-Brigitte le 2 décembre 2000 (à gauche). Vue vers l'aval à la rue Parent le 10 décembre 2000 (à droite)	31
Figure 24 : Vue du seuil à la hauteur du site "vieille école" pris en septembre 2000 (à gauche). Vue vers l'amont de la rivière à partir du Nettoyeur Coté (km 15) prise le 12 décembre 2000 (à droite).....	32
Figure 25 : Vue vers l'amont du bras ouest (secondaire) de l'Île-Enchanteresse prise le 16 décembre 2000 (à gauche). Rapides dans le bras est (principal) de la rivière à l'Île-Enchanteresse pris en décembre 1999 (à droite).	33
Figure 26 : Vue depuis la rue Côte-du-Lac en direction amont (à gauche) prise le 16 décembre 2000. Vue vers l'aval après le passage de la débâcle le 19 décembre 2000 (à droite)	33
Figure 27 : (a) travaux de dégagement d'un chenal suite à l'embâcle (b) Brian Morse indiquant le niveau atteint par l'eau à proximité du lac du Délaissé	36
Figure 28: Historique des variations maximales du débit horaire lors de la formation des embâcles	39
Figure 29: Débit moyen à la prise des glaces et variation maximale des débits horaires lors de la formation des embâcles	39
Figure 30: Pluies totales tombées dans la semaine précédant la formation d'un embâcle	40
Figure 31: Degrés-jours de fonte enregistrés au moment de la formation d'un embâcle	41
Figure 32: Température de l'air maximale atteinte dans la semaine précédant la formation de l'embâcle	42
Figure 33 : Pluies totales tombées lors de la formation de l'embâcle et neige au sol correspondante	43
Figure 34: Degrés-jours de gel accumulés lors de la formation de l'embâcle et débit moyen journalier correspondant.....	44
Figure 35: Débits journaliers moyens et localisation de l'embâcle correspondant	45
Figure 36: Débits moyens journaliers maximums précédant l'embâcle et localisation de l'embâcle correspondant	46
Figure 37 : : Accumulation des degrés-jours de gel pour un embâcle et son lieu de formation.....	47
Figure 38 : Estacade de Saint-Raymond de Portneuf (Source : Ministère de l'Environnement)...	57

Figure 39 : Accumulation de glace sur l'estacade de Saint-Raymond de Portneuf (Magella Dery, riverain, photo non datée)	59
Figure 40 : Vues de l'estacade Duberger (Delcourt, 7 mars 2000).....	61
Figure 41: Vues de l'amont de l'estacade de la rivière Duberger (Morse, 7 mars 2000)	62
Figure 42 : Vue de l'aval de l'estacade de la rivière Duberger (Delcourt, 7 mars 2000)	62
Figure 43 : Sortie d'eau en amont de l'estacade (Morse, 7 mars 2000).....	62
Figure 44 : Vue de l'amont de l'estacade de la rivière Duberger à la fin de l'hiver 2000-2001. Résidus de glace accumulés en amont de l'estacade (Delcourt, 20 mars 2001).....	63
Figure 45 : Sortie d'eau en amont de l'estacade (Delcourt, 20 mars 2001)	63
Figure 46 : Structure de la rivière Saint-Charles	64
Figure 47 : Estacade du pont Champlain à Montréal (Source : PJCCI, 2001)	66
Figure 48 : Estacade de Hardwick durant l'embâcle du 16 mars 1995 (Lever et coll., 1997).....	67
Figure 49 : Schéma de principe de la structure de Hardwick (Lever et coll., 1997).....	67
Figure 50 : Vue de l'estacade de Hardwick durant les hivers 1995 et 1996 (URL du CRREL, 2000).....	68
Figure 51: Vue de l'embâcle sur la rivière Lamoille (2 mars 2000)	68
Figure 52 : Estacade de la rivière Credit (Mississauga, Ontario). Vue de la structure et de la plaine inondable (Tuthill, 1995).....	69
Figure 53 : Vanne de fond du barrage Sartigan (Delcourt, hiver 99-00).....	70
Figure 54 : Détail des grilles protégeant le déversoir (Delcourt, hiver 99-00).....	70
Figure 55 : Face amont du barrage Sartigan (Delcourt, hiver 99-00)	71
Figure 56 : Face aval du barrage Sartigan (Delcourt, hiver 99-00).....	71
Figure 57 : Modèle de la rivière Lamoille à Hardwick (source : Lever et coll., 1997).....	78
Figure 58 : Modèle de la rivière Cazenovia (Source : Lever & coll. 2000).....	78
Figure 59 : Caractéristiques géométriques de la maquette	81
Figure 60 : Vue générale de la maquette	81
Figure 61 : Murs délimitant la maquette.....	82
Figure 62 : Épandage du coulis de ciment sur le gravier	82
Figure 63 : Vanne de contrôle du niveau aval.....	83

Figure 64 : Base de support des piliers.....	83
Figure 65 : Schéma de principe de la mesure de forces.....	84
Figure 66 : Exemple de forces et distances d'application mesurées par les piliers jaugés.....	84
Figure 67 : Panneau de lecture des piézomètres.....	85
Figure 68 (a,b) : Fenêtre de plexiglas et vue d'un embâcle à travers la fenêtre.....	85
Figure 69 : Déversoir du côté de la plaine et tige limnimétrique.....	86
Figure 70 : Répartition des diamètres de blocs de plastique dans la glace modèle.....	87
Figure 71 : Structure de référence.....	90
Figure 72 : Évolution des forces axiales en fonction du temps sur le pilier 1.....	91
Figure 73: Évolution des distances d'application des forces en fonction du temps sur le pilier 1 (1 unité de temps =3 sec).....	92
Figure 74 : Mesure des forces en fonction du débit total pour piliers avec filet à mailles de référence.....	92
Figure 75 : Impact des glaces sur la structure pour le test de référence du 31 juillet.....	95
Figure 76 : Présence de pics de force lors d'un test sur la structure de référence.....	96
Figure 77 : Synthèse des distances d'application des forces (Unités modèle).....	97
Figure 78 : Filet écrasé par les glaces.....	99
Figure 79 : Comparaison des niveaux d'eau lors des tests de mesure du coefficient de Manning pour des pentes de 0,2% et 0,66%.....	99
Figure 80 : Comparaison des forces en fonction du débit pour les deux pentes (Unités modèle)	100
Figure 81 : Impact de glace sur la structure de référence (22 août 01) en unités modèle.....	101
Figure 82 : Surcharge en présence d'un couvert (Test du 22 août 01) en unités modèle.....	102
Figure 83 : Distance d'application des forces pour la structure de référence - Pente de 0,0066 – Unités du modèle.....	102
Figure 84 : Filets à très grandes mailles et à petites mailles.....	103
Figure 85 : Lâcher de glace pour l'estacade avec filet à petites mailles.....	104
Figure 86 : Lâcher de glace pour estacade avec filet à très grandes mailles.....	105
Figure 87 : Influence de la présence d'une plaine inondable sur les hauteurs d'eau pour une pente de 0.2% (a) et 0.66% (b).....	105

Figure 88 : Lectures piézométriques du test de sensibilité à la présence d'un plan d'eau (Unités modèle).....	107
Figure 89 : Hauteur d'eau pour le test avec plan d'eau et le test de référence (Unités modèle)..	107
Figure 90 : Valeurs observées de la relation hauteur-débit dans un embâcle.....	110
Figure 91 : hauteur et débit de lâcher en fonction de la hauteur du filet.....	111
Figure 92 : Simulation d'une structure à 10 piliers avec gros blocs en avant	113
Figure 93 : 10 piliers avec gros blocs - Évolution des lignes d'eau.....	114
Figure 94 : 10 piliers seuls pour un débit de 600 m ³ /s (prototype)	114
Figure 95 : Proportion du débit total passant dans la plaine	118
Figure 96 : (a) estacade-filet avec 5 pontons et (b) estacade 4 pontons	122
Figure 97 : Séries d'ancrages du filet au fond de la rivière en aval des piliers.....	123
Figure 98 : Forces en fonction des débits pour les tests analysés à une pente de 0,2%.....	124
Figure 99 : Convention retenue pour le sens des forces (pris dans le sens d'écoulement du canal).....	125
Figure 100 : Courbes pour différents débits du rapport $F_{mesu}/F_{théo}$ en fonction de la distance à l'estacade en unités de prototype.....	127
Figure 101 : Rapport de $F_{mesu}/F_{théo}$ en fonction du débit pris au début de la section d'équilibre de l'embâcle	128
Figure 102 : Hauteur d'application des forces axiales lors des tests analysés avec une pente de 0,2%.....	129
Figure 103 : Pourcentage du débit passant par la plaine inondable (pente de 0,2%)	130
Figure 104 : Enfoncement du ponton central lors de divers tests	131
Figure 105 : Enfoncement du centre de l'estacade à des débits de 200 et 300 m ³ /s	134
Figure 106 : Estacade-filet « raccourcie » (a) à 100 m ³ /s (b) aux environs de 400 m ³ /s	134
Figure 107 : Forces totales enregistrées sur chaque pilier lors des tests 14 et 17	135
Figure 108 : Débit maximaux atteints lors des tests d'estacades flottantes avec filets.....	138
Figure 109 : Exemple de sortie graphique du logiciel HEC-RAS (embâcle de 1992).....	144
Figure 110 : Impact sur le bief amont de l'installation d'une structure de contrôle des glaces au site #1 lors d'un événement semblable à celui de 1992 à l'Île-Enchanteresse	145
Figure 111 : Impact sur le bief amont de l'installation d'une structure de contrôle des glaces au site #2 lors d'un événement semblable à celui de 1992 à l'Île-Enchanteresse	146

Figure 112 : Niveau d'eau atteint lors d'un embâcle formé sur une structure située en amont du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte	147
Figure 113 : Reconstitution de l'embâcle de 1947 tel qu'observé (en haut) et ce qui se serait produit si une estacade était implantée en amont du 300 Sainte-Brigitte (en bas)	150
Figure 114 : Reconstitution de l'embâcle de 1992 tel qu'observé (en haut) et ce qui se serait produit si une structure de contrôle des glaces avait existé un peu en amont du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte (en bas).....	151
Figure 115 : Planimétrie du secteur de l'Île Enchanteresse.....	165
Figure 116 : Planimétrie du secteur de la rue des Deux-Rapides	165
Figure 117 : Variable définissant la hauteur de submersion.....	168
Figure 118 : Interprétation graphique du risque.....	169
Figure 119 : Paramètres de la loi de Gompertz pour le calcul du taux d'endommagement en fonction de la submersion.....	170

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Données de base sur les embâcles de la rivière Montmorency (Repris et adapté du rapport de Pré-faisabilité notamment pour les dates - Sources diverses).....	8
Tableau 2 : Chaînage kilométrique adopté pour l'étude	10
Tableau 3 : Localisation et extension de quelques événements d'embâcles	12
Tableau 4 : Dates de disparition de la glace sur la rivière Montmorency (Source: archives, MEnv)48	48
Tableau 5 : Débits moyens journaliers au moment de la disparition de la glace sur la rivière Montmorency (Source: archives, MEnv)	49
Tableau 6 : Synthèse des règles décrivant l'amorce d'une débâcle sur la rivière Montmorency....	52
Tableau 7 : Coûts – bénéfiques des solutions envisagées en phase I (Pré-faisabilité).....	56
Tableau 8 : Équivalences de similitude de Froude pour une échelle de 40	80
Tableau 9 : Tests d'estacades fixes réalisés sur la maquette	88
Tableau 10 : Détails des tests réalisés sur le modèle physique avec des estacades flottantes avec filet.....	89
Tableau 11: Rapport entre forces mesurées et forces hydrostatiques théoriques.....	94
Tableau 12 : Rapports hauteur d'application des forces/hauteur d'eau - Pente de 0,002.....	98
Tableau 13 : Rapport forces mesurées /forces théoriques pour l'ensemble des tests à 0,0066....	101
Tableau 14 : Rapport hauteur d'application des forces / hauteur d'eau pour la structure de référence - Pente de 0,0066.....	103
Tableau 15 : Coefficient de Manning en fonction du débit $n(Q)$	108
Tableau 16 : Plan de test pour les essais d'estacades fixes avec filet et une pente de 1,1%	109
Tableau 17 : Forces et distances d'application avec une pente de 1,1%.....	109
Tableau 18 : Rapports forces mesurées/forces théoriques pour l'ensemble des tests à pente de 0,002	115
Tableau 19 : Rapports forces mesurées/forces théoriques pour l'ensemble des tests à 0,0066 ...	115
Tableau 20 : Rapports hauteurs d'application des forces/niveaux d'eau – Ensemble des tests avec une pente de 0,002.....	116
Tableau 21 : Rapports hauteurs d'application des forces/niveaux d'eau - Pente de 0.0066.....	117
Tableau 22 : Niveaux d'eau observés et simulés pour l'événement de 1999	143

Tableau 23 : Niveau d'eau observé et simulé pour l'événement de 1992.....	143
Tableau 24 : Bilan des coûts annuels et des bénéfices escomptés de l'installation d'une estacade fixe avec filet à l'amont immédiat du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte.....	156
Tableau 25 : Statistiques de crues maximums annuelles sur la rivière Montmorency selon les méthodes du dépassement appliquées aux pointes horaires et du maximum annuel horaire (extrait de Leclerc et coll., 2000).....	162
Tableau 26 : Validation des plans d'eau générés à partir des calculs hydrauliques du ministère ..	163
Tableau 27: Validation des stations topographiques temporaires et comparaison des jeux de données topographiques.....	166

Remerciements

Les auteurs et participants de cette étude tiennent sincèrement à remercier les partenaires financiers du projet qui ont collaboré à mettre en place les moyens requis pour réaliser cette ambitieuse initiative :

1. La Ville de Beauport qui agit aussi comme promoteur du projet vis-à-vis du Programme conjoint de protection civile;
2. La municipalité de Sainte-Brigitte-de-Laval;
3. La municipalité de Boischatel;
4. Le Centre d'Études et de Recherches sur les Infrastructures municipales (CÉRIU) qui a rapidement cru au projet et s'est rapidement inscrit dans le partenariat;
5. Le Programme conjoint fédéral-provincial pour la Protection civile (PCPC) qui a complété le financement.

Nous désirons également remercier tous les partenaires dont plusieurs sont mentionnés dans le générique de ce rapport, pour leur contribution précieuse à divers niveaux : conseils, expertise, données historiques, logistique, etc.

1 Introduction

1.1 Contexte

Quelques passages ci-après sont empruntés du rapport de pré-faisabilité (Leclerc et coll., 2001) car nous avons jugé pertinent de situer les travaux de cette phase technique dans l'esprit et les objectifs qui animent le projet depuis son lancement à la fin de 1999.

Quatre municipalités principales se partagent les rives de la rivière Montmorency, un cours d'eau présentant une problématique d'embâcles fréquents et sévères pour certaines d'entre elles: Beauport, Sainte-Brigitte-de-Laval et Boischatel. Plusieurs éléments vulnérables aux inondations y sont en effet présents dont la prise d'eau de Beauport, et plusieurs quartiers résidentiels riverains notamment l'Île-Enchanteresse, les rues des Deux-Rapides, Côte-du-Lac et Bocage ainsi que les secteurs des Îlets, des Trois-Saults et du lac du Délaisse. En plus de représenter une menace pour l'intégrité des personnes, les embâcles hivernaux sont potentiellement et particulièrement dévastateurs et ils occasionnent des dépenses importantes et récurrentes pour les pouvoirs publics à tous les niveaux en plus d'handicaper lourdement la valeur marchande des propriétés affectées, et partant, le rendement fiscal pour les municipalités. Les seules solutions préventives possibles à l'heure actuelle sont les évacuations et elles ne permettent que de minimiser les risques de pertes de vie et certaines pertes matérielles (ex : véhicules automobiles, biens personnels). Les indemnisations postérieures aux sinistres représentent des sommes importantes et imprévisibles.

Toutes les études antérieures ont conclu qu'il n'y avait pas de solution technique (structurelle) au problème, ou s'il y en avait une, par exemple un barrage en amont des secteurs vulnérables (Barabé, 1978), son coût a été jugé prohibitif (typiquement 10M\$ de 1994, selon BPR Groupe Conseil, 1994) en regard du bénéfice escompté. Le surcreusement de la rivière à la hauteur de l'Île-Enchanteresse souhaité par certains de ses résidents ne ferait qu'exporter les embâcles en aval, dans un secteur encore plus vulnérable où l'on trouve la prise d'eau de Beauport et des quartiers résidentiels contigus (Barabé, 1978; Verreault, 1990).

En pratique, la solution actuellement appliquée, et la seule apparemment disponible, est un *statu quo* perçu comme coûteux, récurrent et aléatoire, axé sur les évacuations et l'indemnisation, ainsi que sur des travaux ponctuels d'excavation de chenal d'écoulement dans les embâcles.

Lors de la phase de pré-faisabilité, une évaluation intégrée du risque comprenant toutes les classes de dommages et ceux d'incertitude, a démontré que son coût moyen annuel se situe autour à 260 000\$, ce qui, si l'on désire réaliser des économies et assainir la situation dans une perspective équitable pour les intervenants et les victimes, ouvre la voie au financement de solutions techniques.

Depuis quelques années sont apparues de nouvelles approches d'aménagements remédiateurs aux embâcles considérées comme économiques et sécuritaires pour l'environnement (Lever et coll., 1997). Cette nouvelle donne nous permet d'entrevoir une redéfinition de la problématique de la rivière Montmorency qui ferait place à une réduction significative des risques, et éventuellement à une meilleure mise en valeur de ce cours d'eau. On considère cependant que, dans l'état actuel de l'art, la pente du cours d'eau doit être relativement faible pour garantir le succès de l'intervention. La rivière Montmorency présente malheureusement des pentes assez fortes (4/1000 à 1/100) qui font que cette solution doit être étudiée très attentivement pour en démontrer l'efficacité et la faisabilité technique.

L'objectif global des deux phases du projet est :

de revoir la problématique et de rechercher une solution globale éventuellement innovatrice aux risques d'embâcles sur la rivière Montmorency à partir de principes de rentabilité économique, de durabilité, de respect du milieu naturel et de partenariat équitable entre les divers intervenants du bassin.

Les partenaires du projet -- municipalités, ministères provinciaux, M.R.C., C.U.Q., INRS-Eau, Université Laval, riverains, etc. -- réunis en Comité de suivi² s'étaient entendus dès le départ pour qu'une étape de pré-faisabilité soit réalisée avant de poursuivre la recherche de solutions techniques détaillées à l'aide de tests en laboratoire ou de simulations numériques qui deviendraient les objectifs de la deuxième phase. Diverses considérations devaient être examinées en phases de pré-faisabilité, puis de faisabilité : *présence de sites prometteurs, acceptabilité des risques résiduels, avantage coût/bénéfice, impact environnemental, aspect géotechnique.*

1.2 Rappel des conclusions de la phase de pré-faisabilité

1.2.1 Le coût du risque d'embâcles : 260 000\$/année

Une des conclusions majeures de la phase I était que le coût intégré du risque d'embâcle se situe autour de 260 000\$/année pour l'ensemble des intervenants sur la rivière Montmorency. Le principe d'équité requérant qu'on établisse la ventilation des coûts, l'exercice qui fut fait alors a

² Instance *ad hoc* formée de représentants des partenaires du projet et mise en place en vue d'assurer la prise en compte des différents points de vue et intérêts sur la question à l'étude.

permis d'estimer la part de chacun. La facture se répartit donc ainsi : **65 345 \$** pour les riverains; **101 370 \$** pour les pouvoirs locaux et **93 726 \$** pour les gouvernements. Dans le cas des 173 riverains à risque identifiés, nous estimons que ceux-ci assument 285 \$ chacun en moyenne.

1.2.2 Un système d'alerte précoce amélioré

Avant d'aborder les solutions techniques, les études de la phase I avaient établi d'emblée que la gestion de la problématique, même dans le *statu quo*, devrait comporter des interventions additionnelles comme la mise en place d'un *système d'alerte précoce* efficace pour hâter les évacuations et ainsi minimiser les coûts humains associés à ces aléas. Des essais ont été réalisés afin de mettre en place un dispositif automatisé déclencheur d'alerte lorsque le couvert de glace se met en mouvement à l'amont du secteur soumis à la débâcle. Les résultats se sont avérés prometteurs. De plus, les consignes météorologiques méritaient d'être ré-examinées avec un regard neuf. Des résultats nouveaux seront présentés dans le présent rapport.

1.2.3 Quatre scénarios envisagés

Au-delà du *statu quo* (évacuations, indemnisations, travaux remédiateurs temporaires) comme *base de comparaison*, trois scénarios de base et leurs variantes avaient été identifiés et analysés sommairement au cours de la Phase I, incluant l'identification de sites propices pour leur implantation:

1. différentes variantes comportant un(des) ouvrage(s) léger(s) construit(s) à l'amont des secteurs vulnérables, dispositifs comprenant des estacades fixes avec ou sans filet, des estacades flottantes et une série de seuils;
2. un ouvrage léger construit à l'aval de l'Île-Enchanteresse nécessitant la relocalisation de ses résidents et permettant une redéfinition de sa vocation (parc à glace, parc récréo-touristique selon les saisons, couloir vert);
3. un barrage lourd en amont des secteurs vulnérables.

L'identification de ces scénarios n'était pas exhaustive et laissait place au développement de nouveaux pour la présente phase II, incluant l'identification de meilleurs sites.

L'hypothèse d'un barrage lourd a été facilement écartée notamment à cause de son coût que ne justifient pas à aux seuls les coûts inhérents aux risques. De plus, l'impact environnemental était redouté. Seul l'examen d'un scénario d'implantation multi-objectif (eau potable, hydro-électricité, récréo-tourisme) permettrait de relancer l'examen de ce scénario mais cette perspective débordait largement la portée de cette étude.

L'implantation d'un ouvrage léger en aval de l'Île-Enchanteresse est techniquement la solution la plus évidente et la plus sûre à condition que les riverains à risque dans le bief d'implantation et immédiatement en amont soient relocalisés et/ou expropriés. Les coûts sociaux et économiques

d'un tel scénario sont considérables mais méritaient d'être examinés. Un des objectifs de cette phase était de vérifier si les gains réalisés par une telle solution à l'égard des risques d'inondation à l'eau libre pourraient aider à qualifier cette solution du moins sur le plan économique. Un chapitre de ce rapport est réservé à cette question (Chapitre 6).

Quand aux scénarios légers situés en amont de l'Île-Enchanteresse, seul l'établissement d'estacades fixes avait vraiment survécu à l'examen préliminaire, dispositif primaire situé assez près des sites à protéger pouvant être assorti d'interventions complémentaires, de type estacade flottante visant à minimiser et retarder l'apport de glace dévalant de l'amont. Pour les estacades fixes, deux sites avaient été identifiés immédiatement à l'amont de l'Île-Enchanteresse, endroits répondant techniquement aux critères morphologiques fixés pour ce type d'intervention. Cependant, la présence d'éléments riverains vulnérables dans les biefs d'amont (bâtiments résidentiels, infrastructures routières) soulevait des doutes sur la faisabilité de tels scénarios du point de vue des risques résiduels. Il fallait examiner cette question et éventuellement partir à la recherche de nouveaux sites.

1.3 Objectifs de la phase de faisabilité

Conformément au programme de recherches et d'études établi initialement pour l'ensemble du projet et suite aux résultats et conclusions tirés de la phase I de pré-faisabilité, le mandat de la phase de faisabilité comprend les éléments suivants :

1. Les études en laboratoire sur le comportement de structures de type peignes, seuils-peignes, avec ou sans filet et estacades flottantes et sur leur capacité de retenir les glaces dans un tronçon fluvial de pente forte, similaire aux conditions morphologiques prévalant sur la rivière Montmorency aux sites envisagés ;
2. Les calculs numériques visant, par le recours aux outils mathématiques appropriés, à définir en mode statique les grands paramètres du comportement des embâcles dans les biefs d'amont identifiées comme propices à la réception des structures envisagées ;
3. Les études de risques résiduels ou complémentaires, notamment, dans les biefs d'amont des sites d'intervention ainsi que dans leurs biefs d'aval;
4. Les risques associés aux conditions d'inondation à l'eau libre dans les secteurs de l'Île-Enchanteresse et de la rue des Deux-Rapides;
5. Les éléments additionnels de validation requis pour recommander une ou des solutions ;
6. Les nouveaux éléments permettant de bonifier le dispositif d'alerte précoce existant sur le bassin.

Dans ce rapport, on trouve d'abord plusieurs éléments d'information repris et mis à jour ou complètement nouveaux concernant la genèse et la dynamique des embâcles dans la rivière Montmorency.

Dans le chapitre suivant, un rappel un peu plus détaillé des hypothèses de solutions et scénarios envisagés est incorporé. De plus, l'existence de dispositifs similaires à ceux proposés en plusieurs endroits de l'est de l'Amérique du nord nécessitait qu'on examine l'efficacité de ces ouvrages afin d'en tirer les leçons.

Le chapitre principal de ce rapport est consacré aux tests en laboratoire lesquels permettent, faute de pouvoir tester les ouvrages en nature, d'en analyser le comportement sur maquette, de quantifier des variables importantes comme les forces exercées sur les ouvrages et les débits de conception.

Les autres chapitres sont dédiés à des aspects complémentaires comme les implications pratiques (faisabilité) des solutions analysées, incluant le choix définitif d'un site propice, les impacts résiduels associés au scénario proposé et quelques considérations relatives à l'impact sur l'écologie du cours d'eau et ses usages existants ainsi qu'à l'accessibilité au site pour la réalisation des travaux. De plus, il sera question des risques à l'eau libre du côté de l'Île-Enchanteresse et de la rue des Deux-Rapides dans le contexte déjà mentionné.

Enfin, nous concluons l'ensemble des études sur quelques recommandations pour la suite du processus.

2 Nouvelles données concernant la genèse des embâcles sur la Montmorency

2.1 Historique des embâcles sur la Montmorency ³

Disposer d'une base de données bien documentée sur les embâcles historiques est essentiel pour comprendre la dynamique hivernale et printanière d'un cours d'eau. Par contre, la création d'une telle banque d'information n'est pas chose facile. La multitude des sources d'information et l'hétérogénéité des données et informations collectées compliquent la tâche de l'analyste. Le besoin de mettre en place un système d'archivage de toute l'information disponible a été souligné par le *Cold Region Research and Engineering Laboratory* de l'Armée américaine (CRREL) dans un article de White (1996) qui plaide pour la création d'une base de données complète et homogène sur les embâcles. La soudaineté et l'imprévisibilité de ce genre d'aléas demande souvent une réaction rapide, tant du citoyen que des autorités officielles. De plus, contrairement aux inondations en eau libre, les informations concernant les inondations dues aux embâcles sont habituellement plus dispersées si bien que la mise en commun des renseignements obtenus par chacun, en situation opérationnelle et lors du suivi, est alors parfois laborieuse.

Heureusement, des efforts importants ont depuis longtemps été déployés par les services compétents du gouvernement du Québec pour documenter les embâcles sur la rivière Montmorency; à cet égard, la contribution de Guy Guilbert du ministère de l'Environnement (région de Québec) est à signaler. Cette préoccupation est sans doute liée à la fréquence des problèmes qui y surviennent et aux tentatives répétées d'y apporter une solution, entreprise qui demandait bien sûr de documenter les processus.

³ Certaines parties de cette section ont été extraites de *Rapport de pré-faisabilité ; Analyse de risques d'inondations par embâcles de la rivière Montmorency et identification de solutions techniques innovatrices*. Ce rapport fut présenté au Comité de suivi le 30 janvier 2001.

2.1.1 Portée de la base de donnée

Si les données fournies par le Ministère de l'Environnement ont constitué la principale source, d'autres informations produites ailleurs étaient disponibles. Une des premières tâches qui s'imposait a été la collecte des renseignements disponibles auprès des divers intervenants. En plus du ministère de l'Environnement, les sources d'information furent les municipalités de Sainte-Brigitte-de-Laval et Boischatel, la Ville de Beauport, la MRC Jacques-Cartier, la Communauté urbaine de Québec, et la Sécurité publique du Québec et occasionnellement, les riverains de la rivière Montmorency. La base de données couvre une période de 55 ans comprise entre les années 1947 et 2001. Il faut toutefois noter que la période s'étendant de 1947 à 1964 n'est documentée qu'au niveau de deux événements de très grande sévérité soit :

- ✍ celui de 1947 à l'Île-Enchanteresse qui, selon des témoins oculaires, (Comité de Citoyens de l'Île-Enchanteresse) aurait été totalement submergée suite à un embâcle majeur accompagné de fort ruissellement;
- ✍ celui de 1957 au secteur des Trois-Saults qui, également selon des témoins oculaires, a causé une submersion prolongée du secteur des Îlets et des dommages importants lors de son démantèlement.

À partir de l'année 1964 et jusqu'en 1992, une grande quantité d'information avait déjà été colligée par la Direction régionale de Québec du Ministère de l'Environnement du Québec. Ces informations avaient été produites par la Direction régionale elle-même ou par d'autres services gouvernementaux dont les services centraux du même ministère ainsi que ceux du Ministère de la Sécurité publique. Ces données avaient permis la création d'une carte où sont indiquées la date de chaque événement ainsi que la localisation du pied de l'embâcle. Ce document ne montre cependant pas l'endroit où s'est établi la tête de l'embâcle. Doté d'un tel outil, il fut plus facile de retrouver l'information et les photographies prises en avion ou en hélicoptère par le ministère de l'Environnement ou la Sécurité civile ainsi que celles recueillies par des riverains. L'étude des photographies a permis de mesurer l'extension de ces divers événements vers l'amont.

Par ailleurs, grâce aux entrevues avec des riverains, il a été possible d'intercaler de nouveaux événements dans la liste, bien que déjà fort complète, de la Direction régionale. Ces événements, tous mineurs et sans grand impact, étaient passés inaperçus aux autorités qui n'avaient pour la plupart du temps même pas été averties. Le Tableau 1 présente la synthèse des événements historiques reliés aux embâcles recensés dans le cadre de ce travail, incluant les débits maximums journaliers observés lors de ces événements. Dans certains cas, il a été jugé utile d'ajouter des informations relatives aux interventions réalisées ou au nombre de résidences affectées.

Il y a eu 27 événements d'embâcles signalés dans les 55 dernières années. Sur ce nombre, 11 ont eu lieu depuis le début des années 1990. Les embâcles récents de 1992 et 1999 ont été particulièrement sérieux. Ils ont entraîné l'évacuation, parfois complète, des résidents de l'Île-Enchanteresse ainsi que l'inondation des 3/4 de cette dernière. Bien que ces deux cas furent critiques, ils ne se comparent pas à l'embâcle de 1947 à l'Île-Enchanteresse ou de 1957 dans le secteur des Îlets. Celui de 1947 aurait, selon les témoignages, fait monter le niveau d'eau de plus de 7,5 m et submergé la totalité de l'Île-Enchanteresse. En 1957, à Beauport, l'eau aurait dépassé d'environ 7 m son niveau normal et aurait noyé de larges bandes de terres riveraines des villes actuelles de Beauport et Boischatel en plus d'entraîner des glissements de terrain majeurs.

**Tableau 1 : Données de base sur les embâcles de la rivière Montmorency
(Repris et adapté du rapport de Pré-faisabilité notamment pour les dates - Sources diverses)**

DATE	CLASSE ⁴	SECTEURS AFFECTÉS	DÉBIT (m ³ /s)	REMARQUES	SOURCE
1947	5	Île-Enchanteresse	n/d	Île-Enchanteresse submergée complètement	Comité de citoyens de l'Île-Enchanteresse
57-12-21	5	Des Îlets – Trois-Saults	n/d	Embâcle dynamité – dommages d'érosion	Témoignages visuels de résidents
64-04-15	3	Secteur au sud de l'Île-Enchanteresse	n/d	Dommmages importants aux résidences, rues et pont Dynamitage inefficace	
64-12-28	2	1.5 km en aval des travaux de nov. 1964	85	L'embâcle a cédé après son dynamitage	Guilbert (1993) & Barabé (1978)
72-08-02		Gros chenal : 92 m. Branche ouest : 730 m.	20	Travaux pour faire disparaître les hauts fond, Améliorer la période de débâcle et eau libre	
73-12-01	1	En amont du rapide des Trois-Saults en remontant vers l'Île-Enchanteresse	46	Fondu sans problème au printemps (résultats des travaux aléatoires)	
76-04-07	1	Branche secondaire de l'Île-Enchanteresse	100		Guy Guilbert (1993)
78-01-11	3	Rues du Bocage, Côte-du-Lac (évacuée) et Deux Rapides (embâcle de 3 km et de 5 m de hauteur)	20	41 chalets et 3 résidences affectés (embâcle de l'aval de lignes de transmission à l'aval de l'Île-Enchanteresse)	Guilbert (1993) & Barabé (1978)
79-03-07	2	2 branches de l'Île-Enchanteresse obstruées	155	Tranchée pratiquée à travers l'embâcle, glace déposée en rive droite. Hauteur de l'embâcle d'environ 3 m	Guilbert (1993) & Rapport d'inspection de Gilles Barabé
80-04-11	2	Secteur de la rue des Deux Rapides	190		
81-02-22	2	2 branches obstruées, Rue du Bocage submergée	47	Déblai du chenal.	Guilbert (1993)
82-04-18	1	Aval de l'Île-Enchanteresse	8	Le secteur n'est pas inondé	

⁴ La classification adoptée a été développée dans le cadre de la phase I de pré-faisabilité. On trouvera à l'Annexe 1 les éléments d'interprétation utilisés pour définir les classes.

Tableau 1 (suite) : Données de base sur les embâcles de la rivière Montmorency

DATE	CLASSE	SECTEURS AFFECTÉS	DÉBIT (m ³ /s)	REMARQUES	SOURCE
83-03-04	2	Beauport - Pied du Trois-Saults; Boischatel - Rue des Émeraudes	10	Chalets et résidences affectées	Guilbert (1993)
86-03-31	3	Hauteur de Des Îlets	37		
86-05-08	1		7	Embâcle sans conséquences	Témoignages de riverains
88-01-15	2	Chenal principal obstrué à l'Île-Enchanteresse	8	Dû à un dégel survenu le 3 janvier 1988	
89-12-18	1	Beauport - Pied du Trois-Saults	434	Période de froid	
90-03-18	1	Hauteur de l'Île-Enchanteresse	87	Impossible d'intervenir	Guilbert (1993)
90-03-19	1	Beauport - Rue du bocage	75	Impossible d'intervenir	
91-01-05	2	Lac du Délaiqué	13	2 chalets inondés	
91-04-09	1	En aval - Pointe sud de l'Île-Enchanteresse	114	Déplacement de l'embâcle à Beauport, rue du Bocage	
92-03-12	4	2 branches obstruées	22	Déblai total de la branche secondaire	Guilbert (1993) & Sécurité publique
94-04-17	2	Hauteur des lignes, Beauport	n/d	Dépenses d'urgence à Sainte-Brigitte-de-Laval	Guilbert & Sécurité publique
96-01-25	2	Petit chenal pont de l'île et aval de l'île jusqu'à rue bocage	n/d	Résidences affectées	Guy Guilbert & Sécurité publique
98-02-22	2	À la hauteur du quartier des Îlets	n/d	Résidents évacués, digues fusibles ouvertes à la station de pompage	Michel Leclerc (INRS-ETE)
99-01-25	3	Aval de l'Île-Enchanteresse	n/d	4 maisons considérées comme perte totale	Guilbert & Sécurité publique
00-12-17	2	Lac du délaissé	n/d	Évacuation – Travaux de creusage	U. Laval / INRS-ETE

2.1.2 Description de quelques cas d'embâcles

Il a été jugé utile de procéder à la description de quelques événements particulièrement problématiques afin d'en dégager quelques éléments d'interprétation. Chacun des cas exposés dans

les sections suivantes est accompagné d'une carte indiquant sa localisation sur la rivière ainsi qu'une description et des photographies résumant les principales caractéristiques qu'il a été possible d'obtenir.

Une attention particulière est apportée à décrire deux événements récents: ceux survenus les 25 janvier 1999 et 12 mars 1992. L'embâcle de 1999, en plus d'être le deuxième en importance survenu dans la décennie 1990, retient l'attention du fait qu'il fut à l'origine du présent projet. L'embâcle de 1992 fut le pire enregistré depuis 1972. Ces deux cas ont été largement médiatisés et sont probablement parmi les plus connus par le public. Il faut aussi souligner l'abondance de rapports et de documents écrits sur ces deux événements.

Quant à l'embâcle qui s'est produit au début de l'hiver 2000-2001 dans le lac du Délaissé, les données recueillies seront présentées de concert avec les résultats de la campagne de caractérisation prévue dans le cadre du projet (voir la section 2.2).

Le Tableau 3 rapporte la localisation de la tête et du pied des embâcles que nous avons choisi de documenter plus à fond en se référant au chaînage kilométrique proposé au Tableau 2 et à la Figure 1.

Tableau 2 : Chaînage kilométrique adopté pour l'étude

Site ou lieu dit	Chaînage (km)	Site ou lieu dit	Chaînage (km)
Fleuve Saint-Laurent	0,0	Rue des Deux Rapides	13,0 à 13,7
Chute Montmorency	0,7	Pointe sud de l'Île-Enchanteresse	13,8
Barrage des Marches-Naturelles	2,1	Pointe nord de l'Île-Enchanteresse	14,7
Aval du lac du Délaissé	3,8	Site dit « <i>de la Vieille École</i> »	15,7
Amont du lac du Délaissé	4,8	Jonction des rivières Montmorency et des Pins	17,5
Amont des rapides des Trois-Saults	7,8	300 Boul. Sainte-Brigitte	18,0
Aval de la prise d'eau de la Ville de Beauport	8,9	Jonction des rivières Montmorency et Richelieu	18,3
Amont de la prise d'eau de la Ville de Beauport	9,4	Jonction des rivières Montmorency et Saint-Adolphe	23,7
Domaine des Îlets	9,55	Amont des grands rapides	33,0
Rue du Bocage	10,9	Pont du Moulin	36,0
Côte-du-Lac	11,35		

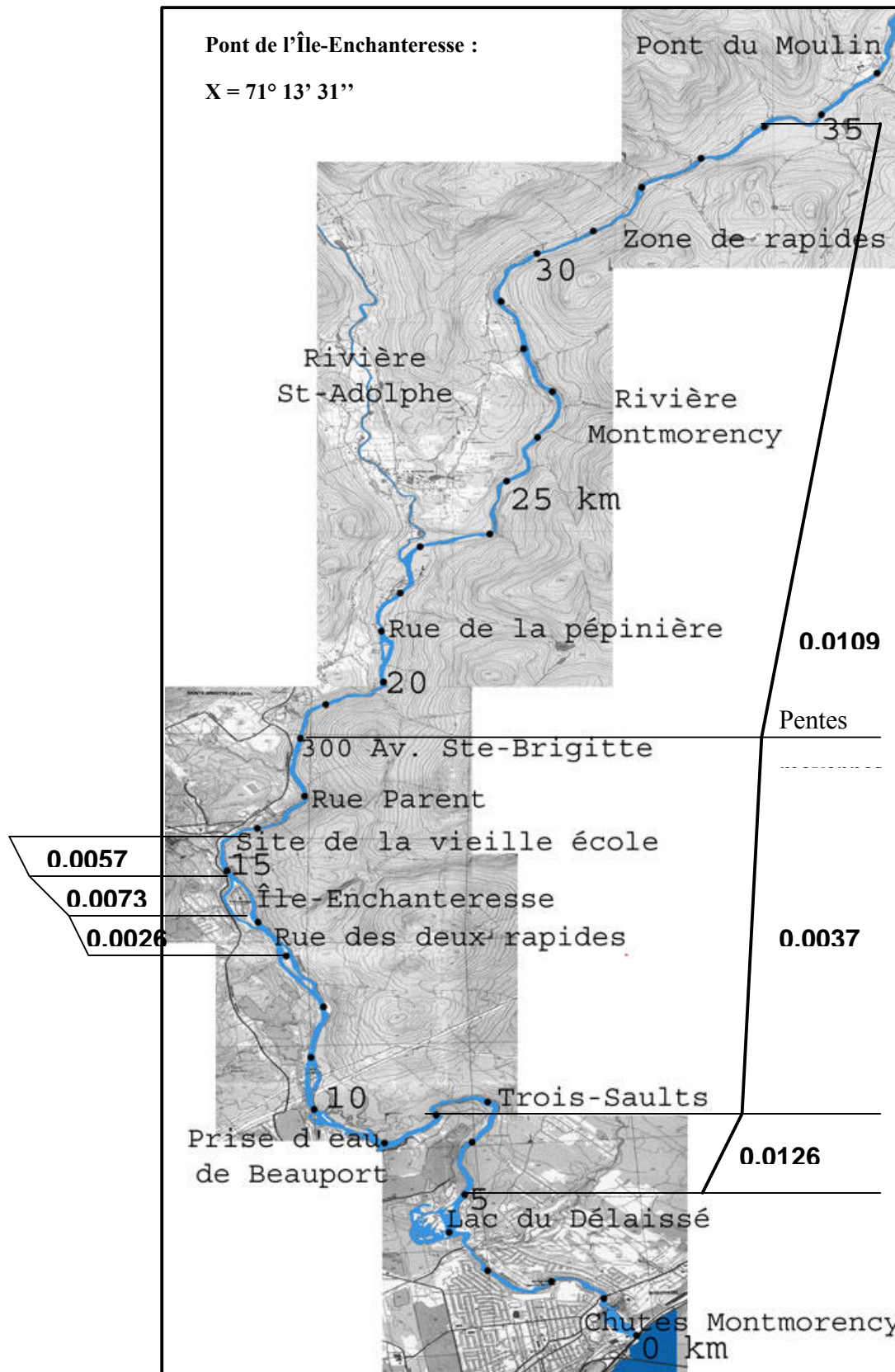


Figure 1 : Chaînage kilométrique du réseau hydrographique inférieur de la rivière Montmorency, topographie, pentes typiques et éléments toponymiques

Tableau 3 : Localisation et extension de quelques événements d'embâcles

DATE	LOCALISATION (pied – tête) (km)	LONGUEUR (km)
25-01-99	13,6 – 15,6	2
26-02-96	10,9 – 14,5	3,6
12-03-92	13,6 – 16,0	2,4
10-02-86	13,6 – 16,4	2,8
11-01-78	10,3 – 13,5	3,2

2.1.3 Embâcle du 5 janvier 1999

Le 25 janvier 1999 à 5h15, un citoyen téléphone à la Municipalité de Sainte-Brigitte-de-Laval pour l'informer d'un début d'inondation sur l'Île-Enchanteresse. À 5h30, la Municipalité émet un avis de sinistre et décide, de concert avec les autorités gouvernementales, d'évacuer les résidents de l'Île. Dans le courant de la journée, les résidents ont pu réintégrer leur domicile, à l'exception de 5 dont les habitations étaient trop gravement endommagées. Par la suite, 4 des 5 propriétaires impliqués ont été expropriés.

2.1.3.1 Évaluation de la situation des glaces le 25 janvier 1999

À 8h30 le 25 janvier 1999, monsieur Guy Guilbert, technicien principal à Urgence Environnement (ministère de l'Environnement du Québec – Direction régionale de Québec), effectue un survol de la rivière à partir de la ville de Beauport jusqu'en amont de la municipalité de Sainte-Brigitte-de-Laval. Voici les observations qu'il rapporte suite à ce survol et à une visite sur les lieux (Guilbert, 1999):

« De Beauport à l'Île-Enchanteresse, le couvert de glace sur la rivière est en place et peu altéré. Il n'y a eu aucun mouvement de glace, l'eau déborde sur les berges et par les canalisations de crue. L'épaisseur du couvert de glace semble varier entre 20 et 25 cm et l'eau circule librement en-dessous. Le pied de l'embâcle s'est établi à environ 200 m en aval de la pointe sud de l'Île. Les glaces bloquent complètement le chenal est. Aucune glace n'a emprunté le chenal ouest, la voie ayant été complètement obstruée à l'entrée. Des résidences ont été inondées sur la rive est de l'Île et en amont de celle-ci sur la rive ouest de la rivière. Le survol dans la partie amont de l'embâcle permet de constater que le débit est relativement faible et qu'il n'y a plus de glace sur une distance de près de 14 km. De plus, le débit a commencé à régresser sous l'embâcle. »

2.1.3.2 Description physique de l'embâcle

Comme l'indique Guilbert dans son compte-rendu, l'embâcle s'est formé à la hauteur de la rue des Deux-Rapides, à environ 200 m en aval de l'Île-Enchanteresse. La Figure 2 montre sa localisation géographique. La hauteur atteinte par le niveau d'eau et les glaces à la pointe sud de l'Île est estimée, à l'aide de photographies et de témoignages de riverains, à 4,5 m au-dessus du niveau normal de la rivière.

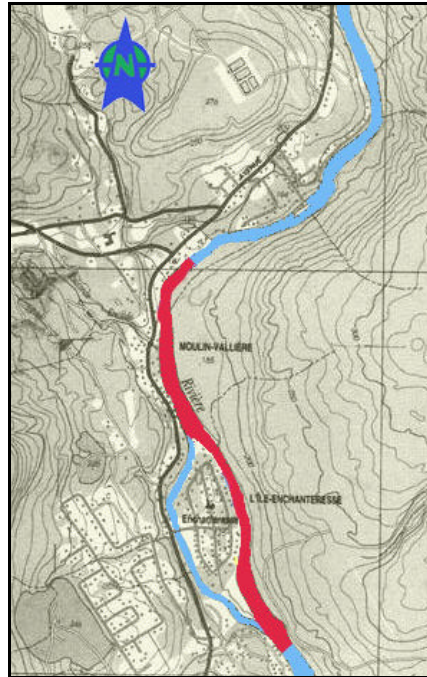


Figure 2 : Localisation de l'embâcle survenu le 25 janvier 1999

Le débit relativement faible de la rivière au moment des événements a probablement empêché les glaces de descendre plus bas sur la rivière. Cet avis provient du fait que la glace, en aval de l'embâcle, était en partie recouverte d'eau. Le couvert déjà fragilisé par l'eau aurait pu, en cas de pression plus forte de l'eau et des glaces, être entraîné. L'état du couvert en aval de l'embâcle est observable sur la Figure 3. Les deux îles, qu'il est possible d'apercevoir en premier plan sur la photographie, sont situées en aval de l'Île-Enchanteresse que l'on devine en arrière plan.



**Figure 3 : Situation du couvert de glace en aval de l'Île-Enchanteresse le 25 janvier 1999
(Source : Ministère de l'Environnement du Québec)**

Les glaces remontent par la suite dans le chenal est de l'Île-Enchanteresse (tronçon de 1,02 km). L'entrée du chenal ouest a, semble-t-il, été obstruée par les glaces au tout début des événements, empêchant les glaces de s'y introduire par la suite (Figure 4).



**Figure 4 : Situation du couvert de glace à la pointe Nord de l'Île-Enchanteresse le 25 janvier 1999
(Source : Ministère de l'Environnement du Québec)**

L'embâcle se termine environ 900 mètres plus haut que la pointe amont de l'Île-Enchanteresse. À quelques centaines de mètres en amont de l'Île (à la hauteur du 132 de l'avenue Sainte-Brigitte), le niveau de glace et d'eau est encore supérieur d'environ 3,2 m à sa position normale. Cette information est confirmée par le propriétaire de la résidence qui nous a indiqué avec précision la hauteur d'eau atteinte. Un tronçon de rivière est par la suite dégagé de glaces sur 14 km. La Figure 5 indique la localisation de la tête de l'embâcle.



**Figure 5 : Tête de l'embâcle du 25 janvier 1999
(Ministère de l'Environnement du Québec)**

2.1.3.3 Interventions réalisées

Étant donné que l'embâcle s'était formé tôt en hiver, il y avait de fortes présomptions qu'un couvert de glace se reforme, dans les mois de février et de mars sur le tronçon en eau libre. Afin d'éviter de nouveaux événements d'inondation durant le reste de l'hiver ou au printemps, le ministère de l'Environnement a suggéré l'excavation d'un chenal d'évacuation longitudinal à travers l'embâcle avec de la machinerie conventionnelle, ceci afin de faire face à d'éventuels coups d'eau. La première phase du dégagement devait se faire à l'entrée du chenal ouest. Par la suite, le Ministère suggéra de déblayer un chenal aussi large et long que possible dans la branche est. Dans un troisième temps, la rivière Montmorency devait être dégagée en amont de l'Île.

2.1.4 Embâcle du février 1996

L'embâcle se forme dans le secteur du Bocage (près du km 11) à Beauport pour remonter en amont, jusqu'à l'Île-Enchanteresse. On peut constater grâce à la Figure 6 (carte de localisation) et à la Figure 7 (vue de l'embâcle) l'importance de cet événement.



Figure 6 : Localisation de l'embâcle du 26 février 1996

La Figure 8, prise à la rue des Deux-Rapides, montre qu'à cet endroit l'eau a atteint le niveau de la route pourtant située 3,3 m plus haut que le niveau moyen de la rivière. Il est logique de penser que le niveau d'eau et de glace ait été encore plus élevé au début de l'embâcle.



Figure 7 : Vue de l'embâcle du 26 février 1996 (Ministère de l'Environnement du Québec)



Figure 8 : Niveau d'eau atteignant la hauteur de la rue des Deux-Rapides le 26 janvier 1996 (Ministère de l'Environnement du Québec)

2.1.5 Embâcle du 12 mars 1992

Le 12 mars 1992, vers 7h40, un citoyen alerte la municipalité de Sainte-Brigitte-de-Laval car l'eau commence à monter à l'Île-Enchanteresse. Il est à noter que, dans les deux journées précédentes, près de 60 mm de pluie combinée avec du temps chaud avaient touché la région (Figure 9). Après quelques problèmes de coordination, l'évacuation complète de l'Île commence vers 9h30. Le pont reliant l'Île-Enchanteresse à la terre ferme devient inutilisable dû au niveau d'eau enregistré sur l'Île à ce moment. Les opérations d'évacuation sont rapidement arrêtées car le matériel est inadéquat. À 11h30, avec l'aide des Forces armées canadiennes qui fournissent des hélicoptères, l'évacuation reprend pour finalement se compléter vers 14h00.

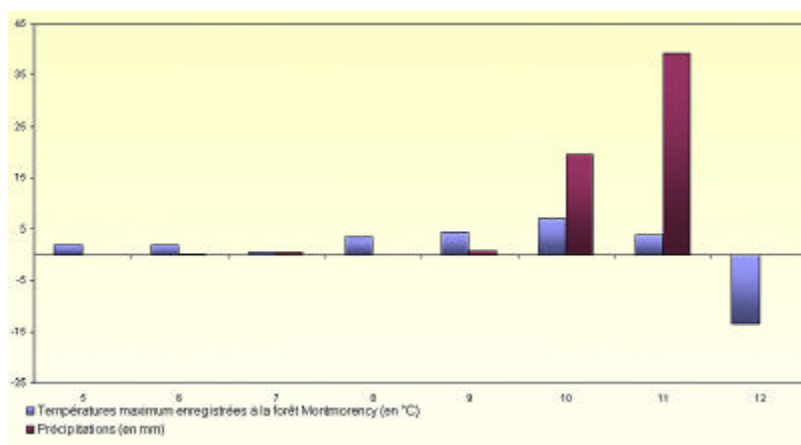


Figure 9 : Températures maximums et précipitations journalières dans la semaine précédant l'embâcle du 12 mars 1992

2.1.5.1 Description physique de l'embâcle

L'embâcle débute encore une fois à la hauteur de la rue des Deux-Rapides à Sainte-Brigitte-de-Laval (Figure 10). Selon des observations faites sur place, les glaces embarquent par-dessus le couvert de glace rigide. La rivière est en charge dans tout le secteur et l'eau s'écoule sur la rive (Guilbert, 1992). À l'Île-Enchanteresse, les glaces remontent profondément dans le chenal ouest.



Figure 10 : Localisation de l'embâcle du 12 mars 1992

Le couvert est soulevé jusqu'au niveau de la hauteur de la rive de la rue des Aulnes. Le niveau d'eau à l'Île-Enchanteresse atteint 5 m de plus que sa hauteur normale à la pointe sud et près du pont (Figure 11). La glace ne pouvant plus descendre par les chenaux, complètement obstrués, se fraye un chemin à travers les rues et les résidences (Figure 12). L'embâcle s'étend sur une zone d'environ 1,3 km à partir de la pointe amont de l'Île. La rivière est ensuite libre de glace sur une zone de plusieurs kilomètres et le débit est relativement faible (Guilbert, 1992).

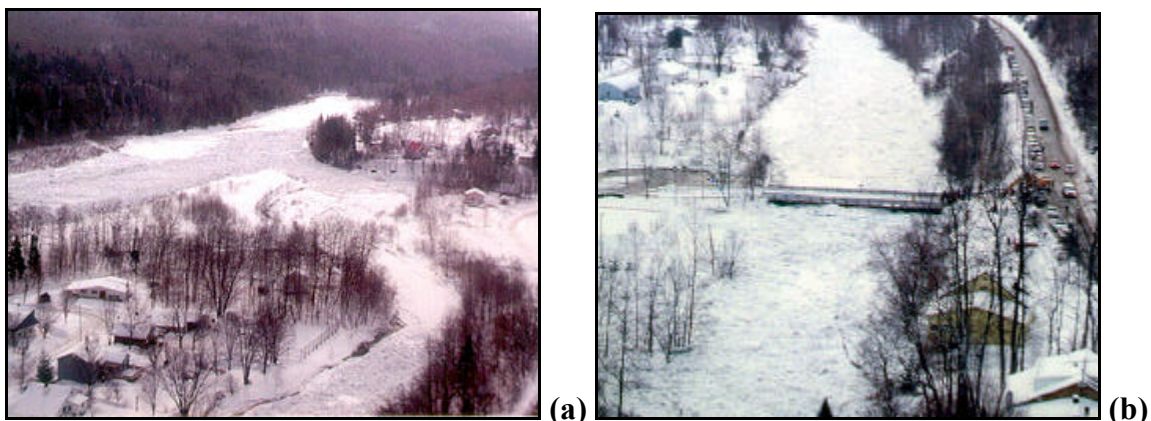


Figure 11 : Situation à la pointe Sud (aval) de l'Île-Enchanteresse (a) et au pont (b) le 12 mars 1992 (Ministère de l'Environnement du Québec)

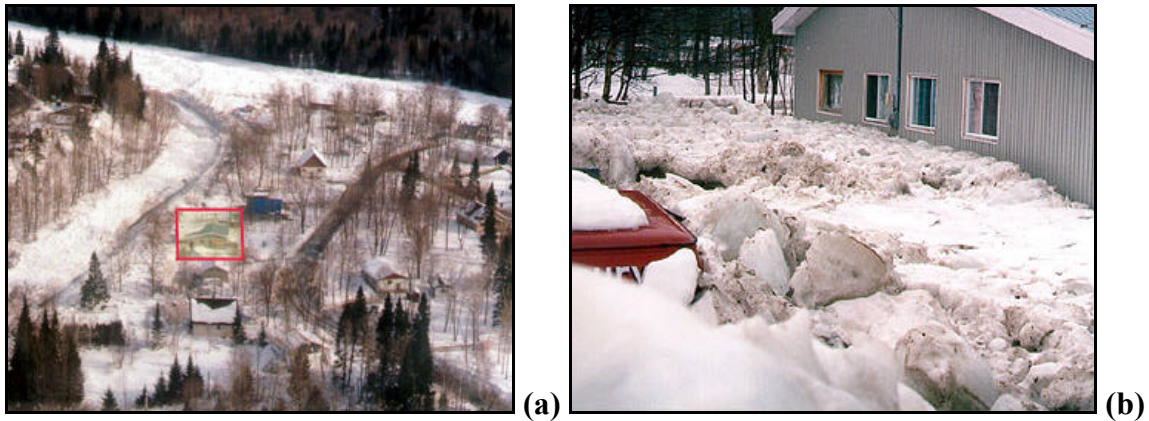


Figure 12 : Embâcle du 12 mars 1992 - Les glaces envahissent la majeure partie de l'Île. La zone encadrée à l'image (a) est agrandie en (b) (Source : Ministère de l'Environnement du Québec)

2.1.5.2 Interventions réalisées

Afin de prévenir une nouvelle hausse du niveau d'eau advenant un coup d'eau majeur dans les jours ou les semaines qui suivraient l'embâcle, il fut décidé de dégager le chenal est sur toute sa longueur. Cette tâche de déblaiement fut effectuée avec de la machinerie conventionnelle. Cette solution entraîne des risques pour les opérateurs, comme le démontre la Figure 13 où une pelle mécanique a défoncé le couvert peu stable de l'embâcle. Les travaux ont été achevés malgré tout.



Figure 13 : Pelle mécanique en difficulté lors des travaux effectués suite aux événements de mars 92 (Ministère de l'Environnement du Québec)

2.1.6 Embâcle du 10 février 1986

L'embâcle s'est formé à la hauteur de la rue des Deux-Rapides pour remonter vers l'amont jusqu'en aval de la rue Parent. Les glaces ont contourné l'Île-Enchanteresse principalement par le

chenal est qui fut complètement obstrué. Quelques glaces ont aussi emprunté la branche ouest descendant à mi-chemin entre la pointe nord de l'Île et le pont (Figure 14).



Figure 14 : Localisation de l'embâcle du 10 février 1986

Afin de faciliter la circulation de l'eau advenant une hausse du débit, la branche ouest fut déblayée sur toute la longueur de l'Île-Enchanteresse (Figure 15).

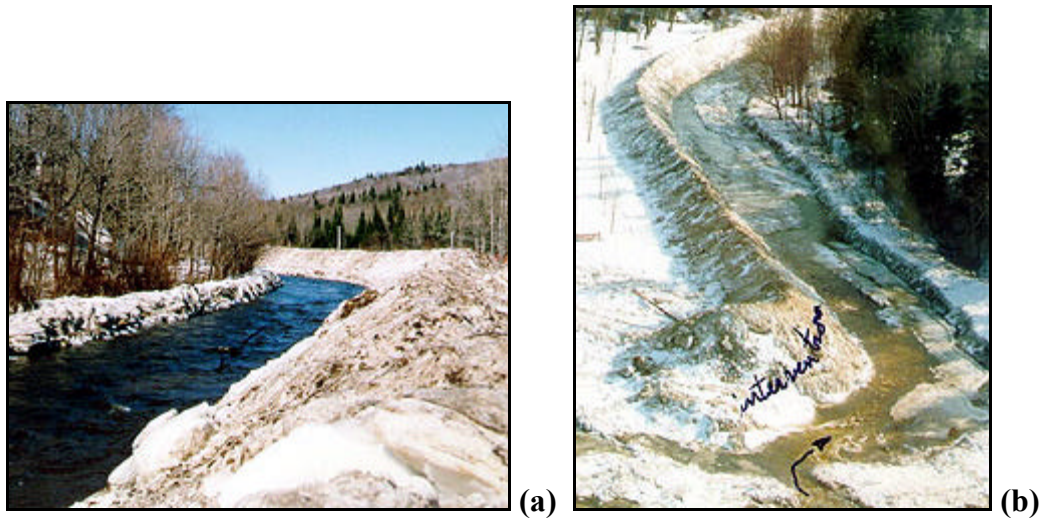


Figure 15 : Intervention réalisée dans le chenal ouest à la hauteur du centre de l'Île-Enchanteresse (a) et à la pointe amont (b)
(Source : Ministère de l'Environnement du Québec)

2.1.7 Embâcle du 11 avril 1980

On n'a que quelques indices disponibles à propos de l'embâcle du 11 avril 1980. La Figure 16 mérite un examen attentif. Elle fut prise à la hauteur de la rue des Deux-Rapides. À gauche de l'image, il est possible de voir le niveau d'eau qui arrive à égalité avec une piscine hors terre. Il

nous fut impossible de mesurer avec précision le niveau d'eau atteint à cet endroit. Par contre, une piscine hors terre faisant au moins 1 m de hauteur, et sachant que la hauteur moyenne du talus sur la rue des Deux-Rapides est de 3 m, on peut en déduire que le niveau dépassait de 4 m son niveau normal.



Figure 16 : Inondation créée par un embâcle sur la rue des Deux-Rapides le 11 avril 1980 (Source : Ministère de l'Environnement du Québec)

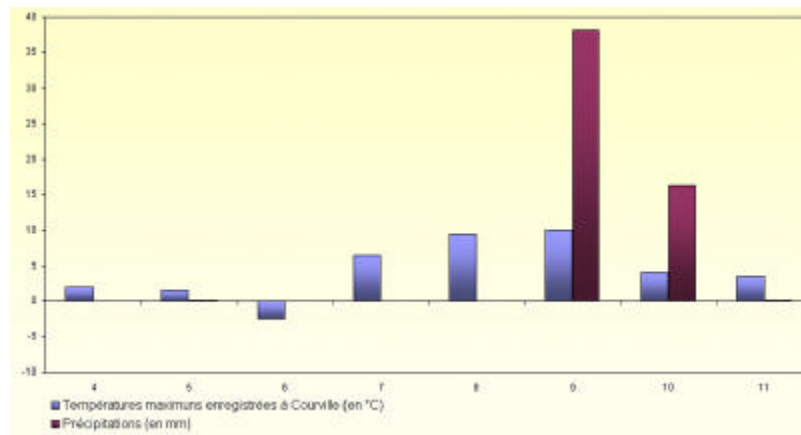


Figure 17 : Températures maximums et précipitations journalières dans la semaine précédant l'embâcle du 11 avril 1980

Les conditions météorologiques (redoux printanier accompagné de fortes précipitations) étaient probablement la cause du décrochement du couvert (Figure 17). De plus, la pré-débâcle devait déjà être fort avancée à cette époque de l'année. Les pluies des deux jours précédant l'événement suffirent, selon toutes probabilités, à gonfler suffisamment le niveau d'eau pour que la débâcle se produise et que la glace dévale la rivière.

2.1.8 Embâcle du 11 janvier 1978

L'embâcle débutait à environ 200 m en aval de l'île de Canteloup (environ au km 10,5) pour se terminer à 300 m en aval de la pointe sud de l'Île-Enchanteresse. Les glaces s'étalaient sur une longueur de 3,4 km et atteignaient 4,6 m de hauteur (Barabé, 1978). En amont de l'embâcle, une zone de 21 km était à l'eau libre (voir aussi la Figure 18).



Figure 18 : Localisation de l'embâcle du 11 janvier 1978

2.1.9 Événements antérieurs à 1977

Entre 1947 et 1977, six événements d'embâcle ayant causé des dommages ont été rapportés sur la rivière Montmorency. L'information souvent de nature descriptive disponible sur ces événements est fournie sommairement dans les sections suivantes.

2.1.9.1 Embâcle du 7 avril 1976

Le début du mois d'avril 1976 fut favorable au débordement de plusieurs rivières dans la région de Québec. De fortes pluies occasionnèrent une hausse rapide du niveau et une fonte accélérée de la couverture de neige. Les journaux font état de nombreuses situations d'urgence dues à des débordements de cours d'eau. Aucune mention particulière n'est faite au sujet de la rivière Montmorency. Les documents du ministère de l'Environnement signalent toutefois un embâcle à la hauteur de l'Île-Enchanteresse. Les glaces, déjà affaiblies par les premiers beaux jours, furent probablement rapidement emportées. Les données météorologiques de précipitation et de température pour la semaine précédant les événements (Figure 19) semblent confirmer cette situation. Aucune précipitation ou température exceptionnelle ne fut enregistrée dans les heures précédant l'embâcle.

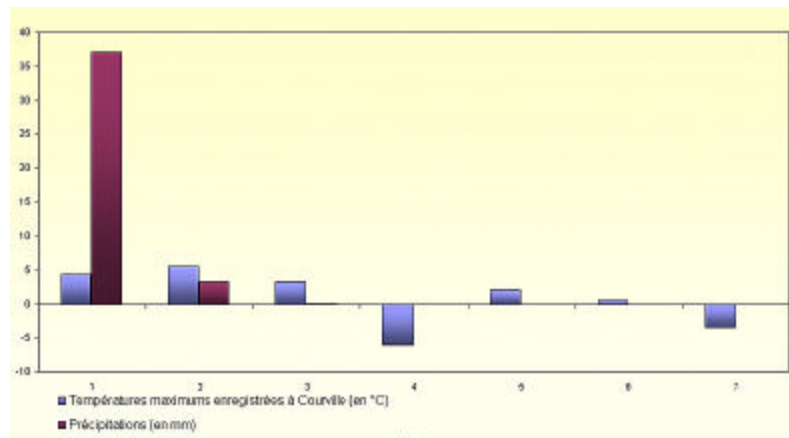


Figure 19 : Températures maximums et précipitations journalières dans la semaine précédant l'embâcle du 7 avril 1976

2.1.9.2 Embâcle de décembre 1973

Une accumulation de glace est signalée dans la courbe en amont du rapide des Trois-Sauts et remonte vers l'Île-Enchanteresse. La fonte a eu lieu au printemps sans aucun problème notable.

2.1.9.3 Embâcle du 15 avril 1964

Le secteur affecté se situe à la hauteur de l'Île-Enchanteresse. Du dynamitage a été fait, sans toutefois donner de résultats. Les médias rapportent 200 personnes évacuées de l'Île. Selon une déclaration du maire de l'époque à Sainte-Brigitte-de-Laval, M. Claude Fortier, un bouchon de glace de 4,6 m de haut se serait constitué sur un îlot situé juste en aval de l'Île-Enchanteresse. L'eau se serait alors élevée de 3 à 3,8 m au-dessus de son niveau normal⁵. Des dommages aux infrastructures (pont et rues) sont signalés dans les dossiers du Ministère de l'Environnement.

2.1.9.4 Embâcle du 28 décembre 1964

Un embâcle se forme dans le secteur de l'Île-Enchanteresse. Il cède après une série de dynamitages effectués par les artificiers des Forces armées canadiennes.

2.1.9.5 Embâcle du 21 décembre 1957

Les informations proviennent majoritairement de recherches et d'entrevues menées en 1999 par Michel Leclerc (INRS) avec différents témoins oculaires de l'événement.

⁵ Journal Le Soleil, 16 avril 1964 et éditions suivantes

Durant la période du 21 au 24 décembre 1957 marquée par un redoux, de fortes précipitations et vraisemblablement une fonte partielle du couvert de neige présent (Figure 20), la rivière Montmorency a subi une débâcle massive. Il se forma un embâcle dont le pied était situé immédiatement à l'amont du rapide des Trois-Saults et la tête face à la station de pompage actuelle de Beauport.

Le rehaussement du niveau d'eau fut tel à l'amont que la rivière envahit l'ensemble des zones inondables du secteur des Îlets et déborda dans le marécage où se trouve aujourd'hui le terrain de camping L'Accueil Saint-Esprit. Des indices permettent de situer la cote géodésique de cette inondation: face au 243 de la rue des Trois-Saults, le niveau d'eau atteignit presque le « plein bord » ce qui signifie une cote de 159 m à cet endroit. De même, à l'extrémité amont du marécage située en face de la digue aval barrant le fossé de ceinture de la station de pompage, l'eau traversait la rue à une hauteur d'approximativement 50 cm, ce qui correspond à la cote 159,5 m. Aux limites actuelles de Beauport avec Boischatel, dans la rue des Trois-Saults, la rivière sortait largement de son lit; le niveau d'eau était tel que la rivière coulait dans la rue des Trois-Saults jusqu'au pied de la côte qui mène au rapide des Trois-Saults même, soit sur une distance de 400-500 m. La cote géodésique de cette partie de route correspond à 158,5-159 m. Une accumulation d'eau et de glace estimée à 3,5 millions de m³ s'est formé derrière l'embâcle.

À la demande du gouvernement provincial, l'Armée canadienne est intervenue avec ses artificiers (dynamiteurs) pour faire sauter le pied de l'embâcle et évacuer la glace avant le retour du temps froid. Suite au dynamitage, l'eau accumulée d'eau (réservoir) s'est vidangée à un rythme très rapide (heures). Cela a mis en branle un écoulement fortement érosif qui a causé beaucoup de dommages en berge aux propriétés riveraines adjacentes (voir la Figure 20)⁶.



Figure 20 : Érosion des berges suite à la purge rapide de l'eau retenue derrière l'embâcle de décembre 1957

⁶ Michel Leclerc, communication personnelle, 2000

2.1.9.6 Embâcle de 1947 (date indéterminée)

Plusieurs témoins oculaires affirment qu'il s'agirait d'un des plus importants événements survenus sur cette rivière en terme d'inondation due à un embâcle de glace. Une reconstitution des niveaux d'eau, faite d'après les témoignages et un recoupage d'informations diverses, indique une hausse de 7,5 m du niveau d'eau (Morse, communication personnelle, 1999) à la hauteur de l'Île-Enchanteresse. À cet endroit, toute l'Île est submergée par 2 m d'eau. De plus, l'avenue Sainte-Brigitte à la hauteur du pont était aussi inondée coupant ainsi les accès routiers vers le village. La valeur de ces indices a permis de classer le risque d'un tel embâcle à un très haut niveau de sévérité (voir l'annexe 1) étant donnés les dommages qui en résulteraient aujourd'hui avec les éléments vulnérables qui s'y trouvent.

2.1.10 Travaux effectués sur la rivière

Au fil des ans, différents travaux ont été réalisés sur la rivière Montmorency en relation avec les inondations. La plupart l'ont été en réaction à un embâcle (déblaiement, dynamitage, etc.). Par contre, il est arrivé à quelques reprises que des travaux préventifs ou correctifs aient été réalisés. Ceux-ci sont rapportés ci-après avec quelques commentaires sur leur efficacité.

2.1.10.1 Surcreusement du lit de la rivière

Le ministère des Ressources Naturelles (prédécesseur de l'actuel ministère de l'Environnement) a autorisé deux fois le surcreusement du lit de la rivière dans la zone sensible de l'Île-Enchanteresse. La première fois, en novembre 1964, une série de travaux ont été faits en aval de l'Île-Enchanteresse dans la zone où, au printemps précédant, un embâcle s'était formé. Un mois après la fin des travaux (soit en décembre 1964), un embâcle se reformait à 1 km en aval de la zone modifiée! L'impact du creusage ne semble donc pas avoir influencé significativement le comportement du cours d'eau, du moins dans le sens désiré.

La deuxième série de travaux débuta à la fin de l'été 1972. Ils consistèrent à excaver les chenaux de chaque côté de l'Île-Enchanteresse et en aval de celle-ci. Le ministère des Ressources Naturelles canalisa la rivière sur 90 m dans le tronçon principal (est) et sur 730 m dans la branche secondaire (ouest). Cela améliora peut-être pendant quelque temps les conditions d'écoulement des glaces, bien qu'aucun document disponible ne le démontre. Il faut noter que, lors de ces travaux, le Ministère ne cherchait pas à prévenir les embâcles, mais plutôt les inondations à l'eau libre. Les nombreux embâcles arrivés depuis cette date, notamment dans les quelques années qui ont immédiatement suivi, portent à croire que la solution n'a pas eu d'impact à court ou à long termes sur la problématique des embâcles.

2.1.10.2 Dynamitage

Au cours de la période de référence de l'étude, il n'y a eu que peu d'exemples portés à notre connaissance de dynamitage d'embâcle sur la rivière Montmorency. L'embâcle de décembre 1957,

qui s'était formé en amont du rapide des Trois-Sauts, fut dynamité avec pour conséquence la purge rapide des glaces et de l'eau accumulée derrière l'embâcle, un phénomène assimilable à un bris de barrage. Il en résulta une forte érosion des berges et des dommages à des résidences. Lors des événements survenus en avril 1964, les Forces armées firent également une série de tentatives de dynamitage. Une première série de 300 bâtons de dynamite furent d'abord placés à des endroits stratégiques dans l'embâcle. Le barrage de glace ne céda pas. Un deuxième essai fut fait le lendemain en plaçant les charges directement sous l'embâcle. Le résultat fut tout aussi infructueux. Au début de l'hiver suivant, soit en décembre 64, dans un secteur en aval de l'Île-Enchanteresse, les Forces armées furent appelées à disloquer un embâcle qui s'y était formé. Cette fois, l'obstacle a cédé sous le coup des explosifs.

Lors de l'embâcle de mars 1992, il fut discuté de faire sauter l'embâcle avec des charges explosives. Cependant le couvert situé en aval de la région affectée était lui-même très affaibli. Si la masse de glace délogée par le dynamitage s'était remise en mouvement, le couvert en aval aurait pu être emporté sur une longue distance au risque de créer un second embâcle encore plus important plus bas sur la rivière, dans un des secteurs de la ville de Beauport ou de causer des dégâts à la prise d'eau de cette municipalité. Le procédé fut jugé trop hasardeux pour être utilisable. Aujourd'hui, on pourrait ajouter qu'il violerait le principe d'équité qui interdit le transfert du risque.

2.1.10.3 Déblaiement de la glace

Le déblaiement de la glace ne constitue pas un moyen de prévention des embâcles, mais plutôt un palliatif. Le déblaiement de la glace sur une portion de rivière survient à la suite d'un embâcle lorsqu'il est jugé dangereux de laisser la situation dans l'état. Le procédé a pour principal objectif d'assurer un meilleur écoulement de l'eau dans le cas où une hausse du débit serait observée dans les semaines ou les mois suivant un embâcle. Sur la rivière Montmorency, le déblaiement n'a jamais été effectué sur toute la longueur d'un embâcle. Les travaux ont principalement été faits dans le bras est de l'Île-Enchanteresse ainsi que dans le lac du Délaié lors du dernier embâcle survenu en décembre 2000. À notre connaissance, il n'est jamais arrivé qu'un second coup d'eau d'une assez grande importance survienne de sorte que les chenaux déblayés soient mis à contribution de manière observable. Il est donc impossible de savoir si la solution de déblaiement apporterait les résultats escomptés.

2.2 Résumé des nouvelles observations sur le terrain : dynamique des glaces

Lors des hivers 1999-2000 et 2000-2001, la croissance et la fonte des couverts de glace ont été suivis sur un large tronçon s'étendant de la rue Côte-du-Lac (km 12) jusqu'à la rue de la Pépinière au km 21 (voir la Figure 1). Dans un premier temps, des photographies de la rivière ont été prises durant toute la saison froide ainsi que lors de la prise et du dégel des glaces. De plus, de décembre à avril, des relevés ont été pris sur le couvert de glace à des endroits précis. À ces points stratégiques, la température de l'eau, la concentration de glace à la dérive et l'épaisseur de neige,

de glace et de frasil ont été notées. Lors de la campagne 2000-2001, une sonde de pression fut installée à un endroit pour suivre les variations du niveau d'eau lors de la fonte. Malheureusement, les données recueillies par cet appareil n'ont pu être utilisées de l'eau s'étant infiltrée dans l'appareil et ayant rendu inutilisable le système d'acquisition de données. En d'autres temps, les variations du niveau d'eau ont aussi été enregistrées manuellement lors des visites sur le terrain. Ces observations ont eu lieu à une fréquence d'une à deux fois par semaine.

2.2.1 Observations recueillies lors des hivers 1999-2000 et 2000-2001

2.2.1.1 Faits saillants

Les données recueillies au cours des saisons hivernales 1999-2000 et 2000-2001 constituent une banque d'information inédite sur le développement du couvert de glace de la rivière Montmorency. Avant d'entrer dans les détails des résultats, certains points saillants seront mentionnés.

D'abord, l'hiver 1999-2000 fut tardif. Le temps froid s'installa environ deux semaines plus tard qu'à l'habitude pour la région. Par contre, l'hiver 2000-2001 s'installa beaucoup plus rapidement. Les températures furent froides en novembre et en décembre. Au milieu de décembre, la rivière était, à certains endroits, plus fermée qu'elle ne l'avait jamais été durant tout l'hiver précédent.

La région à l'étude comporte de nombreuses sources souterraines et petits ruisseaux qui se jettent dans la rivière Montmorency. Ces affluents mineurs gèlent moins rapidement que le cours d'eau principal, ce qui implique que la glace de rive est fragile à plusieurs endroits. Ce phénomène fut observé à de nombreuses reprises lors de nos sorties sur le terrain. Dû aux températures plus froides observées durant l'hiver 2000-2001, cette fragilité semblait moins importante, bien que toujours présente.

Au mois de février 2000, le couvert de glace atteignait des épaisseurs allant jusqu'à 80 cm. Des variations importantes ont été observées dans l'épaisseur et la qualité de la glace aux différents sites de relevés. Parfois, de grandes variations d'épaisseur surviennent dans des zones séparées de quelques mètres seulement (voir la Figure 21).

Beaucoup de frasil est généré dans la zone de rapides et s'accumule en aval de l'Île-Enchanteresse (à la hauteur de la rue des Deux-Rapides). Les mesures indiquent des épaisseurs allant jusqu'à 110 cm de frasil à cet endroit à l'hiver 2000 et jusqu'à 124 cm pour la même section en 2001.

Lors du dégel printanier de l'an 2000, la hausse du niveau d'eau ne fut pas significative. Cela peut s'expliquer par le fait que la température s'est élevée graduellement sur une période assez longue. Le réchauffement a commencé à la fin février pour se poursuivre de façon continue. Il n'y a pas eu non plus de très fortes précipitations printanières sur le bassin. Aucun événement d'embâcle ne fut donc rapporté cet hiver-là.

La formation et la croissance du couvert de glace ont pu être bien suivies. Toutefois, la saison hivernale 1999-2000 n'a pas permis d'observer de conditions d'embâcles. Selon les autorités de

Sainte-Brigitte-de-Laval, le printemps 2000 fut exceptionnellement calme et, d'une certaine façon, fort peu représentatif du comportement normal de la rivière.

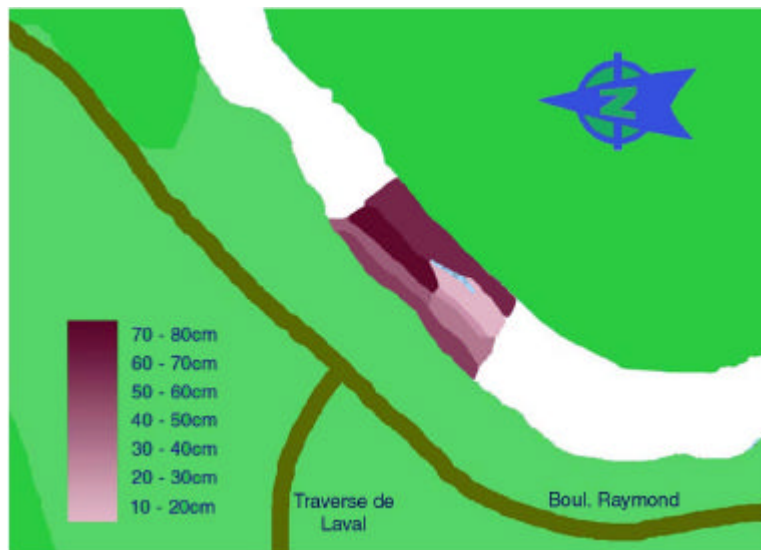


Figure 21 : Épaisseur des glaces dans le secteur "Vieille École" en février 2000

Les relevés des hivers 1999-2000 et 2000-2001 permettent de confirmer l'exactitude des renseignements fournis par les divers intervenants et d'amener des faits qui n'avaient pas encore été rapportés officiellement. Remarquons aussi le rôle primordial que jouent les rapides (en amont de l'Île-Enchanteresse et aux Trois-Sauts) dans la dynamique de la rivière. Il faut également faire mention de l'accumulation de frasil à la rue des Deux-Rapides ainsi que de la non-homogénéité des glaces (fragiles dans les rapides, solides près de l'Île-Enchanteresse, etc.).

2.2.1.2 Conclusions pertinentes à l'étude d'implantation d'estacades

Ces faits saillants permettent de tirer certaines conclusions pertinentes relatives à la faisabilité d'estacades conventionnelles, fixes ou flottantes.

Contrairement à nos attentes, la configuration de la rivière dans le secteur de Sainte-Brigitte-de-Laval laisse peu de marge de manœuvre pour l'installation d'une structure conventionnelle (estacade flottante ou peigne) afin de retenir les glaces. En effet, à plus de 2 ou 3 km de l'Île-Enchanteresse, commence une zone de rapides (pente d'environ 1%) qui s'étend vers l'amont sur 15 km. L'installation de structures conventionnelles sur un cours d'eau à si forte pente pourrait s'avérer inefficace à cause des vitesses de courant trop importantes. Les tests en laboratoire conduits dans le cadre de cette étude visent justement à vérifier le comportement des ouvrages en interaction avec la glace en mouvement et de s'assurer qu'ils ne seront pas perméables au passage de la glace. Les divers concepts de structures innovatrices développés dans le cadre de ce projet de recherche doivent pouvoir s'intégrer dans ce type de conditions morphologiques.

La présence de nombreuses sources alimentant la rivière dans cette région pourrait aussi poser un problème au succès d'un quelconque ouvrage de contrôle des glaces. Étant généralement plus

chaudes que le cours d'eau principal, elles affaiblissent le couvert qui n'est alors plus soutenu efficacement par la glace de rive.

2.2.2 Évaluation sommaire de la quantité de glace lors d'un embâcle

Lors de la phase I, un exercice similaire avait été tenté afin d'évaluer la quantité de glace pouvant se retrouver en dévalaison lors d'une débâcle typique, et par la suite se voir stopper dans un embâcle. Cette information est nécessaire afin d'évaluer l'extension éventuelle d'un embâcle provoqué artificiellement et les hausses consécutives du niveau de l'eau dans le bief d'accumulation. Cet exercice préliminaire avait conduit à une estimation de 820 000 m³ pour une débâcle du tronçon pont du Moulin – Île-Enchanteresse (Leclerc et coll., 2001). En ajoutant le segment allant jusqu'au secteur des Îlets inclusivement, ce chiffre était porté à 920 000 m³.

En procédant à une estimation plus précise de la largeur des tronçons impliqués, et en introduisant d'autres facteurs comme le fait qu'une partie de la glace en dévalaison demeure accrochée aux berges tout le long du parcours sous la forme de « murailles de glace » facilement observables lors de débâcles, on a pu ré-évaluer les chiffres mentionnés ainsi:

1. Hypothèse 1 :

La largeur moyenne de la rivière est typiquement de 50 m (moyenne des largeurs des transects à l'étiage sur une distance de 3,2 km en amont de l'Île-Enchanteresse) et une épaisseur de glace de 0,5 m est estimée réaliste sur toute la longueur du tronçon.

2. Hypothèse 2 :

En estimant la longueur des tronçons de rivière fournissant l'apport de glace de la façon suivante :

- ?? Du pont du Moulin au début de la zone des rapides: 3 km;
- ?? Secteur des grands rapides: 14,7 km;
- ?? De la fin de la zone des rapides (Sainte-Brigitte-de-Laval) à l'Île-Enchanteresse : 3,6 km;
- ?? De l'Île-Enchanteresse à l'amont de la rue des Deux-Rapides : 1 km;

Longueur totale de **22,3 km**.

Le volume de glace serait alors évalué à : $(22\ 300\ \text{m}) \times (50\ \text{m}) \times (0,5\ \text{m}) = \underline{\underline{557\ 500\ \text{m}^3}}$

Si la débâcle devait continuer jusqu'au secteur des Îlets sur le territoire de la ville de Beauport et y former un embâcle, on peut ajouter au volume déjà calculé le tronçon suivant:

- ?? De la rue des Deux-Rapides au secteur des Îlets: 4 km

En portant la largeur moyenne de la rivière pour ce seul tronçon à 65 m afin de tenir compte de son élargissement à cet endroit :

Le volume de glace additionnel est de: $(4\ 000\ \text{m}) \times (65\ \text{m}) \times (0,5\ \text{m}) = \underline{\underline{130\ 000\ \text{m}^3}}$

Cependant, ce calcul sur-estime les volumes de glace pour plusieurs raisons :

- ?? La largeur de 50 m est certainement conservatrice car elle a été estimée pour la partie inférieure du tronçon lequel tend à se rétrécir en remontant vers l'amont;
- ?? Les épaisseurs de glace sont habituellement moins importantes dans les rapides typiques du tronçon à débâcle;
- ?? Lors de débâcles, une part importante de la glace demeure stockée sur les rives du parcours. 70% des volumes calculés théoriquement ci-dessus semble une approximation raisonnable pour estimer le volume de glace parvenant effectivement à l'embâcle. D'ailleurs, Lever & coll. (2000) estiment dans leur étude sur la rivière Cazenovia qu'une estimation de 50% est réaliste mais que choisir 70% constitue est une valeur conservatrice.

Ces hypothèses additionnelles ont donc montré qu'un volume de **406 000 m³** était suffisant pour simuler les embâcles observés sur la rivière immédiatement en aval de l'Île-Enchanteresse. À 4 km en amont de ce point où l'on proposera plus loin dans ce rapport d'installer un ouvrage, ce volume se réduit à **336 000 m³**. Un volume résiduel de **70 000 m³** pourrait donc participer au risque résiduel d'embâcle au site des Deux-Rapides si le couvert de glace en aval de l'ouvrage devait décrocher. Cet aspect du risque résiduel sera de nouveau abordé plus loin dans le présent rapport.

2.2.3 Observation visuelle de l'évolution et de la progression du couvert de glace

Afin de rendre rapidement et visuellement accessibles le plus d'informations possibles recueillies lors des deux campagnes des terrains, des séquences animées de progression du couvert de glace ont été réalisées à partir des observations visuelles réalisées. Une telle *séquence* montre l'évolution du couvert dans le temps pour une section précise de rivière et une saison donnée. À l'aide des photographies et des notes recueillies sur le terrain lors des sorties hebdomadaires, le développement du couvert est d'abord reporté sur une photographie aérienne de la rivière. Un élément de chaque séquence, appelé ici *prise de vue* correspond à chaque sortie.

À la fin de l'hiver 1999-2000, 13 prises de vue avaient ainsi été réalisées pour une période s'étendant du 12 décembre au 1^{er} avril. Pour cette première campagne de terrain, la section de rivière sous étude s'étendait de la rue des Deux-Rapides à la Vieille École (Figure 22). L'hiver suivant, la zone d'étude fut étendue tant à l'aval qu'à l'amont pour couvrir un secteur s'étendant de la rue Côte-du-Lac jusqu'à la hauteur du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte. Une partie de la zone mentionnée (en gris sur la Figure 22) n'a pu être couverte vu le manque d'accessibilité.

2.2.3.1 Description des tronçons suivis

Il est possible de subdiviser en quatre grands tronçons la zone d'observation. Une première section, la plus en amont, est comprise entre le 300 de l'avenue Sainte-Brigitte et l'aval de la rue Parent (voir la Figure 1, page 11 et la Figure 22). Une seconde section s'étend entre la rue Parent et l'amont de l'Île-Enchanteresse. La troisième section couvre la zone de l'Île-Enchanteresse et la rue des Deux-Rapides. Finalement, la dernière section, séparée des précédentes par une zone où aucune observation n'a pu être prise, est celle longeant la rue Côte-du-Lac.

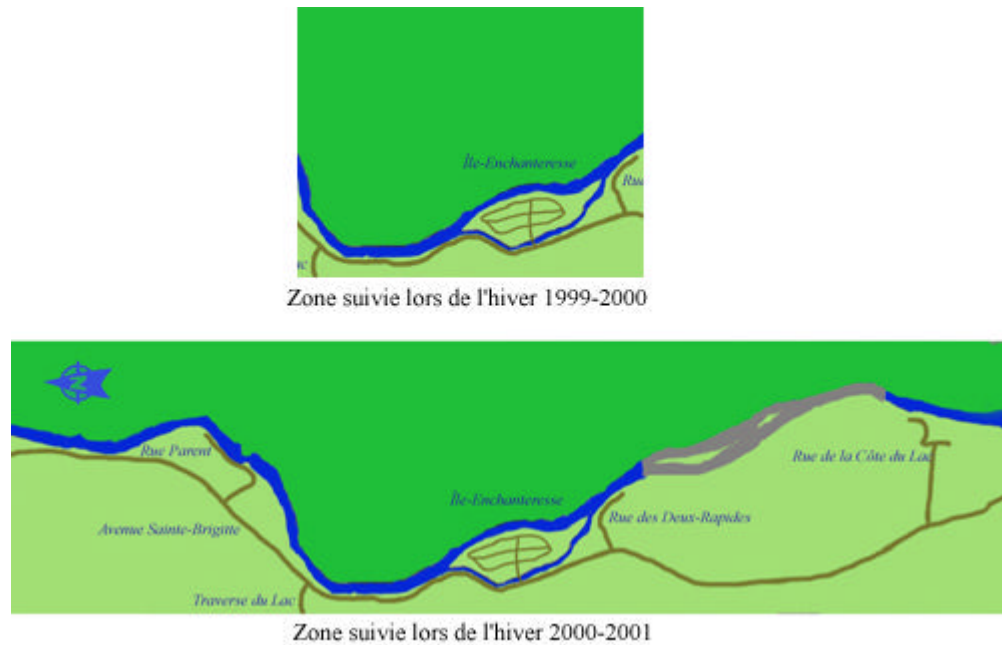


Figure 22 : Zones d'observation lors des campagnes de terrain 1999-2000 et 2000-2001

La première section (du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte à la rue Parent) est constituée à l'amont d'une zone de rapide. La rivière devient moins turbulente au niveau de la rue Parent. À cette hauteur, il fut d'ailleurs noté que le couvert se formait tôt en saison. Dès la première sortie sur le terrain, le 25 novembre 2000, le couvert était déjà en place sur une bonne longueur de la rivière. Après s'être ouvert un chenal, la semaine suivante, l'eau disparut sous le couvert de glace jusqu'à la débâcle du 19 décembre 2000. Par la suite, le couvert se reforma très rapidement pour rester complet jusqu'en avril. Beaucoup de frasil est généré et transféré dans cette partie par les rapides situés juste en amont. (voir la Figure 23).



Figure 23 : Vue vers l'amont à la hauteur du 300 avenue Sainte-Brigitte le 2 décembre 2000 (à gauche). Vue vers l'aval à la rue Parent le 10 décembre 2000 (à droite)

Le second tronçon retient particulièrement l'attention puisque c'est dans cette zone que des sites potentiels d'implantation d'une éventuelle structure ont été identifiés (les sites 1 et 2 présentés dans le rapport de pré-faisabilité). Une première sous-section du tronçon a une longueur de 200

mètres. Elle est bordée en amont et en aval par deux petites zones de rapides. Le rapide le plus en aval est caractérisé par une bande de rochers qui s'avancent dans la rivière en créant un rétrécissement localisé. Il s'agit du seuil que l'on retrouve à la hauteur de la vieille école. Voir aussi la Figure 24)



Figure 24 : Vue du seuil à la hauteur du site "vieille école" pris en septembre 2000 (à gauche). Vue vers l'amont de la rivière à partir du Nettoyeur Coté (km 15) prise le 12 décembre 2000 (à droite).

Une seconde sous-section commence au seuil, pour se terminer au ruisseau Euclide (situé à mi-distance entre la pointe nord de l'Île-Enchanteresse et le site de la vieille école). Sa longueur est de 400 m. Dans cette section, la rivière a une largeur moyenne de 60 m. La dernière sous-section commence au ruisseau pour se terminer à la pointe aval de l'Île-Enchanteresse. Cette zone est rectiligne et de largeur moyenne de 70 m. La troisième section jouxte l'Île-Enchanteresse et la rue des Deux-Rapides. À la hauteur de l'Île, la rivière se divise en deux bras. Le chenal principal (à gauche) a une largeur d'environ 40 m, alors que celui de droite (au niveau du pont) est large de 20 m. Au milieu de l'Île, dans le chenal gauche (est), une zone de rapides se prolonge vers l'amont. En 1999-2000, cette portion dynamique du chenal principal n'avait jamais été complètement couverte par la glace. L'année suivante, le couvert recouvrit totalement le chenal dès le début de l'hiver. Après la débâcle de décembre, le bras fut de nouveau couvert par les glaces, mais de petites veines d'eau restèrent apparentes durant tout l'hiver. Le chenal droit (ouest) est plus calme et moins d'eau y circule (Figure 25).

En aval de l'Île-Enchanteresse, le secteur de la rue des Deux-Rapides est reconnu pour être la zone où les embâcles vont s'arrêter naturellement. La rivière s'élargit à cet endroit (autour de 80 m) et la pente se redresse favorisant à la fois la sédimentation d'alluvions grossiers et la formation d'embâcles. Le courant y est moins rapide qu'à l'amont de l'Île. Le couvert de glace se forme un peu plus rapidement à cet endroit que dans les autres sections de la rivière. Moins rapidement toutefois qu'à la hauteur de la rue Parent. Le début de la fonte du couvert y est aussi observé un peu plus tard qu'ailleurs. Nos sondages révèlent des quantités de frasil extrêmement importantes.



Figure 25 : Vue vers l'amont du bras ouest (secondaire) de l'Île-Enchanteresse prise le 16 décembre 2000 (à gauche). Rapides dans le bras est (principal) de la rivière à l'Île-Enchanteresse pris en décembre 1999 (à droite).

Le dernier tronçon sous étude situé le long de la rue Côte-du-Lac ne fut suivi que durant l'hiver 2000-2001. La rivière y est généralement assez large (environ 80 m). La prise du couvert s'y fait progressivement au début de l'hiver par accumulation de frasil le long des berges. Les glaces recouvraient environ les deux tiers de cette section de rivière lors de la débâcle de décembre. Suite au passage de la débâcle, le 17 décembre, des murailles de glace apparurent le long de chaque berge. Ces murailles ont été évaluées à une hauteur de 2 m. La glace se reforma par la suite pour atteindre une couverture complète de la rivière aux alentours de la mi-janvier. Cette date correspond avec la réapparition de couverts semblables ailleurs sur la rivière.



Figure 26 : Vue depuis la rue Côte-du-Lac en direction amont (à gauche) prise le 16 décembre 2000. Vue vers l'aval après le passage de la débâcle le 19 décembre 2000 (à droite)

2.2.3.2 Comparaison et analyse des deux séquences

Il n'apparaît pas nécessaire de procéder à une analyse détaillée de chaque tronçon pour chaque séquence dans le cadre de ce rapport. Ces informations servent à obtenir une meilleure compréhension du développement dynamique des glaces sur la rivière. Cette connaissance, bien qu'utile, déborde le contexte du rapport. Dans cette optique, un simple résumé de ces deux années

suffira. Les deux séquences (1999-2000 et 2000-2001) sont produites sous la forme d'un fichier d'animation (*.AVI) gravé sur CD-ROM et fourni en annexe (aussi disponible sur demande).

En observant les deux séquences, il est possible de constater que la prise des glaces s'est faite plus rapidement lors de l'hiver 2000-2001 que lors du précédent. Déjà lors de la visite du 10 décembre 2000, on observait un couvert pratiquement complet entre la rue des Deux Rapides et la pointe nord de l'Île-Enchanteresse. Or l'hiver précédent, une telle situation ne s'était présentée qu'au début, voire au milieu de janvier. Toutefois, la débâcle et l'embâcle du 17 décembre 2000 modifièrent complètement la progression du couvert et conséquemment, le déroulement de la campagne de terrain. La description de cet événement particulier est rapportée en détail dans la section suivante. La progression des glaces recommença son développement à partir de ce moment, et se retrouva au même point qu'avant la débâcle vers le 10 janvier 2001.

Pour les deux hivers, le couvert atteignit son stade de développement maximal à partir du milieu du mois de janvier. La fonte commença et se termina plus tôt lors du premier hiver. Elle s'étendit alors du milieu de février jusqu'au début d'avril. Durant cette période d'un mois et demi les températures se réchauffèrent graduellement faisant fondre le couvert sur place. En 2000-2001, la fonte du couvert débuta vers la fin du mois de mars pour prendre fin vers le 18 avril. Cette fonte fut donc plus rapide que celle de l'année précédente.

2.2.4 Embâcle du 17 décembre 2000

Le début de l'hiver 2000 fut caractérisé par des températures froides. Dès le milieu de décembre, le couvert de glace recouvrait presque entièrement la rivière. Un redoux des températures (atteignant jusqu'à 7°C) accompagné par une forte pluie de 50 à 52 mm (Station météorologique du ministère de l'Environnement à Château-Richer) fit gonfler le débit de la rivière Montmorency dans les journées du samedi 16 et dimanche 17 décembre 2000. Le responsable de la Sécurité publique pour la municipalité de Sainte-Brigitte-de-Laval, indique que le débit passa alors de quelques m³/s à plus d'une centaine (Côté, communication personnelle, 2001). Suite à ces précipitations, la rivière se libéra de son couvert de glace sur plusieurs dizaines de kilomètres (probablement jusqu'au pont du Moulin, lieu habituel de décrochement des glaces mais cette hypothèse n'a pu être vérifiée car ce lieu est difficile d'accès et aucun survol n'a été effectué). Les glaces s'immobilisèrent à quelques reprises avant de s'arrêter définitivement au lac du Délaissé.

2.2.4.1 Progression de l'embâcle

La progression de l'embâcle a pu être suivie avec précision grâce surtout aux témoignages de riverains et des auteurs de ce rapport. Tout d'abord, le passage d'une débâcle à l'Île-Enchanteresse est rapporté aux autorités par Brian Morse, co-auteur de ce rapport, vers 19h00. Aux alentours de 20h00 de cette même journée, la glace s'immobilise une première fois à la hauteur de la rue Bocage. La hauteur des glaces est d'environ 3 m selon les témoignages des résidents. L'embâcle demeure stable toute la nuit sans toutefois occasionner d'inondation. Dans la nuit de dimanche à lundi (à 04h00 selon une riveraine) l'embâcle de la rue Bocage cède et la glace dévale jusqu'au secteur des Trois-Saults (témoignage d'une riveraine). À ce moment, la rivière est

à l'eau libre du rapide des Trois-Saults jusqu'en amont de la municipalité de Sainte-Brigitte-de-Laval. Des murs de glaces (dits *de cisaillement*) de 3 à 4 m par rapport au thalweg et de 2 à 3 m par rapport au lit près de la berge sont visibles sur tout le tronçon à l'eau libre le long de chaque rive. Cette observation corrobore l'hypothèse posée précédemment à l'égard des pertes de glace sur le parcours de la débâcle (section 2.2.2, page 29).

Le lundi matin autour de 05h00, des résidents de la rue St-Pierre (lac du Délaissé, Beauport) signalent la formation d'un embâcle en face de leur domicile. Le niveau s'élève aussitôt dans tout le lac, mais aucun débordement n'est rapporté. L'embâcle est évalué à 500 m de longueur. Vers 10h00 dans la matinée du lundi, un deuxième train de glace est signalé en provenance du secteur d'amont de Sainte-Brigitte-de-Laval (Claude Côté, communication personnelle, 2001). Une heure après, la vague de glace est signalée à la hauteur de la rue des Trois-Saults. La glace est très fractionnée et circule facilement. (Michel Leclerc, communication personnelle, 2001). Finalement à 11h30, le second train de glace arrive au lac du Délaissé et force la progression de l'embâcle précédent vers l'aval dans le lac (300-400 m de plus). Le niveau s'y élève encore, mais sans déborder sauf à l'extrémité aval de la rue Saint-Pierre, un point bas situé de toute évidence dans la plaine de débordement à cet endroit (Figure 27). En effet, la rivière transite une partie de son débit excédentaire par des bras secondaires situés en rive droite ce qui entraîne l'isolement de certaines résidences de la rue Saint-Pierre.

2.2.4.2 Suite des événements

Suite aux événements initiaux, la situation sembla se stabiliser. Le retour au temps froid, durant le congé de Noël, généra toutefois énormément de frasil. Celui-ci se retrouva en quantité importante dans le lac du Délaissé, colmatant les chenaux d'écoulement qui avaient pu se créer à travers l'embâcle. L'eau recommença à s'élever forçant l'évacuation de certaines résidences de partie basse de la rue Saint-Pierre. La décision fut alors prise de déblayer la glace à travers l'embâcle afin de recréer des chenaux d'écoulement. La situation encore instable força d'abord l'utilisation d'une machinerie spécialisée appelée communément « grenouille ». Au mois de janvier, constatant l'inefficacité de cette machinerie dans les circonstances particulières du lac du Délaissé (surabondance de frasil sur de grandes profondeurs), les travaux se poursuivirent avec l'utilisation de machines plus conventionnelles (Figure 27). La présence importante de frasil fut confirmée par les opérateurs de cette machinerie et par différents relevés fait par la suite.



(a)



(b)

**Figure 27 : (a) travaux de dégagement d'un chenal suite à l'embâcle
(b) Brian Morse indiquant le niveau atteint par l'eau à proximité du lac du Délaissé**

2.3 Analyse des facteurs explicatifs de la débâcle et des embâcles

Cette partie s'inspire en grande partie de l'étude complémentaire produite par Doyon (2001) dont le mandat consistait à déterminer ou préciser, à partir de données déjà recueillies, et si nécessaire en allant chercher de nouvelles sources d'information, les combinaisons de facteurs responsables du décrochement du couvert de glace et de la formation consécutive d'embâcles sur la rivière Montmorency. L'étude cherchait entre autres à répondre quantitativement aux questions suivantes :

- ?? *Quelle est l'influence du débit sur le lieu de formation des embâcles ?*
- ?? *Quelle est l'influence sur la débâcle (ou sur un embâcle) de la température et des précipitations dans les jours précédant celle-ci ?*
- ?? *Quel est le débit à partir duquel la rivière « évacue » complètement son couvert de glace ?*
- ?? *Est-il possible de prévoir des conditions particulièrement favorables à la formation d'embâcles ?*

En bref, l'étude devait dans la mesure du possible mettre en évidence les facteurs à l'origine du déclenchement de la débâcle. S'il s'avérait concluant, l'analyse devait également permettre d'identifier dans quelles conditions la débâcle mène à la formation d'embâcles.

En corollaire aux questions précédentes, l'étude des débits et facteurs météorologiques visait à résoudre les questions suivantes:

?? *Quels étaient les volumes de glace impliqués dans les embâcles qui se sont produits par le passé sur la rivière Montmorency ?⁷*

?? *L'épaisseur du couvert de glace joue-t-elle un rôle par rapport au lieu de formation d'un embâcle ?*

?? *Quelle est l'influence des précipitations sur le moment du décrochement du couvert et le lieu de formation d'un embâcle ?*

Dans ce résumé, la plupart des affirmations sont celles de l'auteur (Doyon, 2001). À l'occasion des interprétations additionnelles ont pu être apportées par les autres auteurs du présent rapport. Pour clarifier la provenance des énoncés, on se rapportera au document original de Doyon.

2.3.1 Démarche

Dans un premier temps, les questions ayant trait aux facteurs susceptibles de jouer un rôle déterminant dans l'amorce de la débâcle ou la formation d'embâcles ont retenu l'attention. L'influence de ces facteurs doit être jaugée car le dimensionnement de la structure de contrôle des glaces ainsi que l'alimentation d'un système d'aide à la décision devant servir à déclencher une alerte précoce en cas de débâcle en dépendent. De façon générale, l'approche a consisté à porter en graphique les données disponibles se rapportant aux facteurs soupçonnés d'être responsables d'un phénomène donné afin d'en quantifier l'influence. On a ainsi cherché l'existence de corrélations entre les différents paramètres caractérisant les épisodes de débordement des eaux en présence de glace. Les facteurs ont d'abord été considérés sur une base individuelle puis examinés selon des regroupements spécifiques. La confection d'un tableau de raisonnement aura permis de synthétiser les connaissances nouvellement acquises.

2.3.2 Cueillette des données

Le jeu de données disponibles colligé dans le rapport de la phase I (Leclerc et coll., 2001) et mis à jour dans ce rapport (Tableau 1, page 8) a permis le démarrage immédiat du projet. À l'examen attentif des valeurs disponibles, des anomalies se sont révélées et une validation est apparue nécessaire. La base de données a donc fait l'objet d'un examen minutieux. Un certain nombre d'incohérences ont été décelées et corrigées. La nature des erreurs entachant les données a été décrite par Doyon (2001). Il s'agissait le plus souvent d'erreurs reliées au décalage dans le temps entre la survenue d'un embâcle et le moment de son signalement ou de son observation.

Le besoin en données complémentaires s'est rapidement fait sentir en cours de mandat, de sorte qu'il a fallu recourir à de nouvelles sources d'information. Les données suivantes ont ainsi été récoltées :

⁷ Cette question a déjà été répondue à la section 2.2.2, page 29, le présent exercice visant à valider la conclusion obtenue.

- ?? Débits horaires depuis le début de l'opération de la station 051001 (Marches naturelles);
- ?? Débit moyen à la prise des glaces pour les 20 dernières années;
- ?? Moment de l'année où l'on n'enregistre plus d'effet de glace sur la rivière à la station 051001 et débit moyen correspondant;
- ?? Débits moyens pour les années 1998 à 2000;
- ?? Neige au sol et précipitations.

Notons finalement que les données météorologiques manquantes à l'une ou l'autre des 2 stations de Courville ont toujours été complétées par les données provenant de la station de Québec (aéroport). La proximité de cette dernière station par rapport à celle de Courville permet le recours à ce stratagème sans risque de trouver des écarts notables.

2.3.3 Facteurs favorisant la débâcle

2.3.3.1 Influence du débit

La littérature scientifique établit d'emblée que la débâcle est notamment causée par un écoulement capable de briser le couvert de glace solide. En réalité, le débit est probablement le paramètre jouant le rôle le plus important dans l'amorce de la débâcle, spécialement dans les cas où le couvert est encore relativement sain. Identifier avec certitude le débit déclencheur s'est toutefois avéré un exercice vain dans le cas de la Montmorency. En effet, nous ne possédons aucune indication permettant d'affirmer que la débâcle s'est amorcée à un débit donné. Il est seulement possible en pratique de situer le débit dans une gamme comprise entre le minimum observé avant la débâcle et le maximum durant l'événement ce qui n'est pas moins que rien.

L'historique des variations maximales du débit horaire lors de débâcles précédant la formation d'embâcles est tracé à la Figure 28. On y constate que la fourchette des débits est très étendue pour la grande majorité des années. Le débit déclencheur se trouve bien sûr occulté quelque part dans cette plage. La Figure 28 montre des *maxima* qui s'échelonnent de 32 à 266 m³/s, les deux plus petits étant 32 et 35 m³/s. Ces mesures signifient que pour au moins deux cas, le débit déclencheur était égal ou inférieur à 35 m³/s.

Même si la débâcle est tributaire d'un ensemble de facteurs, lesquels varient selon la phase saisonnière en plus d'être différents d'un tronçon à l'autre, nous retenons que le débit de 30 m³/s constitue un seuil significatif de déclenchement pour le système d'alerte précoce.

À la Figure 29, nous avons tenté de réduire la plage de valeurs abritant le débit déclencheur en ajoutant une nouvelle information au graphe. Comme il est reconnu que la rupture du couvert se produit généralement alors que le niveau d'eau est égal ou supérieur à celui qui prévalait lors de la prise des glaces à l'automne précédent, nous avons ajouté le débit moyen au moment de la prise et ce, pour les 20 dernières années. Tel qu'escompté, il s'ensuit une légère réduction de la fourchette de débits, nettement insuffisante toutefois pour nous permettre d'identifier le débit déclencheur.

Ainsi, l'influence du débit dans le déclenchement du processus de débâcle demeure pour le moment difficilement quantifiable, son rôle dominant tenant d'abord à des préceptes purement physiques, d'ailleurs tout à fait défendables.

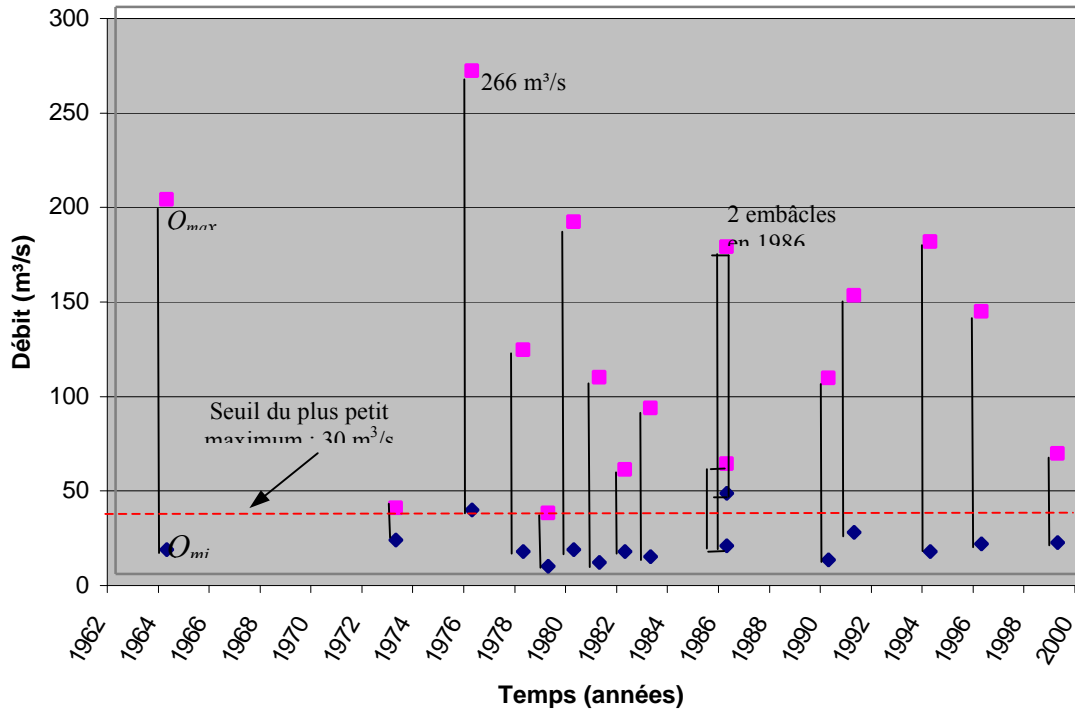


Figure 28: Historique des variations maximales du débit horaire lors de la formation des embâcles

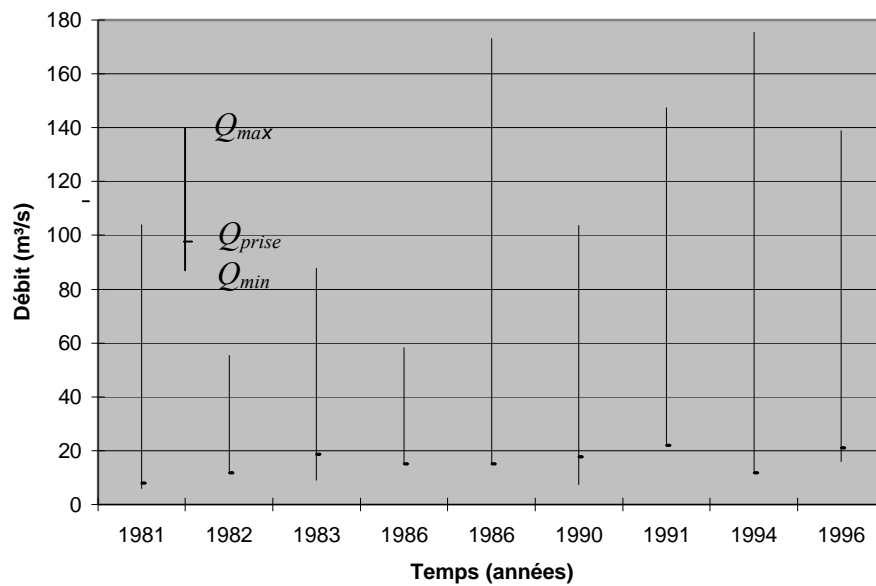


Figure 29: Débit moyen à la prise des glaces et variation maximale des débits horaires lors de la formation des embâcles

2.3.3.2 Influence des conditions météorologiques

Il est évident que les précipitations jouent un rôle majeur dans le déclenchement de la débâcle. La Figure 30 montre le total des pluies tombées une semaine avant la formation de chacun des embâcles répertoriés depuis 1957. On constate d'abord qu'il y a **toujours** eu un épisode de pluie durant la semaine précédant la formation d'un embâcle. On note ensuite que :

La plus faible quantité de pluie reçue dans la semaine précédant un embâcle sur la rivière Montmorency était de 22 mm.

Cette valeur peut faire office de seuil significatif au moment de construire le tableau de raisonnement pour le système d'alerte précoce. Il faut par contre rappeler que l'effet de la pluie sur le débit – ou le niveau d'eau – varie selon l'état du couvert de neige et la température.

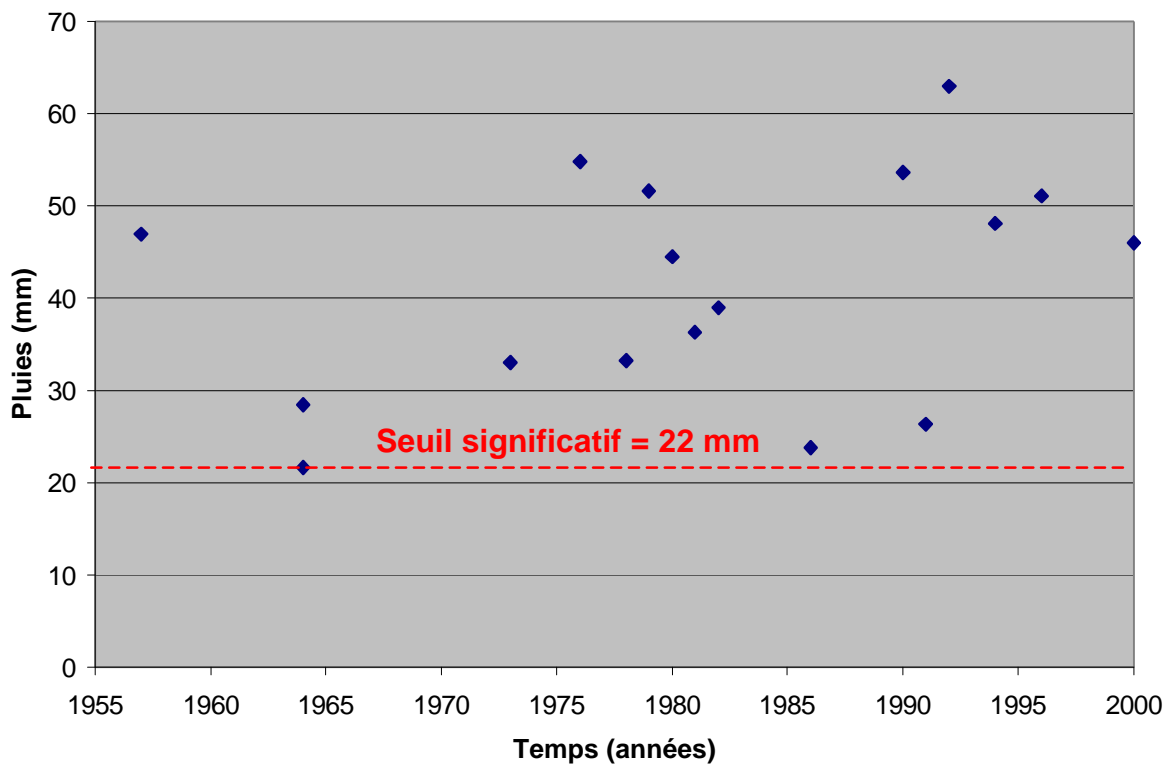


Figure 30: Pluies totales tombées dans la semaine précédant la formation d'un embâcle

Il va sans dire que la fonte joue parfois un rôle important dans le déclenchement de la débâcle. Ceci est particulièrement vrai si la débâcle coïncide avec l'arrivée du printemps ou au début de l'hiver lorsque le couvert peut mûrir à la faveur d'un redoux et des précipitations liquides. Cependant, on sait aussi que le décrochement du couvert peut se produire au milieu de l'hiver alors que la fonte est rarement avancée. Même si quelques degrés-jours de fonte sont enregistrés à cette occasion, ceux-ci ne font que témoigner de la période de redoux qui s'est momentanément installée. Le couvert demeurant généralement sain, on peut affirmer que la fonte n'est pas le facteur dominant dans l'amorce de la débâcle lorsqu'elle se produit en hiver. La Figure 31 montre pour tous les embâcles répertoriés depuis 1957 la quantité de degrés-jours de fonte accumulés au

moment de leur formation. On constate que la fonte n'était pas commencée – ou très peu avancée - dans 9 cas sur 20. On peut dès lors conclure que

La fonte n'est pas un facteur essentiel au déclenchement de la débâcle, mais qu'elle joue possiblement un rôle de catalyseur lorsque celui-ci se produit.

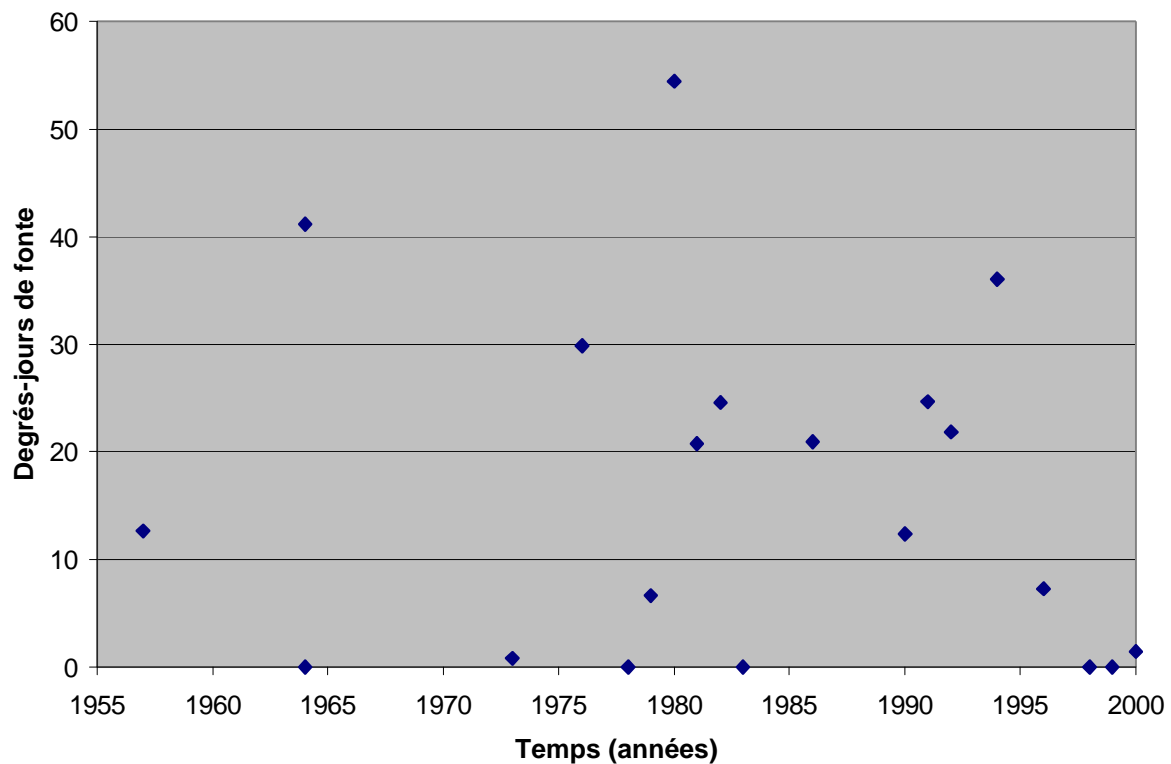


Figure 31: Degrés-jours de fonte enregistrés au moment de la formation d'un embâcle

Si la fonte n'est pas un facteur essentiel au déclenchement de la débâcle, **tous** les embâcles se sont pourtant produits alors qu'un certain réchauffement prenait place. Comment expliquer qu'il puisse y avoir réchauffement mais pas de fonte ? Pour répondre à cette question, il faut retourner au modèle conceptuel de la fonte qui implique un mûrissement du couvert nival préalable au ruissellement d'eau de fonte. Nous avons choisi de représenter la fonte par un bilan des degrés-jours au-dessus de 0°C. Ce bilan est construit à partir des températures moyennes journalières. Or, il arrive occasionnellement que la température moyenne demeure en-dessous du point de congélation malgré que des pointes horaires au-dessus de 0°C soient enregistrées.

La Figure 32 illustre pour tous les cas répertoriés la température de l'air maximale enregistrée dans la semaine précédant la formation de l'embâcle. Nous observons que l'embâcle coïncide **toujours** avec une période de redoux et des températures horaires maximales supérieures à 0°C. Par contre, plusieurs cas de débâcles se sont produits alors que les températures moyennes journalières étaient sous le point de congélation, de sorte qu'on doit conclure que le passage des températures moyennes au-dessus de 0°C n'est pas essentiel au déclenchement de la débâcle.

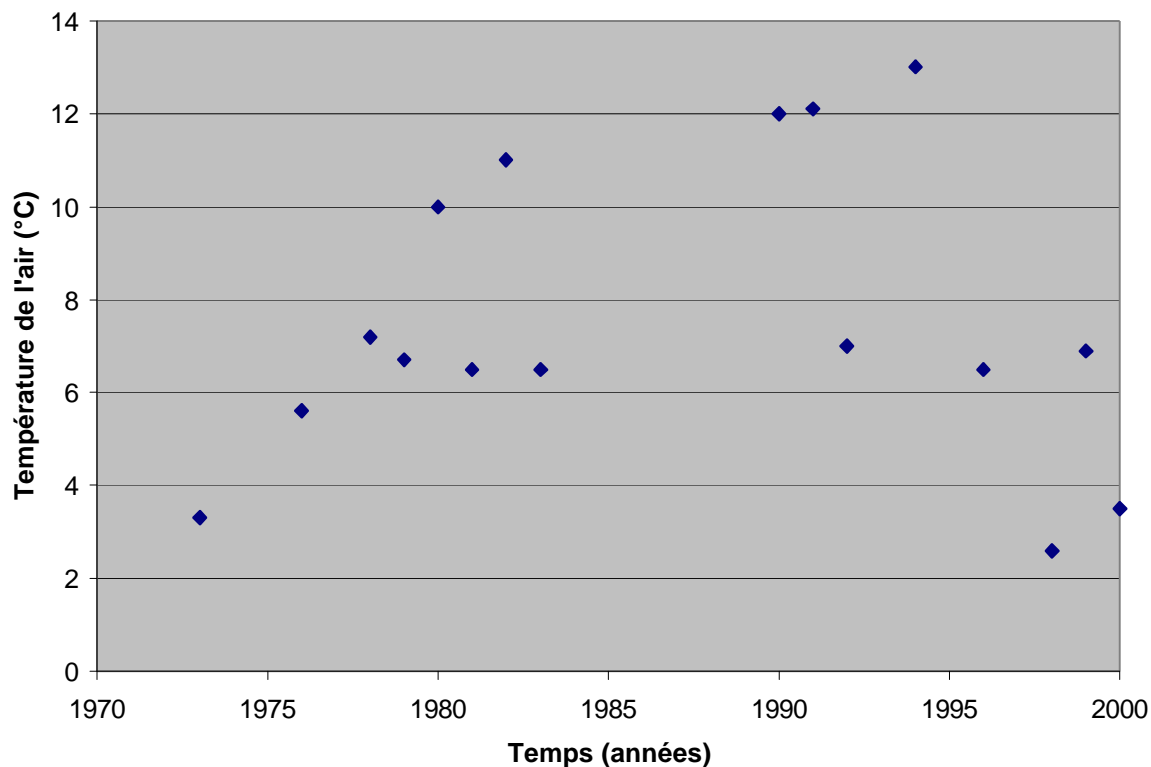


Figure 32: Température de l'air maximale atteinte dans la semaine précédant la formation de l'embâcle

Enfin, il est nécessaire de rappeler que des températures moyennes journalières au-dessus du point de congélation ne sont pas obligatoirement synonymes de débâcle. En effet, la fonte sur place est une avenue pour laquelle la nature peut toujours opter. En d'autres mots, des températures de l'air moyennes journalières supérieures à 0°C contribuent à l'installation de conditions favorables mais ne sont pas suffisantes à elles seules au déclenchement de la débâcle.

2.3.3.3 Influence combinée de la pluie et du couvert de neige en place

Nous venons de compléter la revue des principaux facteurs individuels susceptibles de jouer un rôle significatif dans le déclenchement de la débâcle. Nous savons maintenant que la fonte et la température ne jouent pas toujours un rôle dominant. En ce qui concerne les précipitations, nous avons réussi à identifier un seuil, 22 mm, que nous croyons significatif. Enfin, même si nous estimons qu'il s'agit du facteur clé de l'amorce de la débâcle, l'influence du débit demeure plutôt imprécise sans mesures de terrain plus ciblées.

Faute d'avoir pu identifier avec plus de précision la contribution individuelle de chacun des facteurs étudiés jusqu'ici, nous tentons de vérifier ci-après si leur combinaison permet de dégager leur contribution conjointe.

Intuitivement, on conçoit facilement que la pluie n'exerce un effet quelconque qu'après avoir ruisselé jusqu'à la rivière. Pour ce faire, elle doit circuler par percolation au travers du massif de

neige. Ainsi, lorsqu'on tente de quantifier le rôle des précipitations, on devrait logiquement prendre en considération la quantité de neige au sol. La Figure 33 propose d'examiner si la quantité de pluie requise pour forcer la débâcle dépend de la quantité de neige au sol. La tendance qui s'en dégage est assez claire : plus le couvert nival est épais, plus la quantité de pluie requise pour déclencher le processus de débâcle est importante. On en conclut que :

Le couvert de neige joue bel et bien le rôle tampon qu'on lui confère habituellement pour l'amortissement du ruissellement lié aux précipitations en situation propice à la débâcle.

Par ailleurs, le seuil de 22 mm identifié précédemment demeure valide et s'avère même conservateur puisqu'il s'est produit dans les pires conditions, alors qu'il n'y avait pas de neige au sol.

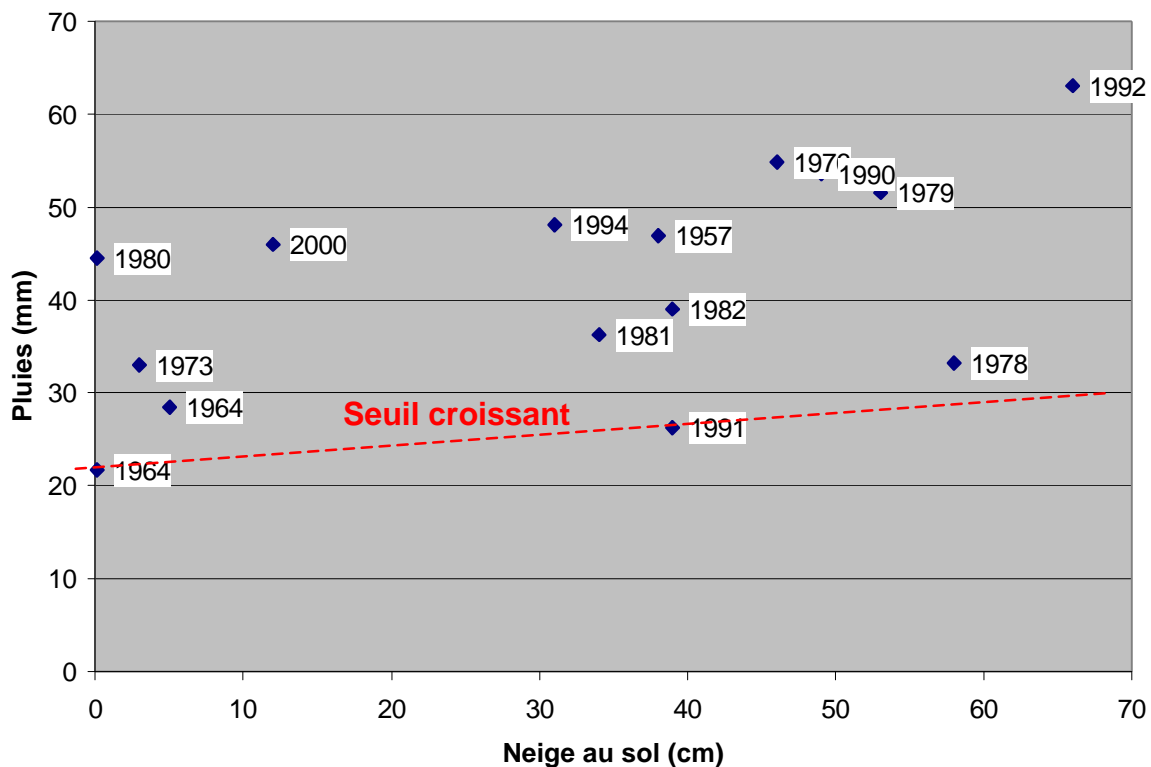


Figure 33 : Pluies totales tombées lors de la formation de l'embâcle et neige au sol correspondante

Pour cette raison, nous proposons un nouveau seuil qui varie en fonction des conditions d'enneigement. Ainsi, avec une épaisseur de 70 cm de neige au sol, c'est un minimum de 30 mm de pluie que la rivière pourra théoriquement recevoir avant de voir le couvert de glace se soulever et se rompre et entreprendre sa dévalaison. Notons au passage que ce graphe ne tient pas compte de l'état du mûrissement du couvert nival.

2.3.3.4 Influence de l'état du couvert de glace

On comprend par ailleurs aisément que la résistance mécanique du couvert de glace sur la rivière dépend de son épaisseur et éventuellement de son état de fragilisation en situation de redoux ou de fonte printanière. Cet autre facteur – ou son équivalent - doit donc également faire partie de l'analyse. C'est ce que la Figure 34 permet d'examiner en confrontant le bilan des degrés-jours de gel accumulés au moment de la formation de l'embâcle et le débit correspondant. Le nombre de degrés-jours est considéré représentatif de l'épaisseur du couvert, cette donnée n'étant pas disponible directement.

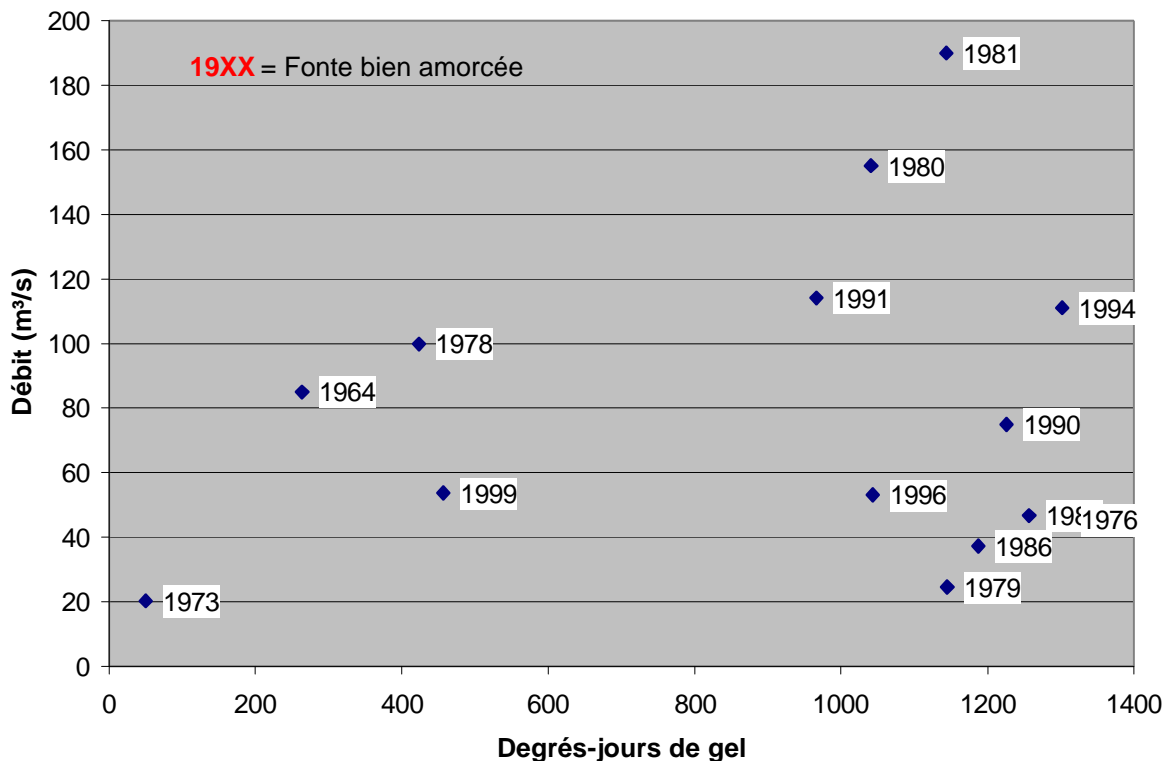


Figure 34: Degrés-jours de gel accumulés lors de la formation de l'embâcle et débit moyen journalier correspondant

Deux éléments d'intérêt ressortent. D'abord, si les données sont exactes, on note que de faibles débits sont capables d'emporter des couverts relativement épais, ce qui laisse toutefois présumer qu'ils ont été préalablement fragilisés par la fonte. Les données inscrites en rouge, indiquant que la fonte était bien amorcée au moment de la débâcle, montrent que c'est bel et bien le cas à l'exception de l'année 1979 où la fonte n'avait qu'à peine débuté. Des conditions particulières inconnues ont peut-être prévalu cette année-là accélérant ainsi la débâcle.

Ensuite, on distingue deux populations sur le graphe : la première représente les couverts minces avec un nombre de degrés-jours de gel inférieur à 450 et la seconde, les couverts plus épais avec les degrés-jours de gel supérieurs à 950. Entre les deux populations, aucun point intermédiaire. De façon toute hypothétique, on pourrait avancer que

Le couvert de glace se brise surtout en début de saison lorsqu'il est encore mince et vulnérable ou encore, à l'arrivée du printemps, alors qu'il est forcément plus épais, mais probablement fragilisé par le début de la fonte.

2.3.4 Facteurs déterminant l'emplacement d'un embâcle

2.3.4.1 Influence du débit

La Figure 35 présente les débits journaliers moyens en fonction du lieu de formation de l'embâcle correspondant. À première vue, il est difficile de dégager une quelconque relation entre les deux variables. Comme la détermination du lieu de formation de l'embâcle est très arbitraire, spécialement pour les événements moins récents, et que le choix du débit déclencheur relève également de l'interprétation, nous préférons tenter de présenter les données disponibles sous un angle différent avant de tirer des conclusions trop hâtives.

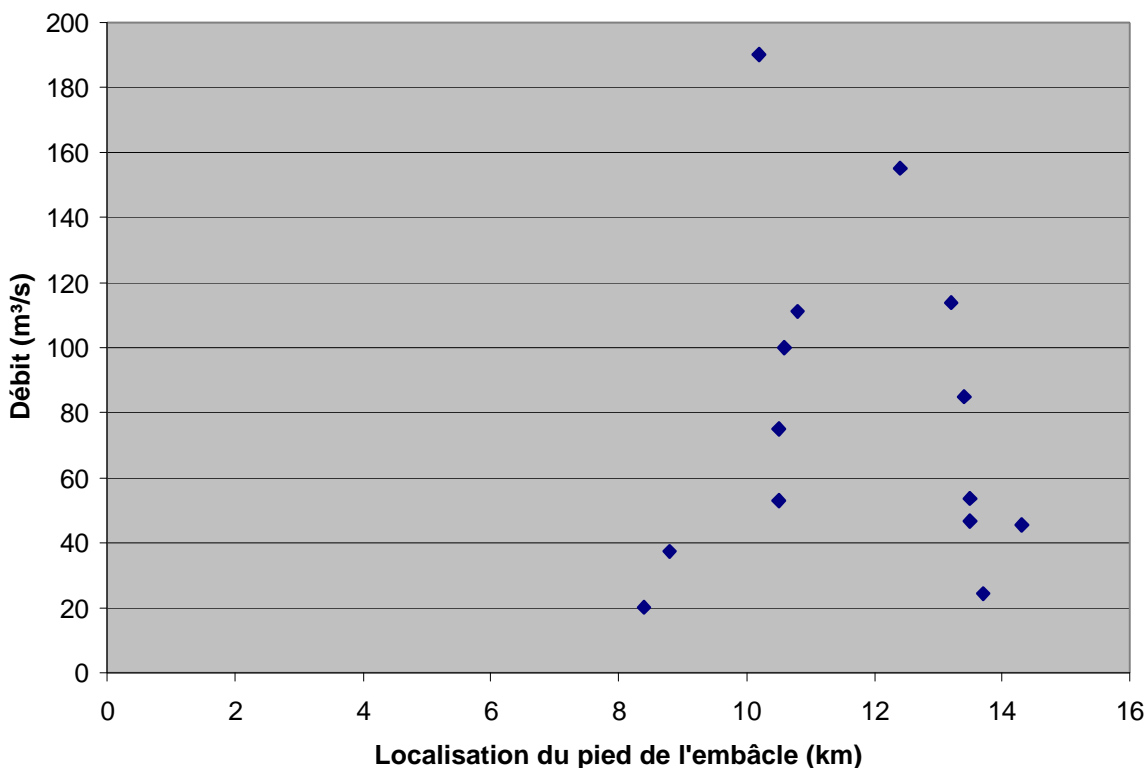


Figure 35: Débits journaliers moyens et localisation de l'embâcle correspondant

Dans l'analyse précédente, le choix du débit s'est arrêté sur celui mesuré au moment de l'observation de l'embâcle. Or, l'examen des débits mesurés les jours précédant l'observation de l'embâcle porte à croire que certains embâcles n'ont été rapportés que le lendemain ou même le surlendemain de leur formation. En d'autres mots, le débit déclencheur ne correspond pas nécessairement à celui mesuré au moment de l'observation de l'embâcle. C'est dans cet esprit que

l'influence des débits journaliers moyens mesurés les jours précédant (jours -1 et -2) l'observation de l'embâcle en fonction de sa localisation. Cette analyse qui n'est pas rapportée ici (voir Doyon, 2001) par des graphiques ne jette que bien peu de lumière additionnelle sur une hypothétique relation entre le débit et le lieu de formation d'un embâcle.

Cependant, avant de conclure que le débit n'entretient aucune relation avec le lieu de formation, nous préférons tracer une figure supplémentaire (Figure 36) sur laquelle sont rapportés les débits moyens maximaux atteints dans les jours précédant l'embâcle peu importe le jour. S'il demeure difficile de trouver le lien qui unit le débit mesuré au moment de la formation de l'embâcle avec sa position, on peut aisément identifier le débit maximal enregistré dans les jours précédant l'observation de l'embâcle. Ce débit ne constitue pas forcément le débit déclencheur, mais il a certainement exercé une influence quelconque quant à l'endroit où l'embâcle s'est formé.

Il est encore une fois pratiquement impossible de déceler la moindre corrélation entre les deux variables en présence. De deux choses l'une : ou bien le débit n'exerce pas la moindre influence sur le lieu de formation de l'embâcle - ce qui nous semble fort peu probable - ou bien sa contribution est occultée par un ou plusieurs autres facteurs météorologiques dont l'influence est au moins aussi significative. Enfin, il faut aussi considérer la possibilité que le débit exerce effectivement une influence non négligeable, mais que celle-ci soit subordonnée à d'autres paramètres plus influents comme la topographie des lieux, la pente du cours d'eau ou la section utile telle que délimitée par le couvert intact ou les berges.

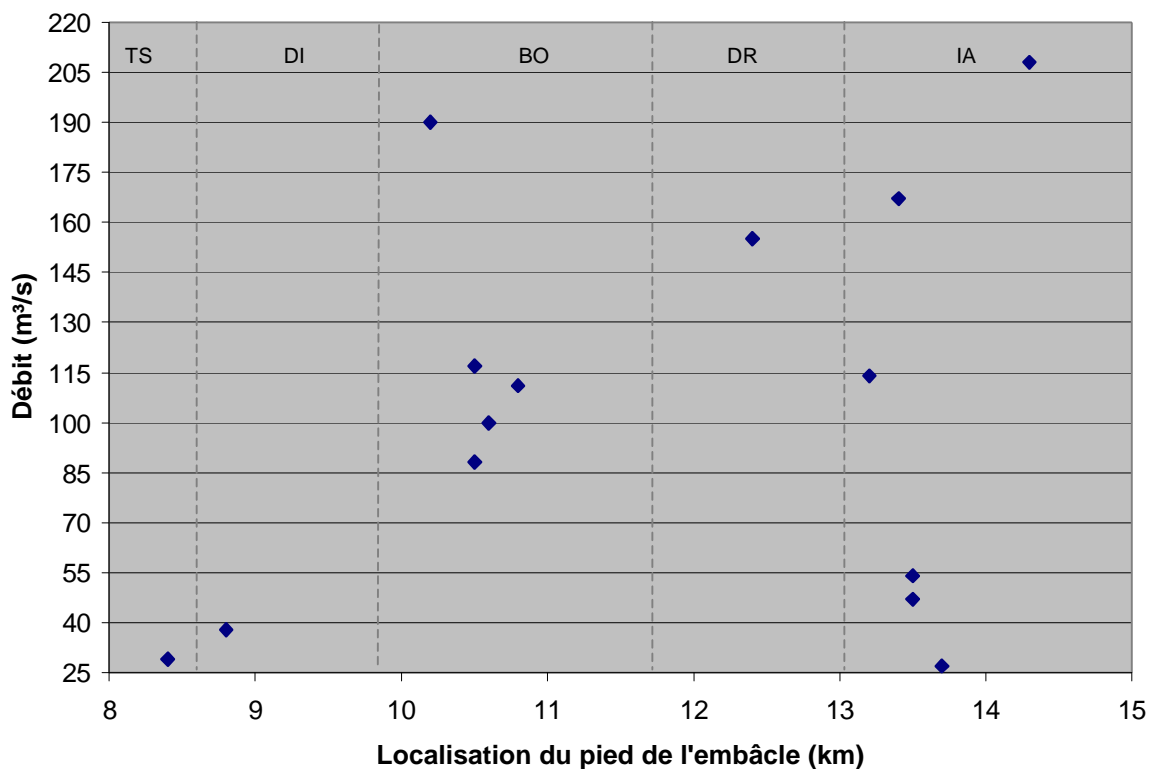


Figure 36: Débits moyens journaliers maximums précédant l'embâcle et localisation de l'embâcle correspondant

Les données dont nous disposons ont permis de vérifier si le débit jouait un rôle déterminant sur le lieu de formation d'un embâcle. Comme on l'a vu dans cette section, l'examen des données disponibles n'a malheureusement rien révélé de probant quant à l'implication du débit sur l'emplacement final de l'embâcle. La section suivante est dédiée à l'étude de l'influence de l'épaisseur du couvert sur le lieu de formation de l'embâcle, facteur qui pourrait contribuer à élucider la question.

2.3.4.2 Influence de l'épaisseur du couvert de glace

L'épaisseur atteinte par la glace peut être grossièrement estimée à partir d'une corrélation simple avec la température de l'air. Toutefois, ce genre de corrélation s'avère efficace surtout pour les tronçons où l'écoulement est laminaire. Comme l'épaisseur du couvert de glace est, à cause de ses nombreux rapides, un paramètre hautement variable sur la rivière Montmorency, il est recommandé d'utiliser directement le bilan des degrés-jours de gel. À la Figure 37, l'origine du bilan est ajustée au moment où le gel s'installait de manière plus permanente. Cette astuce vise uniquement à simuler l'apparition de la première couche de glace, moment à partir duquel devrait normalement débiter le décompte des degrés-jours de gel pour le calcul de l'épaississement du couvert. Le résultat n'est pas très éloquent quant à la relation liant l'épaisseur du couvert et l'emplacement de l'embâcle.

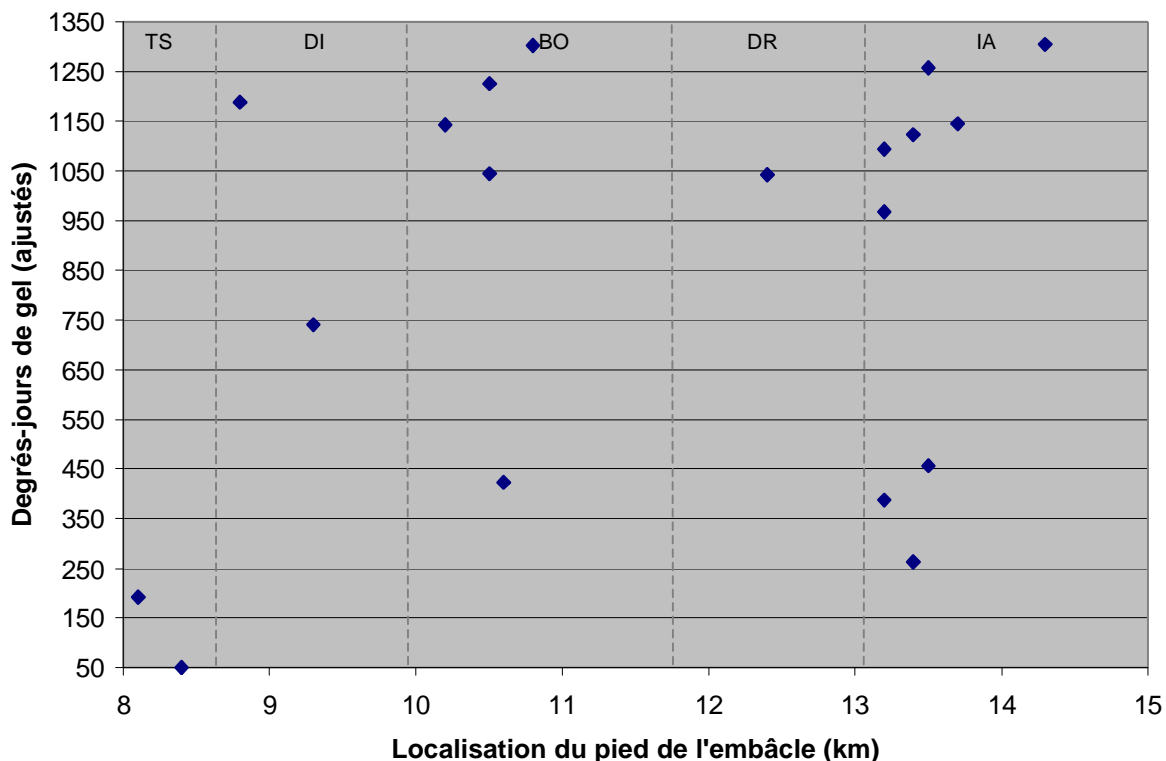


Figure 37 : : Accumulation des degrés-jours de gel pour un embâcle et son lieu de formation

Nous croyons qu'il est toujours légitime de lier la dimension des blocs au processus d'arrêt de la glace. Toutefois, l'influence de l'épaisseur ne semble pas prépondérante au point de pouvoir être explicitée au même titre que celle du débit ou de la précipitation avec la méthode grossière utilisée.

2.3.5 Débit évacuateur

Le « débit évacuateur » est une variable de conception très importante pour un ouvrage de contrôle des glaces car elle détermine le seuil de débit en-deçà duquel un tel dispositif doit demeurer efficace étant donné que dans cette gamme inférieure de débit, on ne peut assurer que la rivière pourra évacuer elle-même l'ensemble de la glace en dévalaison et donc risque de reformer des embâcles en aval dans des zones vulnérables. Corollairement, on estime qu'au-delà de ce seuil, la structure dispositif peut libérer la glace emprisonnée dans son bief d'amont en comptant sur la « compétence du cours d'eau pour l'évacuer jusqu'à son embouchure.

Il est difficile d'identifier précisément la valeur du débit à partir duquel la rivière a la compétence pour évacuer **complètement** son couvert de glace sur l'ensemble de son parcours jusqu'à son embouchure. En effet, cette information n'est *stockée* nulle part. Une possibilité est de récupérer dans les archives du ministère de l'Environnement du Québec le moment de l'année où la rivière cesse de subir un effet de refoulement dû à la présence de la glace et le débit correspondant. Cependant, en procédant de cette façon, nous n'obtenons pas uniquement des débits de crue puisque la débâcle n'engendre pas systématiquement d'embâcle dans les tronçons à l'étude. Il arrive en effet que la glace fonde sur place, spécialement lorsque le temps doux s'installe d'une façon progressive comme ce fut le cas au printemps 1997. Le tableau suivant montre les dates les plus hâtive et tardive pour la disparition de la glace au niveau du chenal principal de la rivière Montmorency.

**Tableau 4 : Dates de disparition de la glace sur la rivière Montmorency
(Source: archives, MEnv)**

Débâcle	Date
La plus hâtive*	4 mars
La plus tardive*	22 avril

* en date du printemps 1998

Enfin, le Tableau 5 présente pour les vingt dernières années les débits journaliers moyens au moment de la disparition de la glace sur la rivière. Nous y trouvons une large fourchette de débits attestant que certaines débâcles ont eu lieu progressivement et d'autres, de manière plus précipitée. Le débit à partir duquel la rivière évacue complètement la glace varie selon les conditions du couvert et l'avancement de la fonte. Ne sachant pas les conditions de glace sur toute la rivière, il demeure difficile d'interpréter ces données. Par exemple, on note qu'un débit moyen journalier de 198 m³/s s'est produit lors de l'évacuation des glaces en 1987 mais il se peut que la glace était déjà partie dans des secteurs à rapides plus à l'amont.

Au delà des analyses de Doyon (2001), il reste un dernier moyen d'identifier le débit évacuateur. À la Figure 28 le débit déclencheur se situe entre 32 et 266 m³/s car c'était la fourchette des débits lors des embâcles historiques. Basée sur ces données, nous pouvons faire l'interprétation que, dans des conditions de plus forts débits que cette fourchette, il n'y a pas d'embâcles parce que les glaces s'évacuent jusqu'à la chute Montmorency. Interpréter ainsi ces données pour identifier un débit évacuateur est une extrapolation basée non pas sur des observations mais sur l'absence d'observation (d'embâcle). Alors affirmer que les débits les plus extrêmes notés à la Figure 28 (soient $Q_{\text{évacuateur}} = 200$ à 266 m³/s) correspondent aux débits évacuateurs est une hypothèse qui demeure faible. Par contre, il reste vrai qu'il n'y a pas eu d'embâcle observé à des valeurs supérieures et c'est pourquoi l'hypothèse est retenue.

Maintenant, en examinant de plus près ces données, il est notable que l'embâcle formé lors du débit de 266 m³/s était dans le bras secondaire de l'Île-Enchanteresse et n'a pas constitué un blocage du cours principal. Alors il est possible de l'écarter comme débit seuil d'évacuation et de ne retenir que les autres événements. Pour le moment, le débit évacuateur retenu pour des fins de conception est 200 m³/s.

Tableau 5 : Débits moyens journaliers au moment de la disparition de la glace sur la rivière Montmorency (Source: archives, MEnv)

Débit (m ³ /s)	Date	Débit (m ³ /s)	Date
87,8	11 février 1981*	23,2	17 mars 1990
7,6	28 mars 1982	24,3	5 avril 1991
12,3	5 avril 1983	N/d	1992
N/d	1984	31,4	10 avril 1993
56,1	16 avril 1985	74,5	15 avril 1994
14,0	29 mars 1986	14,1	12 avril 1995
198,0	31 mars 1987	175,4	21 avril 1996
58,8	5 avril 1988	28,5	22 avril 1997
7,1	28 mars 1989	28,2	28 mars 1998

* bris de la jauge

Finalement, il reste deux informations à considérer qui n'ont pas été incluses dans cette analyse. La première a trait à l'événement de 1947. La valeur du débit observé n'est pas disponible pour cette année là mais, sur la base d'une analyse par transposition à partir des rivières voisines (Jacques-Cartier et Sainte-Anne) dont l'hydrologie répond aux mêmes tendances régionales et à une même orographie, le débit de l'événement a été estimé à 190 m³/s. Cette valeur vient entériner notre conclusion préliminaire de 200 m³/s. La deuxième information concerne les niveaux d'eau historiques observés lors des embâcles. Selon les calculs théoriques traditionnels, il existe une relation assez précise entre les profondeurs d'eau lors des embâcles et les « débits de charriage ». Selon les données des 25 dernières années, les profondeurs d'eau lors des embâcles sont inférieures

à 5 m. Par contre, en calculant une profondeur théorique avec les modèles empiriques reconnus pour un débit de $200 \text{ m}^3/\text{s}$, trouve une valeur de 7 à 8 m vis-à-vis de l'Île-Enchanteresse (correspondant à une pente de 7.4 m/km). Or, aucun embâcle aussi épais n'a été observé dans la période de référence même en considérant l'embâcle de 1947 estimé à 6 m d'épaisseur. Selon les relations disponibles, un embâcle 5 à 6 m d'épaisseur correspondrait plutôt à un débit d'environ $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Nous sommes devant le conflit que les observations de débit et de profondeur ne semblent pas conciliables avec les relations théoriques (empiriques) établies. L'impasse devait être brisée.

Un débit évacuateur de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ est retenu comme paramètre de conception pour la structure

Ce débit ultime pouvant être associé à un embâcle stable dans le bief de rétention de la structure ou dans l'un ou l'autre des biefs potentiels d'embâcles résiduels en aval de celle-ci, des surélévations de niveau d'eau de 5 à 6 m sont retenues pour l'analyse des risques résiduels dans les zones vulnérables.

2.3.6 Divers

D'autres aspects ont été traités par Doyon (2001) dans le cadre de son mandat complémentaire, comme le volume des embâcles historiques, l'évolution à long terme de leur fréquence historique et de leur magnitude telle que représentée par l'indice de sévérité des dommages (Tableau 1), la période de l'année où l'événement se produit et la classification de sévérité. Étant donné que peu de ces questions ont pu trouver une réponse éclairante d'après les données disponibles, il ne sera pas fait mention ici des détails de ces analyses. On se rapportera au rapport de Doyon (2001) pour ce faire.

Cependant, il est nécessaire d'insister ici sur l'importance de disposer d'une base de données fiables pour tirer des conclusions pertinentes en relation avec la dynamique de glaces en rivière et aux risques d'inondation qui y sont reliés. Dans le présent exercice, nous avons été ravis de l'abondance de données historiques disponibles. Cependant, l'incertitude reliée à certaines données a eu pour effet d'occulter l'influence des facteurs dominants. Il nous apparaît donc nécessaire :

de supporter la recherche visant à préciser les facteurs à suivre (monitoring) pour la compréhension de la débâcle et des embâcles et à reconstituer les jeux de données historiques disponibles dans les archives publiques pour les rivières à risques.

2.4 Contribution au système d'alerte précoce

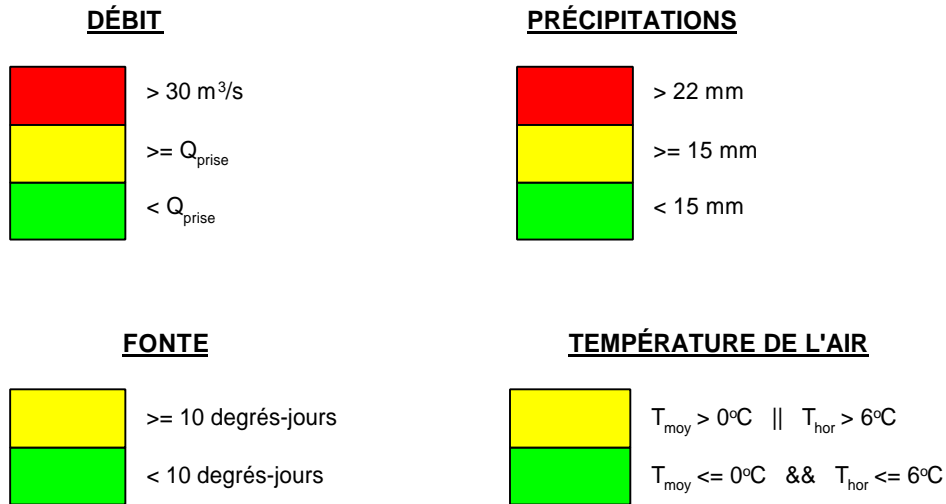
L'une des questions auxquelles nous devons apporter une réponse améliorée concernait la possibilité de prévoir des conditions particulièrement favorables à la formation d'embâcles en vue d'en tenir compte dans l'alerte précoce. Dans l'état actuel des choses et tant qu'un dispositif de contrôle des glaces en dévalaison n'aura pas été implanté sur la rivière, la vigilance des autorités et

le déclenchement d'alerte en cas de danger imminent sont des pratiques qui vont demeurer nécessaires, voire indispensables à la sécurité des populations. Même si nous n'avons déniché aucune donnée pour corroborer ce que nous avançons, nous sommes d'avis qu'aussitôt que le couvert est mis en mouvement sur la rivière Montmorency, son accumulation et sa compaction sous forme d'embâcle sont grandement probables, surtout lorsque le débit maximum associé à la débâcle demeure en deçà du débit d'évacuation que l'on considère apte à évacuer la glace jusqu'à l'embouchure du cours d'eau. Ainsi, toute débâcle présentant un aspect dynamique – ceci exclut donc les débâcles où la fonte sur place prédomine – comporte un risque élevé de mener à la formation d'embâcles.

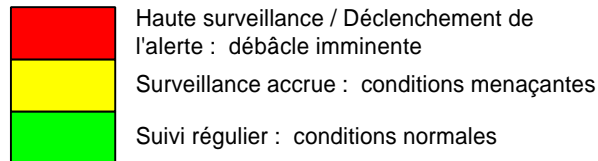
Dès lors, il advient que l'identification de conditions favorables à la formation d'embâcles équivaut à toutes fins pratiques à identifier les conditions menant au soulèvement puis au morcellement du couvert. Ce travail ayant fait l'objet des sections antérieures, nous présentons au Tableau 6 un résumé des règles de base devant présider à l'identification de ces conditions favorables. L'utilisation d'un code de couleurs universellement reconnu facilite la compréhension du tableau. Par exemple, un code rouge signifie qu'il y a danger de rupture imminente du couvert. Le code jaune signifie pour sa part que le couvert est dans un état relativement vulnérable. La fonte a pu le rendre hautement fragile ou encore, le débit l'a peut-être placé dans un état de grande fragilité.

L'alerte précoce repose essentiellement sur les facteurs critiques que sont les précipitations et le débit. On atteint d'ailleurs un code rouge uniquement par le biais des clés P ou Q. Ces 2 facteurs demeurent les indicateurs de base. La température de l'air, pas plus que la fonte, ne peuvent mener à un code rouge à elles seules. Ces deux facteurs sont en réalité des catalyseurs : seuls, ils n'ont pas d'impact significatif. Mais couplés avec le débit ou la pluie, ils sont des facteurs aggravants. Donc, l'idée d'inclure ces deux paramètres qui permettent de passer d'un code vert à un code jaune nous a semblé intéressante.

Tableau 6 : Synthèse des règles décrivant l'amorce d'une débâcle sur la rivière Montmorency



LÉGENDE



3 Solutions envisagées de contrôle structurel des embâcles et inventaire des expériences antérieures

3.1 Scénarios envisagés

Comme mentionné en introduction, différents scénarios remédiateurs ont été étudiés sommairement en phase I pour prévenir les dégâts dus aux embâcles le long de la Montmorency. Dans un premier temps, le coût intégré des risques liés aux embâcles avait été chiffré afin de servir de base de comparaison aux coûts des différents scénarios remédiateurs. Si le coût annuel d'un scénario s'avère moins cher que les coûts annuels engendrés par la situation actuelle, il est alors intéressant de le mettre en application à condition qu'il garantisse des risques résiduels minimaux, ce qui signifierait, par exemple dans le cas de l'installation d'une structure en rivière, une efficacité suffisante pour éliminer la plupart des dégâts d'embâcle et des coûts d'intervention. La prise en compte des risques liés à la sécurité des personnes permettrait cependant de valider un scénario ne satisfaisant pas le seul critère de rentabilité économique. Le cas échéant la décision représente un choix social. Les coûts du *statu quo* ont été évalués dans l'étude de pré-faisabilité à environ 260 441\$ (Leclerc et coll., 2001). Le risque pour les personnes n'est malheureusement pas quantifiable.

Sans tenir compte des nouvelles connaissances dans ce rapport, les scénarios suivants avaient donc été analysés sommairement en phase I:

1. **Une estacade fixe (peigne) installée au niveau du secteur de la « Vieille École » en amont de l'Île-Enchanteresse** qui, pour être jugée efficace ne devait peu ou pas requérir d'intervention administrative (expropriation, relocalisation) et devait éventuellement être assortie de deux estacades flottantes, l'une au site retenu et l'autre à l'amont de Sainte-Brigitte-de-Laval à la confluence de la rivière Saint-Adolphe afin de réduire l'apport de glace à l'ouvrage principal.

Deux sites ont été repérés en amont de l'Île-Enchanteresse pour l'installation d'estacade fixe de type peigne. Ces sites comportent des plaines inondables en rive gauche, configuration propice pour limiter les hauteurs d'eau dans le bief d'accumulation de glace et les inondations reliées. Un seuil peut être ajouté juste en aval de la structure afin d'augmenter légèrement les niveaux d'eau et ainsi diminuer les vitesses d'écoulement, ce qui permet la formation d'un couvert plus solide en début d'hiver. Dans les exemples nord-américains (§ 3.3) où de telles structures ont été construites, les résultats furent très encourageants mais la courte expérience de ce type de structure ne permet pas encore d'en évaluer l'efficacité à long terme. De plus, la rivière

Montmorency présente de fortes pentes et des hauteurs de plaine inondable importantes à ces sites, ce qui nécessite des études plus poussées afin d'évaluer l'efficacité de ces structures dans de telles conditions (projet de recherche réalisé par Delcourt, 2002). Deux questions émergent tout particulièrement : une reliée à la vitesse des courants et à la capacité d'une estacade-peigne de provoquer l'arrêt des glaces et l'amorce d'un embâcle dans son bief d'amont. La deuxième est reliée à la présence significative d'une fonction résidentielle significative dans le bief d'accumulation ce qui porte à envisager la nécessité de mesures administratives importantes visant la relocalisation et/ou l'expropriation des résidences potentiellement affectées par des inondations consécutives aux embâcles artificiels.

2. **Une estacade flottante avec filet sous-jacent en amont de l'Île-Enchanteresse** qui, à l'instar du premier scénario, ne devait requérir que peu ou pas d'intervention administrative (expropriation, relocalisation) pour être jugée efficace, et pouvant être assortie de deux estacades flottantes, l'une au site retenu et l'autre à l'amont de Sainte-Brigitte-de-Laval à la confluence de la rivière Saint-Adolphe.

Cette solution très semblable à la solution 1 présentait l'avantage d'être financièrement plus intéressante. Cependant, les estacades flottantes ne sont actuellement utilisées que pour des cours d'eau à faible pente, relativement profonds et jamais pour retenir des embâcles (uniquement pour hâter la formation d'un couvert qui, lui, servira à provoquer l'embâcle. La validation de cette solution pour des rivières à pente forte comme la Montmorency nécessitait donc des études plus approfondies (projet de recherche de Francoeur, 2002). Les estacades flottantes sont toutefois retenues dans les scénarios précédents (1) comme solutions d'appoint car, placées au niveau de l'embouchure de la rivière Saint-Adolphe et dans la zone du pont du Moulin, elles permettraient de limiter les apports de glace qui augmentent l'extension des embâcles sur la Montmorency. Une question retient l'attention en plus de celle reliée à la vulnérabilité résidentielle dans le bief d'accumulation, c'est celle de la profondeur du cours d'eau qui semble *a priori* insuffisante sur la Montmorency pour permettre le déploiement du filet sous-jacent.

3. **Une série de seuils avec ou sans fixation au lit à l'amont de l'Île-Enchanteresse** associée à deux estacades flottantes.

Ces seuils rocheux artificiels, initialement conçus pour l'amélioration de l'habitat piscicole (Claude Beaulieu, BPR Groupe Conseil, communication personnelle, 2000) ont l'avantage d'être assez discrets et de former des plans d'eau calmes sur lesquels un couvert solide peut se former plus rapidement entraînant la formation de quantités de frasil beaucoup moins importantes. Cependant, il a été jugé en pré-faisabilité que ces séries de seuils risquaient d'être inefficaces en cas de crues hivernales plus importantes. Dans ce cas, le couvert de glace en amont de chaque seuil risque de décrocher et de ne plus jouer le rôle de déclencheur d'embâcle qu'on attend de lui. De plus, malgré qu'elle soit considérée comme discrète à cause des matériaux alluvionnaires employés, et bénéfique aux habitats piscicoles, la présence de ces seuils, modifierait considérablement l'aspect morphologique de la rivière qui est restée jusqu'à maintenant dans un état quasi-naturel. À cause de sa présence répétitive, cet impact risquait fort d'être jugé indésirable.

4. **Une estacade fixe installée en aval de l'Île-Enchanteresse** qui requiert l'expropriation ou la relocalisation des riverains de cet endroit et de la rue des Deux-Rapides, assortie de deux

estacades flottantes, l'une au site retenu et l'autre à l'amont de Sainte-Brigitte-de-Laval à la confluence de la rivière Saint-Adolphe.

Une structure à cet endroit serait techniquement efficace et la plus avantageuse car la pente de la rivière y est plus faible et que c'est à cet endroit de prédilection que les embâcles se forment le plus souvent. Puisqu'elle aggrave considérablement leur risque, cette solution nécessite cependant la relocalisation de l'ensemble des propriétés de l'Île-Enchanteresse et de la rue des Deux-Rapides, ce qui rend cette solution extrêmement difficile à réaliser socialement et, au bout du compte, financièrement trop coûteuse par rapport au *statu quo*. Avant d'exclure définitivement cette solution, il convenait d'examiner si la résolution des risques à l'eau libre accompagnant cette solution pourrait contribuer à la bonifier et, si possible, la qualifier en terme de rapport coût/bénéfice. Une section complète de ce rapport est consacrée à l'examen de la question des risques à l'eau libre (Chapitre 6, page 160).

5. Un barrage installé en amont.

Il s'agit d'une solution radicale et techniquement efficace aux problèmes d'embâcle de la Montmorency mais les impacts écologiques sont considérables et les coûts financiers dépassent largement ceux du *statu quo* (Tableau 7) ce qui fait que cette solution ne se qualifiait d'aucune manière dès la phase I. Cette solution est citée car elle fut envisagée par Les Consultants BPR en 1994 mais l'analyse n'en a pas été approfondie. De plus, à l'instar des solutions précédentes, cette option ne permet pas d'éliminer le risque résiduel constitué par le décrochement du couvert de glace en aval de l'ouvrage et les embâcles susceptibles de survenir aux sites propices à ce phénomène en aval de l'Île-Enchanteresse.

En plus des solutions citées ci-dessus, l'adjonction ou le rehaussement de digues et de levées le long des rives peut cependant améliorer la protection de certaines zones. Il s'agit d'une option intéressante pour la station de pompage de Beauport afin d'éviter les incursions de glace et de débris dans les bassins de captation. De surcroît, cette solution est de nature à atténuer les risques d'inondation à l'eau libre comme le démontre le rapport de Heniche et coll. (1999) à la Ville de Beauport. Des digues pourraient aussi être placées dans certaines zones résidentielles les plus proches de la rive, notamment à l'entrée du « Rigolet » (secteur résidentiel des Îlets) ainsi qu'à l'amont de l'Île-Enchanteresse.

Le Tableau 7 résume les coûts représentés par les scénarios envisagés en phase I. Le rapport de cette phase présente en plus des détails de calcul une pré-analyse des aspects environnementaux et sociaux de ces options. Ce tableau montre que si les estacades, fixes ou flottantes, s'avéraient efficaces, elles représenteraient une solution très intéressante pour les petites communautés ne disposant pas d'énormes moyens financiers pour l'installation de structures lourdes.

Tableau 7 : Coûts – bénéfiques des solutions envisagées en phase I (Pré-faisabilité)

Scénario	Coût total (\$)	Coût annuel (\$)*	Gain par rapport au statu quo (\$)
0 - Statu quo		260 441	-
1- Estacade fixe en amont de l'Île-Enchanteresse plus estacades d'appoint	1 025 000	153 750	106 691
2 - Estacade flottante en amont de l'Île plus estacades d'appoint	625 000	93 750	166 691
3 – Série de seuils en amont de l'Île plus estacades d'appoint	700 000	105 000	155 441
4 – Estacade fixe en aval de l'Île avec relocalisations et estacades d'appoint	5 736 000	860 470	(600 029)
5 – Barrage lourd en amont de l'Île-Enchanteresse	10 000 000	1 500 000	(environ 1 250 000)

3.2 Nouvelles voies

Devant les incertitudes accompagnant certaines des solutions envisagées en phase I, il convenait de reprendre l'analyse afin de rechercher de nouvelles options. Les travaux de Delcourt (2002) ont permis d'évaluer plus précisément le comportement et les paramètres de dimensionnement des estacades fixes et de développer de nouveaux concepts ou variantes des solutions envisagées, notamment les *estacades à filets retenus par des piliers*. De plus, les recherches de Francoeur (2002) ont aussi permis de préciser les paramètres d'efficacité des estacades flottantes. Une présentation préliminaire de ces idées ainsi qu'une démonstration de leur efficacité en laboratoire ont été réalisées pour le bénéfice du Comité de suivi en octobre 2001. Ces nouveaux scénarios ne seront pas développés dans ce chapitre car il en sera question en détail dans les chapitres subséquents.

Mentionnons simplement que la pause d'une estacade fixe avec filet amovible au niveau d'un site situé immédiatement à l'amont du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte semble une nouvelle hypothèse de solution plus intéressante pour améliorer la protection de l'Île-Enchanteresse et, dans une bonne mesure, les autres sites à risque plus loin en aval. En amont du point mentionné, les rives sont inhabitées et/ou suffisamment surélevées et la glace résiduelle qui pourrait encore former un embâcle en aval de l'Île ne provoquerait que des inondations mineures au niveau de l'Île. Quant aux riverains situés juste en amont de l'Île, ils ne devraient plus être affectés.

3.3 Efficacité des estacades conventionnelles existantes

Ci-après, il a été jugé utile de faire état d'expériences similaires tentées ailleurs ou dans la région immédiate pour résoudre les problèmes d'embâcles à l'aide d'estacades fixes. Les estacades fixes conventionnelles (peignes) sont des structures fixes composées de piliers dont le but est d'arrêter la glace et de former un embâcle stable en amont pendant que l'eau s'écoule sous la glace, à travers celle-ci ou même, par les cotés de la structure. Le présent chapitre tente d'évaluer l'efficacité de ces structures à partir de renseignements fournis par leurs gestionnaires, par les ministères, par les municipalités ou encore fournis par la bibliographie ou d'après diverses autres sources d'informations pertinentes. L'information est produite sous forme de fiche technique.

3.3.1 L'estacade de Saint-Raymond de Portneuf

?? *Situation* : Rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond de Portneuf (60 km à l'ouest de Québec)

?? *Type* : Seuil avec piliers (Figure 38)

?? *Date de construction* : achevée en 1976 (vannes de la rive droite)

?? *Coût de construction* : 368 000 \$ (en 1976)

?? *Coûts d'entretien* : Faibles. Le ministère de l'Environnement est responsable de la structure. Les entretiens depuis la construction se sont limités à des interventions mineures comme la réparation de petites fissures. La structure n'a subi aucune intervention majeure.

?? *Source d'information* : Municipalité de Saint-Raymond de Portneuf.



Figure 38 : Estacade de Saint-Raymond de Portneuf (Source : Ministère de l'Environnement)

La structure est composée d'un seuil de 4,5 m de hauteur (Tuthill, 1995) sur une longueur de 101,5 m. Les piliers posés sur ce seuil mesurent 1,8 m de hauteur et sont espacés de 6 m.

Les riverains de l'estacade estiment que la structure a un impact positif sur la réduction des inondations. Depuis sa construction, une seule inondation hivernale importante a eu lieu (en 1989). Selon les riverains, la structure fonctionne selon deux modes distincts :

- ?? Soit un couvert stable se forme en amont, les glaces en dévalaison de l'amont viennent s'accumuler contre ce couvert stable et, lors d'une période de redoux ou du réchauffement printanier, les glaces fondent en place et/ou passent progressivement à travers la structure sans provoquer de dégâts en ville.
- ?? Soit les blocs de glace s'accumulent contre le couvert formé en amont de la structure. Lorsque la quantité de blocs est importante et que les conditions climatiques entraînent une augmentation du niveau d'eau et un ramollissement de la glace, le couvert stable commence à se fissurer. La poussée importante entraîne l'avancement du front de blocs de glace vers la structure. Le couvert fissuré se fracture donc au fur et à mesure par la poussée des blocs. Il peut s'écouler jusqu'à environ une semaine pour que les blocs accumulés contre le couvert traversent celui-ci et atteignent l'estacade. Les blocs de glace peuvent s'accumuler sur l'équivalent de 3 à 4 épaisseurs de couvert de glace et finalement, le front de blocs de glace atteint la structure. Les blocs et l'eau situés en amont continuent à exercer une poussée importante entraînant la remontée des blocs de glace le long des piliers. Lorsque les glaces ont atteint une hauteur suffisamment importante, elles basculent par dessus de la structure. Le phénomène est alors très rapide et les glaces retenues dans le réservoir d'amont sont rapidement évacuées vers l'aval (en une à trois heures environ). Seuls les plus gros morceaux sont retenus par l'estacade.

On note cependant que les blocs arrivant à l'estacade ne basculent pas systématiquement par dessus. Quand la poussée n'est pas assez forte, les blocs sont retenus et fondent en place. En principe, les blocs ne devraient pas basculer par dessus l'estacade mais les digues qui entourent la structure sur une centaine de mètres en amont empêchent l'eau de se déverser dans une zone habitée vulnérable jouxtant le plan d'eau. L'augmentation du niveau en amont est donc accentuée, ce qui peut expliquer l'accumulation de blocs de glace les uns sur les autres et le basculement de la glace par dessus la structure. Cette augmentation de niveau a été constatée par des riverains qui ont observé une surélévation des inondations de 3 à 4 pieds (0,9 à 1,2 m) depuis la construction de l'estacade. Dans les deux modes de fonctionnement de l'estacade, une plaine inondable située quelques centaines de mètres en amont de l'ouvrage permet d'accumuler une quantité importante d'eau et de glace.

L'estacade n'a pas résolu complètement les problèmes d'inondations de la municipalité mais elle les a considérablement atténués. Cependant, en amont de l'estacade, certaines maisons sont inondées plus régulièrement depuis l'installation de la structure. Au niveau de la rive gauche, les maisons proches de l'estacade ne sont pas, sauf exception, touchées par les inondations car les digues assurent correctement la protection. Cependant, des secteurs de la municipalité plus en aval sont encore inondés car des embâcles se produisent encore au pont du chemin de fer, à la confluence de la rivière Sainte-Anne et du Bras du Nord. Les inondations sont cependant moins importantes car une partie des glaces est retenue par l'estacade. La structure assure malgré tout une bonne protection car, avant que le couvert ne lâche, la pointe de débit a eu le temps de passer. Il s'agit d'un effet de désynchronisation difficile à prévoir mais néanmoins réel. Les dégâts sont donc ainsi minimisés.



Figure 39 : Accumulation de glace sur l'estacade de Saint-Raymond de Portneuf (Magella Dery, riverain, photo non datée)

Le 19 décembre 2000, des observations d'embâcle sur l'estacade ont pu être réalisées. Une pluie d'environ 50 mm était tombée la journée précédente, entraînant la rupture du couvert de glace sur de nombreuses rivières, incluant d'ailleurs la Montmorency (voir la section 2.2.4 « Embâcle du 17 décembre 200 », page 34). Vers 12h40, on observe un train de glace s'arrêtant contre le couvert intact à environ 1 km de l'estacade. Quelques instants plus tard (5 à 10 min.), le niveau d'eau monte entre l'embâcle et l'estacade entraînant un léger mouvement et une légère fracturation du couvert en place. Dans les minutes qui suivent, le train de glace traverse le couvert en place (encore mince et facile à fracturer), parvient jusqu'à l'estacade et n'est absolument pas freiné par celle-ci. Les glaces ne s'arrêtent temporairement que quelques centaines de mètres plus bas, près du centre de la municipalité. Dès que l'embâcle commence à s'y fixer, une augmentation rapide du niveau d'eau peut être observée sans toutefois provoquer d'inondations.

Dans le courant de l'après-midi, cet embâcle cède pour aller se stabiliser plus loin entre l'aval de la ville et l'amont du pont de chemin de fer. Aucune inondation n'est à déplorer cette fois-ci, mais la coté d'alerte est presque atteinte. Des responsables de la municipalité patrouillent toute la journée afin de surveiller les niveaux d'eau aux différents endroits vulnérables de la municipalité.

L'embâcle ne se forma pas sur l'estacade car la dimension des blocs de glace était bien inférieure à l'espacement des piliers de la structure. En effet, les fortes précipitations de la journée précédente (50 mm et plus en une seule journée) ont dû créer une onde de crue importante qui a facilement fracturé les couverts nouvellement formés (pour fins d'évaluation, la glace de la Montmorency avait une vingtaine de centimètres d'épaisseur à la même époque, alors que son épaisseur en milieu d'hiver varie plutôt entre 40 et 60 cm). De plus, l'estacade de Saint-Raymond de Portneuf étant en fait un petit barrage surplombé de piliers, la chute d'eau entre les piliers créait une accélération importante de l'écoulement (dite convective), une sorte de « courant d'appel » qui avait tendance à « aspirer » les glaces.

Lors d'une réunion du comité de suivi du présent projet (janvier 2001), M. Laganière, Ing., (Ministère de l'environnement) apporta des précisions sur les objectifs de conception des ouvrages Sartigan sur la Chaudière et de Saint-Raymond de Portneuf sur la rivière Sainte-Anne. Le but

premier de ces ouvrages similaires est de favoriser la formation d'un couvert de glace solide ayant pour rôle d'arrêter la glace morcelée lors d'une débâcle en amont. Les piliers de l'ouvrage de Saint-Raymond sont relativement espacés. Ils sont là pour retenir le couvert de glace solide même en cas de crue (montée du niveau de l'eau) mais ne sont pas conçus pour retenir de la glace morcelée ainsi que le ferait un seuil-peigne. Le même concept a été adapté pour former le seuil-peigne de la rivière Duberger (voir la section 3.3.2, « L'estacade de la rivière Duberger », page 60. Dans ce cas, des piliers beaucoup plus rapprochés forment une deuxième ligne de défense si le couvert de glace créé par le seuil ne parvient pas à lui seul à stopper la glace morcelée en dévalaison de l'amont.

Une pluie importante et un réchauffement en début d'hiver n'ont rien d'extraordinaire, ce qui signifie que l'épisode survenu au cours de l'hiver 2000-2001 pourrait se reproduire dans le futur avec de probables inondations si les pluies s'avéraient plus importantes. Ce fait démontre que l'efficacité primaire d'une structure de contrôle des embâcles peut contribuer significativement à la réduction des dommages dans les situations prévues par la conception mais qu'il faut s'attendre à la manifestation de risques résiduels associés aux comportements secondaires de l'ouvrage dans les situations d'exception.

En d'autres mots, la structure doit être efficace lorsque les variations de niveau ne sont pas trop rapides, le couvert en place au niveau de la structure pouvant alors retenir les glaces provenant de l'amont. Lorsque le couvert est plus fragile ou que les débits sont plus importants, les glaces peuvent s'arrêter sur la structure comme l'ont témoigné certains riverains. Par contre, lorsque le niveau varie trop brusquement, et que le couvert est fragile d'avance comme en ce mois de décembre 2000, le couvert ne peut plus contribuer à la rétention des glaces provenant de l'amont. Étant de plus morcelé en blocs de petite taille, il peuvent facilement basculer par dessus le seuil de l'ouvrage entre les piliers relativement espacés.

3.3.2 L'estacade de la rivière Duberger

?? *Situation* : Québec, sur la rivière Duberger, près du croisement des autoroutes de la Capitale et Du Vallon

?? *Type* : Seuil avec piliers (Figure 40)

?? *Date de construction* : 1983

?? *Coût de construction* : 275 000 \$ + 45 000 \$ pour les coûts d'ingénierie et de sondage (selon l'estimation de la Ville de Québec).

?? *Coûts d'entretien* : faibles, nettoyage avant l'hiver et une visite annuelle pour le contrôle de l'infrastructure et des risques d'affouillement

?? *Source d'information* : Ville de Québec (Paul Morin, communication personnelle, 2001), et observations de Brian Morse



Figure 40 : Vues de l'estacade Duberger (Delcourt, 7 mars 2000)

La structure de 13,5 m de longueur est composée d'un seuil de 1 m de hauteur surplombé de piliers de 2 m de hauteur et 0,5 m de largeur. L'espace libre entre chaque pilier est de 1,5 m.

Le fonctionnement précis de la structure n'est pas documenté mais la protection des quartiers résidentiels en aval de l'estacade semble assurée, du moins depuis la construction de l'ouvrage. Avant la pose de la structure, les inondations se produisaient environ une année sur deux. Depuis l'installation de la structure, aucun dégât n'est à déplorer. À la confluence des rivières Duberger et Saint-Charles, des embâcles peuvent toujours se former sur cette dernière et menacer le quartier résidentiel riverain mais grâce à l'estacade, les embâcles ne sont pas amplifiés par l'apport de glace de cette dernière.

Les observations faites par B. Morse durant l'hiver 2000 permettent de mieux comprendre le fonctionnement de l'estacade. Sur la Figure 40 et la Figure 41, les traces brunes sur la neige correspondent en fait à des dépôts de glace résultant d'un embâcle. Lors de la visite, le cours d'eau était dégagé sur une distance d'une centaine de mètres, on retrouvait l'embâcle juste en amont d'une sortie d'eau souterraine (Figure 43). Sur la Figure 41, on voit que des résidus de l'embâcle sont encore coincés dans les piliers. Les observations laissent place à plusieurs interprétations. Un embâcle s'est formé en amont de l'estacade et l'apport d'eau souterraine, plus chaude, a pu entraîner la fonte des glaces de l'embâcle situées en aval de cet apport d'eau. Un autre scénario potentiel est que la glace située en aval de la sortie d'eau ait été suffisamment ramollie pour ne plus pouvoir être retenue par les piliers de l'estacade. La glace fut alors entraînée par le courant. Mais l'hypothèse de la fonte en place semble plus plausible. En effet, si l'embâcle avait lâché, des traces de dépôts auraient dû être observables juste en aval de la structure mais comme on peut le voir sur la Figure 42, la neige des berges est restée intacte.



Figure 41: Vues de l'amont de l'estacade de la rivière Duberger (Morse, 7 mars 2000)



Figure 42 : Vue de l'aval de l'estacade de la rivière Duberger (Delcourt, 7 mars 2000)

Figure 43 : Sortie d'eau en amont de l'estacade (Morse, 7 mars 2000)

Lors d'observations réalisées le 18 décembre 2000, vers 11h30, suite aux pluies importantes de la veille (50 mm), on constate qu'un embâcle s'était formé sur les piliers de la structure (Figure 43). La glace s'est accumulée jusqu'à une hauteur de 20 cm sous les piliers (approximativement 2,8 m au-dessus du lit de la rivière).

Si le niveau était plus haut dans les heures qui ont précédé l'embâcle, il est fort probable que l'eau ait pu s'infiltrer à travers la neige sur la rive droite. La longueur d'embâcle ne put être estimée car elle s'étendait aussi loin que nous puissions voir, soit environ 200 m.



Figure 44 : Vue de l'amont de l'estacade de la rivière Duberger à la fin de l'hiver 2000-2001. Résidus de glace accumulés en amont de l'estacade (Delcourt, 20 mars 2001)

Figure 45 : Sortie d'eau en amont de l'estacade (Delcourt, 20 mars 2001)

Sur la Figure 44, les résidus de la glace retenue par l'estacade en décembre 2000 ont déjà subi une fonte avancée à la fin de l'hiver 2000-2001. Cette fonte est accélérée par l'apport d'eau tempérée d'une sortie d'eau en amont (Figure 45) qui est la même que celle figurant à la Figure 43. Comme il a été constaté l'année précédente, la présence de cette amenée d'eau accélère la fonte de la glace. Sur la Figure 45, le couvert en aval de l'amenée d'eau a déjà disparu alors qu'en amont, le couvert est encore complet.

Lors d'une réunion du comité de suivi du présent projet en janvier 2001, il fut précisé que l'estacade Duberger avait été conçue avec des piliers plus resserrés pour retenir directement les blocs de glace car la création d'un plan d'eau n'était pas possible à cet endroit. Il s'agit donc d'un ouvrage de type peigne.

En conclusion, l'ouvrage est efficace car les quartiers résidentiels situés en aval n'ont plus subi de dégâts depuis l'installation. Il est à noter cependant que contrairement à la rivière Montmorency, l'ouvrage est implanté en plaine, un endroit où les pentes sont relativement faibles, peu propices à l'accélération des courants et donc favorables à la création d'embâcles. L'efficacité du concept sur la rivière Duberger ne peut donc servir de leçon pour la rivière Montmorency car les conditions d'écoulement sont assez différentes. Le programme d'essai présenté plus loin vise d'ailleurs à préciser les paramètres d'efficacité de ce type de structure dans des conditions de forte pente.

3.3.3 L'estacade de la rivière Saint-Charles

?? *Situation* : Québec, sur la rivière Saint-Charles, boulevard Saint-Jacques, au nord de la rue De Celles.

?? *Type* : Barrage avec piliers (Figure 46)

?? *Date de construction* : 1983

?? *Coût de construction* : 2 400 000 \$ + 350 000 \$ pour les coûts d'ingénierie et les sondages (selon l'estimation de la Ville de Québec).

?? *Coûts d'entretien* : faible, entretien des vannes, nettoyage

?? *Source d'information* : Ville de Québec (Communication personnelle, Paul Morin, 2001)



Figure 46 : Structure de la rivière Saint-Charles

Il s'agit d'un barrage-seuil relevant le niveau d'eau d'environ 2,5 m. Les piliers au-dessus du barrage mesurent 4,7 m de hauteur pour une largeur de 0,6 m. L'espace libre entre les piliers est de 3,5 m. La longueur du barrage est de 19,9 m (longueur de déversement). La longueur totale du barrage incluant les remblais en rive est de 49,5 m.

Le fonctionnement de la structure n'est pas précisément connu. Cependant, la Ville n'ayant pas de dossier précis sur des problèmes liés à cette structure, le fonctionnement devrait donc être correct et ne poserait aucun problème. Pas de nouvelles, bonnes nouvelles?

Mais il semble logique de penser qu'un relèvement de la ligne d'eau de 2,5 m crée un plan d'eau en amont du barrage, ce qui permet la formation d'un couvert de glace solide permettant de retenir les embâcles. De plus, les piliers ayant été conçus pour retenir ce couvert, est-il possible qu'un jour cette fonction fasse défaut comme ce fut le cas à Saint-Raymond de Portneuf à l'hiver 2000-2001? Seul le temps permettra de s'en assurer.

Concernant l'applicabilité à la rivière Montmorency, les conditions morphologiques réglant l'écoulement dans ce cours d'eau (pentes, débits) sont nettement différentes de la rivière Saint-Charles qui coule en plaine, de telle sorte qu'il est difficile de tirer des leçons de cette structure pour régler le problème de la première.

3.3.4 L'estacade du pont Champlain (Montréal)

?? *Situation* : fleuve Saint-Laurent, Montréal, en aval du bassin de Laprairie et en amont du pont Champlain.

?? *Type* : Estacade fixe constituée de piliers (Figure 47)

?? *Date de construction* : 1965

?? *Coût de construction* : \$ 18 millions en 1965 (environ 70 millions \$ à l'heure actuelle)

?? *Coûts d'entretien* : minime, limité à une inspection annuelle (Brian Morse)

?? *Source d'information* : Tuthill (1995), Brian Morse, URL de Les ponts Jacques-Cartier et Champlain Inc. (2001).

Les risques d'embâcle et d'inondation dans la région de Montréal ont été accrus par l'empiètement créé par la construction des îles d'Expo 67 puisque celles-ci réduisaient la largeur des différents bras du fleuve Saint-Laurent. Pour y remédier, un ouvrage de contrôle des glaces, l'estacade du pont Champlain, fut construit en aval du bassin de Laprairie. Il fut complété en 1965 et le ministère des Transports du Canada en prit possession en août 1966 pour en remettre la gérance à la Garde côtière canadienne (Pêches et Océans, Canada).

Les principaux objectifs visés par la construction de cette structure étaient de:

1. Accélérer la formation d'un couvert de glace dans le bassin de Laprairie;
2. Retenir et emmagasiner la glace qui se forme de façon continue au cours de l'hiver dans les eaux libres des rapides de Lachine et de l'aval du lac Saint-Louis;
3. Diminuer la superficie des régions à l'eau libre productrices de nouvelle glace;
4. Contrôler la débâcle printanière.

L'estacade longe le pont Champlain à environ 300 m en amont. Cet ouvrage, d'une longueur considérable de 2043 m, s'étend de l'Île-des-Sœurs jusqu'à la partie sud du chenal de la Voie maritime du Saint-Laurent. Il consiste en 72 piliers en béton et 2 culées reposant sur le roc. Les poutrelles flottantes ou vannes qui retiennent les glaces dans les travées de 27 m pouvaient originellement, être déplacées verticalement dans des rainures chauffées pratiquées dans les piliers. Les trois travées de 53 m, situées vis-à-vis du chenal d'eau profonde du fleuve, étaient munies de poutrelles qui flottaient avec le courant et qui étaient retenues aux piliers à l'aide d'un dispositif permettant de les détacher au printemps pour ainsi former un chenal d'évacuation de la glace.

Le dessus du régulateur est couvert d'une passerelle constituée de poutres en béton précontraint, où les appareils servant à la manœuvre des poutrelles pouvaient circuler. Au printemps, les poutrelles de 27 m étaient entreposées sur des supports prévus à cette fin sur les piliers. Ci-après sont fournies quelques indications additionnelles sur le dimensionnement de l'ouvrage :

?? Longueur du pont : 2 043 m

?? Largeur du tablier : 8,5 m

?? Largeur totale de l'estacade : 18 m

?? Nombre de piliers : 72

?? Dimensions des piliers :

- 10,5 m de hauteur

- 4 de 5 m de largeur x 19,5 m de longueur

- 68 de 3,7 m de largeur x 16 m de longueur

?? Hauteur des caissons sous les piliers : variable entre 2 et 8,5 m

?? Profondeur d'eau entre les piliers: variable entre 2 et 10 m

- ?? Poutres et vannes flottantes entre les piliers : 1,5 m de hauteur
- ?? Longueur des approches :
 - côté ouest : 450 m
 - côté est : 431 m

Avec l'intervention de la Garde Côtière canadienne pour évacuer les glaces, le couvert n'a plus atteint la ville depuis le milieu des années 60'. La structure n'a pas été testée dans les pires situations. Les pontons d'acier étaient très coûteux en entretien et n'intervenaient pas dans la rétention de la glace. Ils ont donc été enlevés. Actuellement, il ne reste plus que les piliers de béton.



Figure 47 : Estacade du pont Champlain à Montréal (Source : PJCCI, 2001)

L'estacade arrête les glaces surtout quand le niveau d'eau est haut et l'écoulement lent. Donc, lorsqu'un embâcle se forme en aval de l'estacade, le niveau d'eau augmente, l'écoulement est plus lent et la structure retient donc plus aisément les glaces. Mais la Garde Côtière entretenant soigneusement les chenaux de navigation en aval de l'estacade à l'aide de brise-glaces, la formation d'embâcles reste rare et les blocs peuvent atteindre des vitesses suffisantes pour traverser l'estacade.

3.3.5 L'estacade de Hardwick (Vermont)

- ?? *Situation* : Hardwick (Vermont), rivière Lamoille.
- ?? *Type* : Estacade constituée de blocs de granit (Figure 48 et Figure 49)
- ?? *Date de construction* : septembre 1994
- ?? *Coût de construction* : 3600 US\$/mètre de structure (soit 5200 CAD, sans les coûts de conception)
- ?? *Coûts d'entretien* : n/d

?? Source d'information : Lever et coll. (1997), site internet du Cold Region Research and Engineering Laboratory.

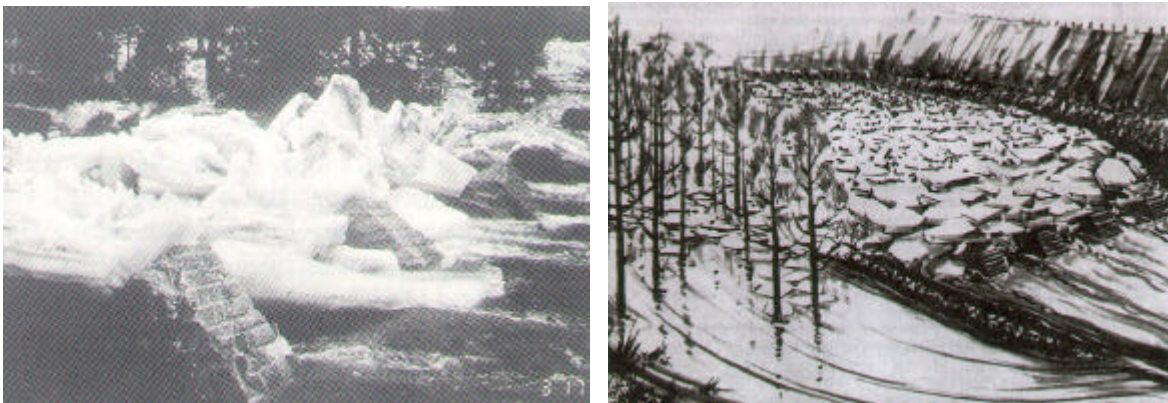


Figure 48 : Estacade de Hardwick durant l'embâcle du 16 mars 1995 (Lever et coll., 1997)

Figure 49 : Schéma de principe de la structure de Hardwick (Lever et coll., 1997)

Lever et coll. (1997) a publié quelques articles sur les structures économiques de rétention des glaces de petites rivières. Un de ces articles décrit précisément les tests effectués sur maquette et sur le terrain et les résultats semblent très prometteurs.

Le résumé traduit de l'article :

« Les communautés situées le long de petites rivières nordiques peuvent subir des embâcles importants. Bien que les dommages provoqués par les inondations puissent être localement très importants, ils sont souvent insuffisants pour justifier le coût d'installation de structures classiques de contrôle des inondations. Les impacts environnementaux de ces structures les rendent aussi peu attractives. Un nouveau type de structures économiques semble convenir au contrôle des embâcles sur les petites rivières. Il s'agit de blocs massifs inclinés partiellement, enterrés dans une fondation et placés en travers de la rivière, près d'une plaine inondable. Les blocs arrêtent l'écoulement de la glace et provoquent un embâcle stable qui repose partiellement sur le sol. Les rochers et les arbres de la plaine inondable retiennent les glaces dans la rivière tandis que l'eau peut contourner la structure. Les larges passages entre les blocs permettent le passage des poissons et des petites embarcations. Les tests sur modèle réduit réfrigéré indiquent que la structure fonctionne bien durant les forts embâcles. Un prototype a été construit à Hardwick (Vermont) et a bien fonctionné au cours des débâcles de moyenne importance qu'il a déjà subis. Il a coûté 3 600\$ US/mètre de largeur de rivière, ce qui représente environ le dixième du prix d'une structure classique de rétention des glaces. »

Lever explique donc que depuis sa construction en 1994, l'estacade a bien fonctionné et aucune inondation n'a atteint le village de Hardwick. En fait, l'estacade forme un embâcle qui est souvent relâché après quelques heures, ce qui est suffisant pour éviter les inondations car la pointe de débit a déjà été évacuée. Dans les deux années qui ont suivi la construction, la structure a subi quatre débâcles. Une seule n'a pas été retenue par la formation d'un embâcle dans son bief d'amont car la glace n'était pas assez résistante pour former une voûte au niveau de l'estacade. Ce comportement

fait penser à celui de l'estacade de Saint-Raymond de Portneuf à l'hiver 2000-2001 (voir la section 3.3.1, « L'estacade de Saint-Raymond de Portneuf », page 57).



**Figure 50 : Vue de l'estacade de Hardwick durant les hivers 1995 et 1996
(URL du CRREL, 2000)**

Durant l'hiver 2000, la structure a encore retenu une débâcle en formant un embâcle dans son bief d'amont. L'ensemble du phénomène observé sur la webcam du CRREL peut être accédé sur le site du CRREL (2000).



Figure 51: Vue de l'embâcle sur la rivière Lamoille (2 mars 2000)

3.3.6 L'estacade de la rivière Credit (Ontario)

?? *Situation* : Mississauga, rivière Credit (Ontario).

?? *Type* : Estacade constituée de piliers de béton (Figure 52)

?? *Date de construction* : 1988

?? *Coût de construction* : 20 000 US \$/mètre (29 000 Can \$)

?? *Coûts d'entretien* : n/d

?? *Source d'information* : Tuthill (1995)

Il s'agit d'une structure constituée de 14 piliers de béton espacés de 2 m (Figure 52). La hauteur des piliers correspond à 1,5 fois le niveau de crue d'une période de retour de 5 ans. Cette structure est placée dans une rivière de 30 m de large pour une pente de 0,003 qui se rapproche sans toutefois égaler celle de la rivière Montmorency. La profondeur en été y est de 0,3 m (Beltaos, 1999).

L'embâcle formé en amont de la structure repose sur le fond. Deux tiers de la glace est stockée dans la plaine inondable, l'autre tiers reste dans la rivière. La structure a bien fonctionné depuis son installation en 1988.



**Figure 52 : Estacade de la rivière Credit (Mississauga, Ontario).
Vue de la structure et de la plaine inondable (Tuthill, 1995)**

3.3.7 Le barrage Sartigan sur la rivière Chaudière

?? *Situation* : rivière Chaudière, Saint-Georges de Beauce (Québec).

?? *Type* : Barrage déversoir avec piliers

?? *Date de construction* : 1967

?? *Coût de construction* : 1 128 000 \$ (estimé en 1965, soit environ 4 500 000 \$ actualisés)

?? *Coûts d'entretien* : n/d

?? *Source d'information* : Laganière & Larouche, (1992); Ministère des Richesses naturelles du Québec (1965)

Le barrage Sartigan sort un peu du cadre de ce rapport car il s'agit plus d'un barrage que d'une estacade. Cependant, cette structure s'est avérée très efficace pour contrôler les glaces. Depuis sa construction, le centre-ville de Saint-Georges n'a plus subi d'inondations liées aux embâcles. Le barrage Sartigan est un ouvrage multi-fonctionnel spécialement conçu pour la rétention des glaces, l'alimentation en eau potable et le passage d'une route (pont). Le barrage doit accumuler et retenir jusqu'à la fonte complète les volumes de glace et de frasil provenant de la Haute-Chaudière et de ses affluents. Pour cela, il fallait créer un plan d'eau suffisamment grand pour obtenir la formation

d'un couvert de glace solide, capable de supporter la poussée des glaces de l'amont. Classique en la matière, l'objectif poursuivi était de créer un obstacle (barrage + couvert de glace) pour l'ensemble des glaces dévalant de la partie supérieure du bassin.

Le barrage est une structure en béton du type barrage-poids dont la longueur totale, incluant les approches, dépasse les 200 m. Sa hauteur est de 12,42 mètres au-dessus du lit de la rivière. Le déversoir est composé de 11 pertuis de 6,1 mètres de largeur. Le barrage dispose également de deux vannes de fond. Les pertuis sont séparés par des piliers de 1 m d'épaisseur et de 3 m de largeur. Ces piliers supportent un tablier de pont et doivent empêcher le champ de glace d'atteindre le déversoir. Entre les piliers, des grilles sont supposées retenir les glaces.

Le barrage a assuré correctement son rôle de protection depuis sa construction. Certaines difficultés de fonctionnement sont cependant à signaler. D'abord, un couvert de glace se forme entre les piliers, ce qui limite le passage de l'eau vers les déversoirs. Lorsque le débit augmente soudainement, le couvert situé au niveau des piliers demeure solidaire des piliers tandis que le couvert situé plus en amont a tendance à se rompre par flexion. Les blocs ainsi libérés pivotent et viennent se bloquer dans les grilles, ce qui obstrue encore plus le passage de l'eau. On pense alors à ouvrir les vannes de fond mais celles-ci sont figées par la glace. Dans certains cas, l'usage d'une pelle mécanique a pu résoudre le problème et libérer le passage de l'eau entre les grilles. Maintenant, le déglacage des vannes de fond est assuré par des câbles chauffants placés dans les rainures (Figure 53). Comme on peut le voir sur la Figure 54, les grilles sont placées au-dessus du niveau de l'eau en hiver afin d'éviter la formation de glace par conduction thermique sur les barreaux.



Figure 53 : Vanne de fond du barrage Sartigan (Delcourt, hiver 99-00)



Figure 54 : Détail des grilles protégeant le déversoir (Delcourt, hiver 99-00)



Figure 55 : Face amont du barrage Sartigan (Delcourt, hiver 99-00)

Figure 56 : Face aval du barrage Sartigan (Delcourt, hiver 99-00)

3.4 Conclusions

Les scénarios envisagés en phase I qui se qualifiaient sur le plan économique soulèvent des doutes sérieux quant à leur efficacité sur le plan technique qu'il s'agisse de leur aptitude à contenir la débâcle au site d'implantation ou des répercussions que le reflux du débit dans le bief d'accumulation sur les éléments vulnérables implantés en rive.

Une revue des structures existantes a démontré que la plupart de celles-ci opèrent selon un principe similaire consistant à favoriser par la réduction des vitesses de courant la prise d'un couvert de glace solide dans le bief d'amont de la structure. Ce couvert, de concert avec la structure elle-même, permet de retenir les glaces en dévalaison lors d'une débâcle tout en permettant au débit de transiter par la structure ou en plaine de débordement. Le fonctionnement de ces structures est encore peu connu, du moins retrouve-t-on peu de comptes-rendus de suivis en situation opérationnelle. Cependant, on remarque qu'à quelques exceptions près, les estacades semblent avoir atteint leurs objectifs de protection. Les situations de fonctionnement déficient correspondent souvent à des débâcles hâtives lorsque le couvert de glace en amont de la structure n'est pas suffisamment solidifié pour jouer son rôle d'interception efficacement, et que l'ouvrage ne peut pas prendre le relais à cause d'un trop grand éloignement des piliers.

Il est aussi notable que la plupart de ces structures sont installées dans des cours d'eau dont le maximum de pente se situe autour de 0,002 (recherches menées au CRREL) ce qui est encore loin de correspondre à celle de la rivière Montmorency qui atteint 0,01 dans la partie où il serait possible d'intervenir, c'est-à-dire, à l'amont du 300 avenue Saint-Brigitte. Le protocole d'étude a donc été préparé en vue de répondre à ce questionnement relatif à l'efficacité de divers options d'implantation dans un bief d'écoulement à forte pente. Ces options comprennent les estacades fixes et les estacades flottantes, avec ou sans filet qui toutes doivent pouvoir répondre aux

objectifs sans pouvoir compter sur un couvert solide dans leur bief d'amont pour amortir la vague de glace et amorcer le processus d'embâcle.

En tenant compte de toutes ces considérations,

nous émettons l'hypothèse que l'installation d'une estacade fixe avec filet amovible au niveau d'un site situé dans le bief d'amont du 300 de l'avenue Sainte-Brigitte semble la solution la plus intéressante pour améliorer la protection de l'Île-Enchanteresse et dans une bonne mesure les autres sites à risque plus loin en aval.

En effet, à l'amont du point mentionné, les rives sont inhabitées ce qui satisfait au principe de transférabilité du risque en des sites non-vulnérables. De plus, nous formons l'hypothèse (à vérifier par le protocole d'étude) que la glace résiduelle qui pourrait encore former un embâcle en aval de l'Île-Enchanteresse ne provoquerait que des inondations mineures au niveau de l'Île. Quant aux riverains situés juste en amont de l'Île et en aval de la structure, ils ne devraient plus être affectés.

Concernant le type de structure à favoriser, puisque les expériences tentées ailleurs démontrent qu'en l'absence de couvert ou en présence d'un couvert fragile, la structure est laissée à elle-même pour jouer son rôle efficacement, l'applicabilité sur la rivière Montmorency d'une estacade fixe traditionnelle apparaît difficile car son couvert est effectivement fragile à cause des zones de rapides et il est mal ancré en rive à cause de sources plus chaudes. Il est douteux qu'une telle structure puisse livrer les résultats attendus à moins que ses piliers soient très rapprochés pour intercepter une glace fracturée en petits blocs (ex : rivière Duberger). Le cas échéant, l'impact sur le cours d'eau pourrait s'avérer indésirable du moins sur le plan visuel et en terme de navigabilité quand on considère les usages récréo-touristiques du cours d'eau (canot-kayak).

Reste donc la possibilité de pourvoir la structure d'un filet, possibilité qui avait été envisagée préliminairement en phase I. On ne connaît pas encore d'expérience de ce type tentée ailleurs encore moins dans des circonstances comparables à la Montmorency. Un projet analogue a été proposé sur la rivière Chassé en Beauce dernièrement mais ses modalités de fonctionnement sont encore inconnues. L'idée d'utiliser un filet doit satisfaire à certains critères de conception ou variables de dimensionnement auxquels doit répondre le programme expérimental, notamment :

- 1. son caractère amovible*
- 2. son maintien en suspension et son nécessaire ancrage sur des piliers implantés en travers du cours d'eau*
- 3. sa résistance aux efforts*
- 4. sa hauteur et la taille de ses mailles*
- 5. le débit de conception*
- 6. le besoin d'une plaine de débordement*